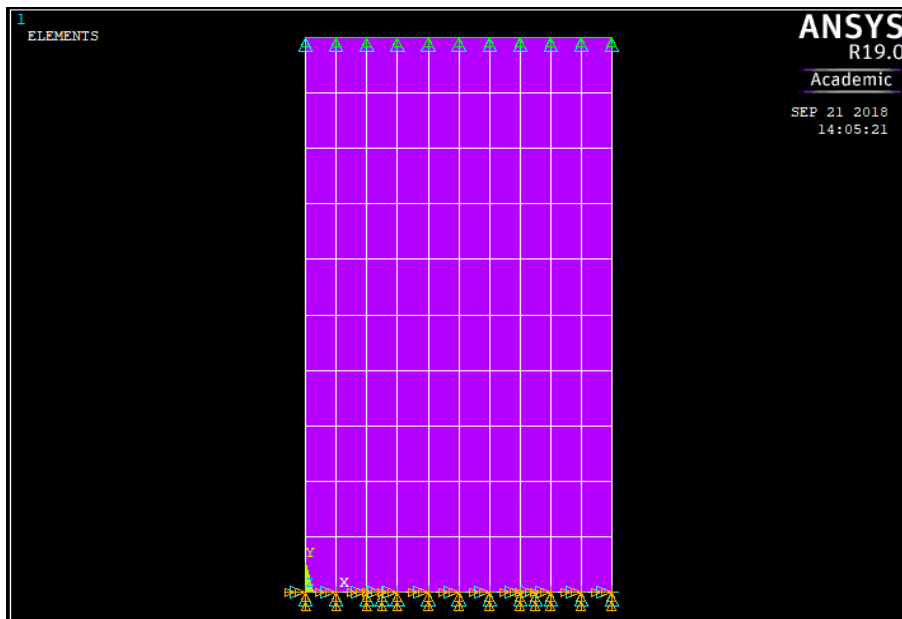




ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Origem Natural**

**SARA DE MELO TOMAR**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Professora Doutora Maria Alexandra Rodrigues  
Professora Doutora Maria Amélia Loja

Júri:

Presidente: Professor Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte  
Vogais:

Professora Doutora Inês de Carvalho Jerónimo Barbosa  
Professora Doutora Maria Amélia Loja

**Dezembro de 2018**





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

# **Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Origem Natural**

**SARA DE MELO TOMAR**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

**Orientador:**

Professora Doutora Maria Alexandra Rodrigues  
Professora Doutora Maria Amélia Loja

**Júri:**

Presidente: Professor Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte  
Vogais:

Professora Doutora Inês de Carvalho Jerónimo Barbosa  
Professora Doutora Maria Amélia Loja

**Dezembro de 2018**



# Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer às minhas orientadoras, a Professora Doutora Maria Alexandra Rodrigues e Professora Doutora Maria Amélia Loja pelo acompanhamento ao longo da realização do trabalho, esclarecimento das dúvidas e atenção disponibilizada.

Aos meus amigos agradeço por serem sempre uma fonte de ânimo e por me motivarem a continuar, com um especial agradecimento ao meu colega João Reis, pela amizade, pelos momentos de distração e por me acompanhar nas longas horas de trabalho.

À minha parceira de aventura Filipa Tancredo, palavras não chegam para explicar o quão importante foi este apoio. Por estares sempre presente nos momentos difíceis, pelas doses de força e por seres uma amiga incomparável. Agradeço-te muito por viveres comigo esta jornada até ao último minuto e por torceres sempre pelo meu sucesso.

Ao Rodrigo que me acompanha sempre em qualquer momento, amparando-me nas circunstâncias mais stressantes, sempre com uma palavra de apoio e carinho. Obrigada por tudo, por acreditares sempre em mim e acima de tudo por nunca me deixares desistir, fazendo-me sempre acreditar que iria conseguir independentemente dos obstáculos e inseguranças.

Por fim, e sem dúvida o mais importante dos agradecimentos, a toda a minha família. Ao meu irmão Pedro, por me ensinar que devemos sempre viver a vida com mais calma e aos meus pais Ana e Hélio, pelas palavras sábias e afetuosas, pela compreensão nos momentos mais difíceis, por estarem sempre presentes e me apoiarem incondicionalmente. Acima de tudo agradeço por me proporcionarem esta experiência e nunca desistirem de mim, nada disto seria possível sem vocês!

A todos, o meu muito obrigada!



## Lista de Abreviaturas

CAE	<i>Computer Assisted Engineering</i>
CNSL	<i>Cashew nutshell liquid</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FRP	<i>Fibre Reinforced Polymers</i>
NFRC	<i>Natural Fibre Reinforced Composites</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>
SRIM	<i>Structural Reaction Injection Molding</i>

## Lista de Símbolos

$E_1$	Módulo de elasticidade do compósito na direção das fibras de reforço (GPa)
$E_2$	Módulo de elasticidade do compósito na direção transversal à fibra (GPa)
$E_f$	Módulo de elasticidade das fibras de reforço (GPa)
$E_m$	Módulo de elasticidade da matriz (GPa)
$G_{12}$	Módulo de corte no plano (GPa)
$h$	Espessura de cada camada da placa (mm)
$N$	Número de camadas constituintes da placa
$t$	Espessura da placa (mm)
$v_f$	Fração volúmica de fibra (%)
$v_m$	Fração volúmica de matriz (%)
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson no plano 1-2
$\nu_f$	Coefficiente de Poisson da fibra
$\nu_m$	Coefficiente de Poisson da matriz

$\varepsilon$	Extensão
$\sigma$	Tensão (MPa)
$\rho$	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )

# Resumo

A deterioração do meio ambiente tem levado a uma crescente preocupação de ordem ambiental, sendo que existe uma necessidade premente de promover a reciclagem dos materiais usados em Engenharia.

O aumento da utilização de materiais compósitos nas mais variadas indústrias, conjugado com a preocupação pelo meio ambiente, tem promovido o estudo sobre a incorporação de materiais de origem natural em materiais compósitos, de modo a reduzir o impacto ambiental dos mesmos. Esta necessidade constitui uma vertente a explorar sempre que as aplicações em causa assim o permitirem e sem comprometer os desempenhos conseguidos através de materiais como os polímeros de origem sintética.

Apesar de existirem estudos que incidem sobre a utilização de fibras ou outros agentes de reforço de origem natural, existe ainda necessidade de desenvolver estudos mais aprofundados conducentes à caracterização do comportamento mecânico destes materiais sendo por isso uma área de investigação emergente e que se pretende desenvolver no corrente trabalho.

Com a modelação por elementos finitos de compósitos reforçados a fibra de cânhamo, conclui-se que o desempenho do material, face ao aumento da percentagem do volume de fibra no domínio do estudo, apresenta uma melhoria das suas propriedades. Do mesmo modo conclui-se que o Módulo de Elasticidade na direção das fibras ( $E_1$ ) demonstra grande influência nas propriedades finais do material. Assim, é possível a avaliação do seu interesse e aplicabilidade no ramo da Engenharia.

Palavras chave: compósitos naturais, fibras naturais, resina epoxídica, fibra de cânhamo, modelação FEM.



# Abstract

The deterioration of the environment has led to a growing concern for the well-being of the environment, and there is a pressing need to promote the recycling of materials used in Engineering.

The increase in the use of composite materials in the most varied industries, coupled with the concern for the environment, has promoted the need to study and incorporate materials of natural origin in composite materials, in order to reduce their environmental impact. This necessity is an area of science to be explored wherever the materials and their applications permit and without compromising the performances achieved for example through other materials, such as polymers of synthetic origin.

Although there are studies that focus on the use of fibers or other reinforcing agents of natural origin as well the use of resin of natural origin, there is still a need to develop more in-depth studies leading to the characterization of the mechanical behavior of these materials and therefore is an emerging area of research and one that is intended to develop in the current work.

The analysis of the modelation using the Finite Element Method of the hemp fiber reinforced composites, allows to conclude that the performance of the material, due to the increase of the fiber volume percentage in the studied area, shows an improvement of its properties. In addition, the direction of the fibers shows great influence on the final properties of the material. Thus, it is possible to evaluate their interest and applicability in the field of engineering.

Keywords: natural composites, natural fibres, epoxy resin, hemp fibre, FEM modulation.



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento teórico .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Estrutura .....	2
2.	Estado de arte .....	5
2.1.	Os materiais compósitos.....	5
2.1.1.	Compósitos reforçados com fibras .....	7
2.1.2.	Materiais para matrizes .....	17
2.2.	Processos de Fabrico de compósitos de fibras .....	23
2.3.	Propriedades de materiais compósitos naturais.....	27
2.4.	Modelação por método dos elementos finitos de compósitos naturais .....	29
2.5.	Aplicações de compósitos naturais.....	32
3.	Estudo das propriedades do material compósito .....	39
3.1.	Introdução .....	39
3.2.	Materiais a incorporar .....	39
3.2.1.	Tecido Cânhamo .....	39
3.2.2.	Resina Epoxídica.....	39
3.2.3.	Resina Mater-Bi .....	40
3.3.	Cálculo de propriedades.....	41
4.	Modelação através do método de elementos finitos.....	45
4.1.	Metodologia utilizada em ANSYS.....	45
4.2.	Definição das características a aplicar no código.....	46
4.3.	Validação.....	47
4.4.	Compósito cânhamo/ resina epoxídica.....	58
4.4.1.	Influência da variação do volume de fibra .....	59
4.4.2.	Influência da variação de propriedades materiais .....	61

4.5.	Compósito cânhamo/resina Mater-Bi.....	68
4.5.1.	Influência da variação do volume de fibra .....	68
4.5.2.	Influência das propriedades.....	69
5.	Conclusões .....	77
5.1.	Conclusões do presente estudo.....	77
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	78
	Referências.....	79
	ANEXO A - Imagens da Modelação da validação do código.....	85
	ANEXO B - Código de Modelação ANSYS do Presente Estudo.....	93
	ANEXO C - Imagens da Modelação da Variação de Volume de Fibra do Compósito .....	99
	ANEXO D - Imagens da Modelação da Variação de Propriedades do compósito em +/- 2% .....	105

## Índice de Figuras

Figura 1. Classificação de materiais compósitos, adaptação (Silva , 2014).....	6
Figura 2. Imagens de compósitos reforçados (Silva , 2014) com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras curtas unidirecionais; (c) fibras curtas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas tecido e (f) fibras contínuas multidirecionais.....	7
Figura 3. Mercado dos compósitos reforçados com fibra (adaptação de (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005), baseado em (Plast. News. August 26, 2002)). .....	8
Figura 4. Tipos de fibras baseado em (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006).....	8
Figura 5. Esquema dos reforços usados em compósitos reforçados com fibras (Silva , 2014).....	9
Figura 6. Classificação fibras sintéticas (Matthews & Rawlings, 1999).....	10
Figura 7. Classificação de fibras naturais, adaptação (Nakamura, 2000). .....	13
Figura 8. Exemplos de matrizes poliméricas sintéticas (Castro, 2013).....	18
Figura 9. Classificação dos processos de fabrico de acordo com o tipo de matriz adapta (Mazumdar, 2002) .....	23
Figura 10. Imagens de modelação em ANSYS de compósitos híbridos de fibra de juta (a) e de fibra de banana (b) (Prasad, Joy, Venkatachalam, Narayanan, & Rajakumar, 2014).....	31
Figura 11. Contorno da placa não considerando a heterogeneidade do material (Ma, et al., 2018). .....	32
Figura 12. Exemplos da aplicação de compósitos naturais (Cicala, Cristaldi, Recca, & Latteri, 2010) .....	33
Figura 13. Exemplo de aplicação de compósitos com fibras naturais (Teles, et al., 2015).....	35
Figura 14. Etapas usadas na elaboração do código .....	45
Figura 15. Imagem da placa para o caso 1. ....	48
Figura 16. Imagem da placa para o caso 2. ....	50
Figura 17. Imagem da placa para o caso 3. ....	52
Figura 18. Imagem da placa para o caso 4. ....	54
Figura 19. Imagem do provete com aplicação de constrangimentos e cargas.....	59
Figura 20. Gráfico de comparação da Tensão de Von Mises.....	60
Figura 21. Gráfico de variação de $\sigma_x$ para - 2%.....	65
Figura 22. Gráfico de variação de $\sigma_x$ para +2%.....	65

Figura 23. Gráfico de variação de $\sigma_y$ para -2%.....	66
Figura 24. Gráfico de variação de $\sigma_y$ para +2%.....	66
Figura 25. Gráfico de variação de $\sigma_{vm}$ para -2%. ....	67
Figura 26. Gráfico de variação de $\sigma_{vm}$ para +2%. ....	67
Figura 27. Gráfico de comparação da Tensão de Von Mises.....	69
Figura 28. Gráfico de variação de $\sigma_x$ para +2%.....	73
Figura 29. Gráfico de variação de $\sigma_x$ para -2%.....	73
Figura 30. Gráfico de variação de $\sigma_y$ para +2%.....	74
Figura 31. Gráfico de variação de $\sigma_y$ para -2%.....	74
Figura 32. Gráfico de variação de $\sigma_{vm}$ para +2%. ....	75
Figura 33. Gráfico de variação de $\sigma_{vm}$ para -2%. ....	75

## Índice de Tabelas

Tabela 1. Propriedades de fibras sintéticas baseado em (Castro, 2013) e (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006).....	11
Tabela 2. Propriedades de fibras naturais baseado em (Castro, 2013) e (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006).....	12
Tabela 3. Constituição de fibras de cânhamo (Romão, 2012) (Suardana, Piao, & Lim, 2011). .....	15
Tabela 4. Propriedades de resinas termoplásticos (Mazumdar, 2002). .....	19
Tabela 5. Propriedades de resinas termoendurecíveis (Mazumdar, 2002). .....	20
Tabela 6. Propriedades de resinas Mater-Bi (Rudnik, 2008). .....	22
Tabela 7. Tabela resumo dos critérios de escolha de processos de fabrico.....	26
Tabela 8. Propriedades Mecânicas de compósitos de resina Mater-Bi baseado em (Puglia, Tomassuci, & Kenny, 2003).....	36
Tabela 9. Tabela baseada em (Lopez, et al., 2012). .....	37
Tabela 10. Propriedades da fibra de cânhamo (Lobo, 2018).....	39
Tabela 11. Propriedades da resina epóxi retiradas de site fabricante (Sicomín, 2017) .....	40
Tabela 12. Propriedades da resina Mater-Bi Y (Bastioli, 1998). .....	40
Tabela 13. Propriedades mecânica do compósito de fibra de cânhamo/ resina epoxídica .....	43
Tabela 14. Propriedades mecânica do compósito cânhamo/Mater-Bi .....	43
Tabela 15. Tabela com valores de extensão e tensão do compósito cânhamo/epoxídica .....	46
Tabela 16. Propriedades mecânicas do compósito em estudo no exemplo (Cassenti). .....	47
Tabela 17. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 1).....	49
Tabela 18. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 1).....	49
Tabela 19. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 1).....	49
Tabela 20. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 2).....	50
Tabela 21. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 2).....	51
Tabela 22. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 2).....	51
Tabela 23. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 3).....	52
Tabela 24. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 3).....	53
Tabela 25. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso3).....	53

Tabela 26. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 4).....	55
Tabela 27. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 4).....	56
Tabela 28. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 4).....	56
Tabela 29. Tabela das propriedades do Aço.....	57
Tabela 30. Resultados para o caso 5. ....	58
Tabela 31. Tabela dos resultados de variação de volume de fibra .....	60
Tabela 32. Tabela de valores para $E_1$ . ....	61
Tabela 33. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $E_1$ .....	61
Tabela 34. Tabela de valores de $E_2$ . ....	62
Tabela 35. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $E_2$ .....	62
Tabela 36. Tabela de valores de $\nu_{12}$ .....	63
Tabela 37. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $\nu_{12}$ . ....	63
Tabela 38. Tabela de valores de $G_{12}$ .....	64
Tabela 39. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $G_{12}$ . ....	64
Tabela 40. Tabela dos resultados de variação de volume de fibra. ....	68
Tabela 41. Tabela de valores de $E_1$ . ....	70
Tabela 42. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $E_1$ .....	70
Tabela 43. Tabela de valores de $E_2$ . ....	70
Tabela 44. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $E_2$ .....	71
Tabela 45. Tabela de valores de $\nu_{12}$ .....	71
Tabela 46. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $\nu_{12}$ . ....	71
Tabela 47. Tabela de valores de $G_{12}$ .....	72
Tabela 48. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de $G_{12}$ . ....	72

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento teórico

A combinação de diferentes matérias-primas existentes na natureza levou à criação de materiais que viriam a ser chamados de compósitos. No século XX, o desenvolvimento tecnológico e a crescente necessidade de uma maior produção, a custos reduzidos, levou as indústrias a criarem materiais compósitos sintéticos de forma a aglomerar propriedades que garantissem a melhor performance possível do material.

Porém, a preocupação com o meio ambiente e a vontade de recorrer a produtos mais ecológicos capazes de substituir materiais sintéticos prejudiciais ao mesmo, despertou a necessidade de implementar materiais naturais na constituição dos compósitos. Essa procura de novos materiais sustentáveis levou à seleção de compósitos feitos a partir de fibras naturais, tornando-se uma das áreas de investigação de maior crescimento nos últimos anos (Sanja, Madhu, Jawaid, Sentharamaikkannan, & Senthil, 2018).

A seleção dos materiais nas mais variadas indústrias depende não só da sua aplicação, mas também das matérias abundantes na região onde estas indústrias operam. Uma das escolhas pode recair em matérias de origem biológica como as fibras de cânhamo, o bambu ou a palha (Eires, 2006).

Um relatório de progresso de Faruk et al (2014) publicado em 2014 afirma que a taxa de crescimentos anual média global dos materiais compósitos naturais foi de cerca de 48% entre os anos 2003 - 2007 na Europa, e que se prevê um aumento das 0,36 milhões de toneladas (2007) para 2,33 milhões de toneladas até 2013 e de 3,45 milhões de toneladas em 2020. As fibras naturais mais usuais são as fibras de linho, juta, cânhamo, sisal e rami sendo, portanto, as mais extensivamente pesquisadas e utilizadas em diferentes aplicações de compósitos naturais.

Assim, o presente trabalho visa abordar o estudo de compósitos reforçados com fibras naturais, a partir da fibra de cânhamo, uma vez que as suas propriedades o tornam bastante atrativo tendo em conta a relação performance vs impacto ambiental.

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo a modelação por elementos finitos das propriedades mecânicas de materiais compósitos reforçados a fibras de origem natural.

O estudo em questão irá analisar as propriedades mecânicas, bem como a capacidade de deformação, de fibras naturais, quando conjugadas com diferentes matrizes e as características resultantes dessa ligação. O presente trabalho elabora uma comparação entre as propriedades obtidas através de modelação de elementos finitos de um compósito com resina sintética não biodegradável conjugada com fibra de cânhamo, e um compósito de fibra de cânhamo conjugado com uma resina biodegradável.

## 1.3. Estrutura

O presente trabalho final de mestrado está dividido em quatro capítulos.

O primeiro capítulo está dividido em três subcapítulos nos quais se faz o enquadramento teórico, definem-se os objetivos do trabalho e a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo é realizado um estado de arte sobre o tema, sendo dividido em 3 subcapítulos que aprofundam a temática das resinas e dos reforços dos compósitos, bem como alguns processos de fabrico mais utilizados na produção dos mesmos. Neste capítulo são também abordadas as propriedades mecânicas dos materiais compósitos naturais, e a modelação de compósitos pelo método de elementos finitos. Finalizando o capítulo com um subcapítulo dedicado ao estudo da aplicação destes materiais e os recentes desenvolvimentos relativamente ao tema neste trabalho proposto.

No terceiro capítulo é apresentada a formulação teórica necessária para a previsão das propriedades mecânicas dos compósitos a partir dos materiais que os compõem. É também elaborada uma descrição dos constituintes dos materiais em estudo.

O quarto capítulo é reservado para a modelação em ANSYS e análise dos compósitos. Este capítulo inclui uma breve explicação do programa computacional a que se recorreu e alguma da linguagem usada. Como estudo da modelação no compósito de matriz não biodegradável, será analisada a influência da variação de percentagem de volume de fibra, bem como a influência que cada propriedade do material tem no comportamento do compósito. Será

também apresentado um estudo semelhante recorrendo a uma resina biodegradável conjugada com fibra natural.

No quinto capítulo será elaborada uma reflexão sobre a informação e dados obtidos através da realização do presente trabalho. Serão igualmente apresentadas propostas para futuros trabalhos a serem desenvolvidos.



## 2. Estado de arte

### 2.1. Os materiais compósitos

Os vestígios da existência de materiais compósitos remontam à época de 5000 A.C., onde já eram utilizados tijolos feitos a partir de pedras misturadas com material orgânico. No antigo Egito (cerca de 3000 A.C.), as embarcações fluviais eram fabricadas com fibras de cana de papiro, uma planta encontrada nas margens do rio Nilo, embebidas numa matriz de matéria orgânica. Estas embarcações de papiro podem ser consideradas como as precursoras das modernas embarcações poliméricas reforçadas com fibra de vidro (Richardson, 1977).

A contínua adaptação dos materiais às necessidades da civilização desde os primórdios dos tempos até aos dias de hoje, marcou a procura constante de novos materiais e evolução de vários processos de fabrico bem como dos materiais usados.

Um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais que diferem na forma, composição química e nas propriedades. Quando misturados, os constituintes formam um material com propriedades impossíveis de se obter com apenas um dos elementos (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005). A sua aplicação bem como o processo de fabrico a ser utilizado, são fatores que pesam na escolha de um material compósito. As características da matriz e do reforço são igualmente fatores a ter em conta, visto que afetam significativamente várias propriedades dos materiais compósitos. Propriedades como a resistência à corrosão e à oxidação dos materiais, rigidez, resistência ao choque e ao desgaste por abrasão, entre outras, são características atrativas nos compósitos, tornando-os mais aptos que outros tipos de materiais.

As vantagens dos materiais compósitos, ao nível das propriedades mecânicas, devem-se à excelente relação entre o módulo de elasticidade, resistência à tração e a densidade dos materiais obtendo materiais com excelente relação resistência/peso ou rigidez/peso, (Ferreira, 2015).

Na figura 1 podemos observar classificação dos materiais compósitos, segundo Silva (2014), onde os materiais são divididos em três grupos: os de partículas, os de fibras e os estruturais.

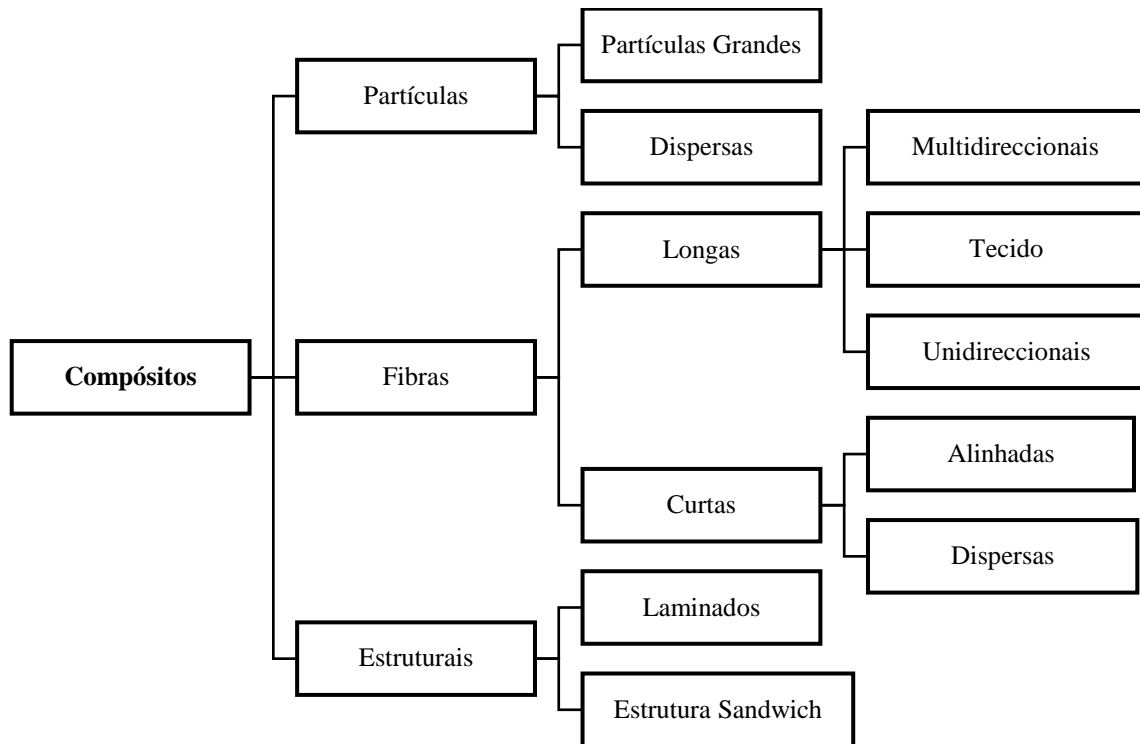


Figura 1. Classificação de materiais compósitos, adaptação (Silva, 2014)

O reforço de um material compósito tem uma grande importância na composição do mesmo, visto ser o componente que confere a rigidez e resistência necessárias, enquanto que a matriz confere a coesão ao material e transfere a carga para o reforço.

Atualmente os reforços mais utilizados na área dos compósitos são as fibras de vidro, de carbono, de aramida e de boro, apresentando diâmetros que variam normalmente entre os 5 e os 25  $\mu\text{m}$ . Dado apresentarem diâmetros tão reduzidos, as fibras exibem elevada flexibilidade sendo facilmente adaptáveis a qualquer geometria (Mazumdar, 2002).

Na figura 2, é possível observar algumas imagens esquemáticas de diferentes compósitos, de acordo com diferentes tipos de reforços, nomeadamente os de partículas aleatórias (a), fibras curtas (b, c), fibras contínuas (d, e, f).

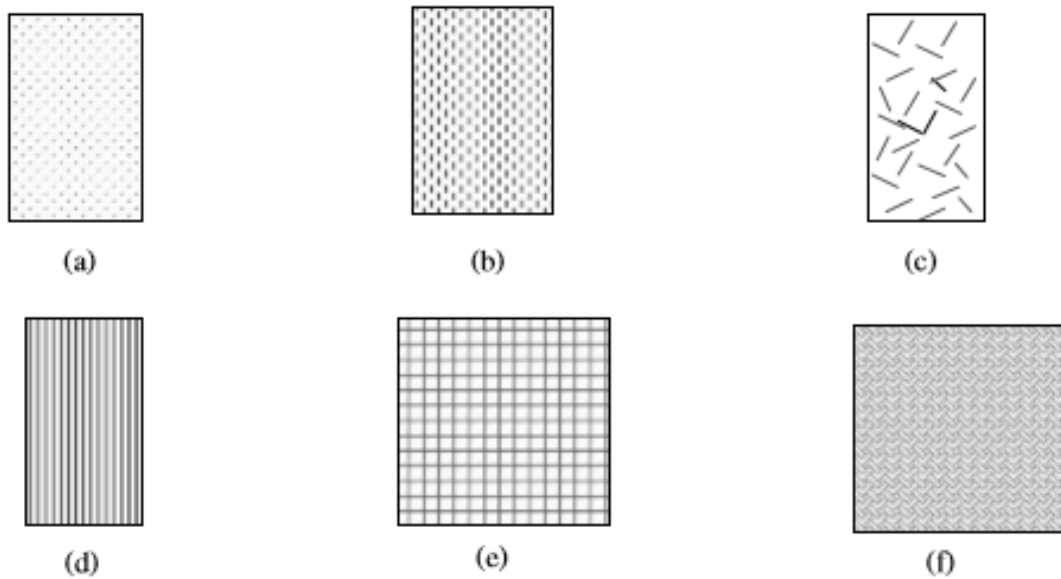


Figura 2. Imagens de compósitos reforçados (Silva , 2014) com: (a) partículas aleatórias; (b) fibras curtas unidirecionais; (c) fibras curtas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas tecido e (f) fibras contínuas multidirecionais.

### 2.1.1. Compósitos reforçados com fibras

Cada vez mais se recorre aos materiais compósitos para desenvolver produtos que requerem alto desempenho, ou seja, produtos que sejam leves, sem nunca comprometer a sua resistência nas mais variadas condições a que sejam sujeitos. Os polímeros reforçados com fibra (FRP - *Fiber Reinforced Polymers*) apresentam as características ideais para os produtos mencionados, sendo essa a razão pela qual são cada vez mais usados em componentes, aumentando assim a sua utilização em diversas áreas, não só na construção civil, mas também nas indústrias automóvel, aeronáutica, entre outras, como se pode observar na figura 3.

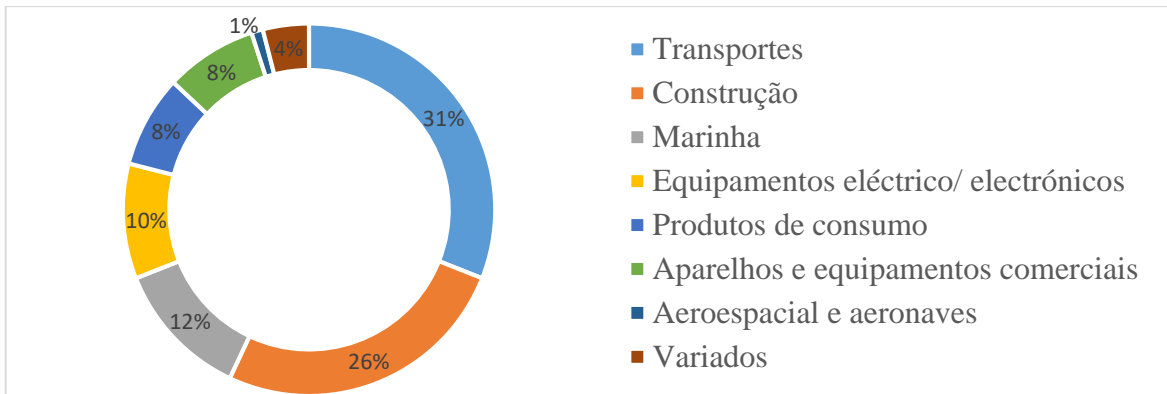


Figura 3. Mercado dos compósitos reforçados com fibra (adaptação de (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005), baseado em (Plast. News. August 26, 2002)).

No início do século XXI, os FRP começaram a ser introduzidos na construção de piscinas como alternativa ao aço. A sua aplicação estendeu-se também à criação do primeiro automóvel militar feito apenas em compósito, bem como ao melhoramento de malas de transporte de equipamento e armação que, por serem feitos de um material mais leve e mais resistente, permitem assim um melhor transporte.

As principais funções das fibras prendem-se com a capacidade de suportar cargas, enquanto que a matriz garante a união das fibras e a proteção das mesmas contra as condições ambientais (Reddy, 2003). As propriedades mecânicas dos compósitos de fibras dependem muito da orientação das fibras e número das camadas, bem como do seu empilhamento (unidirecionais ou multidirecionais).

As fibras podem ser sintéticas, quando fabricadas pelo homem, ou naturais, quando retiradas da natureza. Na figura 4, apresenta-se uma classificação dos tipos de fibras de acordo com a sua origem. As fibras podem ser transformadas em fios ou cordas, sendo posteriormente usadas como componentes de materiais compósitos.

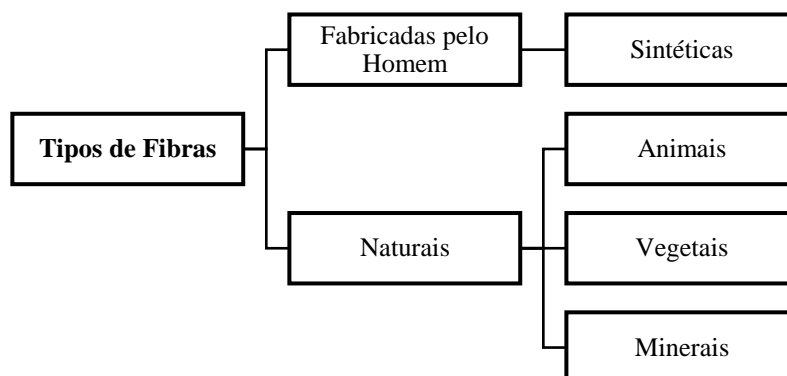


Figura 4. Tipos de fibras baseado em (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006).

As fibras podem também ser classificadas de acordo com a sua dimensão, ou seja, longas ou curtas, como se pode observar na figura 5. As fibras longas e as curtas permitem melhorar as propriedades mecânicas do material, sem que haja um aumento muito significativo de massa. No entanto a utilização de fibras longas implica muitas vezes recorrer a processos de fabrico manuais, onde a mão-de-obra é mais especializada, sendo que pode ser necessária a utilização de equipamentos mais caros, enquanto no caso de fibras curtas recorre-se a processos automáticos mais económicos, no entanto os compósitos de fibras longas apresentam melhores propriedades mecânicas nomeadamente em termos de rigidez e resistência mecânica (Rohit & Dixit, 2016).

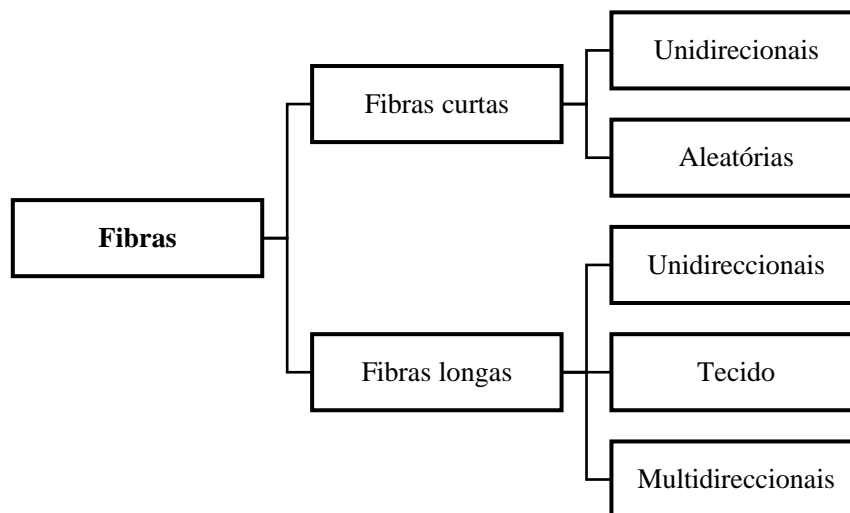


Figura 5. Esquema dos reforços usados em compósitos reforçados com fibras (Silva, 2014).

Como se verifica na figura 5, as fibras podem ser orientadas em diferentes direções, podendo tornar o material compósito num material ortotrópico ou, caso sejam distribuídas aleatoriamente, tornar o material num material com características quase homogêneas, classificando-se assim como um material isotrópico (Castro, 2013).

#### 2.1.1.1. Fibras Sintéticas

Nos últimos anos, uma grande e crescente parcela da produção comercial de fibras tem origem sintética ou semi-sintética. Estas fibras fornecem propriedades mecânicas geralmente superiores às de origem natural e uma maior resistência à degradação, estando disponíveis

numa variedade de formas e composições para aplicações variadas (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006).

Na figura 6, apresenta-se uma classificação relativa às fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais compósitos, como as fibras de vidro, de carbono e aramídicas, ressaltando que as fibras de vidro são as que apresentam menores custos, tornando a sua utilização mais comum. No entanto, as fibras de carbono e aramídicas são aplicadas num contexto onde as características do material tendem a ser cruciais para o uso do produto, como em barcos, carros, etc. (Romão, 2003).

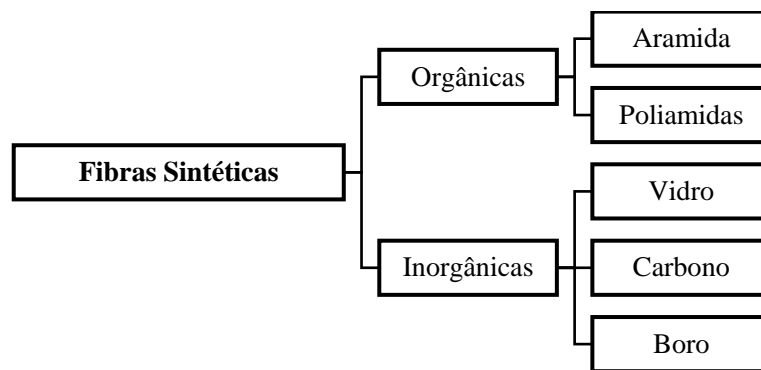


Figura 6. Classificação fibras sintéticas (Matthews & Rawlings, 1999)

As fibras de carbono são utilizadas em diferentes componentes em variadíssimas indústrias, nomeadamente em componentes de satélites, submarinos, naves espaciais, comboios de alta velocidade, estando contudo, mais presente na área automóvel. Os polímeros reforçados com fibra de vidro são utilizados em tubagens com o propósito de transportar diferentes tipos fluido como a água, químicos e resíduos industriais, cadeiras de estádios, mobiliário de habitações, estruturas de piscinas, entre outros (Silva, 2011). Na tabela 1 é possível observar algumas propriedades das fibras mencionadas anteriormente.

Tabela 1. Propriedades de fibras sintéticas baseado em (Castro, 2013) e (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006)

	<b>Materiais</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensão de Rutura (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>Fibras sintéticas</b>	<b>Vidro E</b>	2,5	2000 – 3500	70,0 – 72,4
	<b>Carbono</b>	1,4	3100 - 5500	164,3 – 171,4
	<b>Kevlar</b>	1,44	3620	130,00
	<b>Boro</b>	2.6	3440	407,00

#### 2.1.1.2. Fibras Naturais

As fibras naturais têm vindo a ser usadas desde há 3000 anos atrás, desde os tempos dos antigos egípcios, onde a mistura de palha e barro dava origem ao material usado na construção das paredes (Rohit & Dixit, 2016).

As fibras naturais são biodegradáveis, leves, resistentes e de baixo custo, tendo vindo cada vez mais a substituir, com sucesso, os enchimentos de fibras vidro e minerais em inúmeras aplicações de engenharia, desde as indústrias aeroespacial e automóvel até a embalagem de produtos e à construção civil (Kozłowski, 2012). O peso das fibras naturais é de cerca de dois terços do peso das fibras de vidro e o consumo de energia para a sua produção é apenas um terço.

As fibras naturais mais utilizadas, numa matriz biodegradável ou não biodegradável, são o cânhamo, o sisal, o linho, aparas de madeira e o kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) (Kalia & Avérous, 2011). Podemos afirmar que as fibras naturais quando incorporadas em plásticos irão, num futuro próximo, competir fortemente com as fibras de reforço convencionais. A resistência notável, a alta rigidez e a estabilidade dimensional de elementos de construção leves possibilitam reduzir essencialmente o peso de aeronaves, comboios, veículos automóveis, entre outros. Na tabela 2 é possível observar algumas propriedades como a densidade, tensão de ruptura e módulo de Young referentes a diferentes tipo de fibras naturais.

Tabela 2. Propriedades de fibras naturais baseado em (Castro, 2013) e (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006)

	<b>Materiais</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensão de Rutura (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>Fibras naturais</b>	<b>Algodão</b>	1,5 – 1,6	287 - 597	5,5 – 12,6
	<b>Linho</b>	1,5	345 – 1035	27,6
	<b>Sisal</b>	1,5	511 - 635	9,4 - 22,0
	<b>Cânhamo</b>	1,4	550 - 900	70,0
	<b>Ananás</b>	1,44	413 - 1627	34,5 - 82,51
	<b>Urtiga</b>	-	954 - 2234	59,0 - 115,0

O uso de fibras naturais como reforço em compósitos de matriz polimérica, proporciona para além dos benefícios já conhecidos, grandes benefícios ambientais relativamente ao descarte final dos produtos no final do seu ciclo de vida. Para além de retardação de chama, um fator decisivo na escolha de aplicar uma fibra natural, é a tendência de degradação, ou seja, saber se esta suportará as condições ambientais adversas, como por exemplo a humidade (Kalia & Avérous, 2011).

No processamento de compósitos criados com fibras naturais, um fator importante a ter em conta é a temperatura de processamento, sendo que a mesma pode afectar a integridade das fibras. Estas fibras apresentam uma baixa temperatura de processamento, sendo limitadas a aproximadamente 200°C (Silva, 2011).

Segundo Rohit & Dixit (2016), a aplicação de fibras naturais representa também uma oportunidade económica para todo o setor agrícola, uma vez que pode criar muitas oportunidades de emprego nos setores urbano e rural, na produção de fibra natural e sua transformação, podendo contribuir para a redução da pobreza em países em desenvolvimento e países moderadamente desenvolvidos.

As fibras naturais podem ser divididas em 3 grupos de acordo com a sua origem, animal, vegetal ou mineral, como se pode observar na figura 7.

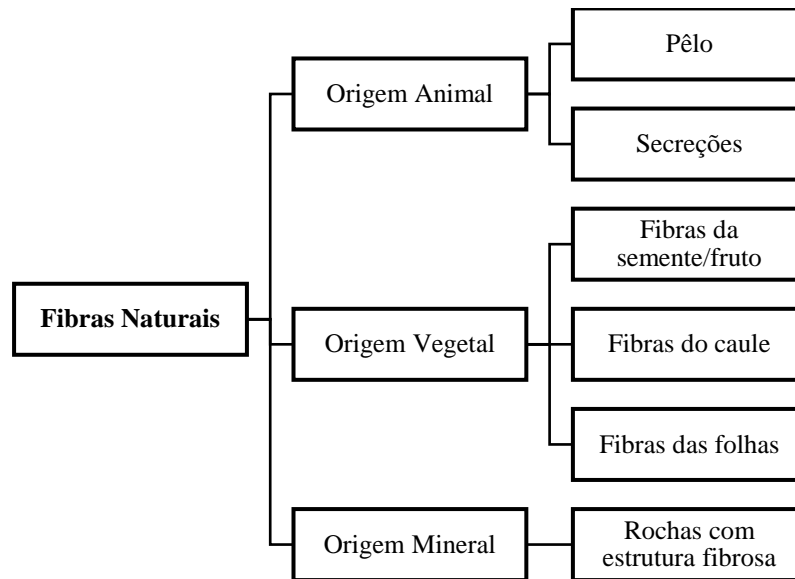


Figura 7. Classificação de fibras naturais, adaptação (Nakamura, 2000).

#### 2.1.1.2.1. Fibras origem animal

Segundo Avallone & Baumeister III (1997), nas fibras de origem animal estão incluídos dois tipos de fibras: pêlo e secreções. Na categoria de pêlo, podemos encontrar fibras como a lã de ovelha, mohair de cabras, cabelo de camelo, entre outras e na categoria de secreções incluem-se exemplos como a seda que é originária do bicho da seda. A lã é a mais importante destas, pois pode ser processada, reduzindo a sua suscetibilidade ao dano da traça e ao encolhimento, enquanto que a seda, que outrora apresentava particular importância económica, tem vindo cada vez mais a ser substituída por diversas fibras sintéticas, na maioria das suas aplicações.

#### 2.1.1.2.2. Fibras origem mineral

De acordo com Nakamura (2000) e Avallone & Baumeister III (1997), o grupo de fibras minerais é representado por rochas com estrutura fibrosa, sendo o amianto a única fibra mineral de origem natural. Os produtos de consumo que contém esta fibra foram removidos devido às suas propriedades cancerígenas provenientes das partículas que se alojavam no pulmão, prejudicando gravemente a saúde. Esta fibra era vasta e fortuitamente aplicada de

forma ubíqua como um isolador térmico, no entanto atualmente está proscrita desse uso, tendo sido principalmente substituída pela fibra de vidro.

#### 2.1.1.2.3. Fibras origem vegetal

As fibras vegetais de maior utilidade são constituídas por celulose e podem ser classificadas da seguinte forma:

- fibras de semente, como é o caso do algodão;
- fibras de caule, onde estão incluídos o linho, o cânhamo, a juta, entre outras;
- fibras de folha como por exemplo as folhas de bananeira.

Aquelas que contêm mais celulose são as mais flexíveis e elásticas, podendo ser mais facilmente branqueadas, enquanto que aquelas que são mais lignificadas tendem a ser rígidas, quebradiças e difíceis de branquear.

##### 2.1.1.2.3.1. Fibra de Cânhamo

O cânhamo tem sido utilizado para o fabrico de diversos produtos maioritariamente no sector náutico e na tecelagem. Pensa-se que a fibra do cânhamo já era utilizada pelos Mongóis, Tártaros e Japoneses, na produção de vestuários antes mesmo da seda e do algodão (Santos, 2013).

Foi na época dos descobrimentos que o uso do cânhamo se expandiu sendo maioritariamente usado em cordas e velas para embarcações. Após o seu uso e cultivo ter caído em esquecimento, em 1937 o Estado Novo relançou a cultura do cânhamo. No entanto, entre 1971- 1988 devido à sua possível mistura com o cannabis psicotrópico (a marijuana), o cultivo do cânhamo na Europa tornou-se ilegal. Em 1998, o cultivo foi retomado pela empresa “Cânhamo de Portugal, Lda.” com ajuda da União Europeia, no entanto o mesmo foi sendo grandualmente abandonado, tornando-se inexistente. Posteriormente, em 2013 foi criada uma cooperativa a CANAPOR (Cooperativa para o Desenvolvimento do Cânhamo), para recomeçar o cultivo do cânhamo em Portugal (Santos, 2013). Atualmente este material é utilizado num vasto leque de aplicações que podem variar desde a indústria alimentar,

cosmética, têxteis, papel, combustíveis, bioplásticos até aos materiais de construção (Romão, 2003) (Eires, 2006).

O cânhamo é uma fibra que cresce rapidamente, impede o crescimento de ervas daninhas, controla as pragas e proporciona um baixo impacto a nível agrícola, ou seja, apresenta-se como uma boa opção pois prepara o solo para futuras plantações, visto proporcionar ao solo melhor estrutura e condições (Jesus, 2011). Sendo inicialmente originária da Índia e Irão, esta planta é atualmente mais cultivada em regiões mais temperadas do que em regiões tropicais. Normalmente semeada entre os meses de Março e Abril e atingindo a altura de 2-3 metros até ao mês de Agosto, as fibras de cânhamo apresentam uma cor castanha amarelada, consequência da escamagem, raspagem e posteriormente lavagem com água, a que o caule é submetido (Nakamura, 2000). O processo de extração manual do cânhamo é constituído por quatro passos: secagem no campo de colheita, maceração na água, secagem ao alto e gramagem, sendo a última dividida em duas operações, esmagamento e penteação (Romão, 2003). Na tabela 3 é apresentada a constituição das fibras de cânhamo.

*Tabela 3. Constituição de fibras de cânhamo (Romão, 2012) (Suardana, Piao, & Lim, 2011).*

<b>Autor</b>	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lenhina</b>	<b>Pectina</b>	<b>Ceras e óleos</b>
(Romão, 2012)	70.2-74.4	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8
(Suardana, Piao, & Lim, 2011)	70.2 – 76.12	12.28 – 22.4	3.7 – 5.7	0.9 – 1.55	0.8 – 1.59

As fibras de cânhamo, tal como outras fibras naturais apresentam limitações quanto à compatibilidade entre fibra e matriz, elevado grau de absorção de humidade, e fraca resistência a elevadas temperaturas. A análise das limitações relativas a estas fibras naturais será desenvolvida no subcapítulo 2.3.

Apesar de ser uma área de estudo com muito por explorar, já existem alguns estudos elaborados sobre as propriedades destas fibras. Um dos estudos mais extensos sobre esta temática foi realizado por Prasad & Sain (2003), que estudam a importância do diâmetro da fibra no seu comportamento à tração dos materiais, bem como o efeito do ambiente onde as fibras são tratadas. Neste estudo foram usadas fibras de cânhamo de vários diâmetros,

começando de 4  $\mu\text{m}$  a 800  $\mu\text{m}$ , para testes de tração. Foi possível verificar que à medida que o diâmetro da fibra diminui, a quantidade de falhas na fibra também diminui, resultando num aumento das propriedades de tração das fibras. Verificou-se igualmente que a resistência à tração e o módulo de elasticidade de fibras tratadas em ambiente inerte aumentaram, provavelmente devido à produção de fibras de diâmetros menores, e conseqüentemente com um menor número de defeitos naturais. No caso das fibras tratadas no ar ambiente, no entanto, verificou-se uma diminuição das propriedades em estudo. Tal ocorreu devido ao facto de as fibras sofrerem oxidação, o que contribui para a perda de qualidades. Para fibras de diâmetro 4  $\mu\text{m}$  observaram-se valores médios de resistência à tração e valores de módulo de elasticidade de 4200 MPa e 180 GPa, respetivamente. Estes valores diminuíram para 250 MPa e 11 GPa, respetivamente, para fibras de diâmetro de 66  $\mu\text{m}$ . No caso das fibras de diâmetro 800  $\mu\text{m}$ , os valores foram tão baixos quanto 10 MPa para resistência à tração e 2 GPa para o módulo de elasticidade.

A humidade é outro dos fatores que afeta as propriedades das fibras de cânhamo visto que as fibras são obtidas através do caule da planta do cânhamo que tem como função transportar a humidade e nutrientes para as diferentes partes da planta. Em estudos efetuados em tecido de fibra de cânhamo, quando submetido a diferentes temperaturas, entre 50°C - 200°C, foi possível verificar que quanto maior a temperatura, maior a perda de humidade para o mesmo intervalo de tempo de 300 min. Por exemplo para 50°C, 100°C e 150°C a perda que se verifica é de cerca de 4,1%, 8,3% e 10,2% respetivamente. Como consequência da perda de humidade verifica-se uma perda de peso. Quanto à degradação das fibras devido à temperatura foi possível determinar que ocorre entre 150°C - 200°C e acelera substancialmente por volta dos 250°C. No estudo das propriedades de tração, os autores afirmam que as fibras constituintes dos tecidos de cânhamo apresentam uma secção transversal poligonal e bastante diferente de fibra para fibra. Os valores obtidos de diâmetro das fibras naturais, apesar de inferiores aos obtidos em fibras sintéticas como as de vidro, são suficientemente bons para serem considerados e usados como reforço de materiais compósitos. A resistência destas fibras foi caracterizada como sendo dependente da largura das mesmas, sendo que à medida que a largura aumenta, também o número de falhas aumenta e conseqüente a resistência diminui (Shahzad, 2013).

### 2.1.2. Materiais para matrizes

A matriz (resina) de um material compósito cumpre diferentes funções sendo que é fundamental na constituição do mesmo. A matriz após impregnar o reforço, protege o mesmo contra o meio ambiente e ataques químicos que possa sofrer, permitindo ainda o aumento da rigidez e da resistência dos compósitos, quando conjugado com fibras longas ou de fibras curtas (Pickering, Efendy, & Le, 2016).

Os materiais compósitos reforçados com fibra ou partículas apresentam grandes diferenças de comportamento mecânico quando conjugados com uma matriz. No caso das partículas a matriz torna o material num só sólido concedendo a geometria pretendida, enquanto que no caso das fibras a matriz vai funcionar como um aderente que une todas as fibras obtendo em todas o mesmo comportamento, proporcionando assim um aumento da resistência global do material (Ferreira, 2015).

Existem 2 tipos de resinas, as naturais e as sintéticas. As resinas naturais podem ser obtidas através de recursos naturais, recorrendo-se a fontes vegetais. Enquanto que as resinas sintéticas são produzidas industrialmente, resultando do desenvolvimento da tecnologia e das necessidades da sociedade.

Atualmente as matrizes poliméricas sintéticas são as mais utilizadas no fabrico de compósitos por duas razões, a primeira prende-se com o facto destas matrizes apresentarem características como baixa rigidez e resistência que podem ser vantajosas em certas aplicações onde o reforço é feito recorrendo a fibras (como mencionado anteriormente) e a segunda com o facto do processamento não necessitar de altas temperaturas ou pressões, tornando os problemas associados à degradação dos reforços menos acentuados (Matthews & Rawlings, 1999).

Aquando da seleção da matriz/resina torna-se necessário considerar fatores como a sua viscosidade, a interação reforço/resina, o custo e a capacidade de processamento, sendo que as primeiras duas são cruciais para o desempenho do material (Silva, 2014).

#### 2.1.2.1. Resinas Sintéticas

As resinas sintéticas são produzidas artificialmente por reação química, consistindo num conjunto de polímero mais os aditivos. Estas resinas são conhecidas desde o séc. XIX, sendo

que a sua natureza permite uma fácil utilização, de maneira a diminuir o custo (Umney & Rivers, 2003).

A resinas sintéticas apresentam grandes impactos ambientais, principalmente no seu processo de extração e refinação, por serem polímeros provenientes do petróleo. Visto que o petróleo é um recurso fóssil, a produção desta resina depende da escassez da sua matéria prima, assim como, da constante variação do seu custo (Brito, Agrawal, Araújo, & Mélo, 2011).

As resinas sintéticas podem ser divididas em dois grandes grupos, as termoplásticas e as termoendurecíveis, apresentando-se alguns exemplos na figura 8.

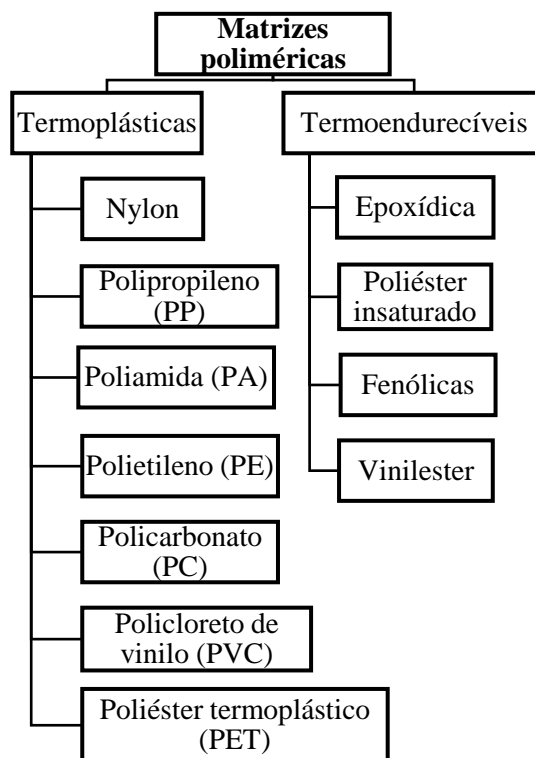


Figura 8. Exemplos de matrizes poliméricas sintéticas (Castro, 2013).

#### 2.1.2.1.1. Resinas Termoplásticas

Os materiais termoplásticos são, na sua generalidade, materiais mais dúcteis e mais resistentes, características que se devem ao facto de este tipo de materiais serem baseados em longas cadeias poliméricas (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006). Como estes não

formam ligações cruzadas ao nível molecular, tornam-se mais flexíveis e enformáveis, sendo usados sem preenchimentos ou reforços em várias aplicações. No entanto segundo Mazumdar (2002) este tipo de materiais tem melhor desempenho mecânico com a adição de reforços ou preenchimento, visto apresentarem valores de rigidez baixos.

Os termoplásticos podem ser submetidos a ciclos térmicos, sem perda significativa de propriedades, o que permite serem fundidos e reciclados. Por outro lado, podem ser soldados tornando a reparação ou junção de componentes uma possibilidade.

Na tabela 4, é possível observar alguns exemplos de resinas termoplásticas e algumas das suas propriedades.

*Tabela 4. Propriedades de resinas termoplásticas (Mazumdar, 2002).*

<b>Materiais</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>Nylon</b>	1,1	55 – 90	1,3 – 3,5
<b>Polycarbonato</b>	1,2	55 - 70	2,1 – 3,5
<b>Polietileno</b>	0,9 – 1,0	20 - 35	0,7 – 1,4

#### 2.1.2.1.2. Resinas Termoendurecíveis

A polimerização de resinas inicia-se através da junção de um endurecedor adicionado apenas no momento de aplicação da resina, sendo esta reação exotérmica denominada de cura. Para que a reação de polimerização seja desencadeada é necessária a presença de um sistema constituído por um ativador e um catalisador, ou simplesmente, por um catalisador adicionado ao precursor polimérico (monómero ou oligómero) numa fase anterior à de impregnação (Romão, 2012).

Os materiais termoendurecíveis após a sua cura já não podem ser reaquecidos, ao contrário dos termoplásticos, visto que durante a sua cura são criadas ligações cruzadas entre as moléculas (Avallone, Baumeister III, & Sadegh, 2006). Quanto maior o número de ligações, mais estável, termicamente falando, e mais rígido será o compósito, tornando a reparação

dos mesmos difícil, sendo necessário recorrer a adesivos ou a parafusos e rebites para promover a ligação deste tipo de peças (Mazumdar, 2002).

Estas resinas são mais fáceis de processar do que as resinas termoplásticas e apresentam uma melhor capacidade de impregnação, uma maior resistência química contra solventes e são bons isolantes elétricos. Na tabela 5, é possível observar algumas propriedades das resinas termoendurecíveis mais utilizadas.

*Tabela 5. Propriedades de resinas termoendurecíveis (Mazumdar, 2002).*

<b>Materiais</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensão de Rutura (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>Resina Epoxídica</b>	1,2 – 1,4	50 – 110	2,5 – 5,0
<b>Resina Fenólica</b>	1,2 – 1,4	35 - 60	2,7 – 4,1
<b>Poliéster</b>	1,1 – 1,4	35 - 95	1,6 – 4,1

#### 2.1.2.1.2.1. As Resinas Epoxídicas

A resina epoxídica é uma resina termoendurecível que apresenta boas propriedades mecânicas e químicas. Dependendo da estrutura química, bem como dos agentes e processo de cura, é possível obter-se características tais como dureza, elevada resistência química e mecânica, resistência ao desgaste e fadiga, boa adesão às fibras, resistência ao calor e excelentes propriedades elétricas. As resinas epoxídicas, para além de apresentarem uma alta resistência à tração e compressão e boa resistência química a diferentes tipos de solventes, são também vantajosas economicamente devido ao baixo custo e à facilidade de processamento (Silva, 2014).

Como referido anteriormente, esta resina é bastante versátil, o que facilita a adesão a vários tipos de materiais, sendo por isso das resinas mais usadas em todo o tipo de componentes e produtos, tais como pisos industriais, pranchas de surfe, tintas anticorrosivas, e tantas outras (Carvalho, 2015).

Existem resinas epoxídicas líquidas, semi-sólidas e sólidas. As resinas líquidas são maioritariamente usadas nos processos de RTM (*Resin Transfer Moulding*), Enrolamento Filamentar (*Filament Winding*), Pultrusão e Moldação Manual (*Hand lay-up*), recorrendo a diferentes reforços de fibras. As resinas semi-sólidas são usadas em processos como Autoclave e, finalmente, as sólidas são mais utilizadas para processos de junção de componentes (Mazumdar, 2002).

Devido a apresentarem um custo mais elevado que outras resinas, as resinas sólidas não são normalmente usadas em mercados onde o custo da resina deve ser reduzido, como no caso da indústria automóvel e náutica.

#### 2.1.2.2. Resinas Naturais

Os polímeros biodegradáveis constituem uma família de polímeros, que ainda se encontra vagamente definida, que pode ser degradada por organismos vivos. Apresentam-se como uma possível alternativa aos polímeros tradicionais não biodegradáveis quando a sua reciclagem se torna impraticável ou mesmo nada económica. O objetivo deste tipo de materiais prende-se com a produção de uma nova geração de materiais semelhantes a plásticos mas provenientes de fontes naturais, que retenham as suas propriedades durante o seu uso e que simultaneamente sejam completamente biodegradáveis quando descartadas corretamente (Bastioli, 1998).

As resinas naturais formam um grupo de resinas quimicamente diversificado, caracterizadas por serem materiais insolúveis em água, segregados ou excretados por plantas. Os óleo-resinas e bálsamos, são usados como ocorrem, mas são mais frequentemente tratadas por destilação ou outros processos, que levem à separação do componente de óleo do componente de resina mais dura. Estas resinas também podem ser provenientes de animais como os insetos. (Umney & Rivers, 2003).

As resinas naturais são caracterizadas por possuírem um ciclo de vida mais curto comparativamente com resinas sintéticas (Brito, Agrawal, Araújo, & Mélo, 2011).

##### 2.1.2.2.1. A Resina de Mater-Bi

A resina Mater-Bi é um material termoplástico totalmente biodegradável feito de componentes naturais (à base de amido de milho e derivados de óleo vegetal) e de poliésteres

sintéticos biodegradáveis (Mostafa, Sourell, & Bockisch, 2010). O amido termoplástico quando misturado ou enxertado com poliésteres biodegradáveis proporciona o aumento da flexibilidade e da resistência à humidade. Estes materiais biodegradáveis são adequados para serem reforçados por fibras naturais, comportando-se assim como cargas biodegradáveis numa matriz biodegradável (Lopez, et al., 2012).

O amido desestruturado comporta-se como um polímero termoplástico e pode ser processado como um plástico tradicional. Tendo em conta esta particular característica do amido, a empresa Novamont em Itália desenvolve e comercializa os produtos Mater-Bi (Rutkowska, Krasowska, Steinka, & Janik, 2004).

Segundo Mali, Grossmann, & Yamashita (2010) e Bastioli (2000), esta resina à base de amido de milho, batata e trigo, já se encontra em comercialização em produtos como sacos do lixo. Vroman & Tighzert (2009) indicam ainda que este material tem vindo a ser utilizado em ferramentas agrícolas e bens de consumo descartáveis. Existem vários tipos de resina Mater-Bi, com diferentes propriedades físicas. A escolha do tipo de Mater-Bi prende-se com o processo de fabrico e a sua aplicação, sendo que se deve ter em conta o ponto de fusão e a viscosidade dependendo da aplicação pretendida. A sensibilidade reduzida que esta resina apresenta à humidade, faz da mesma uma candidata adequada para a produção de películas, itens moldados por injeção e espumas (Bastioli, 1998).

Esta resina apresenta valores de densidade, tensão de rutura e Módulo de Young bastante competitivos quando comparada com outras resinas, o que faz dela uma boa candidata para substituição de resinas fósseis. Na tabela 6 é possível observar algumas propriedades mecânicas de diferentes tipos de resina Mater-Bi.

*Tabela 6. Propriedades de resinas Mater-Bi (Rudnik, 2008).*

<b>Materiais</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Tensão de Rutura (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
<b>Mater-Bi NF01U</b>	1,3	25	0,12
<b>Mater-Bi ZF03U/A</b>	1,23	31	0,18
<b>Mater-Bi Y1010U</b>	1,35	25 - 30	2,1 – 2,5

## 2.2. Processos de Fabrico de compósitos de fibras

O fabrico de componentes em materiais compósitos incorporando fibras e matrizes poliméricas pode ser realizado por diversos tipos de processos, dependendo do tipo de matriz (termoendurecível ou termoplástica) e do tipo de reforço (fibras curtas ou fibras contínuas), como se pode observar na figura 9. A maioria dos processos de fabrico passam por 4 fases: impregnação, empilhamento, consolidação e, por fim, solidificação.

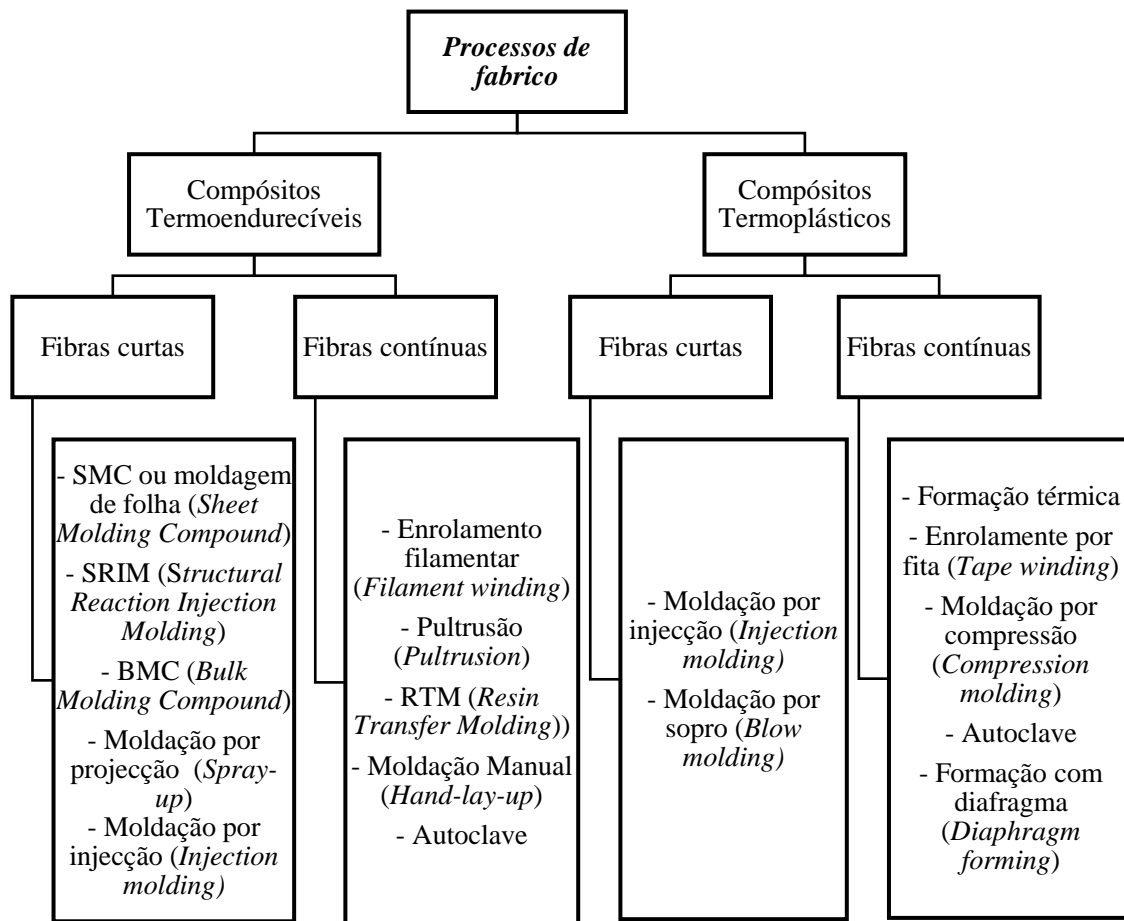


Figura 9. Classificação dos processos de fabrico de acordo com o tipo de matriz adapta (Mazumdar, 2002)

Na atualidade, os processos de fabrico de compósitos naturais podem ser exclusivamente manuais ou uma combinação de manuais e automáticos, sendo que a moldagem pode ser realizada em molde aberto ou molde fechado (Silva, 2011). Embora já se recorra a automação nos processos que seguidamente se apresentam, a maioria recorre ainda fortemente a manufatura com mão-de-obra especializada, capaz de produzir os produtos e garantir a sua qualidade. Este tipo de processamento torna a produção dos compósitos mais

dispendiosa. Alguns dos processos mais utilizados no fabrico de compósitos incorporando fibras naturais apresentam-se seguidamente.

- **Pultrusão**

A Pultrusão é uma técnica onde as fibras são impregnadas na resina, sendo posteriormente as fibras puxadas através de uma fieira ou molde de forma a se obter a secção desejada. O material passa seguidamente numa matriz aquecida que irá provocar a polimerização, ou seja, a reação de cura conferindo a forma final. Este processo permite a obtenção de perfis de secção constante, bem como de variadas formas e de boa qualidade (Miracle & Donaldson, 2001).

- **Enrolamento Filamentar**

Neste processo, os reforços, são impregnados com a resina e aditivos, por meio de imersão completa. Os filamentos impregnados são enrolados em várias camadas sobre um mandril rotativo podendo ser dispostas segundo diversos padrões, sendo posteriormente a cura realizada num forno ou com luzes infravermelhas, sempre com o mandril em rotação (Miracle & Donaldson, 2001). Uma vez a peça curada, ocorre a desmoldagem do mandril e posterior acabamento.

- **Moldação Manual**

A moldação manual consiste na aplicação sucessiva na superfície do molde de agente desmoldante e, posteriormente, são manualmente impregnados com a resina e fibra, sequencialmente, recorrendo a um pincel ou a um rolo de lã. O processo é finalizado com a passagem de um rolo metálico para eliminar bolhas, garantir o impregnamento das fibras e finalizar o acabamento. O processo é repetido as vezes necessárias até obter a espessura desejada. A cura é realizada à temperatura ambiente sendo que após a mesma, a peça é desenformada.

- **RTM - Resin Transfer Molding**

O processo consiste na utilização de um sistema de molde e contramolde, sendo que o contramolde apresenta um ou vários pontos de injeção de resina, dependendo do tamanho

da peça. Os reforços são previamente colocados no interior da cavidade do molde, antes do fecho do conjunto molde/contramolde, e de seguida é injetada a resina. Com a finalidade de diminuir o tempo de cura, o molde pode ser aquecido ou encontrar-se à temperatura ambiente, sendo que nos casos onde o molde utilizado é de aço, esta ação é recomendada. Posteriormente, o molde é aberto para desmoldagem do compósito. Para este processo é aconselhável que a resina seja de baixa viscosidade e devem-se usar pressões baixas. Quando comparado com outros processos de fabrico, o RTM apresenta algumas vantagens tais como: baixo custo de mão de obra, ferramentas simples, possibilidade de produção de peças complexas e com qualidade (Garay, 2010).

- **SMC - Sheet Molding Compound**

No processo SMC, um conjunto de fibras contínuas é cortado em comprimentos menores. Posteriormente essas fibras vão ser impregnadas numa camada de resina, que se caracteriza por ser uma mistura de resina e catalisador. Para garantir um produto mais consistente, normalmente é depositada uma segunda camada desta mistura. De seguida, o material é coberto por polietileno, que garante uma melhor conservação e realiza-se a compactação. Após este processo o material é armazenado para que se dê o processo de cura.

Este processo é caracterizado por uma produtividade muito alta, excelente reprodutibilidade de peças, baixos custos e a possibilidade de realizar peças com geometrias complexas. As vantagens deste processo são o baixo custo do material, tempos de fabrico curtos, é um processo com um aproveitamento de material de cerca de 95% e permite elaborar peças tridimensionais complexas. (Fette, Hentschel, Köhler, Wulfsberg, & Herrman, 2016). A maior desvantagem das peças elaboradas através deste método é o baixo nível de rigidez e resistência, devido ao baixo volume de fibra e a um comprimento de fibra curto (Wulfsberg, et al., 2014).

- **Autoclave em embalagem de vácuo**

Neste processo, o compósito é submetido a um ciclo de calor, pressão e vácuo. Durante o ciclo de aquecimento, o material vai sofrer mudanças no seu estado físico e entrar no regime plástico, é nesta fase que deve ser aplicada pressão para promover a compactação do laminado. Por fim, a aplicação de vácuo durante a consolidação vai levar à remoção do ar

aprisionado no interior do componente. O material deverá ter que ser submetido a um acabamento final para retirar todas as rebarbas em excesso. O custo do equipamento é elevado, o que leva a um maior investimento (Cândido & Almeida, 2000).

Na tabela 7 pode-se observar um resumo de alguns dos processos de fabrico usados em materiais compósitos e as suas características quanto ao tipo de componentes que podem ser produzidos através destes processos, quanto à dimensão, custo, forma, entre outros.

Tabela 7. Tabela resumo dos critérios de escolha de processos de fabrico.

Processo	Produtividade	Custo	Desempenho	Dimensão	Forma	Materiais
Enrolamento filamental ( <i>Filament winding</i> )	Lenta a rápida	Baixo a alto	Alto	Pequena a grande	Cilíndrica e aximétrica	Fibras contínuas com resinas epoxídicas e de poliésteres
Pultrusão ( <i>Pultrusion</i> )	Rápida	Baixo a médio	Alto na direção longitudinal	Sem restrições no comprimento e pequena na secção transversal	Constante transversalmente	Fibras contínuas com resinas de poliéster e vinilester
Moldação Manual ( <i>Hand-lay-up/ Wet lay-up</i> )	Baixa	Médio a alto	Médio a alto	Pequena a grande	Simple e complexa	Impregnados e fibras com resinas epoxídicas ou poliéster
Moldação por projeção ( <i>Spray-up</i> )	Média a rápida	Baixo	Baixo	Pequena a média	Simple e complexa	Fibras curtas com resina catalisada
RTM ( <i>Resin transfer moulding</i> )	Média	Baixo a médio	Médio	Pequena a média	Simple e complexa	Pré-formados com resinas epoxídicas e vinilester
SRIM ( <i>Structural reaction injection moulding</i> )	Rápida	Baixo	Médio	Pequena a média	Simple e complexa	Pré-formados com resinas poliisocianatos
Moldação por compressão ( <i>Compression moulding</i> )	Rápida	Médio	Médio	Pequena a média	Simple e complexa	SMC (sheet moulding compound)
Moldação por injeção ( <i>Injection moulding</i> )	Rápida	Baixo a médio	Baixo a médio	Pequena	Complexa	Fibras curtas com resina termoplástica
SMC ( <i>Sheet Molding Compound</i> )	Rápida	Baixo	Baixo	Pequena a grande	Complexa	Fibras curtas com resinas de poliéster e vinilester

## 2.3. Propriedades de materiais compósitos naturais

Os materiais naturais apresentam inúmeras vantagens quando comparados com materiais sintéticos. Estes materiais apresentam não só um menor impacto ambiental, mas também devido à sua abundância na natureza, apresentam-se como um recurso precioso.

No entanto, tal como referido nos capítulos anteriores, as fibras naturais apresentam também algumas limitações que se tornam aspetos críticos no uso deste tipo de fibras, tais como o seu desempenho mecânico, os limites de temperatura de processamento e a suscetibilidade a condições húmidas e degradação ambiental.

Alguns estudos conduzidos com o intuito de verificar a viabilidade da aplicação de materiais compósitos naturais nas mais variadas indústrias, aprofundam as limitações destes materiais e a sua capacidade de resistir a diferentes condições. Landro & Janszen (2014), afirmam que apesar destes compósitos não serem os mais fidedignos devido à sua elevada absorção de humidade, os mesmos suportam o contacto num curto espaço de tempo. Outra limitação destes materiais é o facto de apresentarem uma fraca resistência ao fogo, tornando necessário submetê-los a tratamentos superficiais ou à conjugação com aditivos.

Segundo Jauhari, Mishra & Thakur (2015) as propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais dependem principalmente dos seguintes critérios:

- Teor de Celulose (afeta a resistência à tração), lignina (afeta a rigidez), hemicelulose, pectina, ceras e teor de água;
- Geometria da célula elementar;
- Ângulo do eixo da hélice da fibra (afeta a resistência à tração inversamente);
- Geralmente não são filamentos únicos como a maioria das fibras sintéticas, sendo que podem ter várias formas físicas, quanto ao comprimento e diâmetro da fibra (quanto menor o diâmetro, maior resistência mecânica dado existir maior superfície de contato com a matriz);
- Irregularidade da secção da fibra derivada da sua constituição (provoca grande dispersão das propriedades, apresentando qualidade não homogénea das fibras).

Os tratamentos a que são submetidas as fibras para evitar alguns dos problemas acima mencionados são tratamento da superfície, aditivos e revestimentos no material (Omrani, Menezes, & Rohatgi, 2016).

Estes tratamentos podem ser físicos ou químicos. O tratamento físico mais usual é o tratamento com plasma, sendo uma técnica física que tem vindo a ser utilizada com sucesso na modificação da superfície de várias fibras naturais. Adicionalmente, o tratamento com plasma pode introduzir diferentes grupos funcionais na superfície da fibra natural, tendo estes grupos como objetivo formar fortes ligações covalentes com a matriz, conduzindo a uma forte aderência interface fibra/matriz. Este tratamento também pode melhorar a rugosidade da superfície e resultar numa melhor adesão da interface com as matrizes (Cruz & Figueiro, 2016).

Os tratamentos químicos podem ser do tipo: tratamento alcalino, silano, aditivos repelentes de água, peróxidos, permanganatos, entre outros. Através da literatura observou-se que alguns destes tratamentos químicos mencionados podem melhorar significativamente as propriedades mecânicas das fibras naturais, devido ao facto de modificarem a estrutura cristalina e removerem componentes fracos como a hemiceluloses e a lignina da estrutura da fibra. Além disso, a absorção de humidade e subsequente intumescimento das fibras naturais pode ser reduzida através destes tratamentos usando aditivos repelentes de água, ou até aditivos de acoplamento de silano, que podem melhorar as interações interfaces fibra/matriz através da formação de forte ligação química resultando portanto, numa melhoria do desempenho mecânico do materiais (Cruz & Figueiro, 2016).

Uma das técnicas mais usadas para este propósito é o tratamento alcalino (também chamado de mercerização), consistindo na remoção de uma certa quantidade de Lignina, cera e óleos que cobrem a superfície externa da parede celular da fibra. A importante modificação alcançada com este tratamento é a rutura da ligação de hidrogênio na estrutura da rede, aumentando assim a rugosidade da superfície. Geralmente é realizada em fibras curtas, por aquecimento a aproximadamente 800°C em solução aquosa com 10% de NaOH durante cerca de 3 a 4 horas, posteriormente é lavado e secado em forno ventilado. Com esta técnica é possível perturbar os grupos de fibras e obter fibras menores e de melhor qualidade (Rohit & Dixit, 2016).

Com o tratamento alcalino, a tensão superficial e, conseqüentemente, o molhamento das fibras torna-se maior, melhorando assim a ligação através de uma forma mecânica de entrelaçamento entre a matriz e a superfície rugosa das fibras. A mercerização também proporciona o desfibramento, ou seja, a desagregação das fibras em microfibras, aumentando

assim a área superficial efetiva disponível para o contato com a matriz líquida (Carvalho, 2015).

Além dos anteriormente mencionados tratamentos físicos e químicos, a superfície da fibra também pode ser modificada usando tratamentos biológicos. Pommet, et al. (2008) afirmam que, num estudo recente, nanofibras de celulose foram depositadas na superfície das fibras de sisal e cânhamo, usando-as como substratos durante o processo de fermentação da celulose bacteriana. Com o estudo foi possível observar-se que a deposição de cerca de 5 a 6% de celulose bacteriana na superfície da fibra natural resultava numa melhoria significativa na adesão interfacial com matrizes poliméricas, como ácido polilático e butirato de acetato de celulose. Portanto, este novo processo apesar de ainda estar muito pouco estudado leva ao desenvolvimento de uma nova geração de compósitos de fibra natural com melhor interface fibra/matriz.

Quanto a outras limitações destes materiais como a heterogeneidade, em 2016 foi elaborado um estudo em materiais compósitos compostos por fibra de cânhamo, com um diâmetro médio de cerca de 13 +/- 5 micrómetros, impregnada com dois tipos de matriz epoxídica, uma sintética denominada de Epolam 2020 com uma densidade de 1.10g/cm<sup>3</sup> e uma resina de origem biológica denominada Greenpoxy 56 que apresenta uma densidade de 1.181g/cm<sup>3</sup>, submetidos a ensaios de tração. Os resultados obtidos no ensaio mostraram que a orientação do fio não tinha influência significativa no módulo de Young dos materiais. No entanto as amostras com o fio orientado a 45° apresentaram valores de tensão máxima de rutura, bem como extensão, maiores do que no fio orientado a 90°. Com este estudo, foi possível verificar que a deformação é maior no fio que na resina e que, à medida que a tensão aplicada aumenta, maior é o intervalo entre os valores máximos e mínimos de tensão, o que comprova a heterogeneidade das deformações no material (Perrier, Touchard, Chocinski-Arnault, & Mellier, 2016).

## 2.4. Modelação por método dos elementos finitos de compósitos naturais

O método de elementos finitos apresenta-se como um método com uma alta adaptabilidade e eficácia na resolução de problemas relacionados com a análise de elementos estruturais. É baseado no cálculo de diferentes variáveis em pontos pré-estabelecidos, os nós. Este método

adapta-se não só a diferentes cargas e condições de apoio e fronteira, mas também a diferentes geometrias. Apresenta-se como uma alternativa ao método experimental que pode ser demorado e caro devido ao consumo de materiais, ou em casos mais complexos impossível de realizar (Ferreira A. , 1990) (Durão, Gonçalves, Moura, & Marques, 2012).

Hoje em dia existem diferentes programas comerciais com recursos de análise de elementos finitos. Estes *softwares* auxiliam o utilizador a resolver uma variedade de problemas, elaborando variados estudos, desde análises estáticas lineares a análises transitórias não-lineares. Alguns dos programas mais utilizados, como o ANSYS, o Abaqus e SolidWorks simulation, têm recursos especiais para analisar materiais compósitos e aceitam formulações de elementos personalizadas idealizadas pelo utilizador. Recorrer a estes *softwares* não possibilita apenas acesso a ferramentas de análise, modelação geométrica e visualização de resultados, mas podem igualmente ser integrados na elaboração de projetos que perspectivem um aumento do ciclo de vida dos produtos, sendo classificados como ambientes de análise completos ou engenharia assistida por computador (CAE – *Computer Assisted Engineering*) (Barbero, 2014).

Na literatura é possível encontrar alguns estudos que recorrem ao método de elementos finitos para comparar valores obtidos experimentalmente com os obtidos por FEM (*Finite Element Method*), de forma a analisar a potencialidade dos compósitos de fibras naturais.

Num estudo elaborado em 2016 em compósitos de resinas epoxídicas reforçadas com fibra de côco e fibras de sisal unidirecionais para avaliação da resistência à tração e tenacidade à fratura, os autores realizaram diferentes testes para descobrir as propriedades mecânicas do material. As conclusões do estudo afirmam que criando a conjugação das fibras naturais de sisal com as fibras de côco proporcionou uma considerável melhoria na resistência à tração quando comparado ao reforço individual, devendo-se maioritariamente à transferência de cargas e módulo de corte entre as fibras. Foi possível observar que o módulo de Young teórico do composto híbrido usando a regra de mistura é um pouco superior aos valores experimentais obtidos, visto que os valores usados no método são meramente teóricos e calculados em pontos preestabelecidos. Observou-se que a resistência à tração obtida no método experimental está em concordância com o valor obtido através do método FEM, comprovando a potencialidade do método, como recurso no estudo das propriedades mecânicas dos compósitos em análise (Kumar, D. N., Thara, & G, 2016).

Noutro estudo foi realizada uma modelação utilizando materiais compósitos de matriz híbrida de uma resina comum misturada com diferentes percentagens de uma resina líquida à base de casca de caju (CNSL - *Cashew nutshell liquid*), reforçados com fibras de juta e banana, usando o elemento *Solid 187* do ANSYS. Para o estudo foram caracterizadas as condições fronteira como iguais a um ensaio de tração e definidas a matriz e fibra como unidas, ou seja, não diferenciando matriz de reforço, sendo as propriedades dos materiais recolhidos da literatura. Os resultados obtidos para carga versus deformação de cada caso de compósitos de matriz polimérica híbrida com % de CNSL variável conjugada com fibra de juta e banana, quando comparados com resultados experimentais e de elementos finitos, apresentam valores próximos, como a carga máxima e a tensão máxima. Na figura 10 observa-se a deformação sofrida pelo material quando modelado em ANSYS, para o compósito de fibras de juta (a) e para o compósito de fibras de banana (b) (Prasad, Joy, Venkatachalam, Narayanan, & Rajakumar, 2014).

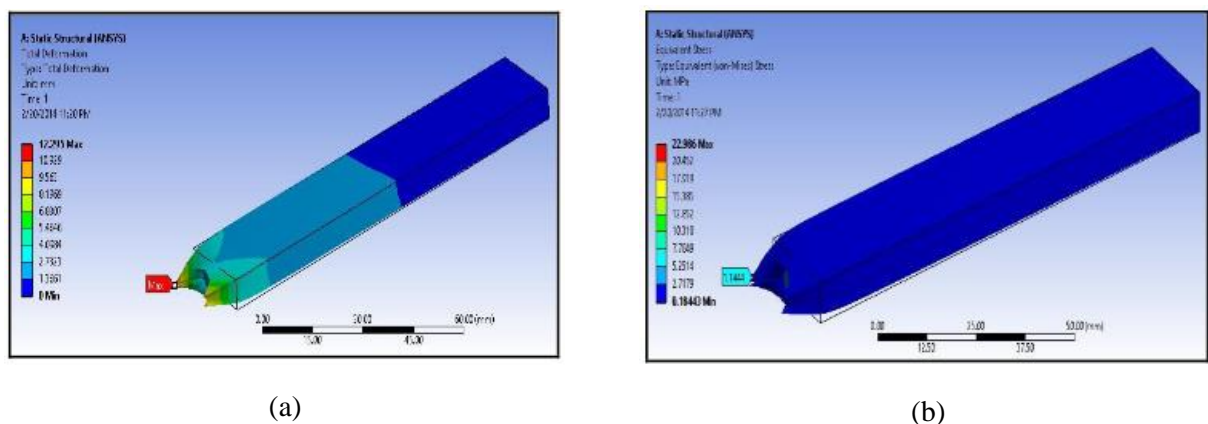


Figura 10. Imagens de modelação em ANSYS de compósitos híbridos de fibra de juta (a) e de fibra de banana (b) (Prasad, Joy, Venkatachalam, Narayanan, & Rajakumar, 2014).

Verifica-se pelas imagens que a fibra de banana apresenta valores de deformação mais baixos que a fibra de juta, visto que a mesma aparenta deformar-se em todos os perfis.

Ma et al. (2018) elaboraram um estudo para avaliar a importância dos compósitos reforçados com fibras naturais (NFRC – Natural Fibre Reinforced Composites) não serem materiais homogêneos. O estudo foi efectuado recorrendo a uma combinação entre o FEM e os valores experimentais encontrados na literatura, com o intuito de descobrir a influência que a heterogeneidade do material tem na resposta dinâmica do mesmo. Com a elaboração do

estudo, recorrendo ao FEM 3D, foi possível descobrir que os valores obtidos para o deslocamento no plano aumentavam acentuadamente de  $10^{-19}$  para  $10^{-5}$  quando o material deixava de se considerar homogêneo. Na modelação, quando a placa é submetida a um impacto verifica-se uma oscilação dos valores de deslocamento, o que vai provocar o aumento da velocidade e da aceleração dos pontos locais do material e consequentemente vai aumentar a probabilidade de haver dano local. O mapa de distorção possibilita uma melhor avaliação do dano local na placa NFRC, onde a curva de contorno com alta curvatura significa a existência de um gradiente de alta deformação (figura 11). Os autores concluem que as oscilações verificadas se devem à instabilidade na matriz de rigidez que a heterogeneidade do material provoca.

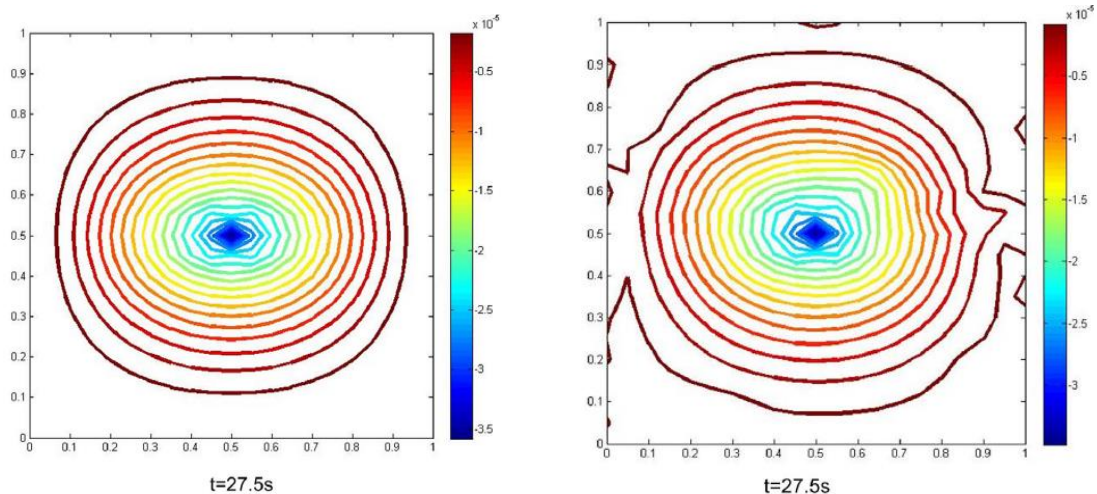


Figura 11. Contorno da placa não considerando a heterogeneidade do material (Ma, et al., 2018).

Podemos concluir a partir da literatura, que apesar de não ser ainda um método muito preciso para obter o comportamento dos materiais naturais, recorrer às técnicas de FEM apresenta-se como uma excelente oportunidade de pesquisa e desenvolvimento das temáticas em estudo, visto que os resultados embora apresentando algumas diferenças são bastante aproximados aos experimentais.

## 2.5. Aplicações de compósitos naturais

Atualmente a maioria dos compósitos ainda utiliza resinas poliméricas sintéticas como as epoxídicas, fenólicas, entre outras, conjugadas com reforços de fibras como são exemplo a

fibra de carbono, a fibra de vidro, etc. A maioria destes componentes deriva do petróleo o que faz deles não degradáveis, ou seja, não se decompõem de forma natural e, com o aumento da produção em massa e da utilização de objetos descartáveis, reutilizar e reciclar estes materiais revela-se uma problemática atual (Scarponi, 2015).

A crescente preocupação com o meio ambiente e o resultado dos efeitos que toneladas de lixo provocam no ecossistema, levam a uma crescente procura de alternativas ecológicas e à necessidade de adaptação dos materiais e produtos previamente existentes de forma a reduzir o seu impacto ambiental. Na figura 12 observam-se diferentes aplicações dos compósitos naturais, usados nos dias de hoje.



Figura 12. Exemplos da aplicação de compósitos naturais (Cicala, Cristaldi, Recca, & Latteri, 2010)

Esta demanda levou à necessidade de recorrer a fibras que possam ser facilmente encontradas na natureza e que tenham um impacto ambiental mais reduzido ou inexistente, voltando aos materiais que levaram à origem dos compósitos (Carvalho, 2015).

A substituição de materiais de maior impacto ambiental, mas com uma fiabilidade estável, por compósitos feitos de fibras naturais, apresenta benefícios e limitações na sua utilização. Os benefícios mais evidentes prendem-se com o custo, que se apresenta mais baixo comparativamente ao das fibras sintéticas, com o peso dado que a densidade das fibras naturais é mais baixa, com as boas propriedades de isolamento quer seja acústico, quer seja térmico e a ainda com a capacidade de se degradarem quando submetidos a condições climáticas adversas, nomeadamente a humidade. Estas fibras também apresentam vantagens no que diz respeito à utilização de ferramentas, uma vez que não são abrasivas

para as mesmas (Bledzki & Gassan, 1999). Mas acima de tudo, as fibras naturais existem em abundância na natureza constituindo um recurso natural renovável, sendo um fator decisivo na atualidade.

Quanto às limitações, Silva (2003) afirma que estes materiais ainda são bastante suscetíveis às condições climáticas (humidade e altas temperaturas) e apresentam baixa resistência ao impacto. As condições, tanto de cultivo em termos de clima e tipo de solo como de extração, apresentam um papel crucial na qualidade da fibra final, o que leva a que as propriedades das mesmas sejam muito variáveis sendo difícil, nalguns casos, prever o seu desempenho.

Segundo Rohit & Dixit (2016) outra limitação das fibras naturais como reforço para fabrico de compósitos, é a má compatibilidade que se verifica entre fibra e matriz, consequência da natureza hidrofílica das fibras e natureza hidrofóbica de macromoléculas de polímeros. Portanto, a modificação da fibra recorrendo a diferentes técnicas, é considerada uma mais valia, sendo que ao alterar as propriedades da superfície da mesma, consegue-se assim uma melhor adesão nas diferentes matrizes.

Quanto à aplicação destes compósitos de fibras naturais, para além dos ramos convencionais como sejam o vestuário e o artesanato, onde estes materiais já eram usados (Prado & Spinacé, 2011) em tecidos, cordas, telas e papel (Bledzki & Gassan, 1999), também o ramo automóvel e construção civil têm sido dos maiores impulsionadores no redirecionamento destes compósitos e na evolução das aplicações dos mesmos. Exemplos da aplicação destes materiais, nestes sectores, podem ser vistos no interior de automóveis em produtos como os encostos de cabeça, painéis das portas, pára-choques, entre outros (figura 13).



*Figura 13. Exemplo de aplicação de compósitos com fibras naturais (Teles, et al., 2015)*

Na indústria da construção civil, estes materiais passaram a estar mais presentes, substituindo materiais como a madeira em diversos componentes, tais como, as ombreiras das portas e janela, em telhas, entre outros (Kamal, et al., 2014).

Hoje em dia, já é possível o fabrico de painéis à prova de bala fabricados com compósitos reforçados com fibras de rami com resina epoxídica como matriz, por processo manual. Esses protótipos de painéis à prova de balas são mais leves e mais económicos do que os painéis convencionais (Rohit & Dixit, 2016).

Os cientistas e a indústria têm vindo a procurar alternativas para minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de produtos fabricados com plásticos. Como tal, outra vertente dos compósitos naturais a ter em consideração, é a utilização de resinas biodegradáveis (Brito, Agrawal, Araújo, & Mélo, 2011). Para garantir a viabilidade destas resinas, é necessário analisar as suas propriedades quando conjugadas quer com fibras sintéticas, quer com fibras naturais, como se pode observar na tabela 8.

Tabela 8. Propriedades Mecânicas de compósitos de resina Mater-Bi baseado em (Puglia, Tomassuci, & Kenny, 2003)

	Volume de fibra (%)	Mater-Bi Z		Mater-Bi Y	
		E (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	E (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)
<b>Fibra de Linho</b>	0	131	7.8	1174	26.5
	10	204	8.4	1377	27.4
	20	514	15.5	1731	28.1
	30	584	15.2	2423	29.5
	40	1736	21.0	2473	30.0
<b>Fibra de Vidro</b>	20	415	8.3	2540	28.3
	30	692	7.9	3058	30.0
	40	876	7.8	4314	31.7

Por se apresentarem como materiais bastante competitivos ao nível de densidade, módulo de Young e tensão de rutura, este tipo de matrizes tem vindo cada vez mais a ser estudadas na substituição de materiais fósseis. Os exemplos acima apresentados na tabela 8, possibilitam a comparação da conjugação de uma matriz biodegradável com fibras sintéticas vs fibras naturais.

Visto que o presente trabalho aborda a relação matriz/reforço, na tabela 9 é possível observar resultados experimentais obtidos aquando um estudo elaborado por Lopez (2012) sobre materiais compósitos de fibra de cânhamo e resina Mater-Bi, em que se avalia a influência da percentagem de fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Tabela 9. Tabela baseada em (Lopez, et al., 2012).

Percentagem de fibra de cânhamo	$\sigma_t$ (MPa)	$E_t$ (GPa)	$\epsilon_{max}$ (%)
0%	30.6	2.7	2.85
10%	41.8	4.3	2.25
20%	48.3	5.85	1.73
30%	54.3	7.0	1.34

Embora a literatura demonstre que ainda existe um longo caminho a percorrer no que toca ao estudo e utilização de compósitos naturais, a aplicação e estudo dos mesmos apresentam grandes vantagens para o futuro, dadas a suas características ecológicas e propriedades mecânicas.

Vários autores afirmam que a utilização e exploração destes compósitos naturais em países em desenvolvimento, apresenta uma excelente oportunidade para o desenvolvimento e possível crescimento económico, dada a abundância de matéria-prima nestes países.

Embora o estudo de compósitos naturais criados com fibras naturais e resinas biodegradáveis esteja em processo de desenvolvimento, dado os benefícios que estes materiais apresentam, pode-se afirmar que ainda existe grande espaço para evolução das suas propriedades mecânicas, processos de fabrico e melhoria das suas aplicações.



# 3. Estudo das propriedades do material compósito

## 3.1. Introdução

Neste capítulo serão caracterizadas em primeiro lugar as propriedades mecânicas dos materiais constituintes do compósito em estudo recorrendo a características e a valores encontrados na literatura (Lobo, 2018) e seguidamente elaborados os cálculos das características resultantes da junção dos mesmos.

## 3.2. Materiais a incorporar

### 3.2.1. Tecido Cânhamo

Os valores considerados para as propriedades da fibra de cânhamo são obtidos através de análise da literatura, obtendo a tabela abaixo apresentada:

*Tabela 10. Propriedades da fibra de cânhamo (Lobo, 2018).*

<b>Cânhamo</b>	
Módulo de elasticidade, E (GPa)	9.5
Tensão limite de elasticidade (MPa)	277
Gramagem (Kg/m <sup>2</sup> )	0.23734
Densidade, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1500
Coefficiente de Poisson da fibra, $\nu_f$	0.22

### 3.2.2. Resina Epoxídica

Para o estudo em questão e após pesquisa de literatura foi definido que a matriz polimérica usada seria uma resina epoxídica da Sicomin SR 1500 conjugada com um endurecedor SD 2505, com características descritas na tabela abaixo.

Tabela 11. Propriedades da resina epóxi retiradas de site fabricante (Sicomín, 2017)

<b>Epoxídica</b>	
Módulo de elasticidade, E (GPa)	3.1
Tensão limite de elasticidade (MPa)	77
Coefficiente de Poisson da matriz, $\nu_m$	0.35

Segundo os dados disponibilizados pelo fornecedor, esta resina epoxídica modificada foi formulada para não sofrer cristalização e para possuir uma baixa toxicidade. Este sistema possui excelentes propriedades de degradação, degeneração, bem como excelente aderência a todo o tipo de reforços (vidro, aramida, carbono, poliéster, entre outros) (Sicomín, 2017).

### 3.2.3. Resina Mater-Bi

Tendo em conta os requisitos anteriormente mencionados para a seleção de resina naturais, foi selecionada a Mater-Bi Y, sendo que os valores das propriedades mecânicas estão apresentados na tabela 12, retirados de (Bastioli, 1998). Após uma análise da literatura sobre o tema, podemos afirmar que as resinas tal como a Mater-Bi, à base de amido, quando conjugadas com outros elementos têm valores de coeficiente de Poisson que podem variar de 0.35 – 0.45 (Owen & Koller, 1996). De um ponto de vista analítico serão considerados para efeitos de estudo os valores mais baixos dos intervalos apresentados, visto ser recomendado a utilização de uma resina menos viscosa e com menor ponto de fusão.

Tabela 12. Propriedades da resina Mater-Bi Y (Bastioli, 1998).

<b>Mater-Bi Y</b>	
Módulo de elasticidade, E (GPa)	2.1
Tensão limite de elasticidade (MPa)	25
Coefficiente de Poisson da matriz, $\nu_m$	0.37

### 3.3. Cálculo de propriedades.

A placa laminada em estudo apresenta uma matriz polimérica de resina epoxídica e um reforço de fibras naturais de cânhamo com a orientação  $[0^\circ/90^\circ]_4$ .

Segundo Silva (2014), um material homogêneo equivalente é geralmente assumido como ortotrópico. Para descrever as propriedades mecânicas de um laminado ortotrópico no seu plano, é necessário determinar quatro propriedades de rigidez elástica (constantes elásticas) do mesmo. Essas propriedades mecânicas são o módulo de Young na direção das fibras de reforço ( $E_1$ ), o módulo de Young transversal à fibra de reforço ( $E_2$ ), o módulo de corte no plano ( $G_{12}$ ) e o coeficiente de Poisson no plano ( $\nu_{12}$ ).

Com as características acima mencionadas de ambos os componentes, segundo Reddy (2003), é possível calcular essas propriedades do compósito, conforme se apresenta de seguida.

Começando pelo cálculo da espessura de cada camada ( $t$ ) a partir da espessura do provete ( $h$ ) e o número de camadas ( $N$ ), posteriormente foi calculado o volume de fibra ( $V_f$ ), recorrendo à gramagem de fibra, densidade ( $\rho$ ) e espessura do provete ( $h$ ).

- espessura de cada camada (1) e volume de fibra (2):

$$h = \frac{t}{N} \quad (1)$$

$$h = \frac{\textit{gramagem}}{V_f \times \rho} \quad (2)$$

De seguida recorrendo ao volume de fibra obtido e volume de matriz ( $V_m$ ), bem como ao módulo de elasticidade da fibra ( $E_f$ ) e da matriz ( $E_m$ ), é possível calcular os módulos de elasticidade do compósito quer na direção das fibras ( $E_1$ ) quer transversalmente às mesmas ( $E_2$ ).

- Cálculo do módulo de Young ((3), (4)):

$$E_1 = E_f \times V_f + E_m \times V_m \quad (3)$$

$$E2 = \frac{Ef \times Em}{Ef \times Vm + Vf \times Em} \quad (4)$$

Com os valores anteriores e os coeficientes de Poisson da fibra ( $\nu_f$ ), e da matriz ( $\nu_m$ ), é calculado o coeficiente de Poisson do compósito nos planos 1-2 ( $\nu_{12}$ ) e 2-1 ( $\nu_{21}$ ).

- coeficiente de Poisson ((5), (6)):

$$\nu_{12} = Vf \times \nu_f + Vm \times \nu_m \quad (5)$$

$$\nu_{21} = \frac{E2}{E1} \times \nu_{12} \quad (6)$$

Por fim é efetuado o cálculo para os módulos de corte para a matriz ( $G_m$ ) e para a fibra ( $G_f$ ) e conseqüentemente o módulo de corte ( $G_{12}$ ) do compósito em estudo.

- módulo de corte da matriz (7), módulo de corte da fibra (8) e módulo de corte (9):

$$Gm = \frac{Em}{2 \times (1 + \nu_m)} \quad (7)$$

$$Gf = \frac{Ef}{2 \times (1 + \nu_f)} \quad (8)$$

$$G_{12} = \frac{Gm \times Gf}{Vm \times Gf + Vf \times Gm} \quad (9)$$

### **Compósitos de fibra de cânhamo/ resina epoxídica**

Os resultados para cada propriedade dos compósitos de fibra de cânhamo/resina epoxídica, calculados através das equações 1 - 9, encontram-se na tabela 13.

Tabela 13. Propriedades mecânica do compósito de fibra de cânhamo/ resina epoxídica

Propriedades	
LxH	25x50 mm
t	3 mm
h	0.375 mm
V <sub>f</sub>	42%
E <sub>1</sub>	5.788 GPa
E <sub>2</sub>	4.323 GPa
ν <sub>12</sub>	0.2954
ν <sub>21</sub>	0.22064
G <sub>12</sub>	2.234 GPa

### Compósito de fibra de cânhamo/ resina Mater-Bi

A tabela 14 apresenta os resultados obtidos para cada propriedade do compósito de fibra de cânhamo/resina Mater-bi, calculados recorrendo às equações 1 - 9 anteriormente apresentadas, e tendo igualmente em conta as características dos provetes em estudo apresentadas no início do capítulo.

Tabela 14. Propriedades mecânica do compósito cânhamo/Mater-Bi

Propriedades	
LxH	25x50 mm
t	3 mm
h	0.375 mm
V <sub>f</sub>	42%
E <sub>1</sub>	5.208 GPa
E <sub>2</sub>	3.121 GPa
ν <sub>12</sub>	0.307
ν <sub>21</sub>	0.184
G <sub>12</sub>	1.156 GPa



# 4. Modelação através do método de elementos finitos

No presente capítulo será elaborado um estudo considerando os materiais compósitos constituídos tanto com matriz epoxídica como com matriz Mater-Bi, com o objetivo de testar o comportamento mecânico. Serão apresentadas as características de modelação do compósito, uma breve descrição do programa utilizado, bem como a explicação do código elaborado. Será igualmente efetuada uma análise comparativa bem como um estudo que permite verificar quais as características do material mais influentes.

## 4.1. Metodologia utilizada em ANSYS

A metodologia considerada na utilização do *software* ANSYS, baseou-se no conjunto de etapas que se apresentam na figura 14, e cuja descrição também se refere.

### Passos do código

---

**1º Seleção de Elemento**

**2º Definição das propriedades do material**

**3º Definição da espessura e orientação da fibra de cada camada**

**4º Definição da geometria da placa**

**5º Criação da malha**

**6º Aplicação de constrangimentos**

**7º Imposição da deformação**

**8º Definição de estudo estático linear**

---

*Figura 14. Etapas usadas na elaboração do código*

Inicialmente no programa ANSYS APDL que se elaborou foi selecionado o tipo de elemento a usar na modelação, sendo o shell 181 o escolhido por se basear em elementos com 4 nós,

por se considerar ser o suficiente para a aplicação. Posteriormente define-se as propriedades do material compósito ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$  e  $G_{12}$ ) e relativamente a cada camada ( $k$ ), a espessura e a sua orientação ( $h_k$  e  $\Theta_k$ ).

Numa fase seguinte é definida a geometria final da placa através da indicação das coordenadas de cada ponto da mesma e consequentemente as suas linhas e superfície. Para a criação da malha é definido o número de elementos, em cada linha e coluna.

Na fase final, são estipulados os constrangimentos a que a placa vai ser sujeita. Para efeitos de estudo de uma placa sujeita a um ensaio de tração, considera-se que um dos lados da placa está encastrada e que a deformação será imposta no lado oposto. Por fim impõe-se a deformação a que a placa vai ser sujeita.

## 4.2. Definição das características a aplicar no código

De acordo com a literatura baseada em dados experimentais (Lobo, 2018), obteve-se os seguintes dados (tabela 15) associados ao ponto que caracteriza o limite do domínio plástico, para um compósito de fibra de cânhamo e matriz epoxídica.

*Tabela 15. Tabela com valores de extensão e tensão do compósito cânhamo/epoxídica*

Extensão	Tensão
$\varepsilon = 0.003$	$\sigma = 18 \text{ MPa}$

Recorrendo à Lei de Hooke (10) e após obter a extensão correspondente ao final do domínio elástico do material, é possível obter o valor da deformação correspondente à mesma considerando o valor de  $l_0$  referido anteriormente ( $l_0 = 50 \text{ mm}$ ).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (10)$$

Obtém-se assim um valor de deformação de  $\delta = 0.15$  mm.

Este valor de deformação será considerado no código elaborado para a modelação do compósito em ANSYS e posterior verificação do valor da tensão obtido com soluções da literatura.

### 4.3. Validação

Neste subcapítulo será elaborado um estudo para a validação do código desenvolvido para a modelação. Este estudo consiste na elaboração de uma comparação entre um exemplo elaborado pela University of Connecticut – School of Engineering (Cassenti), baseado num exercício de (Staab, 2015) e o presente trabalho. Estes códigos serão testados no programa ANSYS, tendo por princípio 4 casos de aplicação de força e condições fronteira, sendo ainda considerados diferentes refinamentos de malha (2x2, 10x10, 20x20 e 40x40).

Para a modelação em ANSYS, considera-se uma placa de material compósito “cross-ply”, simétrica que consiste em quatro camadas, 2 finas camadas externas com fibras orientadas ao longo do eixo x e 2 camadas internas mais espessas com fibras orientadas ao longo do eixo y sendo a sequência  $[0/90]_s$  (Cassenti). As propriedades mecânicas do compósito em análise na validação podem ser observadas na tabela 16.

Tabela 16. Propriedades mecânicas do compósito em estudo no exemplo (Cassenti).

Propriedades	
$E_1$	$20 \times 10^6$ psi
$E_2$	$1.3 \times 10^6$ psi
$G_{12}$	$1.03 \times 10^6$ psi
h	12t in
LxH	1x1 in
N	1000 lb/in
t	0.005 in
$V_{12}$	0.3

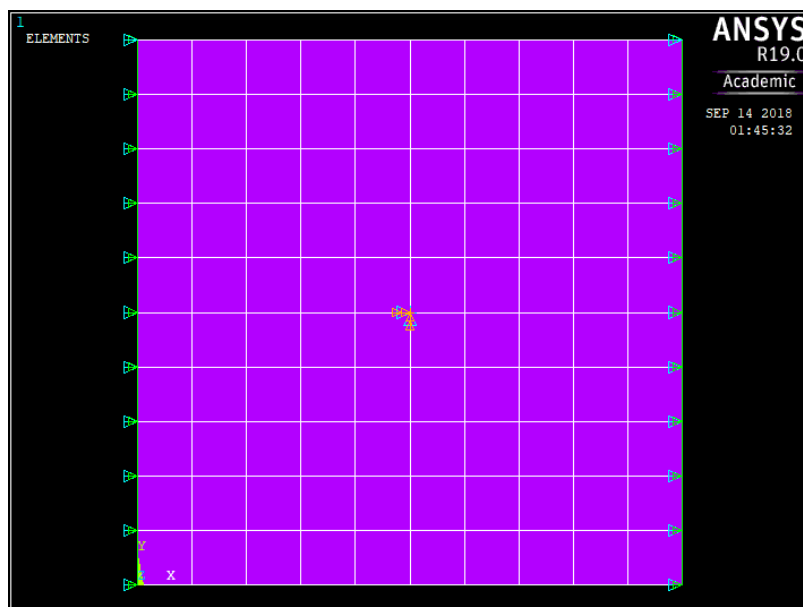
De forma a proceder à validação do código APDL foram usadas unidades do sistema inglês de acordo com a referência (Staab, 2015). Para efeito de validação foram testados 5 casos de estudo que serão analisados nos pontos seguintes, não só ao nível de deformação e tensões, mas também são apresentados valores de erro recorrendo à equação:

$$\text{erro}(\%) = \left| \frac{\text{Valor referência} - \text{Valor estudo}}{\text{Valor de referência.}} \right| \times 100 \quad (11)$$

Nas tabelas 17 – 28 e 30 – 31, podem ser observados os resultados obtidos no ANSYS para efeitos de validação do código do presente estudo usando as características anteriormente definidas, bem como os erros calculados.

### **Caso 1:**

No presente caso foi implementado um código que correspondesse às características e condições fronteira exigidas pelo exemplo escolhido para validação. Como tal foi definido um encastramento no centro da placa e imposta uma força no valor de -1000 lb/in na linha composta pelos nós quando x vale zero e nos nós em x igual à largura da placa como se pode observar na figura 15.



*Figura 15. Imagem da placa para o caso 1.*

Após a modelação foi possível obter valores de deformação e tensões relativas aos estudos dos materiais.

Tabela 17. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 1)

2 x 2			10 x 10			20 x 20			40 x 40			
(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	
1	0,00188	0,001881	0,0532	0,00188	0,001881	0,0532	0,00188	0,001881	0,0532	0,00188	0,001881	0,0532

A tabela 17 indica os valores de deformação sofridos pela placa após ser submetida à força indicada no enunciado. Podemos afirmar que o valor da deformação obtido é de cerca de 0.00188 in, verificando-se que mesmo para a malha menos refinada o resultado já convergiu para a solução de referência.

Tabela 18. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 1).

			2 x 2			10 x 10		
	Tipo	Tensão	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
<b>Centro encastrado, pressão em UX (1)</b>	Nó	X	75591,90	75608,40	0,0218	75591,90	75608,40	0,0218
		Y	1361,16	1361,45	0,0213	1361,16	1361,45	0,0213
	Elemento	Von Mises	74920,60	74937,00	0,0219	74920,60	74937,00	0,0219

Na tabela 18 é possível observar os valores das tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  nos nós, bem como a tensão de Von Mises,  $\sigma_{VM}$ , do elemento verificando-se que os valores são iguais para ambos os refinamentos de malha. Os desvios dos resultados obtidos em relação à referência são muito pequenos, confirmando a validade dos resultados obtidos.

Tabela 19. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 1).

			20 x 20			40 x 40		
	Tipo	Tensão	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
<b>Centro encastrado, pressão em UX (1)</b>	Nó	X	75591,90	75608,40	0,0218	75591,90	75608,40	0,0218
		Y	1361,16	1361,45	0,0213	1361,16	1361,45	0,0213
	Elemento	Von Mises	74920,60	74937,00	0,0219	74920,60	74937,00	0,0219

Na tabela 19 verificam-se valores idênticos à tabela 18, o que evidencia que o refinamento da malha não tem influência nos valores obtidos nas tensões, quer ao nível dos nós, quer ao nível do elemento. Os erros observados voltam a ser erros inferiores a 0.5%.

**Caso 2:**

Neste caso manteve-se o encastramento no centro da placa e a imposição de força no valor de -1000 lb/in na linha composta pelos nós quando y vale zero e nos nós em y igual ao comprimento da placa como demonstrado pela figura 16.

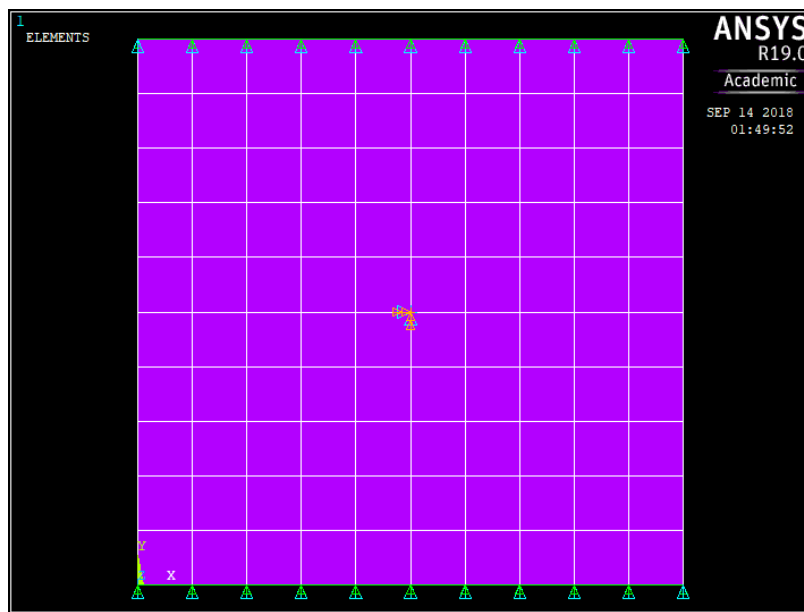


Figura 16. Imagem da placa para o caso 2.

Os valores obtidos são apresentados nas tabelas 20 - 22.

Tabela 20. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 2).

	2 x 2			10 x 10			20 x 20			40 x 40		
	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
2	0,000494	0,000496	0,4049	0,000494	0,000496	0,4049	0,000494	0,000496	0,4049	0,000494	0,000496	0,4049

Na tabela 20 verificamos que o valor da deformação obtido é de cerca de 0.00049 in. De igual modo, este valor é obtido logo para o refinamento de 2x2 elementos, mantendo-se para malhas mais refinadas.

Tabela 21. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 2).

		2 x 2				10 x 10		
Tipo		Tensão	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
Centro encastrado, pressão em UY (2)	Nó	X	-1361,16	-1367,53	0,4680	-1361,16	-1367,53	0,4680
		Y	1251,87	1257,73	0,4681	1251,87	1257,73	0,4681
	Elemento	Von Mises	2263,61	2274,20	0,4678	2263,61	2274,20	0,4678

Na tabela 21 é possível observar os valores das tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  nos nós, bem como a  $\sigma_{VM}$  do elemento mantendo-se a tendência observada para a deformação no que diz respeito ao refinamento de malha. Os valores de erro são inferiores a 0.5%.

Tabela 22. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 2).

		20 x 20				40 x 40		
Tipo		Tensão	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
Centro encastrado, pressão em UY (2)	Nó	X	-1361,16	-1367,53	0,4680	-1361,16	-1367,53	0,4680
		Y	1251,87	1257,73	0,4681	1251,87	1257,73	0,4681
	Elemento	Von Mises	2263,61	2274,2	0,4678	2263,61	2274,20	0,4678

Na tabela 22 verificam-se valores idênticos à tabela 21, reforçando a conclusão de que o refinamento da malha não influencia os valores obtidos nas tensões tanto nos nós como no elemento. Os erros observados voltam a ser erros inferiores a 0.5%.

### Caso 3:

No caso 3 as condições fronteira consideradas correspondem a considerar que um bordo da placa se encontra encastrado e o bordo oposto está submetido a uma força de 1000 lb/in nos nós correspondentes a y igual ao comprimento da aresta da placa, como apresentado na figura 17.

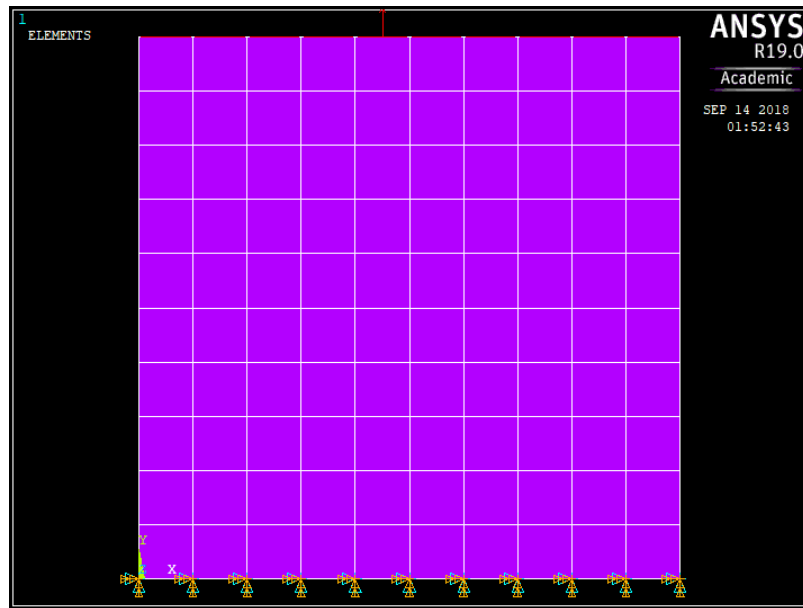


Figura 17. Imagem da placa para o caso 3.

Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 23 - 25.

Tabela 23. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 3).

3	2 x 2			10 x 10			20 x 20			40 x 40		
	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
	0,001044	0,001045	0,0958	0,000985	0,000986	0,1015	0,000985	0,000985	0,0000	0,000985	0,000986	0,1015

Na tabela 23 verifica-se que para a malha 2x2 se obtiveram valores de deformação superiores aos das restantes malhas. Enquanto que os valores obtidos para os dois códigos apresentam entre si erros que variam de 0,09% a 0,1% nas diferentes malhas, verifica-se que a convergência se dá a partir da malha 10x10

Tabela 24. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 3).

		2 x 2						10 x 10						
		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		
Tipo	Tensão	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
X=0 encastrado, pressão em UY (3)	Nó	X	-1405,52	-1182,64	-1405,52	-1182,64	0,0000	0,0000	-1406,15	48,60	-1406,15	48,60	0,0000	0,0000
		Y	1251,08	1255,09	1251,08	1255,09	0,0000	0,0000	1249,37	1283,30	1249,37	1283,30	0,0000	0,0000
	Elemento	Von Mises	2111,64	2302,01	2111,64	2302,01	0,0000	0,0000	1249,22	2302,54	1249,22	2302,54	0,0000	0,0000

Tabela 25. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso3).

		20 x 20						40 x 40						
		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		
Tipo	Tensão	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
X=0 encastrado, pressão em UY (3)	Nó	X	-1410,98	208,92	-1410,98	208,92	0,0000	0,0000	-1414,24	295,21	-1414,24	295,21	0,0000	0,0000
		Y	1247,88	1303,47	1247,88	1303,47	0,0000	0,0000	1246,18	1332,69	1246,18	1332,69	0,0000	0,0000
	Elemento	Von Mises	1184,22	2306,72	1184,22	2306,72	0,0000	0,0000	1156,89	2309,54	1156,89	2309,54	0,0000	0,0000

Na tabela 24, observam-se valores de  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_{max}$ , que são os valores limites de cada tensão resultante da modelação do caso descrito, valores esses que variam desde valores negativos ( $\sigma_y$ ) a valores positivos ( $\sigma_x$ ), a percentagem de erro é de 0% para todos os valores obtidos nas diferentes malhas.

A tabela 25 demonstra percentagem de erro de 0% para todos os valores obtidos nas diferentes malhas. Tal como na tabela 24, observam-se valores de  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_{max}$ , no entanto verifica-se que à medida que se refina a malha o valor de  $\sigma_{max}$  na tensão  $\sigma_x$  passa a demonstrar valores positivos, embora inferiores aos de  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$ .

#### **Caso 4:**

O presente caso é elaborado tendo em conta as condições fronteira similares a um ensaio de tração, considerando que neste caso uma ponta do provete estará encastrada e a outra submetida a uma deformação nos nós correspondentes a  $y$  igual a comprimento do provete simulando a deformação do provete. Os valores usados de deformação imposta serão os obtidos no caso n°3.

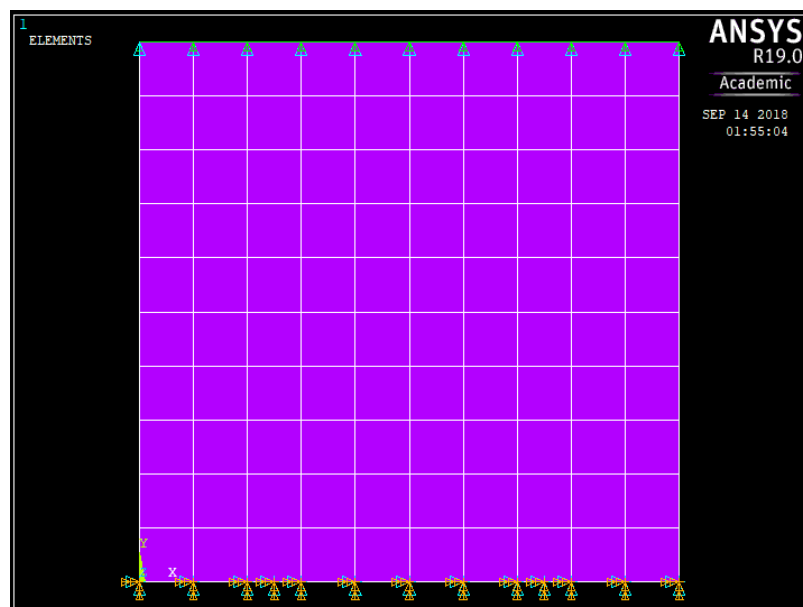


Figura 18. Imagem da placa para o caso 4.

A deformação e valores de tensões do presente caso são demonstrados nas tabelas 26 - 28.

Tabela 26. Resultados da modelação em ANSYS – deformação (caso 4).

4	2 x 2			10 x 10			20 x 20			40 x 40		
	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)	(Cassenti)	Presente Estudo	Erro (%)
	0,001045	0,001045	0,0000	0,000986	0,000986	0,0000	0,000986	0,000986	0,0000	0,000985	0,000986	0,1015

A tabela 26 apresenta valores idênticos à tabela 23, visto na simulação os valores da tabela 23 serem os usados na modelação do caso 4, no entanto nesta tabela apenas na malha de 40x40 os valores apresentam percentagem de erro de aproximadamente 0,1%.

Tabela 27. Resultados da modelação em ANSYS malha 2x2 e malha 10x10 (caso 4).

		2 x 2						10 x 10						
		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		
Tipo	Tensão	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
X=0 encastrado, deformação em UY (4)	Nó	X	-1642,65	-839,46	-1642,65	-839,46	0,0000	0,0000	-1376,68	46,89	-1376,68	46,89	0,0000	0,0000
		Y	1325,77	1340,23	1325,77	1340,23	0,0000	0,0000	1250,67	1284,97	1250,67	1284,97	0,0000	0,0000
	Elemento	Von Mises	1905,73	2576,66	1905,73	2576,66	0,0000	0,0000	1253,10	2290,07	1253,10	2290,07	0,0000	0,0000

Tabela 28. Resultados da modelação em ANSYS malha 20x20 e malha 40x40 (caso 4)

		20 x 20						40 x 40						
		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		(Cassenti)		Presente Estudo		Erro (%)		
Tipo	Tensão	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
X=0 encastrado, deformação em UY (4)	Nó	X	-1375,70	208,33	-1375,70	208,33	0,0000	0,0000	-1375,48	295,34	-1375,48	295,34	0,0000	0,0000
		Y	1249,11	1305,12	1249,11	1305,12	0,0000	0,0000	1247,42	1334,42	1247,42	1334,42	0,0000	0,0000
	Elemento	Von Mises	1187,51	2284,69	1187,51	2284,69	0,0000	0,0000	1159,9	2309,74	1159,9	2309,74	0,0000	0,0000

A tabela 27 demonstra percentagem de erro de 0% para todos os valores obtidos nas diferentes malhas. Na presente tabela verifica-se, mais uma vez, a tendência ao nível de valores de  $\sigma_{min}$  e  $\sigma_{max}$  da tensão  $\sigma_x$ , observável nas tabelas 24 e 25, apresentando valores negativos para  $\sigma_{min}$  e valores que aumentam de negativos para positivos para  $\sigma_{max}$ .

A tabela 28 demonstra percentagem de erro de 0% para todos os valores obtidos nas diferentes malhas. Os valores de todas as tensões ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{VM}$ ) são semelhantes aos obtidos no caso 3.

Podemos, então, concluir dos casos anteriormente apresentados que, quando comparados os resultados obtidos através da modelação, verifica-se que os valores obtidos nos dois códigos são semelhantes, sendo que no caso 1 e 2 apresentam-se erros menores que 0.5%, e nos casos 3 e 4, os erros são de 0%, pelo que se pode considerar que estes valores embora muito relevantes para o estudo, apresentam valores baixos, o que não impossibilita a validação do código. Podemos igualmente afirmar que dados os valores semelhantes dos casos, o código desenvolvido para o presente estudo é viável e dá-se como validado.

O código para a modelação em ANSYS do presente estudo, bem como as imagens relativas aos casos 1 e 4, podem ser consultadas nos ANEXO A e B.

### **Caso 5:**

Neste caso considera-se um caso mais simples: o de uma barra de aço solicitada axialmente. As propriedades do aço em estudo encontram-se explicitadas na tabela 29.

*Tabela 29. Tabela das propriedades do Aço*

<b>Propriedades</b>	
E	200 GPa
t	0.01 m
LxH	1x0.1 m
N	4448x0.01
v	0.3

Sendo que o objetivo do caso cinco é uma validação recorrendo a outro exemplo, designadamente a relação entre a variação de comprimento de um componente solicitado axialmente, recorrendo à Força axial (N), comprimento final (l), a área (A) e ao Módulo de Elasticidade (E):

$$\Delta l = \frac{Nl}{AE} \quad (12)$$

O valor obtido para a deformação, ou seja  $\Delta l$ , é de 0,000002224m.

Através da modelação em ANSYS APDL foi possível obter a seguinte tabela de resultados.

Tabela 30. Resultados para o caso 5.

Deformação		(Cassenti)	Presente Estudo		Erro (%)			
		0,00000222	0,00000222		0,0000			
Tipo	Tensão	10 x 10						
		$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	
<b>X=0 encastrado, pressão em UY</b>	Nó	X	-6347,31	39750,30	-6347,31	39750,30	0,0000	0,0000
		Y	439337,00	450257,00	439337,00	450257,00	0,0000	0,0000
	Elemento	Von Mises	424036,00	462246,00	424036,00	462246,00	0,0000	0,0000

Na tabela 30 verifica-se que existe conformidade entre o valor de deformação analítico e o valor retirado do ANSYS, o que valida mais uma vez o código do presente estudo. No ANEXO A é possível observar as imagens da modelação em ANSYS referentes a este caso (caso 5).

#### 4.4. Compósito cânhamo/ resina epoxídica

Para a elaboração da modelação do compósito foi considerado no estudo um provete com um comprimento de 50 mm, uma largura de 25 mm e uma espessura de provete de 3 mm. O provete é constituído por 8 camadas com orientação  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_4$  (Lobo, 2018). Na figura 19 é

possível observar o provete em estudo bem como as cargas e constrangimentos que serão consideradas para realizar o presente estudo.

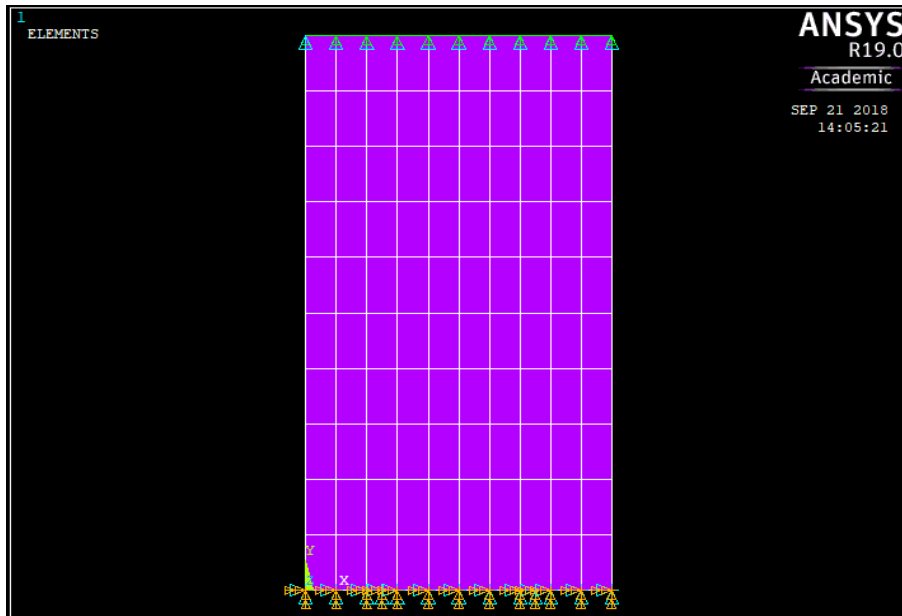


Figura 19. Imagem do provete com aplicação de constrangimentos e cargas.

#### 4.4.1. Influência da variação do volume de fibra

Para analisar a influência que o volume de fibra tem nas propriedades mecânicas no comportamento do provete, foi elaborado um estudo recorrendo aos softwares EXCEL e ANSYS APDL.

O estudo foi elaborado com o código anteriormente referido no subcapítulo 4.2, recorrendo a uma malha de 10x10 e um empilhamento de  $[0^\circ]_8$  como comparação ao empilhamento  $[0^\circ/90^\circ]_4$ . A variação das características avaliadas neste caso da fração de volume foi obtida considerando o intervalo de [35% - 55%] de percentagem de fibra no compósito. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 31.

Tabela 31. Tabela dos resultados de variação de volume de fibra

Volume de fibra (%)	Volume de resina (%)	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$G_{12}$ (GPa)	Tensão Von Mises (MPa) $[0^\circ/90^\circ]_4$	Tensão Von Mises (MPa) $[0^\circ]_8$	
0,35	35	0,65	5,340	4,056	0,3045	0,2313	2,047	17,4	17,3
0,40	40	0,60	5,660	4,244	0,2980	0,2234	2,180	18,4	18,3
0,42	42	0,58	5,788	4,323	0,2954	0,2206	2,234	18,8	18,7
0,45	45	0,55	5,980	4,449	0,2915	0,2169	2,315	19,4	19,3
0,50	50	0,50	6,300	4,675	0,2850	0,2115	2,451	20,4	20,3
0,55	55	0,45	6,620	4,925	0,2785	0,2072	2,589	21,5	21,3

No gráfico da figura 20 é possível observar a comparação entre os valores obtidos para a tensão de Von Mises nos dois empilhamentos.

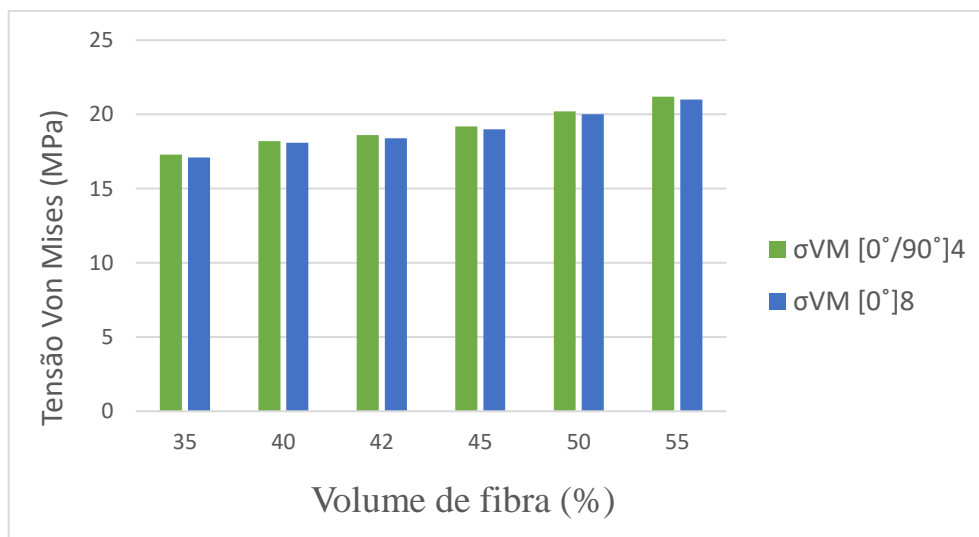


Figura 20. Gráfico de comparação da Tensão de Von Mises

Analisando a tabela 31 e figura 20, pode-se afirmar que embora o empilhamento do compósito afete o resultado da tensão, os valores da diferença são bastante baixos tornando-se pouco relevantes. Também se verifica que à medida que a percentagem do volume de

fibra aumenta, a Tensão de Von Mises aumenta. Este resultado é o esperado face à evolução das propriedades materiais.

#### 4.4.2. Influência da variação de propriedades materiais

Para analisar a influência que cada propriedade definida no subcapítulo 3.3.1 tem na tensão de Von Mises do provete, foi elaborado um estudo para o efeito. O estudo consiste na variação de +/- 2% no valor de cada propriedade. Os resultados da modelação bem como as percentagens calculadas através da equação 11, podem ser consultados nas tabelas 32 – 39.

Tabela 32. Tabela de valores para  $E_1$ .

Volume de fibra (%)	(%)	E1	E1 - 2%	E1 + 2%
0,35	35	5,340	5,233	5,767
0,40	40	5,660	5,547	6,113
0,42	42	5,788	5,672	6,251
0,45	45	5,980	5,860	6,458
0,50	50	6,300	6,174	6,804
0,55	55	6,620	6,488	7,150

Tabela 33. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $E_1$ .

(%)	$\sigma_x E_1 (+2\%)$	$\sigma_y E_1 (+2\%)$	$\sigma_{VM} E_1 (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x E_1 (-2\%)$	$\sigma_y E_1 (-2\%)$	$\sigma_{VM} E_1 (-2\%)$
35	2,80 (0,72%)	18,1 (2,26%)	17,5 (1,16%)	2,78	17,7	17,3	2,77 (0,36%)	17,4 (1,69%)	16,8 (2,89%)
40	2,87 (0,35%)	19,1 (2,14%)	18,5 (1,65%)	2,86	18,7	18,2	2,84 (0,70%)	18,4 (1,60%)	17,8 (2,20%)
42	2,90 (0,35%)	19,5 (1,56%)	18,9 (1,61%)	2,89	19,2	18,6	2,87 (0,69%)	18,8 (2,08%)	18,2 (2,15%)
45	2,95 (0,34%)	20,2 (2,02%)	19,5 (1,56%)	2,94	19,8	19,2	2,92 (0,68%)	19,4 (2,02%)	18,8 (2,08%)
50	3,04 (0,66%)	21,2 (1,92%)	20,6 (1,98%)	3,02	20,8	20,2	3,00 (0,66%)	20,4 (1,92%)	19,8 (1,98%)
55	3,12 (0,32%)	22,3 (2,29%)	21,6 (1,89%)	3,11	21,8	21,2	3,09 (0,64%)	21,4 (1,83%)	20,7 (2,36%)

Na tabela 32 observam-se os valores de  $E_1$ ,  $E_1 + 2\%$  e  $E_1 - 2\%$  e na tabela 33 observam-se os valores obtidos através da modelação com a variação de  $E_1$  em  $\pm 2\%$ . Conforme se conclui, quando a variação é de  $+2\%$  verifica-se maior alteração, nas três tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$ , enquanto nos valores obtidos para  $-2\%$  verifica-se variação, mas a mesma é menor.

Tabela 34. Tabela de valores de  $E_2$ .

Volume de fibra (%)	E2	E2 - 2%	E2 + 2%	
0,35	35	4,056	3,975	4,138
0,40	40	4,244	4,159	4,328
0,42	42	4,323	4,237	4,410
0,45	45	4,449	4,360	4,538
0,50	50	4,675	4,581	4,768
0,55	55	4,925	4,826	5,023

Tabela 35. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $E_2$ .

(%)	$\sigma_x E_2 (+2\%)$	$\sigma_y E_2 (+2\%)$	$\sigma_{VM} E_2 (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x E_2 (-2\%)$	$\sigma_y E_2 (-2\%)$	$\sigma_{VM} E_2 (-2\%)$
35	2,82 (1,44%)	17,7 (0%)	17,1 (1,16%)	2,78	17,7	17,3	2,75 (1,08%)	17,7 (0%)	17,2 (0,58%)
40	2,89 (1,05%)	18,7 (0%)	18,1 (0,55%)	2,86	18,7	18,2	2,82 (1,40%)	18,8 (0,53%)	18,2 (0%)
42	2,93 (1,38%)	19,1 (0,52%)	18,5 (0,54%)	2,89	19,2	18,6	2,85 (1,38%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)
45	2,97 (1,02%)	19,8 (0%)	19,1 (0,52%)	2,94	19,8	19,2	2,90 (1,36%)	19,8 (0%)	19,2 (0%)
50	3,06 (1,32%)	20,8 (0%)	20,2 (0%)	3,02	20,8	20,2	2,98 (1,32%)	20,8 (0%)	20,2 (0%)
55	3,15 (1,29%)	21,8 (0%)	21,2 (0%)	3,11	21,8	21,2	3,07 (1,29%)	21,8 (0%)	21,2 (0%)

Na tabela 34 observam-se os valores de  $E_2$ ,  $E_2 \pm 2\%$ , e na tabela 35 são apresentados os valores da variação de  $E_2$  em  $\pm 2\%$ . Conforme se observa há variação de valores no caso da tensão  $\sigma_x$ , embora não seja uma diferença tão grande como no caso de  $E_1$ . Nas tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$  a variação não é significativa, sendo os valores muito semelhantes ao valor de referência.

Tabela 36. Tabela de valores de  $v_{12}$ .

<i>v</i> olume de fibra (%)	$v_{12}$	$v_{12} - 2\%$	$v_{12} + 2\%$
0,35	35	0,3045	0,3106
0,40	40	0,2980	0,3040
0,42	42	0,2954	0,3013
0,45	45	0,2915	0,2973
0,50	50	0,2850	0,2907
0,55	55	0,2785	0,2841

Tabela 37. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $v_{12}$ .

(%)	$\sigma_x v_{12} (+2\%)$	$\sigma_y v_{12} (+2\%)$	$\sigma_{VM} v_{12} (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x v_{12} (-2\%)$	$\sigma_y v_{12} (-2\%)$	$\sigma_{VM} v_{12} (-2\%)$
35	2,84 (2,16%)	17,7 (0%)	17,2 (0,58%)	2,78	17,7	17,3	2,72 (2,16%)	17,7 (0%)	17,1 (1,16%)
40	2,92 (2,10%)	18,8 (0,53%)	18,2 (0%)	2,86	18,7	18,2	2,8 (2,10%)	18,7 (0%)	18,1 (0,55%)
42	2,95 (2,08%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)	2,89	19,2	18,6	2,83 (2,08%)	19,1 (0,52%)	18,5 (0,54%)
45	3,00 (2,04%)	19,8 (0%)	19,2 (0%)	2,94	19,8	19,2	2,88 (2,04%)	19,7 (0,51%)	19,1 (0,52%)
50	3,08 (1,99%)	20,8 (0%)	20,2 (0%)	3,02	20,8	20,2	2,96 (1,99%)	20,8 (0%)	20,1 (0,50%)
55	3,17 (1,93%)	21,9 (0,46%)	21,2 (0%)	3,11	21,8	21,2	3,05 (1,93%)	21,8 (0%)	21,2 (0%)

Na tabela 36 observam-se os valores de  $v_{12}$ ,  $v_{12} +/-2\%$ . Na tabela 37 apresentam-se os resultados decorrentes da variação de  $v_{12}$  em  $+/-2$ . Observa-se a variação de muitos dos valores, mas tal como na tabela 33, os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$  não variam significativamente, a variação no caso de  $\sigma_x$  é mais significativa.

Tabela 38. Tabela de valores de  $G_{12}$ .

<i>volume de fibra</i>	(%)	$G_{12}$	$G_{12} - 2\%$	$G_{12} + 2\%$
0,35	35	1,5243	1,4938	1,5548
0,40	40	1,5992	1,5672	1,6312
0,42	42	1,6312	1,5986	1,6639
0,45	45	1,6818	1,6481	1,7154
0,50	50	1,7733	1,7379	1,8088
0,55	55	1,8755	1,8380	1,9130

Tabela 39. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $G_{12}$ .

(%)	$\sigma_x G_{12} (+2\%)$	$\sigma_y G_{12} (+2\%)$	$\sigma_{VM} G_{12} (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x G_{12} (-2\%)$	$\sigma_y G_{12} (-2\%)$	$\sigma_{VM} G_{12} (-2\%)$
35	2,79 (0,36%)	17,7 (0%)	17,2 (0,58%)	2,78	17,7	17,3	2,77 (0,36%)	17,7 (0%)	17,1 (1,16%)
40	2,86 (0%)	18,8 (0,53%)	18,2 (0%)	2,86	18,7	18,2	2,85 (0,35%)	18,7 (0%)	18,1 (0,55%)
42	2,89 (0%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)	2,89	19,2	18,6	2,88 (0,35%)	19,1 (0,52%)	18,5 (0,54%)
45	2,94 (0%)	19,8 (0%)	19,2 (0%)	2,94	19,8	19,2	2,93 (0,34%)	19,8 (0%)	19,1 (0,52%)
50	3,03 (0,33%)	20,8 (0%)	20,2 (0%)	3,02	20,8	20,2	3,01 (0,33%)	20,8 (0%)	20,1 (0,50%)
55	3,12 (0,32%)	21,8 (0%)	21,2 (0%)	3,11	21,8	21,2	3,10 (0,32%)	21,8 (0%)	21,2 (0%)

Na tabela 38 observam-se os valores de  $G_{12}$ ,  $G_{12} +/-2\%$ . Na tabela 39, observam-se os valores obtidos através da variação de  $G_{12}$  em  $+/-2\%$ . Na tabela, a variação de valores é pequena, o que possibilita a conclusão de que esta propriedade não é a mais influente para o comportamento do material.

Nas tabelas acima apresentadas, podemos observar que os valores obtidos diferem dos valores obtidos inicialmente especialmente para a tensão  $\sigma_x$ . No entanto, podemos concluir que a propriedade que mais influencia os resultados é o módulo de elasticidade do compósito na direção das fibras de reforço ( $E_1$ ), verificando-se de forma mais visível um aumento e diminuição de valores das tensões quando se varia a propriedade em  $+/- 2\%$ , respetivamente.

Os gráficos abaixo apresentados demonstram a variação das três tensões retiradas através da modelação de ANSYS APDL, com o intuito de visualizar qual a propriedade que apresenta uma maior influência nos valores das tensões.

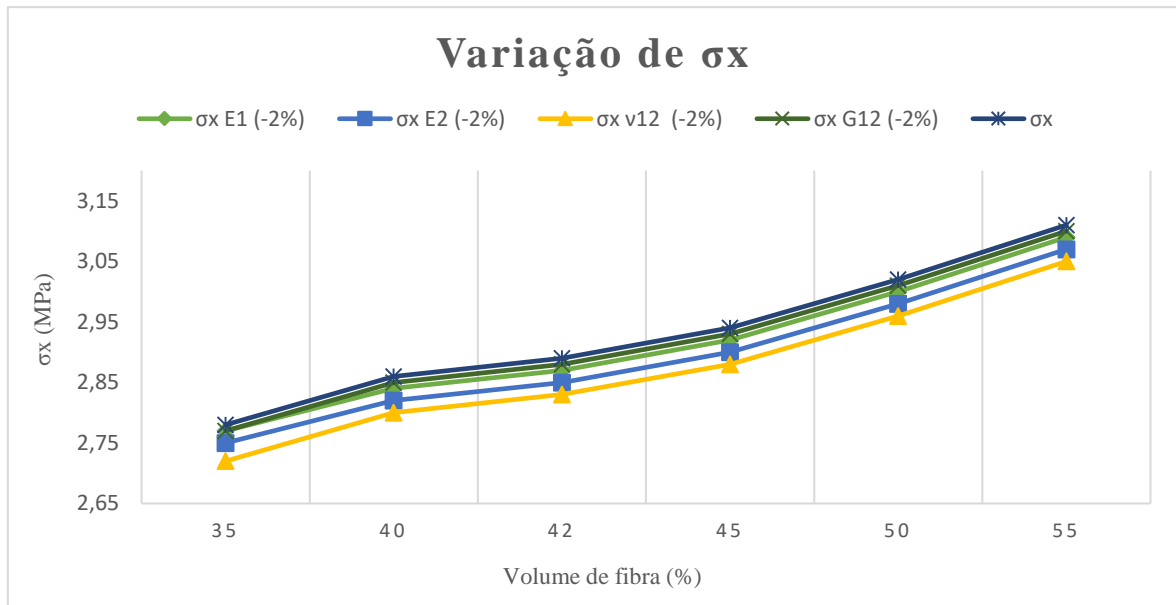


Figura 21. Gráfico de variação de  $\sigma_x$  para -2%.

O gráfico da figura 21 apresenta uma tendência ascendente em todas as rectas. Apesar da sobreposição é possível concluir que a maior influência é no coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) onde o valor é mais baixo que as restantes.

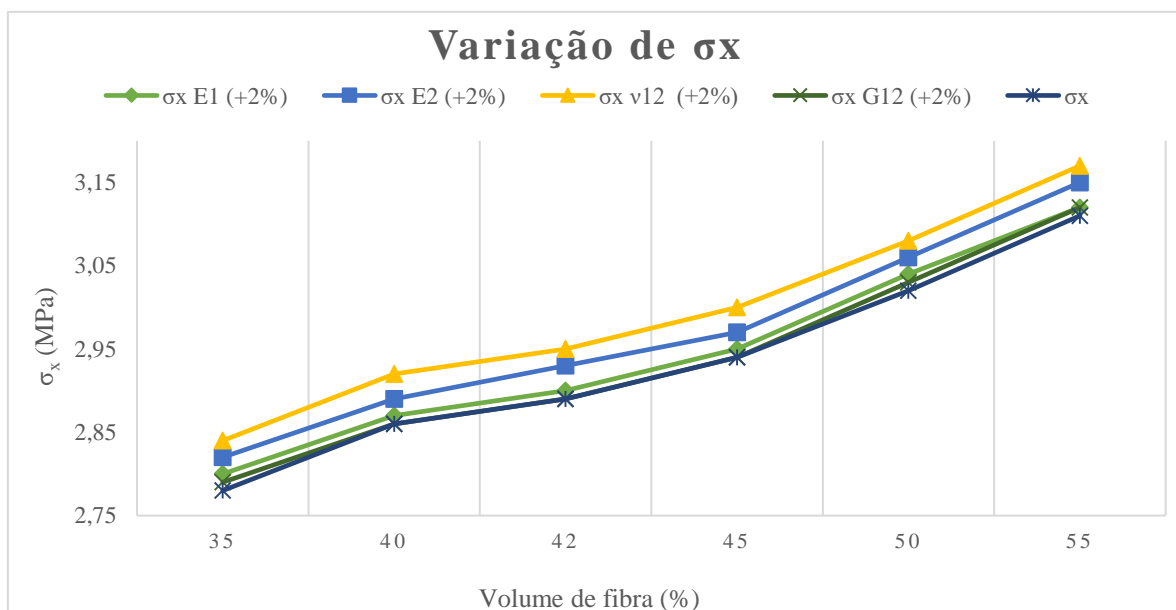


Figura 22. Gráfico de variação de  $\sigma_x$  para +2%.

Na figura 22 podemos observar a mesma tendência relativamente à influência no coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) onde o valor é mais alto que as restantes.

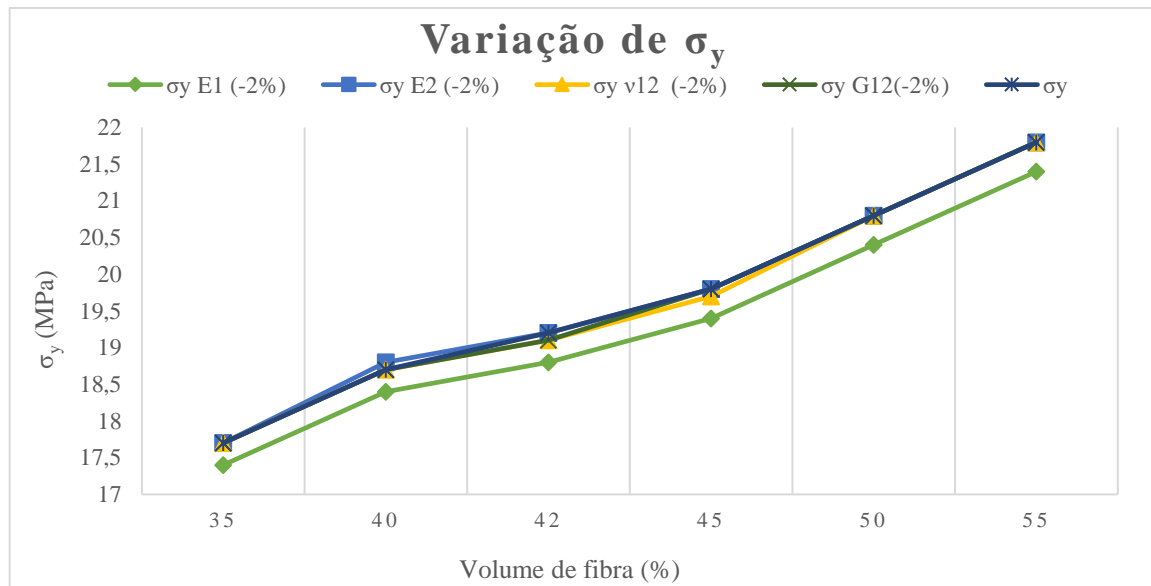


Figura 23. Gráfico de variação de  $\sigma_y$  para -2%.

No gráfico da figura 23, acima apresentada, as rectas encontram-se bastante sobrepostas, no entanto podemos concluir que tanto  $E_2$  como  $\nu_{12}$  e  $G_{12}$  apresentam valores quase idênticos quanto aos valores de  $\sigma_y$  na variação de -2%, nos diferentes volumes de fibra. No entanto, a recta de  $E_1$  é a que apresenta valores mais distantes, ou seja, apresenta os valores mais baixos.

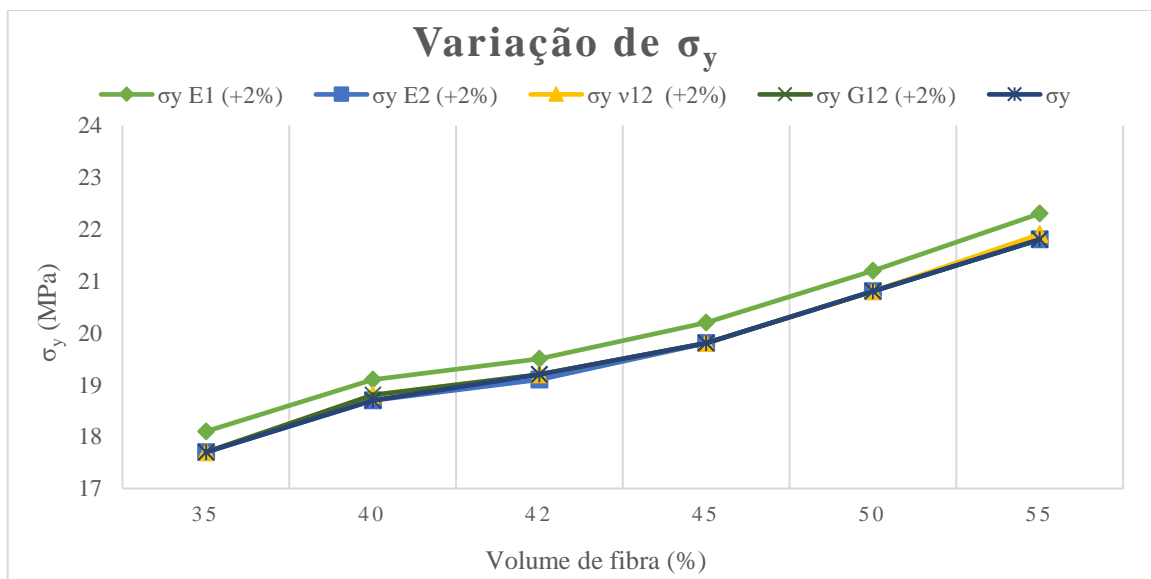


Figura 24. Gráfico de variação de  $\sigma_y$  para +2%.

Na figura 24 volta-se a verificar a sobreposição das rectas ( $E_2$ ,  $\nu_{12}$  e  $G_{12}$ ), no entanto observando o gráfico dos valores para uma variação de +2% da  $\sigma_y$ , verificamos que a única propriedade que se destaca, visto apresentar os valores mais altos é  $E_1$ .

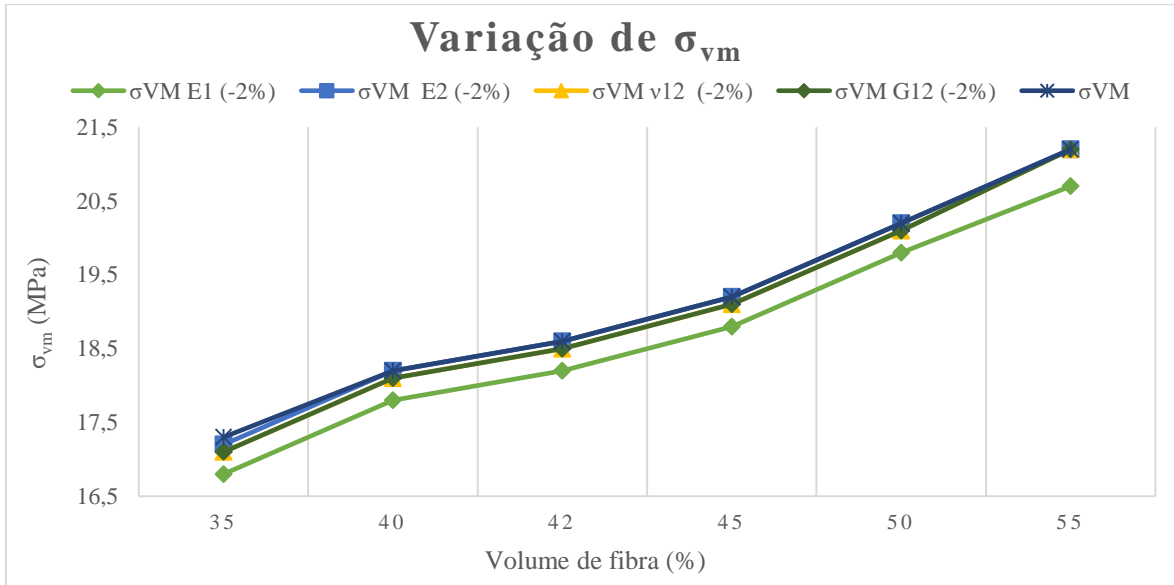


Figura 25. Gráfico de variação de  $\sigma_{vm}$  para -2%.

Na figura 25 volta-se a verificar o destaque da recta correspondente a  $E_1$  e uma grande sobreposição das restante rectas, sendo que esta recta apresenta novamente os valores mais baixos para a variação -2%, comparativamente com as outras.

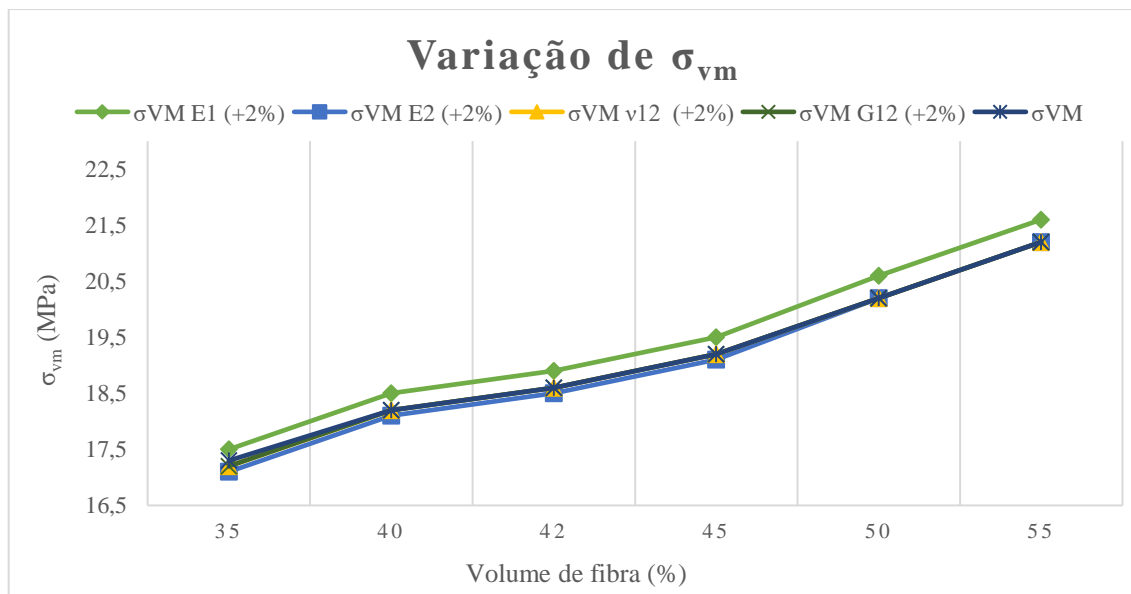


Figura 26. Gráfico de variação de  $\sigma_{vm}$  para +2%.

Na figura 26 verifica-se valores iguais aos originais, no entanto a recta representativa de  $E_1$  volta a destacar-se e a apresentar valores acima das restante para a variação +2%.

Após análise dos gráficos anteriormente apresentados, e embora exista grande sobreposição entre as algumas das rectas e no caso de  $\sigma_x$  se verificar maior influência no coeficiente de poisson ( $\nu_{12}$ ), é possível concluir que a propriedade que se destaca e que apresenta uma maior variação na maioria dos gráficos é o módulo de elasticidade  $E_1$ .

## 4.5. Compósito cânhamo/resina Mater-Bi

### 4.5.1. Influência da variação do volume de fibra

Um novo estudo de influência para a variação do volume de fibra foi elaborado para o caso resina Mater-Bi/fibra de cânhamo, recorrendo aos softwares EXCEL e ANSYS APDL.

O estudo foi elaborado com o código anteriormente explicado no subcapítulo 4.2, recorrendo a uma malha de 10x10 e considerando um empilhamento a  $[0^\circ/90^\circ]_4$  e a  $[0^\circ]_8$ . A variação foi obtida considerando um intervalo de [35% - 55%]. No gráfico da figura 27, bem como na tabela 40 é possível observar a comparação entres os valores obtidos para a tensão de Von Mises nos diferentes empilhamentos.

Tabela 40. Tabela dos resultados de variação de volume de fibra.

Volume de fibra	(%)	Volume de resina	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$G_{12}$ (GPa)	Tensão Von Mises (MPa) $[0^\circ/90^\circ]_4$	Tensão Von Mises (MPa) $[0^\circ]_8$
0,35	35	0,65	4,690	2,887	0,3175	0,1955	1,0661	15,1	14,9
0,40	40	0,60	5,060	3,050	0,3100	0,1869	1,1292	16,2	16,1
0,42	42	0,58	5,208	3,121	0,3070	0,1840	1,1566	16,7	16,5
0,45	45	0,55	5,430	3,233	0,3025	0,1801	1,2002	17,4	17,4
0,50	50	0,50	5,800	3,440	0,2950	0,1749	1,2807	18,6	18,4
0,55	55	0,45	6,170	3,674	0,2875	0,1712	1,3729	19,8	19,5

Na tabela 40 estão descritos os valores obtidos através da modelação do compósito de fibra de cânhamo/Mater-Bi. Podemos observar que à exceção dos coeficientes de Poisson, todos os valores das propriedades aumentam com o aumento do volume de fibra, e que para o

empilhamento  $[0^\circ/90^\circ]_4$  a tensão de Von Mises apresenta valores mais altos do que para o empilhamento  $[0^\circ]_8$ .

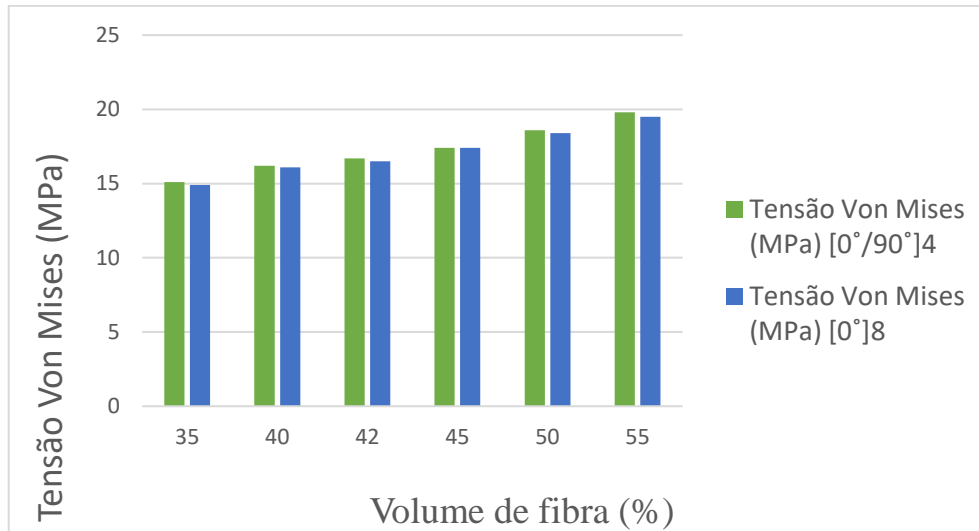


Figura 27. Gráfico de comparação da Tensão de Von Mises

Como podemos observar na figura 27 e tabela 40, à medida que a percentagem do volume de fibra aumenta, à semelhança do caso anterior, a Tensão de Von Mises também aumenta. No caso da resina epoxídica/fibra de cânhamo, verificava-se para o empilhamento  $[0^\circ/90^\circ]_4$  valores de tensão mais elevado o que também se verifica, como é possível observar pelo gráfico acima exposto, no compósito Mater-Bi/fibra de cânhamo obtém-se valores mais elevados para o empilhamento  $[0^\circ/90^\circ]_4$ . No entanto os valores do primeiro material compósito são mais elevados que os do segundo material.

#### 4.5.2. Influência das propriedades

Tal como anteriormente, para analisar a influência que cada propriedade material tem nas tensões  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$  do provete, foi elaborado um estudo considerando a variação de +/- 2% no valor de cada propriedade e devido cálculo do desvio. Os resultados podem ser observados nas tabelas 41 – 48.

Tabela 41. Tabela de valores de  $E_1$ .

Volume de fibra (%)	E1	E1 - 2%	E1 + 2%	
0,35	35	4,690	4,596	4,784
0,40	40	5,060	4,959	5,161
0,42	42	5,208	5,104	5,312
0,45	45	5,430	5,321	5,539
0,50	50	5,800	5,684	5,916
0,55	55	6,170	6,047	6,293

Tabela 42. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $E_1$ .

(%)	$\sigma_x E_1(+2\%)$	$\sigma_y E_1(+2\%)$	$\sigma_{VM} E_1(+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x E_1(-2\%)$	$\sigma_y E_1(-2\%)$	$\sigma_{VM} E_1(-2\%)$
35	2,18 (0,46%)	15,9 (1,92%)	15,4 (1,99%)	2,17	15,6	15,1	2,16 (0,46%)	15,3 (1,92%)	14,8 (1,99%)
40	2,26 (0,44%)	17,1 (1,79%)	16,6 (2,47%)	2,25	16,8	16,2	2,24 (0,44%)	16,5 (1,79%)	15,9 (1,85%)
42	2,30 (0,44%)	17,6 (1,73%)	17,0 (1,80%)	2,29	17,3	16,7	2,28 (0,44%)	16,9 (2,31%)	16,4 (1,80%)
45	2,35 (0,43%)	18,3 (1,67%)	17,8 (2,30%)	2,34	18,0	17,4	2,33 (0,43%)	17,6 (2,22%)	17,1 (1,72%)
50	2,44 (0,41%)	19,6 (2,08%)	19,0 (2,15%)	2,43	19,2	18,6	2,42 (0,41%)	18,8 (2,08%)	18,2 (2,15%)
55	2,53 (0,40%)	20,8 (1,96%)	20,2 (2,02%)	2,52	20,4	19,8	2,51 (0,40%)	20,0 (1,96%)	19,4 (2,02%)

Na tabela 41 observam-se os valores de  $E_1$ ,  $E_1 \pm 2\%$ . Na tabela 42 observam-se os valores resultantes variação de  $E_1$  em  $\pm 2\%$ . Na tabela é visível a variação de valores, mas a variação é mínima no caso de  $\sigma_x$ , enquanto que para  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$  os valores diferem, especialmente no caso de  $\sigma_{VM}$  onde se verifica a maior variação.

Tabela 43. Tabela de valores de  $E_2$ .

Volume de fibra (%)	E2	E2 - 2%	E2 + 2%	
0,35	35	2,887	2,829	2,945
0,40	40	3,050	2,989	3,111
0,42	42	3,121	3,059	3,184
0,45	45	3,233	3,169	3,298
0,50	50	3,440	3,371	3,508
0,55	55	3,674	3,601	3,748

Tabela 44. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de E<sub>2</sub>.

(%)	$\sigma_x E_2 (+2\%)$	$\sigma_y E_2 (+2\%)$	$\sigma_{VM} E_2 (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x E_2 (-2\%)$	$\sigma_y E_2 (-2\%)$	$\sigma_{VM} E_2 (-2\%)$
35	2,20 (1,38%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)	2,17	15,6	15,1	2,14 (1,38%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)
40	2,28 (1,33%)	16,8 (0%)	16,2 (0%)	2,25	16,8	16,2	2,22 (1,33%)	16,8 (0%)	16,3 (0,62%)
42	2,32 (1,31%)	17,3 (0%)	16,7 (0%)	2,29	17,3	16,7	2,26 (1,31%)	17,3 (0%)	16,7 (0%)
45	2,37 (1,28%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)	2,34	18,0	17,4	2,31 (1,28%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)
50	2,46 (1,23%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)	2,43	19,2	18,6	2,39 (1,65%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)
55	2,56 (1,59%)	20,4 (0%)	19,7 (0,51%)	2,52	20,4	19,8	2,49 (1,19%)	20,4 (0%)	19,8 (0%)

Na tabela 43 observam-se os valores de E<sub>2</sub>, E<sub>2</sub> +/-2%. Na tabela 44 são apresentados os valores da variação de E<sub>2</sub> em +/-2%. Na tabela pode-se observar a variação de valores no caso da tensão  $\sigma_x$  embora não seja uma diferença tão grande, as outras tensões apresentam uma variação de 0 - 0,62%, que não são valores significativos.

Tabela 45. Tabela de valores de v<sub>12</sub>.

volume de fibra (%)	v 12	v 12 - 2%	v 12 + 2%
0,35	35	0,3175	0,3239
0,40	40	0,3100	0,3162
0,42	42	0,3070	0,3131
0,45	45	0,3025	0,3086
0,50	50	0,2950	0,3009
0,55	55	0,2875	0,2933

Tabela 46. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de v<sub>12</sub>.

(%)	$\sigma_x v_{12} (+2\%)$	$\sigma_y v_{12} (+2\%)$	$\sigma_{VM} v_{12} (+2\%)$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x v_{12} (-2\%)$	$\sigma_y v_{12} (-2\%)$	$\sigma_{VM} v_{12} (-2\%)$
35	2,22 (2,30%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)	2,17	15,6	15,1	2,13 (1,84%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)
40	2,30 (2,22%)	16,8 (0%)	16,3 (0,62%)	2,25	16,8	16,2	2,21 (1,78%)	16,8 (0%)	16,2 (0%)
42	2,33 (1,75%)	17,3 (0%)	16,7 (0%)	2,29	17,3	16,7	2,24 (2,18%)	17,2 (0,58%)	16,7 (0%)
45	2,38 (1,71%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)	2,34	18,0	17,4	2,29 (2,14%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)
50	2,48 (2,06%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)	2,43	19,2	18,6	2,38 (2,06%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)
55	2,58 (2,38%)	20,4 (0%)	19,8 (0%)	2,52	20,4	19,8	2,47 (1,98%)	20,4 (0%)	19,7 (0%)

Na tabela 45 observam-se os valores de  $v_{12}$ ,  $v_{12} +/-2\%$ . A tabela 46 transcreve os valores da variação de  $v_{12}$  em  $+/-2$ . Observa-se novamente a variação relativa aos valores de  $\sigma_x$ , mas tal como na tabela 44 os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_{VM}$  não variam significativamente.

Tabela 47. Tabela de valores de  $G_{12}$ .

<i>volume de fibra</i>	(%)	<b>G 12</b>	<b>G12 - 2%</b>	<b>G12 + 2%</b>
0,35	35	1,0661	1,0448	1,0874
0,40	40	1,1292	1,1066	1,1518
0,42	42	1,1566	1,1334	1,1797
0,45	45	1,2002	1,1762	1,2242
0,50	50	1,2807	1,2551	1,3063
0,55	55	1,3729	1,3454	1,4003

Tabela 48. Tabela de resultados da modelação em Ansys para a variação de  $G_{12}$ .

(%)	$\sigma_x$ <b>G12 (+2%)</b>	$\sigma_y$ <b>G12 (+2%)</b>	$\sigma_{VM}$ <b>G12 (+2%)</b>	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{VM}$	$\sigma_x$ <b>G12 (-2%)</b>	$\sigma_y$ <b>G12 (-2%)</b>	$\sigma_{VM}$ <b>G12 (-2%)</b>
35	2,18 (0,46%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)	2,17	15,6	15,1	2,17 (0%)	15,6 (0%)	15,1 (0%)
40	2,26 (0,44%)	16,8 (0%)	16,3 (0,62%)	2,25	16,8	16,2	2,25 (0%)	16,8 (0%)	16,2 (0%)
42	2,29 (0%)	17,3 (0%)	16,7 (0%)	2,29	17,3	16,7	2,28 (0,44%)	17,3 (0%)	16,7 (0%)
45	2,34 (0%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)	2,34	18,0	17,4	2,33 (0,43%)	18,0 (0%)	17,4 (0%)
50	2,43 (0%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)	2,43	19,2	18,6	2,42 (0,41%)	19,2 (0%)	18,6 (0%)
55	2,53 (0,40%)	20,4 (0%)	19,8 (0%)	2,52	20,4	19,8	2,52 (0%)	20,4 (0%)	19,7 (0,51%)

Na tabela 47 observam-se os valores de  $G_{12}$ ,  $G_{12} +/-2\%$ . Na tabela 48, observam-se os resultados decorrentes da variação de  $G_{12}$  em  $+/-2\%$ . Na tabela a variação de valores é praticamente inexistente o que reforça a conclusão retirada do estudo do compósito de cânhamo/epoxídica, de que esta propriedade não tem grande influência nas características do material.

Os gráficos seguintes apresentados descrevem a variação das três tensões retiradas através da modelação de ANSYS APDL, para o efeito de observar qual a propriedade que apresenta uma maior influência nos valores das tensões.

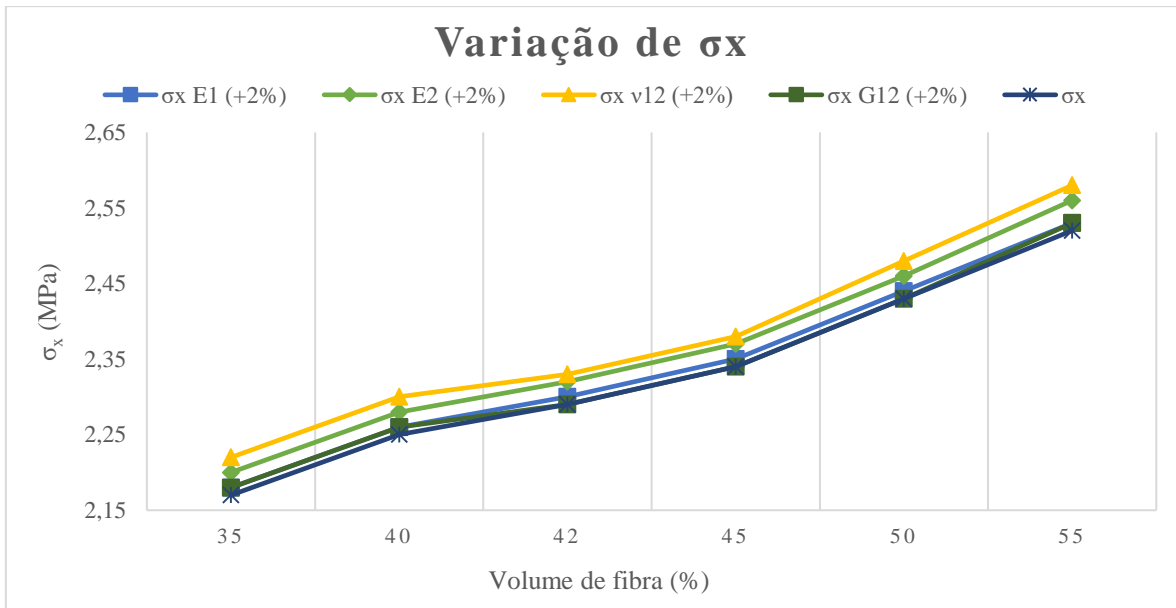


Figura 28. Gráfico de variação de  $\sigma_x$  para +2%.

O gráfico da figura 28 apresenta uma tendência ascendente em todas as rectas, as mesmas apresentam-se separadas, sendo que a mais se destaca é a correspondente ao coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) destacando-se das outras.

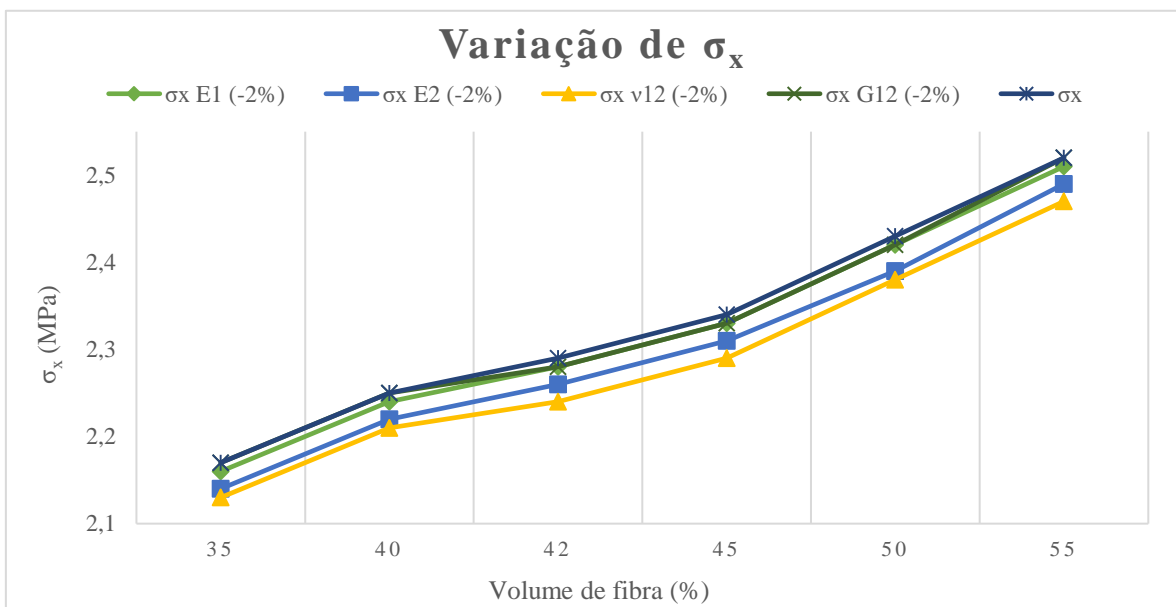


Figura 29. Gráfico de variação de  $\sigma_x$  para -2%.

O gráfico da figura 29 volta a apresentar uma tendência ascendente em todas as rectas, as mesmas apresentam-se separadas, sendo que a que se destaca é a correspondente ao

coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) por se apresentar mais distante da recta de  $\sigma_x$  e apresentar os valores mais baixos.

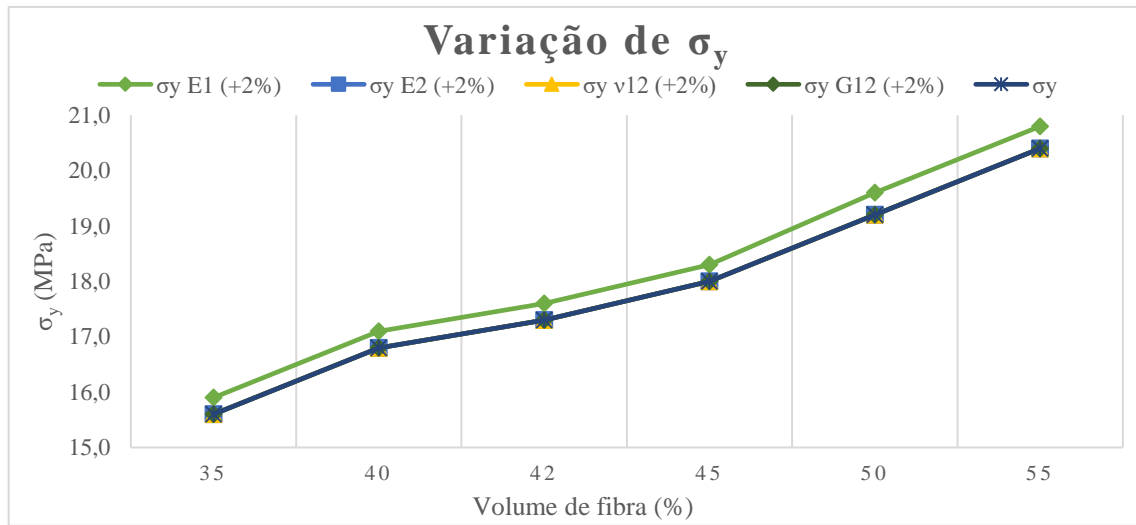


Figura 30. Gráfico de variação de  $\sigma_y$  para +2%.

O gráfico da figura 30 apresenta uma tendência ascendente em todas as rectas, e embora as mesmas se apresentem todas sobrepostas é possível destacar a correspondente ao módulo de elasticidade ( $E_1$ ).

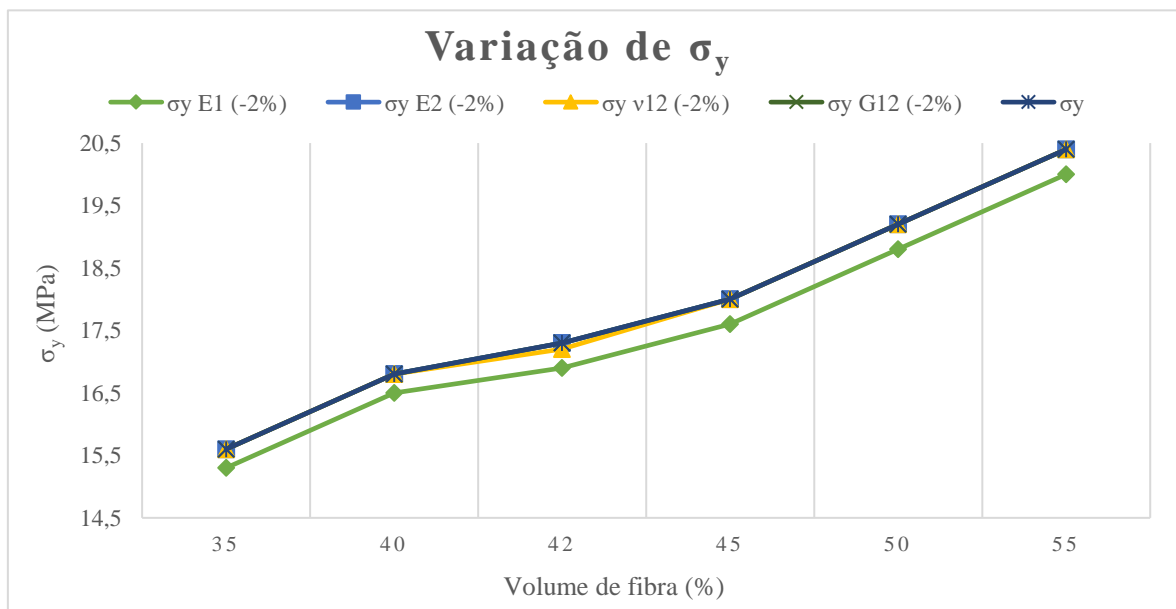


Figura 31. Gráfico de variação de  $\sigma_y$  para -2%.

A figura 31 apresenta uma tendência simétrica à figura anterior, isto é, volta a sobressair a recta correspondente a  $E_1$ , no entanto neste caso apresenta os valores mais baixos do gráfico.

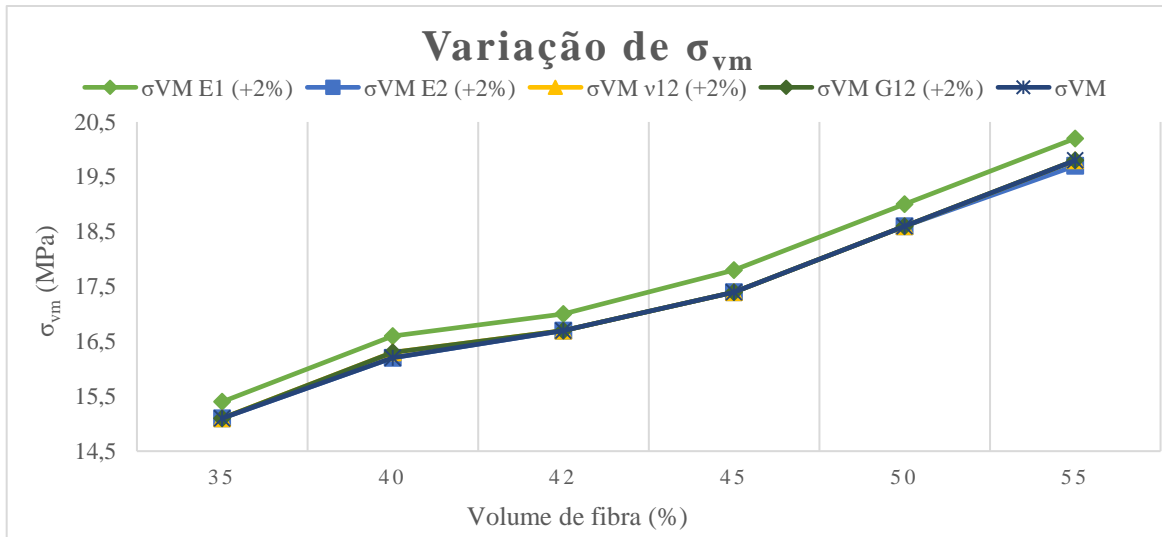


Figura 32. Gráfico de variação de  $\sigma_{vm}$  para +2%.

Na figura 32 a recta de  $E_1$  é de novo destaque apresentando novamente os valores mais altos do gráfico.

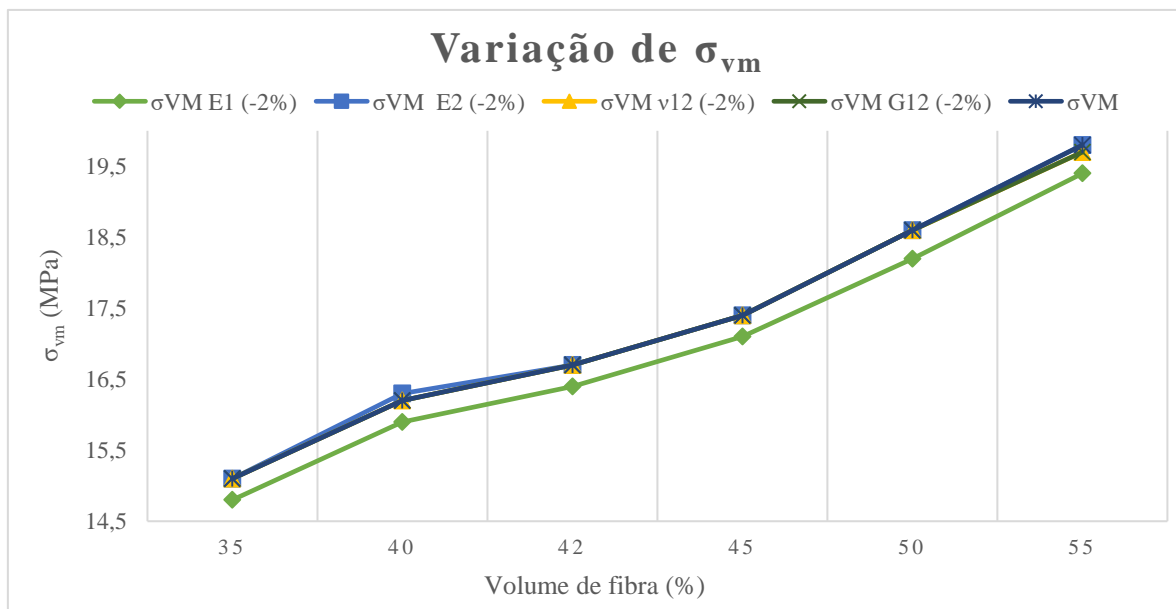


Figura 33. Gráfico de variação de  $\sigma_{vm}$  para -2%.

Na figura 33 a recta representativa da propriedade  $E_1$  destaca-se por ter os valores mais baixos de todos, sendo que as restantes rectas apresentam novamente sobreposição.

Após análise dos gráficos e das tabelas anteriormente apresentados, e embora os gráficos apresentem grande sobreposição entre as rectas o que poderia dificultar a interpretação do gráfico, pode-se concluir que a propriedade com maior influência na maioria dos gráficos é o módulo de elasticidade ( $E_1$ ).

# 5. Conclusões

## 5.1. Conclusões do presente estudo

Com a crescente preocupação pelo meio ambiente, torna-se cada vez mais necessário promover não só a reciclagem de materiais, mas também a incorporação de matérias mais amigáveis para o meio ambiente em materiais já existentes.

A incorporação de materiais naturais em materiais compósitos que substituam materiais de origem sintética, e que apresentem um desempenho equivalente e economicamente competitivo, continua a ser uma vertente a explorar da área de materiais compósitos.

As vantagens inerentes à utilização de materiais com fibras naturais levaram a um estudo mais aprofundado das suas propriedades. Com a criação e desenvolvimento de novos produtos que apresentam propriedades melhores e mais ecológicas, deu-se um aumento da presença destes compósitos no mercado, aumento esse que se deve ao facto das variadas indústrias investirem cada vez mais nestes produtos.

O que se observa atualmente nas pesquisas centradas na área de compósitos poliméricos são trabalhos e estudos elaborados com intuito de avaliar e classificar as propriedades mecânicas e de impacto, as características morfológicas e térmicas, a influência das características de processamento dos mesmos, os diferentes tipos de matrizes usados, bem como de reforços e as características provenientes da junção.

As análises realizadas, usando os resultados obtidos num anterior ensaio de tração, permitem obter valores semelhantes, o que corrobora os valores experimentais. O material escolhido apresenta boas características mecânicas.

As características mecânicas do material provaram ser melhores quanto maior a percentagem de volume de fibra no domínio estudado, o que se prende com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes do compósito. No segundo estudo apresentado foi possível concluir que o módulo de elasticidade de um compósito na direção das fibras ( $E_1$ ) é a propriedade do material que mais influencia o comportamento estático do provete em estudo, quando se varia os valores em +/- 2%.

Através da análise dos resultados das modelações do ANSYS, é possível afirmar que o compósito de resina epóxidica/fibra de cânhamo apresenta melhores valores para as propriedades mecânicas ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$  e  $G_{12}$ ) do que as do compósito Mater-Bi/fibra de cânhamo. No entanto, observando os gráficos podemos afirmar que ambos os compósitos apresentam valores semelhantes, indicando que embora não se igualem as propriedades, o compósito de matriz biodegradável apresenta-se como uma alternativa competitiva dependendo da aplicação do material.

## 5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como propostas a realizar em futuros trabalhos com materiais compósitos de origem natural, enumeram-se os seguintes conteúdos:

- Realizar ensaios de flexão, de impacto, dureza, fadiga e fluência de modo a elaborar uma caracterização mecânica mais completa de ambos os materiais compósitos;
- Elaborar estudo comparativo relativamente a fiabilidade de fibra naturais vs fibras sintéticas;
- Comparar os valores obtidos através de modelação com os valores obtidos através de ensaios realizados ao material recorrendo a diferentes tipos de tratamentos químicos e analisar a viabilidade dos materiais em diferentes aplicações;

# Referências

- Araújo, E. (2015). *Materiais compósitos com incorporação de cânhamo industrial*. (Dissertação de Mestrado). Braga: Universidade do Minho.
- Avallone, E. A., Baumeister III, T., & Sadegh, A. M. (2006). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers* (Tenth ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Barbero, E. J. (2014). *Finite Element Analysis of Composite Materials using Ansys* (2ª ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Bastioli, C. (1998). Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability*, 59, 263-272.
- Bledzki, A., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, 24, 221 - 274.
- Brito, G., Agrawal, P., Araújo, E., & Mélo, T. (2011). Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 6.2, 127-139.
- Cândido, G. M., & Almeida, S. F. (2000). Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10, 31 - 41.
- Carvalho, A. C. (2015). *Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira*. (dissertação de Mestrado). São João del-Rei: Universidade Federal de São João del-Rei.
- Cassenti, B. (n.d.). *Stresses in a Symmetric Cross-Ply Laminar Composite in Tension*. Retrieved Janeiro 8, 2018, from University of Connecticut - School of engineering: [http://www.engr.uconn.edu/~cassenti/AnsysTutorial/Modules\\_APDL/Module%209%20Stresses%20in%20a%20Cross-Ply%20Laminar%20Composite.pdf](http://www.engr.uconn.edu/~cassenti/AnsysTutorial/Modules_APDL/Module%209%20Stresses%20in%20a%20Cross-Ply%20Laminar%20Composite.pdf)
- Castro, B. (2013). *Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais*. (Dissertação de Mestrado). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Cicala, G., Cristaldi, G., Recca, G., & Latteri, A. (2010). Composites Based on Natural Fibre Fabrics. In P. D. Dubrovski (Ed.), *Woven Fabric Engineering*. INTECH.
- Company, T. B. (2015). *BP Statistical Review of World Energy* (64th ed.). London.
- Cruz, J., & Figueiro, R. (2016). Surface modification of natural fibers: a review. *Procedia Engineering*, 155, 285 – 288.

- Durão, L. M., Gonçalves, D. J., Moura, M. F., & Marques, A. T. (2012). Modelação da Furação de Laminados por Elementos Finitos. *Mecânica Experimental*, 20, 109 - 116.
- Eires, R. (2006). *Materiais não convencionais para uma construção sustentável utilizando Cânhamo, Pasta de Papel e Cortiça*. (Dissertação de Mestrado). Braga: Universidade do Minho.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2014). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299, 9 - 26.
- Ferreira, A. (1990). *Análise por Elementos Finitos de estruturas tipo casca em Materiais Compósitos*. (Dissertação de Mestrado). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, F. G. (2015). *Estudo da Delaminação em Compósitos de Epóxico Reforçado com Borracha e Fibras Naturais*. (Dissertação de Mestrado). Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Fette, M., Hentschel, M., Köhler, F., Wulfsberg, J., & Herrman, A. (2016). Automated and cost-efficient Production of Hybrid Sheet Moulding Compound Aircraft Components. *Procedia Manufacturing*, 6, 132 - 139.
- Garay, A. C. (2010). *Efeito da adição de Carbonato de cálcio em Compósitos poliméricos moldados por RTM e RTM light*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Jauhari, N., Mishra, R., & Thakur, H. (2015). Natural Fibre Reinforced Composite Laminates – A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2, 2868 - 2877.
- Jesus, S. (2011). *Novas bases têxteis para novas exigências sociais a sustentabilidade das fibras sintéticas*. (Dissertação de Mestrado). Lisboa: Faculdade de Arquitectura da Universidade técnica de Lisboa.
- Kalia, S., & Avérous, L. (2011). *Biopolymers: Biomedical and Enviromental Applications*. Massachusetts: Scrivener Publishing.
- Kamal, I., Thirmizir, M. Z., Beyer, G., Saad, M. J., Rashid, N. A., & Kadir, Y. A. (2014). Kenaf For Biocomposite: An Overview. *Journal of Science and Technology*.
- Kozłowski, R. M. (2012). *Handbook of natural fibres* (Vol. 2). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Kumar, L. J., D. N., P., Thara, R., & G, I. (2016). Experimental & Finite Element analysis of Sisal Fibre Reinforced Composites. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, 2(7), 155 - 160.

- Landro, L. D., & Janszen, G. (2014). Composites with hemp reinforcement and bio-based epoxy matrix. *Composites: Part B*, 220 - 226.
- Lawrance, S. S., Walia, P., Felker, F., & Willett, J. L. (2004). Starch-filled Ternary Polymer composites. II: Room Temperature Tensile Properties. *Polymer Engineering and Science*, 44 n° 10, 1839-1847.
- Lobo, A. (2018). *Desenvolvimento de produtos com novos materiais poliméricos biodegradáveis*. (Dissertação de Mestrado). Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Lopez, J., Vilaseca, F., Barberà, L., Bayer, R., Pèlach, M., & Mutjé, P. (2012). Processing and properties of biodegradable composites based on Mater-Bi and hemp core fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 59, 38-42.
- Lu, D. R., Xiao, C. M., & Xu, S. J. (2009). Starch-based completely biodegradable polymer materials. *eXPRESS Polymer Letters*, 3, n°6, 366-375.
- Ma, L., Shen, C., Zhang, A., Wang, X., Liang, L., & Zheng, J. (2018). Virtual tests of elastodynamic response of natural fiber-reinforced orthotropic plates. *Composite Structures*, 192, 264 - 273.
- Mali, S., Grossmann, M. V., & Yamashita, F. (2010). Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. *Semina: Ciências Agrárias*, 31, 137-156.
- Matthews, F., & Rawlings, R. (1999). *Composite Materials: Engineering and Science*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Miracle, D., & Donaldson, S. (2001). *ASM Handbook Volume 21 - Composites*. ASM International.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2005). *Natural fibers, biopolymers and biocomposites*. United Kingdom: Taylor & Francis Group.
- Mostafa, H., Sourell, H., & Bockisch, F. (2010). Mechanical properties of some bioplastic under different soil types used as biodegradable drip tubes. *12*.
- Mutjé, P., Lòpez, A., Vallejos, M., Lòpez, J., & Vilaseca, F. (2007). Full exploitation of Cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials. *Composites: Part A*, 38, 369-377.
- Nakamura, A. (2000). *Fiber Science and Technology*. Enfield: Science Publishers, Inc.

- Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 717 - 736.
- Owen, A. J., & Koller, I. (1996). A note on the Young's modulus of isotropic two-component materials. *Polymer*, 37 n°3, 527-530.
- Pamplona, I. (1997). *Degradação e mineralização de polímeros à base de amido de milho*. Porto: Faculdade de Engenharia do Porto.
- Perrier, A., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., & Mellier, D. (2016). Mechanical behaviour analysis of the interface in single hemp yarn composites: DIC measurements and FEM calculations. *Polymer Testing*, 52, 1-8.
- Pickering, K., Efendy, M., & Le, T. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part A*, 83, 98 - 112.
- Pommet, M., Juntaro, J., Heng, J., Mantalaris, A., Lee, A., Wilson, K., . . . Bismarck, A. (2008). Surface modification of natural fibres using bacteria: Depositing bacterial cellulose onto natural fibres to create hierarchical fibre reinforced nanocomposites. *Biomacromolecules*, 1643-1651.
- Prado, K. S., & Spinacé, M. A. (2011). Caracterização de Fibras Naturais Provenientes de resíduos Agroindustriais. *11º Congresso Brasileiro de Polímeros*, (pp. 4051- 4056). São Paulo.
- Prasad, B. M., & Sain, M. M. (2003). Mechanical properties of thermally treated hemp fibers in inert atmosphere for potencial composite reinforcement. *Materials Research Innovations*, 7, 231-238.
- Prasad, V., Joy, A., Venkatachalam, G., Narayanan, S., & Rajakumar, S. (2014). Finite Element analysis of jute and banana fibre reinforced hybrid polymer matrix composite and optimization of design parameters using ANOVA technique. *Procedia Engineering*, 97 , 1116 – 1125.
- Puglia, D., Tomassuci, A., & Kenny, J. M. (2003). Processing, Properties and Stability of Biodegradable Composites based on Mater-Bi and cellulose fibres. *Polymers for Advanced Technologies*, 14, 749-756.
- Razza, F., Fieschi, M., Innocenti, F. D., & Bastioli, C. (2008). Compostable cutlery and waste management: An LCA approach. *Waste Management*, 29, 1424 - 1433.
- Reddy, J. (2003). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells Theory and Analysis* (Second ed.). Boca Raton: CRC Press.

- Richardson, M. O. (1977). *Polymer Engineering Composites*. London: Applied Science Publishers LTD.
- Rohit, K., & Dixit, S. (2016). A Review - Future Aspect of Natural Fiber Reinforced Composite. *Polymers from Renewable Resources*, 7, n°2.
- Romão, C. (2003). *Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais*. (Dissertação de Mestrado). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Romão, C. (2012). *Compósitos de Matriz Termoplástica de Baixa Viscosidade Reforçados com Fibras Naturais de Origem Vegetal*. (Dissertação de Doutoramento). Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rudnik, E. (2008). *Compostable Polymer Materials*. Oxford: Elsevier Ltd.
- Rutkowska, M., Krasowska, K., Steinka, I., & Janik, H. (2004). Biodeterioration of Mater-Bi Y class in compost with Sewage Sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, 13, 85-89.
- Sanja, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., SenthamaraiKannan, P., & Senthil, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 566 - 581.
- Santos, M. O. (2013). *O Cânhamo como material de construção: Viabilidade e Oportunidade*. (Dissertação de Mestrado). Porto: Universidade Fernando Pessoa.
- Scarponi, C. (2015). Hemp fiber composites for the design of a Naca cowling for ultra-light aviation. *Composites Part B*, 81, 53-63.
- Shahzad, A. (2013). A Study in Physical and Mechanical Properties of Hemp Fibres. *Advances in Materials Science and Engineering*.
- Sicomín. (2017, Setembro). Retrieved from Nautic Expo: [http://pdf.nauticexpo.com/pdf/sicomín/sr-1500/23429-90681-\\_7.html](http://pdf.nauticexpo.com/pdf/sicomín/sr-1500/23429-90681-_7.html)
- Silva, H. (2014). *Comportamento Mecânico de Compósitos de Fibra de Vidro/Epoxy Nano-reforçados*. (Dissertação de Mestrado). Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Silva, L. J. (2011). *Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos laminados com fibras vegetais*. (dissertação de Mestrado). São João del-Rei: Universidade Federal de São João del-Rei.
- Silva, R. V. (2003). *Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*. (Dissertação de Doutoramento). São Paulo: Universidade de São Paulo.

- Staab, G. H. (2015). *Laminar Composites* (Second Edition ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Suardana, N., Piao, Y., & Lim, J. K. (2011). Mechanical Properties of Hemp fibers and Hemp/PP Composites: Effects of Chemical surface treatment. *Materials Physics and Mechanics*, *11*, 1- 8.
- Teles, M. C., Glória, G. O., Altoé, G. R., Netto, P. A., Margem, F. M., Braga, F. O., & Monteiro, S. N. (2015). Evaluation of the Diameter Influence on the Tensile Strength of Pineapple Leaf Fibers (PALF) by Weibull Method. *Materials Research*, *2*, 185 - 192.
- Umney, N., & Rivers, S. (2003). *Conservation of Furniture*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable Polymers. *Materials*, *2*, 307-344.
- Wulfsberg, J., Herrman, A., Ziegman, G., Lonsdorfer, G., StöB, N., & Fette, M. (2014). Combination of carbon fibre sheet moulding compound and prepreg compression moulding in aerospace industry. *Procedia Engineering*, *81*, 1601 - 1607.

# ANEXO A

-

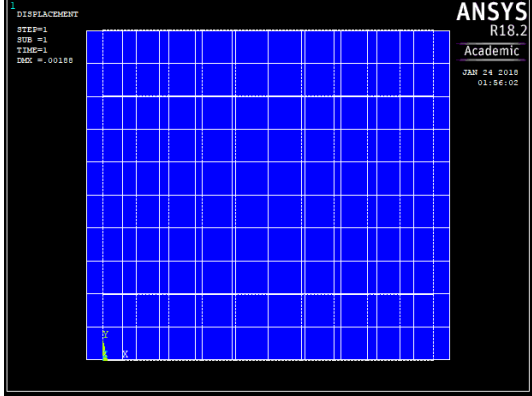
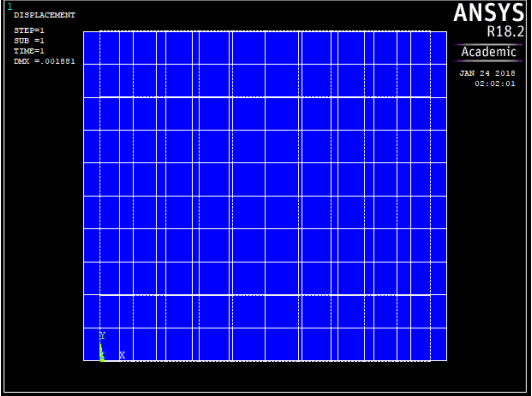
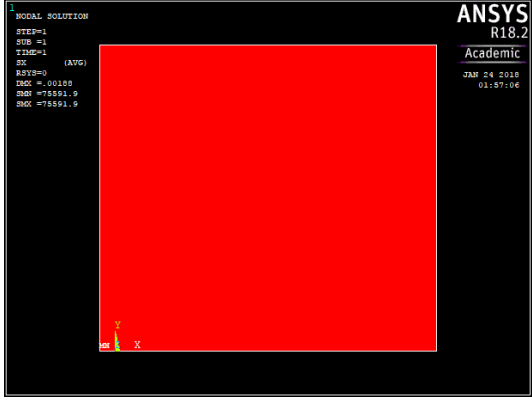
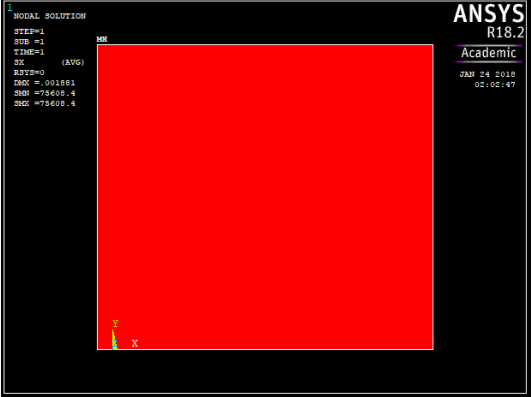
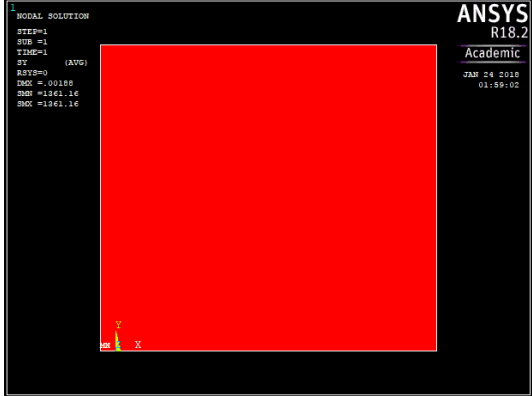
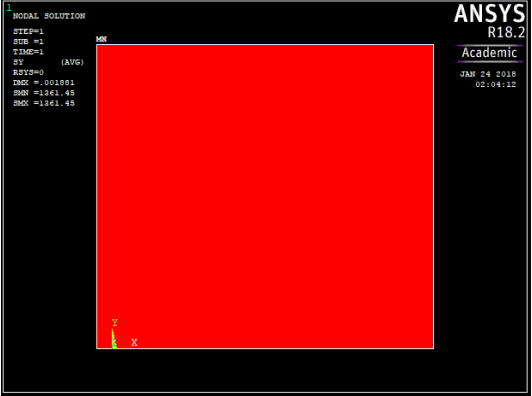
Imagens da Modelação da validação  
do código



# Imagens da Modelação da validação do código

MESH 10x10

Tabela 1: Uy e centro constrangido (caso 1)

(Cassenti)	Presente Estudo
	
	
	

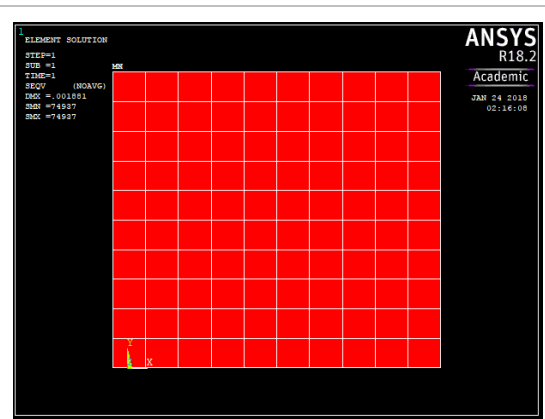
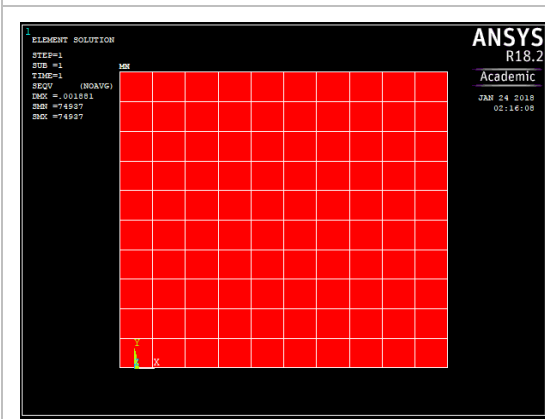
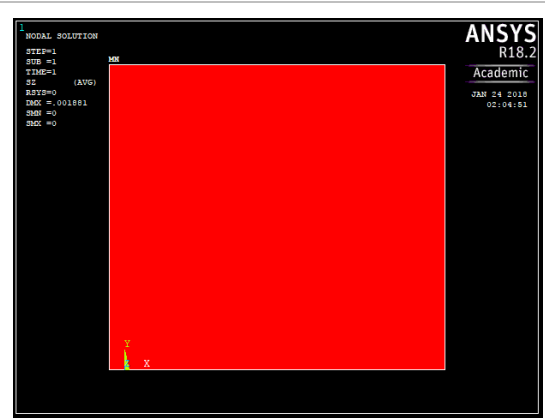
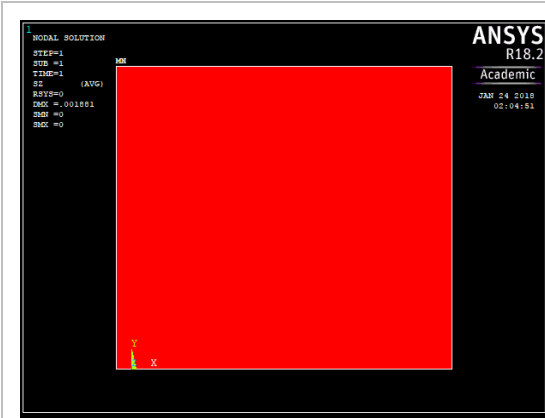
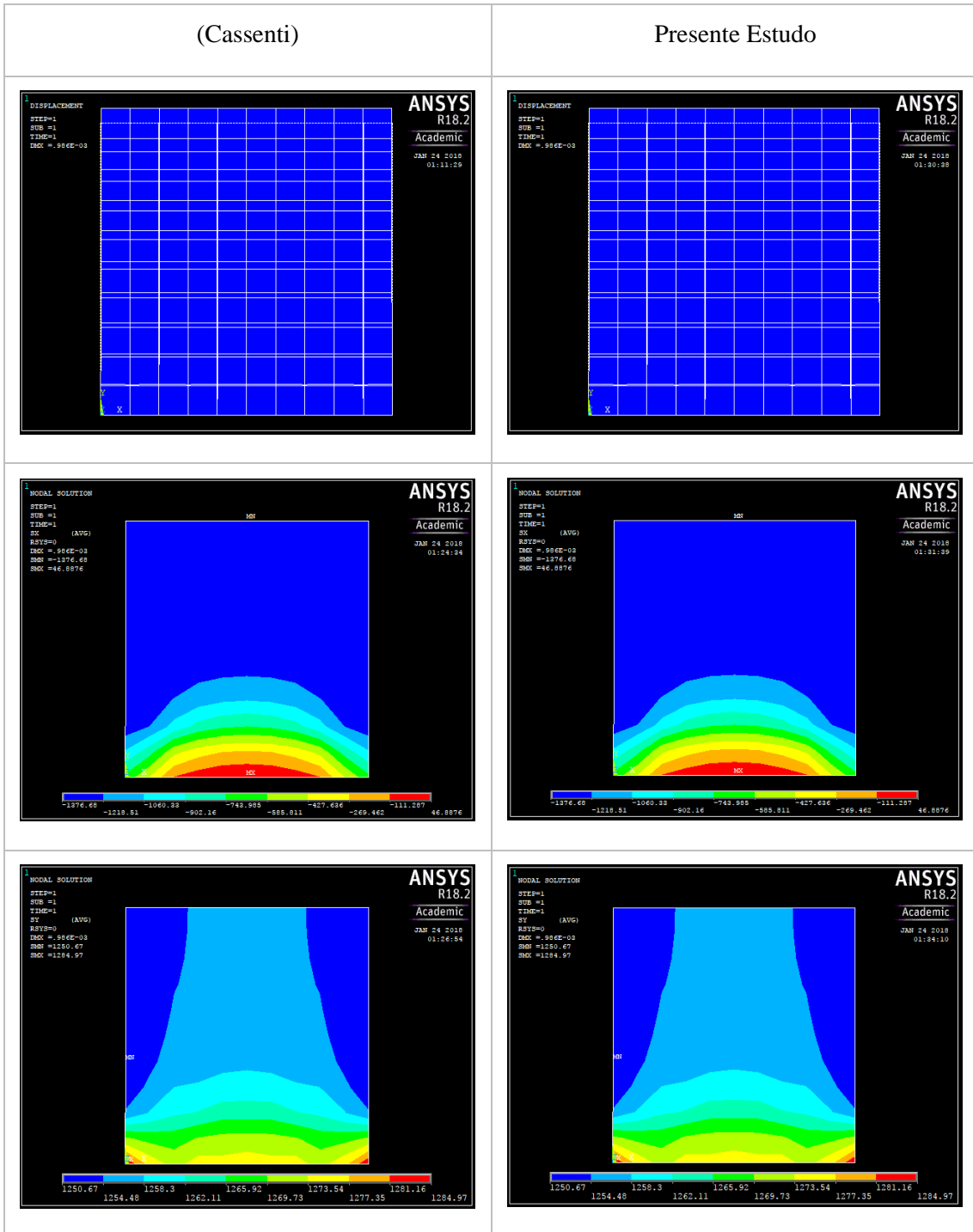


Tabela 4: UY em deformação e lado encastrado (caso 4):



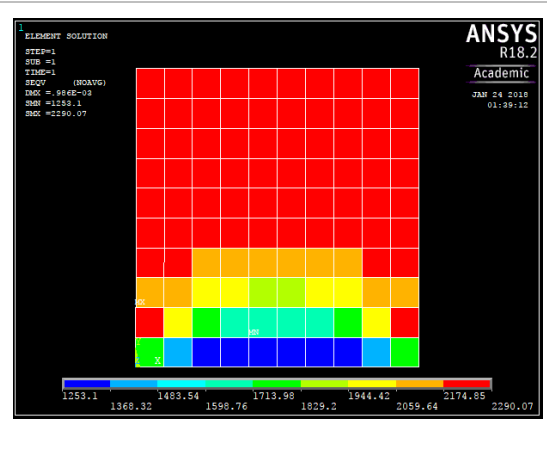
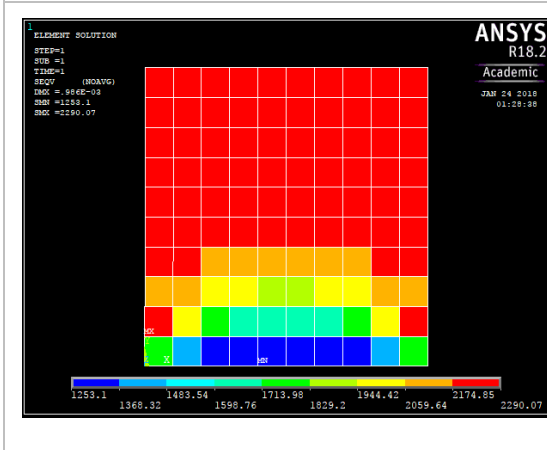
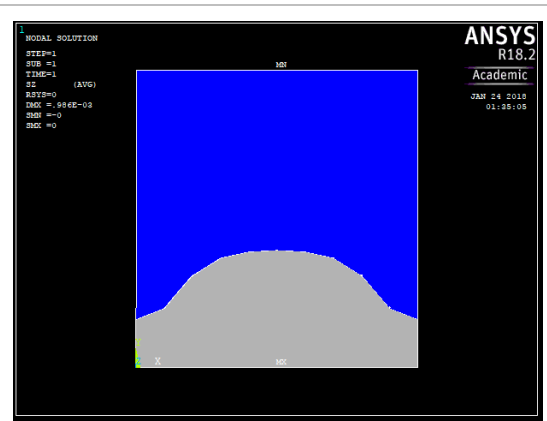
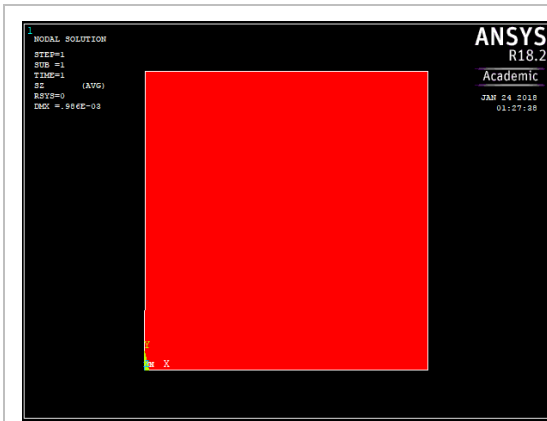
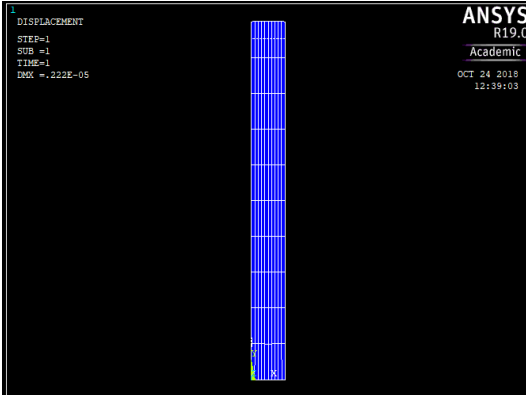
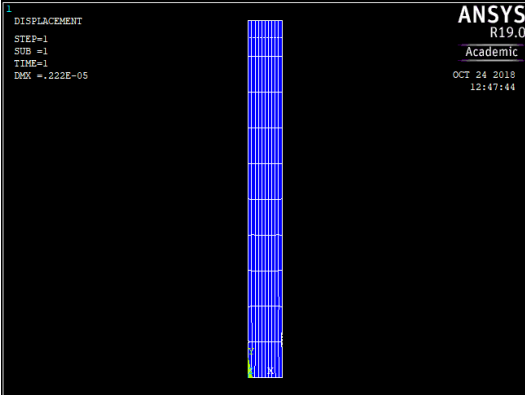
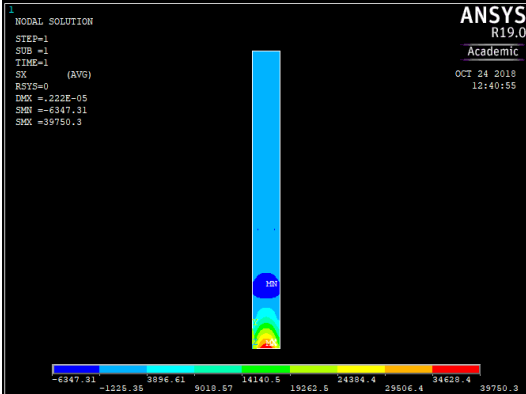
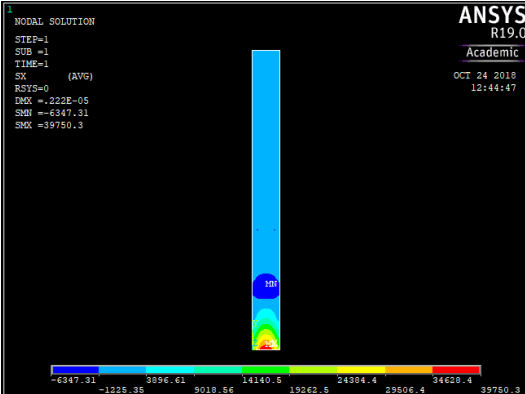
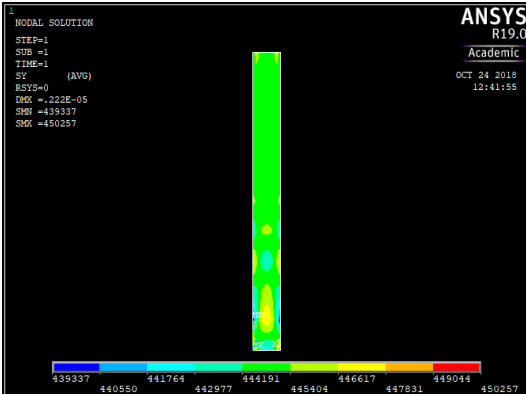
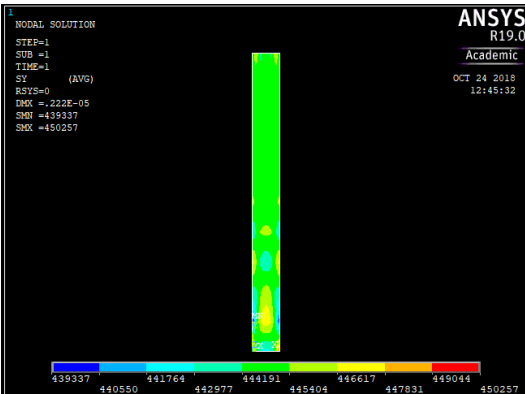
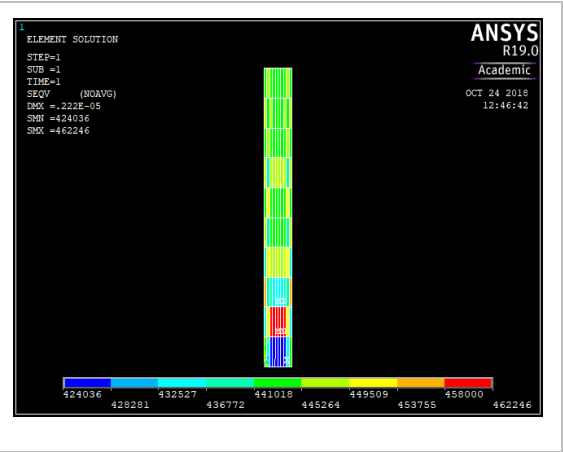
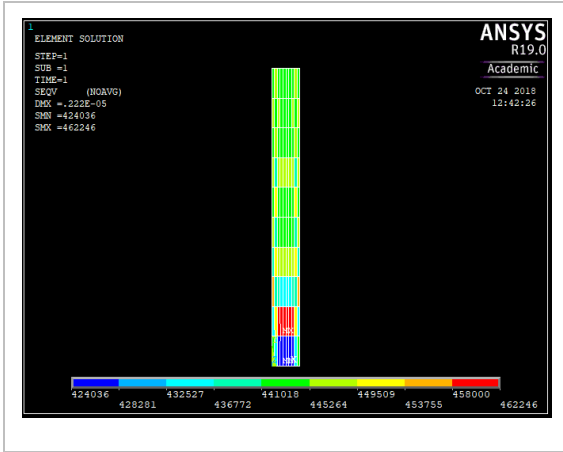


Tabela : UY encastrado pressão (caso 5):

(Cassenti)	Presente Estudo
<p>DISPLACEMENT</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 DMX =.222E-05</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:39:03</p>	<p>DISPLACEMENT</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 DMX =.222E-05</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:47:44</p>
<p>NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 SX (AVG) RSYS=0 DMX =.222E-05 SMN =-6347.31 SMX =39750.3</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:40:55</p>	<p>NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 SX (AVG) RSYS=0 DMX =.222E-05 SMN =-6347.31 SMX =39750.3</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:44:47</p>
<p>NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 SY (AVG) RSYS=0 DMX =.222E-05 SMN =439337 SMX =450257</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:41:55</p>	<p>NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 SY (AVG) RSYS=0 DMX =.222E-05 SMN =439337 SMX =450257</p>  <p>ANSYS R19.0 Academic OCT 24 2018 12:45:32</p>



# ANEXO B

-

Código de Modelação ANSYS do  
Presente Estudo



/PREP7

ET,1,SHELL181

!TIPO DE ELEMENTO

!Cânhamo 42%

! MATERIAL - FIBRA DE CÂNHAMO/EPOXY

MPTEMP,,,,,,,,

! Defines a temperature table for material properties.

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,5.672E9  
temperature table.

! Defines property data to be associated with the

MPDATA,EY,1,,4.323E9

MPDATA,EZ,1,,4.323E9

MPDATA,PRXY,1,,0.2954

MPDATA,PRYZ,1,,0.2206

MPDATA,PRXZ,1,,0.2206

MPDATA,GXY,1,,1.6312E9

MPDATA,GYZ,1,,1.6312E9

MPDATA,GXZ,1,,1.6312E9

sect,1,shell,,

secdata, 0.375e-3,1,0.0,3

secdata, 0.375e-3,1,90.0,3

secdata, 0.375e-3,1,0.0,3

secdata, 0.375e-3,1,90.0,3

secdata, 0.375e-3,1,0.0,3

secdata, 0.375e-3,1,90.0,3

secdata, 0.375e-3,1,0.0,3

secdata, 0.375e-3,1,90.0,3

secoffset,MID

seccontrol,,,, , , ,

!Construção da placa

H=50E-3

L=25E-3

K,1,0,0,0,

K,2,0,H,0,

K,3,L,H,0,

K,4,L,0,0,

L,1,2

L,2,3

L,3,4

L,4,1

!Criação da superfície da placa

AL,1,2,3,4

LESIZE,ALL, , ,10, , , ,1 !10 DIVISOES DE ELEMENTOS EM CADA LINHAS

MSHAPE,0,2D !MALHA 0 - QUADRILATERAL ; 1 - TRIANGLES

MSHKEY,1 !0 - FREE; 1 - MALHA MAPEADA

AMESH,ALL

!Aplicação dos constringimentos

! LOADS! HERE ONE DOES NOT NEED TO DO-LOOP

DELTA\_L0 = 1E-4

DELTA\_L= 0.15E-3 ! Extensão máxima

ALLSEL,ALL

!contrangimento HORIZ

LSEL,S,LOC,Y,0 ! SEL A LINHA LATERAL HORIZ DE SÍM EM Y=0

DL,ALL,,ALL ! COND DE CONTORNO DE SÍMETRIA

ALLSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,(H-1E-3),H ! SEL ALL NODES AT THE TOP LINE, BETWEEN  
H-2.5 AND H, IN ORDER TO SEL THE NODE  
LINE!

D,ALL,UZ

CP,1,UY,ALL ! CP TO ALL KNOTS ABOVE AND CAN NOT  
START FOR THE MINOR NR: THAT IS THE  
MASTER

\*GET,NTOP,NODE,0,NUM,MIN ! OF THESE KNOTS IN THE TOPE CHOOSE THE  
MINOR NUM: MASTER AND CALLS  
SELECTION OFF THE NTOP!

ALLSEL,ALL

D,NTOP,UY,DELTA\_L ! APPLY DESPLAZDTRAN

DTRAN !Transfers solid model DOF constraints to the finite element model.

SFTRAN !Transfer the solid model surface loads to the finite element model.

! Transfer the solid model Constraints to the FE modelSFTRAN

! Transfer the solid model surface loads to the FE model/SOLU

Finish

/Solu

ANTYPE,STATIC

/OUT,SCRATCH

TIME,0.0001

NSUBST,1,1,1

! START WITH MAX OF 1 SUBSTEP FOR EACH LOAD

AUTOTS,0

! USE AUTOMATIC LOAD STEPPING

solve

!SEGUNDO PASSO

D,NTOP,UY,DELTA\_L

TIME,1

DELTIM,0.1,0,0

AUTOTS,0

solve

# ANEXO C

-

Imagens da Modelação da Variação de  
Volume de Fibra do Compósito



Imagem da deformada:

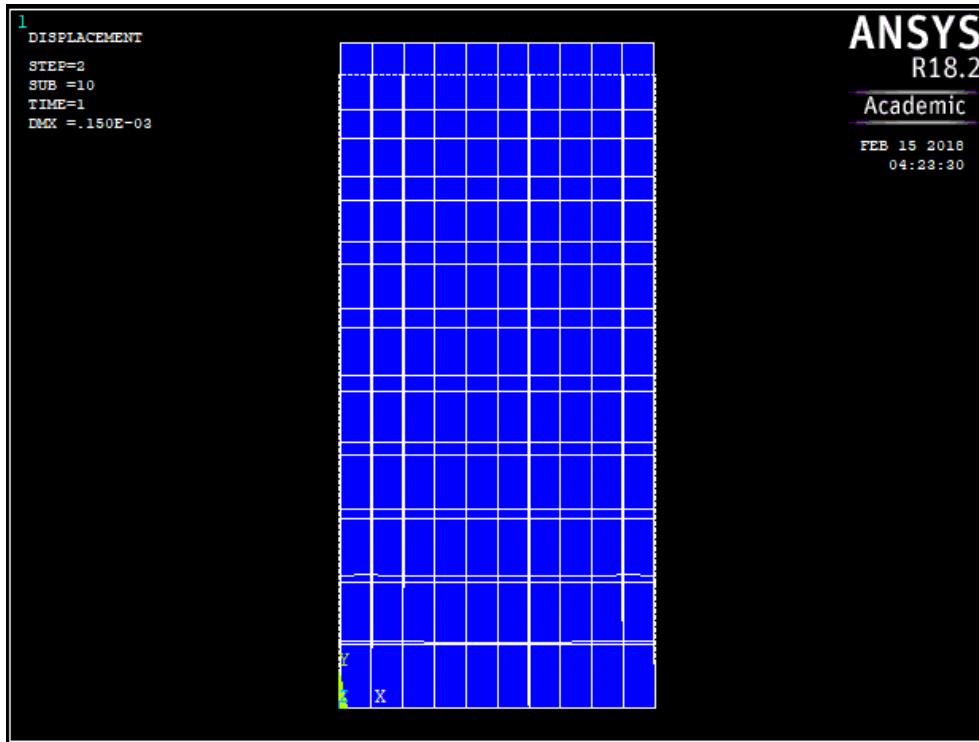
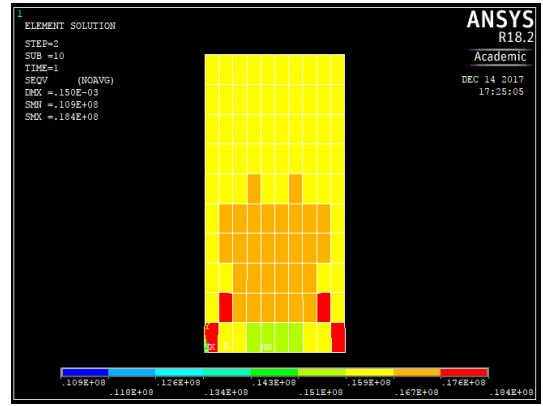
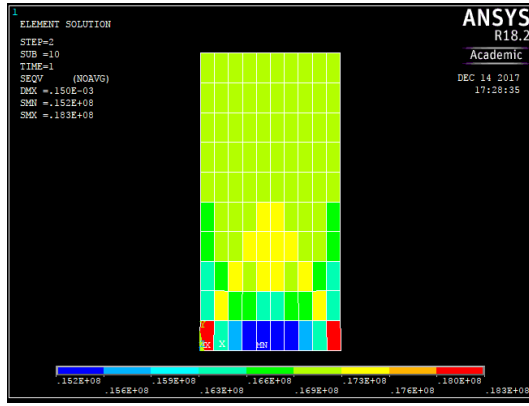


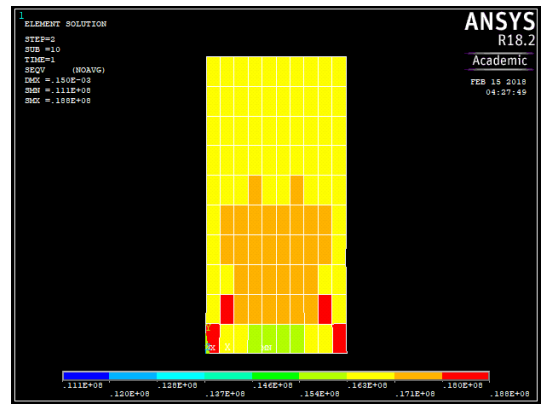
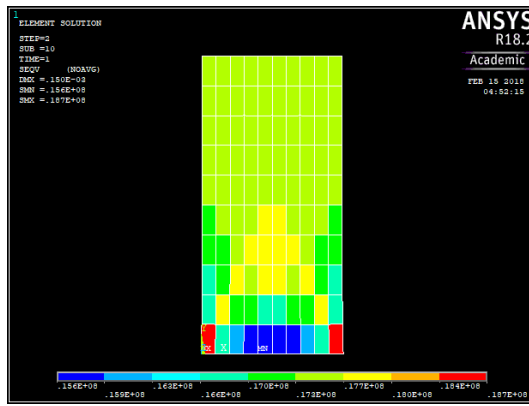
Tabela comparativa dos empilhamentos  $[0^\circ]_8$  e  $[0^\circ/90^\circ]_4$

%	$[0^\circ]_8$	$[0^\circ/90^\circ]_4$
35		

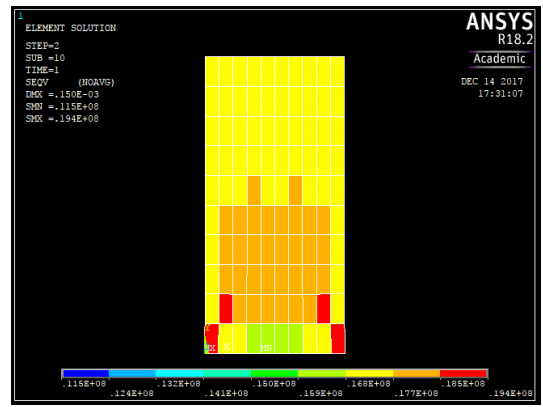
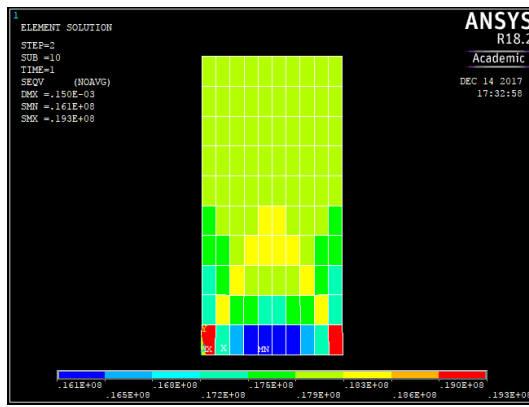
40



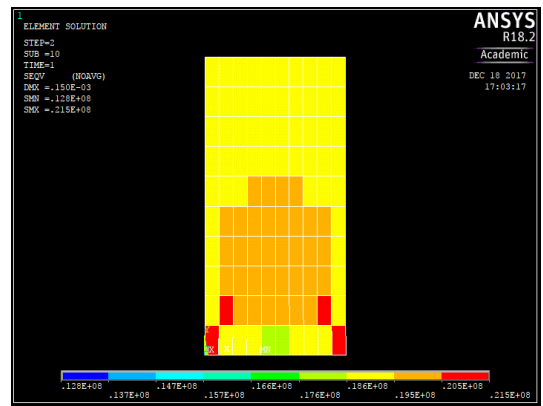
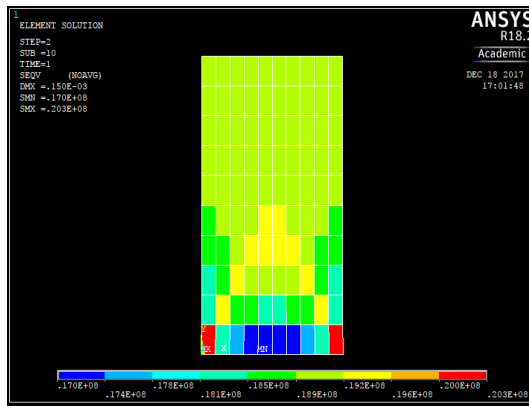
42

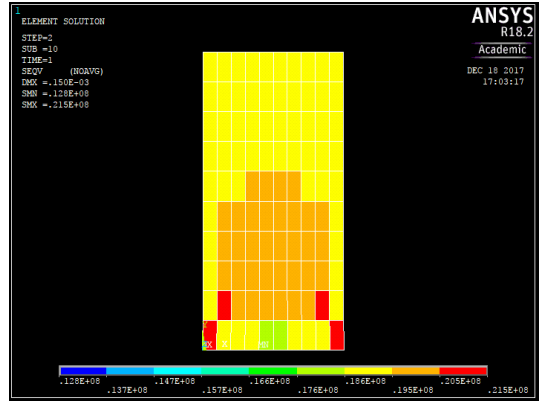
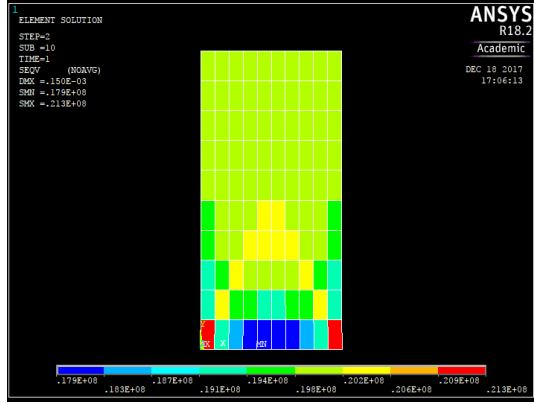


45



50







# ANEXO D

-

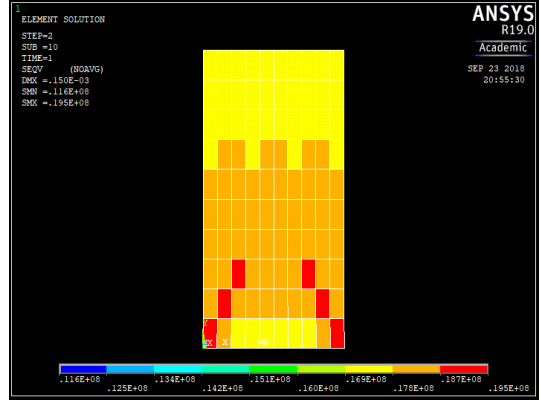
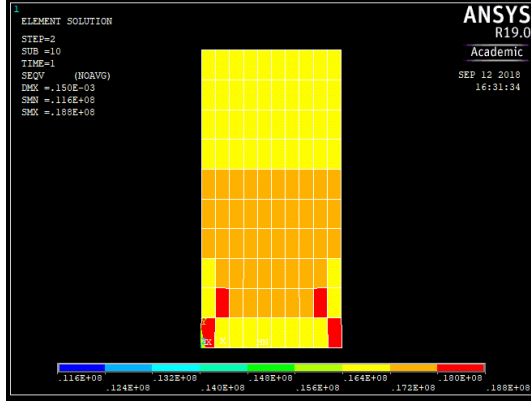
Imagens da Modelação da Variação de  
Propriedades do compósito em +/- 2%



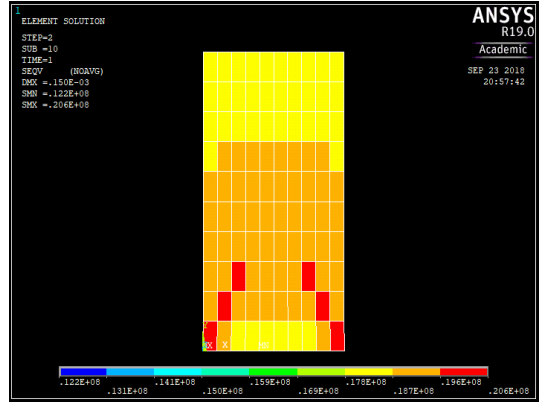
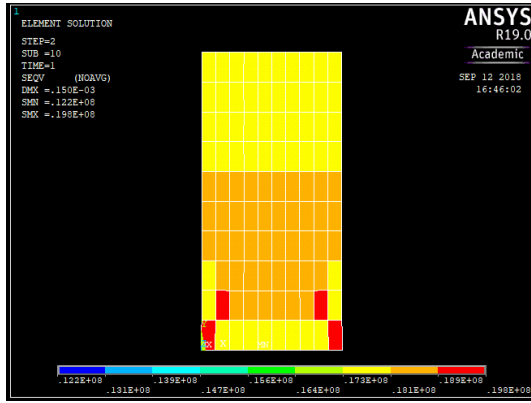
## Tabela comparativa da variação E1 +/- 2% para a Tensão de Von Mises

%	$E_1 (-2\%)$	$E_1 (+2\%)$
35	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.106E+08            SMX =.169E+08</p>	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.105E+08            SMX =.175E+08</p>
40	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.111E+08            SMX =.178E+08</p>	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.110E+08            SMX =.185E+08</p>
42	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.113E+08            SMX =.182E+08</p>	<p>ANSYS R19.0 Academic            STEP=2            SUB =10            TIME=1            SEQV (NOAVG)            DMX =.150E-03            SMN =.113E+08            SMX =.189E+08</p>

45



50



55

