

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DE MODELOS MECÂNICOS BASEADOS EM CÉLULA UNITÁRIA  
MICROMECAÂNICA PARA UMA ESTRUTURA TUBULAR FABRICADA COM A  
TÉCNICA DE *FILAMENT WINDING*

por

Pedro Issamu Carvalho Kakinami

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Kakinami, Pedro Issamu  
ESTUDO DE MODELOS MECÂNICOS BASEADOS EM CÉLULA  
UNITÁRIA MICROMECAÂNICA PARA UMA ESTRUTURA TUBULAR  
FABRICADA COM A TÉCNICA DE FILAMENT WINDING / Pedro  
Issamu Kakinami. -- 2021.

15 f.

Orientador: Jakson Manfredini Vassoler.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Materiais Compósitos. 2. Filament Winding. 3.  
Modelo Célula Unitária. I. Vassoler, Jakson  
Manfredini, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pedro Issamu Carvalho Kakinami

ESTUDO DE MODELOS MECÂNICOS BASEADOS EM CÉLULA UNITÁRIA  
MICROMECAÂNICA PARA UMA ESTRUTURA TUBULAR FABRICADA COM A  
TÉCNICA DE FILAMENT WINDING

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte/Processos de Fabricação/Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, maio de 2021

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda a minha família. Em especial agradeço meus pais, que sempre estiveram presentes, mesmo quando estando longe, dando-me todo o suporte intelectual e afetivo necessário para o meu desenvolvimento.

Agradeço também aos amigos que fiz nessa trajetória, compartilhando o mesmo caminho eles me ajudaram a torná-lo mais fácil e leve de seguir.

Por fim, agradeço aos professores que colaboraram com a minha formação, principalmente aos professores que foram além de suas obrigações no intuito de colaborar com o desenvolvimento dos alunos.

*“All models are wrong, but some are useful.”*

George E. P. Box

Kakinami, Pedro Issamu. **Estudo De Modelos Mecânicos Baseados Em Célula Unitária Micromecânica Para Uma Estrutura Tubular Fabricada Com A Técnica De Filament Winding**. 2021. 15 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## RESUMO

O processo de *filament winding* (FW) tem ganhado espaço na indústria e na academia para a fabricação de componentes de geometria axissimétrica, como cilindros ou vasos de pressão. Esta técnica possui vantagens frente a outros processos como elevado controle da posição das fibras e elevada repetibilidade. No entanto, o padrão de entrelaçamento das fibras gerado por este processo torna difícil prever numericamente a distribuição de deformações e tensões relacionadas a falha do componente. Abordagens numéricas com o detalhamento geométrico necessário para capturar respostas a nível da geometria das fibras torna o processo impraticável devido ao alto custo computacional. Assim, estratégias como análise global-local e multiescala, que necessitam da definição de um elemento de volume representativo (EVR), e modelos de célula unitária, tem sido cada vez mais estudadas como alternativa. Neste contexto, este trabalho propõe o estudo numérico do comportamento de falha de uma célula unitária construída com um padrão de entrelaçamento obtido pela técnica FW para aplicações de tubos submetidos a pressão interna, como vasos de pressão. Neste estudo são investigados diferentes modelos reduzidos baseados em uma célula unitária, que é construída com um padrão de fibras 3 x 3, considerando as interações entre os feixes de fibras que se cruzam em diferentes posições criando heterogeneidades não capturadas por teorias clássicas como a teoria de laminado. São usadas 3 modelos reduzidos além da resposta de referência do tubo completo com geometria detalhada, para comparação dos resultados. Os resultados demonstram que os modelos reduzidos não são capazes de prever falha segundo o modelo completo. Além disto, os resultados também indicam que, para as relações geométricas estudadas, não é possível obter um número suficiente de células unitárias para formar um EVR.

**PALAVRAS-CHAVE:** Materiais Compósitos, *Filament Winding*, Modelo Célula Unitária.

Kakinami, Pedro Issamu. **Study of Mechanical Models Based on a Micromechanical Unit Cell for a Tubular Structure Made Using the Filament Winding Technique**. 2021. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

## ABSTRACT

The process of filament winding (FW) has gained space in industry and academia for the manufacture of components of axisymmetric geometry, such as cylinders or pressure vessels. This technique has advantages over other processes such as high control of the fiber position and high repeatability. However, the fiber interlacing pattern generated by this process makes it difficult to predict numerically the distribution of strains and stresses related to component failure. Numerical approaches with the geometric detail necessary to capture responses at the level of fiber geometry make the process impractical due to the high computational cost. Thus, strategies such as global-local and multiscale analysis, which require the definition of a representative volume element (RVE), and unit cell models, have been increasingly studied as an alternative. In this context, this work proposes the numerical study of the failure behavior of a unit cell built with an interlacing pattern obtained by the FW technique for applications of tubes subjected to internal pressure, such as pressure vessels. In this study, different reduced models based on a single cell, which is constructed with a 3 x 3 fiber pattern, are investigated, considering the interactions between the fiber bundles that intersect in different positions creating heterogeneities not captured by classical theories such as the theory of laminate. 3 reduced models are used in addition to the reference response of the complete tube with detailed geometry, to compare the results. The results show that the reduced models are not able to predict failure according to the complete model. In addition, the results also indicate that, for the geometric relationships studied, it is not possible to obtain a sufficient number of unit cells to form an RVE.

**KEYWORDS:** Composite Material, Filament Winding, Unit Cell Model

## NOMENCLATURA

### Acrônimos

FW	<i>Filament Winding</i>
EVR	Elemento de Volume Representativo
RL	<i>Regular antisymmetric laminated ply</i>
CCO	<i>Circumferential Crossover Circles</i>
HCO	<i>Helical crossover circles</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3.1	Processo de <i>Filament Winding</i> .....	2
3.2	Teorias estruturais aplicadas a compósitos (laminado) .....	4
3.2.1	Material Compósito .....	4
3.2.2	Comportamento de um laminado .....	5
3.3	Análise global local .....	5
3.4	Elemento de volume representativo e Célula Unitária para distribuição periódica.....	6
4	METODOLOGIA.....	8
4.1	Definição da Geometria .....	8
4.2	Modelo Numérico .....	9
4.2.1	Modelo da estrutura completa .....	10
4.2.2	Modelo da estrutura reduzida .....	10
4.3	Comparação entre o modelo completo e os reduzidos .....	11
5	RESULTADOS .....	12
5.1	Região R1 .....	12
5.2	Região R2 .....	13
5.3	Região R3 .....	14
6	CONCLUSÃO.....	15
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais compósitos são largamente usados e possuem uma infinidade de processos de fabricação. O método de *Filament Winding* (FW), enrolamento filamental, é um processo muito utilizado na fabricação de vasos de pressão, e outras estruturas, principalmente tubulares. Esse processo consiste em depositar um feixe de fibras impregnadas com resina em um mandril, que definirá a forma final da peça.

Diferente de outros materiais e métodos de fabricação, existe uma correlação grande entre a forma como o material compósito vai ser manufaturado e seu uso, (JONES, 1999). Dessa forma, estes componentes apresentam uma dificuldade na fase de projeto frente a capacidade de prever com acuracidade a sua falha. O processo de enrolamento gera padrões particulares de entrelaçamento entre as fibras que pode não estar de acordo com as hipóteses de homogeneidade usadas na macromecânica de uma lâmina, fazendo com que teorias clássicas e consolidadas para a análise de compósitos, como a teoria clássica de laminado, possam não prever com aceitável precisão o comportamento mecânico de falha. Neste caso, dependendo das informações disponíveis do material, pode ser necessário estudar a interação entre os feixes para prever a falha dos constituintes do material compósito (micromecânica).

Utilizando-se do método de elementos finitos seria possível criar modelos que considerem as heterogeneidades locais existentes e um componente fabricado dessa forma. Entretanto, um modelo de todo o componente que considere esse nível de detalhamento pode acarretar um custo computacional impraticável. Uma forma viável de contornar isso, seria realizar uma análise reduzida do problema com condições análogas ao problema completo criando um modelo com condições semelhantes, mas com uma geometria reduzida. Estratégias como análise global-local e multiescala, que necessitam da definição de um elemento de volume representativo (EVR), e modelos de célula unitária, tem sido cada vez mais estudadas como alternativas. A construção de um EVR passa pela definição de células unitárias, que se repetem periodicamente no domínio, até atingir as condições de homogeneização das respostas de um volume, que definirá o tamanho e o detalhamento do EVR.

Em componentes tubulares fabricados com a técnica de FW, pode ser que não seja possível obter um EVR, ou um modelo local adequado, devido a relação das dimensões características das heterogeneidades (largura de fibra e padrões de entrelaçamento) e da dimensão do componente (diâmetro e comprimento do tubo). Assim, antes de se desenvolver um EVR para análises de multiescala é necessário conhecer as características do comportamento da região de interesse de falha, a célula unitária com o padrão periódico frente a diferentes tamanhos de volumes representativos, que poderiam ser utilizados como EVR, em uma análise multiescala, ou modelo local, em uma análise global-local.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo estudar modelos reduzidos para análises de componentes tubulares fabricados por meio da técnica de FW, submetidos a pressão interna, como vasos de pressão. O estudo é desenvolvido em modelos mecânicos baseados em uma célula unitária com um padrão de fibras 3 x 3, considerando as interações entre os feixes de fibras que se cruzam em diferentes posições criando heterogeneidades não capturadas por teorias clássicas como a teoria de laminado. Neste modelo são analisadas as respostas de comportamento de falha, em diferentes escalas. Neste trabalho, será considerada a falha quando ocorre a ruptura de uma fibra, ou seja, quando o estado de tensão alcança a tensão máxima do regime elástico.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processo de *Filament Winding*

Esse procedimento surgiu nos anos 1940 com o objetivo de produzir carcaças para motores de foguetes. Nos anos 1950, por conta da corrida espacial, surgiu o sistema de fabricação em série. Já nos anos 1970 e 1980 houve um grande avanço nessa técnica para a indústria de óleo e gás, onde foi possível desenvolver *risers*, estruturas tubulares sobre pressão, que transportam óleo ou gás em um poço de petróleo, utilizando FW. Nos anos 1990 foi possível desenvolver componentes mais complexos devido à evolução da análise estrutural de compósitos e dos equipamentos de controle e automação (AZEVEDO, 2019).

A técnica de FW (enrolamento filamental) consiste em depositar, de forma contínua, um feixe formado por vários filamentos em um mandril giratório, que dará forma a peça. Isso ocorre devido a um movimento de rotação do mandril em torno do seu próprio eixo e uma movimentação longitudinal de um cabeçote que faz a deposição dos filamentos, que são tensionados por tensionadores, no mandril. Essa configuração é ilustrada na Figura 3.1.

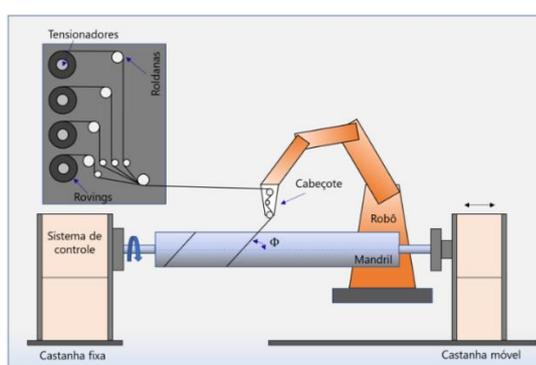


Figura 3.1 Esquema de enrolamento filamental (EGGERS, 2019).

Ademais, existem três formas de realizar o enrolamento: helicoidal, circunferencial e polar. No enrolamento helicoidal as fibras não são postas de forma adjacente o que acarreta uma necessidade de realizar várias passagens para recobrir completamente o mandril. Nesse processo os ângulos de aplicação do filamento variam de  $5^\circ$  até  $85^\circ$  e são depositados alternadamente resultando em uma aplicação de  $\pm\theta$ . O enrolamento circunferencial consiste na aplicação de um feixe na posição quase-normal ao eixo do mandril, dessa forma, gera-se um ângulo próximo à  $90^\circ$ , em geral é aplicado em conjunto do enrolamento polar (AZEVEDO, 2019). Neste enrolamento as fibras passam tangencialmente à abertura polar em uma extremidade do mandril rotativo, inverte o sentido e passa tangencialmente para o lado oposto da abertura polar na outra extremidade (EGGERS, 2019).

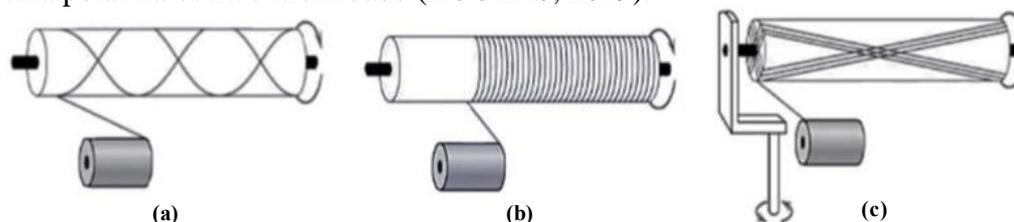


Figura 3.2 Enrolamento helicoidal (a), circunferencial (b) e polar (c) (Azevedo, 2019)

Uma trajetória é dita como geodésica quando esta for a menor distância entre dois pontos em uma superfície. Ao realizar a deposição do fecho filamental pode-se ou não seguir um caminho geodésico. Em geral busca-se depositar os filamentos seguindo um caminho geodésico, visto

que, dessa forma não haverá a necessidade de se considerar atrito entre o mandril e o feixe de filamentos, pois não haverá forças laterais na fita que é depositada (AZEVEDO, 2019; FURTADO, 2016).

Estruturas cilíndricas geralmente são feitas seguindo o processo de enrolamento helicoidal. O processo inicia-se depositando o filamento em uma extremidade do mandril até a outra extremidade onde o ângulo de enrolamento é invertido e o cabeçote retorna ao ponto inicial, esse processo é chamado de circuito segundo (Azevedo, 2019). Findado um circuito inicia-se o próximo deslocando o ponto inicial para o lado. Após uma série de circuitos há o recobrimento do mandril onde pode-se ver a formação de um padrão que se assemelha a um losango.

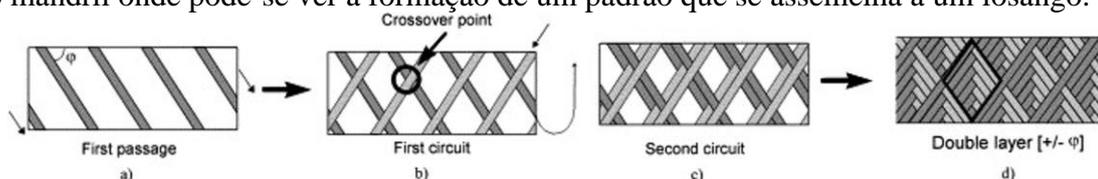


Figura 3.3 Formação do padrão do FW (ROUSSEAU; PERREUX; VERDIÈRE, 1999).

Dentro de cada um desses losangos (AZEVEDO, 2019) identifica duas regiões de mesmo tamanho com feixes unidirecionais divididas por uma região de “zig-zag” e limitadas externamente por regiões de entrelaçamento helicoidais. Além disso, DALIBOR, I. H. *et al.*, 2019, chama esse padrão que se repete de *diamond-mosaic*, diamante-mosaico, e com regiões que se repetem. O diamante pode ser dividido em dois triângulos com orientação das fibras oposta, ou seja, uma com ângulo  $+\theta$  e outra com  $-\theta$ . Em cada triângulo identifica-se três regiões: região laminada com empilhamento antissimétrico (*regular antisymmetric laminated ply – RL*), região influenciada pelo cruzamento dos feixes, identificada pela linha zig-zag, conhecida como *circumferential crossover circles (CCO)* e a região que limita o diamante e é influenciada pela borda externa conhecida como *helical crossover circles (HCO)*. Na Figura 3.4 identifica-se as regiões descritas.

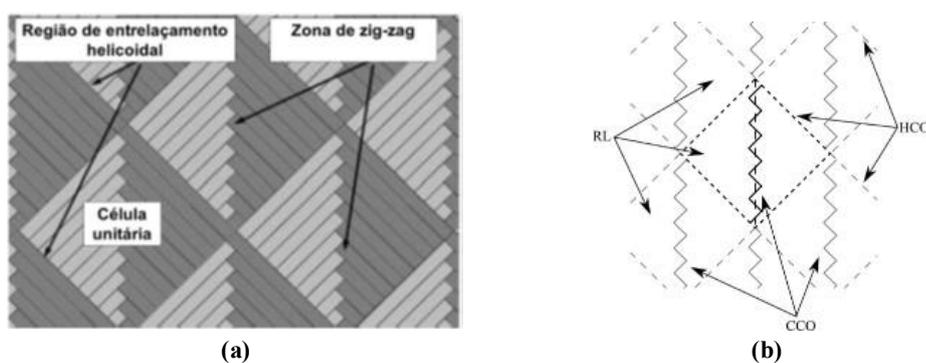


Figura 3.4 Regiões descritas por (a) (AZEVEDO, 2019) e por (b) (DALIBOR, I. H. *et al.*, 2019).

(SHEN; HAN, 2018) estudou a influência do cruzamento das fibras em FW. Nesse estudo o componente é dividido em duas regiões: região de cruzamento e ondulação de fibras e área de laminado. No estudo é possível encontrar uma elevada correlação entre a falha e a posição do cruzamento das fibras. Além disso, notou-se um aumento de 7% a 13% da tensão na região de cruzamento de fibras dando indícios que a região de entrelaçamento helicoidal e a zona de zig-zag são regiões onde o componente deve falhar.

## 3.2 Teorias estruturais aplicadas a compósitos (laminado)

### 3.2.1 Material Compósito

Um material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais em uma escala macroscópica criando um terceiro material com propriedades mecânicas distintas dos materiais iniciais. A grande vantagem desse tipo de material é que, se bem projetado, é possível acentuar as melhores qualidades dos componentes que a constituem. (JONES, 1999).

Os materiais compósitos são classificados em quatro tipos: materiais compósitos fibrosos (longas fibras, de formatos variados, imersos em uma matriz), materiais compósitos laminados (no mínimo duas camadas de materiais colados), materiais compósitos particulados (partículas de uma ou mais materiais suspenso em uma matriz) e material compósito que é uma combinação das opções anteriores (JONES, 1999).

O comportamento dos materiais, em geral, é classificado em dois grupos, um referente a sua heterogeneidade e outro à sua resposta mecânica, anisotropia. Corpos heterogêneos tem propriedades diferentes em diferentes posições. Já um material anisotrópico apresenta diferentes propriedades mecânicas em diferentes direções, mas é constante em todas as posições (JONES, 1999).

Materiais compósitos são, por natureza heterogêneos, visto que, apresentam no mínimo dois constituintes. Para uma análise em uma escala macroscópica esses materiais podem ser considerados homogêneos perdendo as características heterogêneas, mas podem ganhar, se já não havia, uma característica anisotrópica. Dada essa distinção dos comportamentos os materiais compósitos são estudados do ponto de vista da micromecânica e da macromecânica.

Micromecânica é o estudo do comportamento do material compósito, onde as interações são examinadas em uma escala microscópica para determinar o efeito nas propriedades do material. Macromecânica é o estudo do comportamento do material compósito, no qual presume-se que o material é homogêneo e os efeitos dos materiais constituintes são detectados apenas como uma média das propriedades macroscópicas (JONES, 1999).

A teoria mais clássica e difundida para análise de materiais compósitos é a teoria de laminado. Por definição um laminado é um empilhamento de lâminas coladas entre si com direções principais distintas da direção global. Uma lâmina é um arranjo unidirecional ou um tecido de fibras imersos em uma matriz. Na Figura 3.5 é possível ver tanto a configuração de um laminado quanto as configurações de uma lâmina (JONES, 1999).

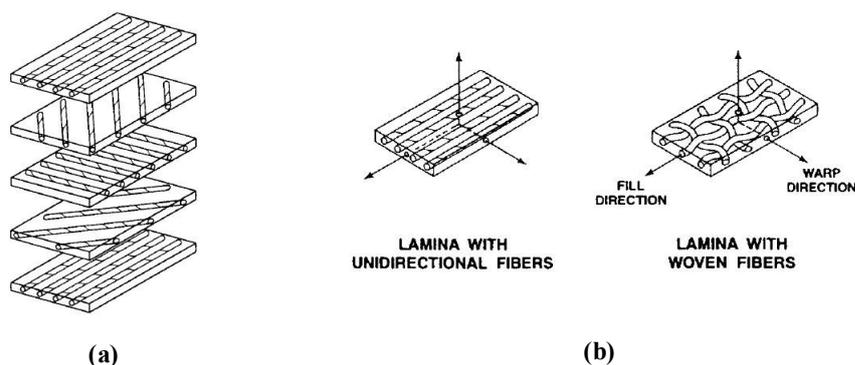


Figura 3.5 (a) Configuração de um laminado com cinco lâminas. (b) Configurações principais de uma lâmina (JONES, 1999).

Outras considerações que (JONES, 1999) faz sobre laminado é quanto a continuidade das fibras, de forma geral um laminado é formado por fibras longas e contínuas. Entretanto afirma-se que

com algumas modificações é possível adaptar as equações para outros tipos de laminados e materiais compósitos particulados.

### 3.2.2 Comportamento de um laminado

Segundo (DE LEON, 2011) a teórica clássica de laminados baseia-se nas hipóteses de placas descritas por Kirchhoff.

- Linhas retas perpendiculares a superfície média, normais transversais, devem permanecer dessa forma após a deformação;
- Não deve haver deformação nas normais transversais;
- As retas normais transversais rotacionam mantendo a perpendicularidade as superfícies médias.

(JONES, 1999) por sua vez estabelece ainda as seguintes hipóteses:

- As lâminas são ortotrópicas, homogêneas e possuem espessura constante;
- O tamanho da espessura do laminado é muito menor que as demais dimensões;
- Considera-se o estado plano de tensões;
- Não há escorregamento entre as lâminas.

Considerando essas hipóteses e o trabalho de (SHEN; HAN, 2018) nota-se que essa teoria seria ineficaz para prever a falha de um componente fabricado por FW, visto que, o uso dessa teoria implicaria na necessidade de um ensaio de uma parte do componente a fim de retirar as propriedades homogeneizadas do material.

### 3.3 Análise global local

(KNIGHT *et al.*, 1991) define a análise global local como um procedimento para determinar o estado de tensão de uma região específica de uma estrutura com informações obtidas a partir de um modelo estrutural global independente.

(VOLETI; CHANDRA; MILLER, 1996) definem duas metodologias de como proceder com uma análise global local. Método do limite específico, *Specified boundary method*, e método da restrição multinodal, *Multi-point constraint method*.

No método do limite específico um modelo da estrutura completa é realizado utilizando as propriedades efetivas, para uma macro escala, do material e os resultados dessa análise representarão a resposta global da estrutura sobre um carregamento. Com a resposta global da análise os deslocamentos devem ser aplicados a uma malha local que tem as propriedades individuais do material. (VOLETI; CHANDRA; MILLER, 1996) ainda especifica que os seguintes passos devem ser seguidos:

- Determinar a propriedade efetiva do material. Nessa etapa qualquer técnica poderia ser utilizada para isso, como por exemplo regra das misturas, Tsai-Halpin e métodos baseados em elementos finitos;
- Criar a malha global e a local. A malha global representará a estrutura como um todo e a local a área de interesse com uma malha mais detalhada considerando as propriedades individuais de cada material;
- Extrair e interpolar os deslocamentos da análise global para a local;
- Resolver o problema local com as condições do modelo global.

O método restrição multinodal é muito semelhante ao método do limite específico, naquela há a diminuição de um passo em relação a este. Naquele método não há a necessidade de extrair e

interpolando os resultados da análise global, pois o modelo global e o local são colocados em uma mesma malha. (VOLETI; CHANDRA; MILLER, 1996)

Essa metodologia definida por (VOLETI; CHANDRA; MILLER, 1996) pode ser usada para analisar componentes confeccionados em FW, visto que, da forma citada seria possível formular um modelo global, desconsiderando heterogeneidades e aplicando a teoria clássica de laminado, e depois um modelo local mais detalhado onde seria possível realizar um estudo mais detalhado de um FW. Porém, para o seu sucesso, é necessário que o modelo local responda de forma consistente com o que se esperaria de um modelo detalhado, sem simplificações geométricas.

### 3.4 Elemento de volume representativo e Célula Unitária para distribuição periódica

A homogeneização tem como objetivo substituir uma estrutura heterogênea, em alguma escala inferior, por uma homogênea equivalente (fictícia), onde estas devem apresentar o mesmo comportamento mecânico. Diferentes caminhos formados no processo de FW geram diferentes estruturas em uma microescala o que pode gerar diferentes propriedades mecânicas macroscópicas. Esse efeito impede que componentes formados por FW sejam modelados como laminados (YIN *et al.*, 2020).

Ao realizar uma análise multiescala comumente não há propriedades do material que se deseja analisar, para sanar isso comumente se usa o EVR, que possui as heterogeneidades de um material com duas fases ou mais (EFENDIEV; HOU, 2009).

O EVR pode ser usado de duas formas, de uma análise refinada para grosseira e de uma grosseira para uma refinada. Na primeira abordagem as equações grosseiras não são explícitas e as informações geradas nas equações refinadas são usadas na simulação. A segunda abordagem os parâmetros da equação grosseira são feitos com base nos resultados do RVE (EFENDIEV; HOU, 2009).

Para existir um EVR e é necessário que exista 2 escalas no problema uma escala microscópica e uma escala macroscópica. O EVR é uma representação de um ponto material na escala macroscópica. Assim, o tamanho do EVR está diretamente ligado a como essas 2 escalas do material se relacionam. O EVR deve ser suficientemente grande para representar as características macroscópicas do problema e pequeno o suficiente para apresentar um ponto material na macroescala (CARNIEL, 2017).

Outro ponto importante para a criação de um EVR é determinar sua geometria, para isso seria necessário ter acesso à uma micrografia de um componente fabricado dessa forma, que não é disponível na literatura.

Para o formato da fita do FW, (ANSAR; XINWEI; CHOUWEI, 2011; BUCHANAN *et al.*, 2010; FURTADO, 2016) afirmam que a seção de um feixe de fibras pode ser elíptica, lenticular, retangular, circular, pista de corrida ou um elemento de reboque, conforme mostrado na Figura 3.6. (BUCHANAN *et al.*, 2010) ainda levanta alguns trabalhos que mostraram um elevado grau de concordância entre os valores calculados e os medidos experimentalmente quando há a utilização de uma seção elíptica.

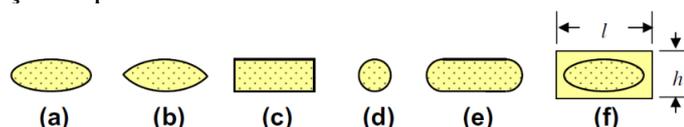


Figura 3.6 Possíveis formatos de seção para um filamento elíptico (a), lenticular (b), retangular (c), circular (d), pista de corrida (e) e elemento de reboque (f). (ANSAR; XINWEI; CHOUWEI, 2011)

As propriedades geométricas e mecânicas do filamento pode variar, dependendo dos parâmetros de fabricação. Neste trabalho consideram-se as propriedades encontradas por DALIBOR, Ingo Hermann, 2020, apresentadas na Tabela 3.1. Além disso, (DALIBOR, Ingo Hermann, 2020) ainda fez ensaios de tração em fitas individuais para obter a tensão de ruptura, esses valores pode ser encontrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 Propriedades geométricas e mecânicas de filamentos individuais retirados de corpos de prova planos. (DALIBOR, Ingo Hermann, 2020)

Propriedade		Fabricante	Resultados dos Ensaios
Módulo de elasticidade tração/ compressão longitudinal (GPa)	$E_{t1} / E_{c1}$	135	153
Módulo de elasticidade tração/ compressão transversal (GPa)	$E_{t2} / E_{c2}$	---	12.2
Módulo de cisalhamento (GPa)	$G_{12}$	---	5.9
Coefficiente de Poisson maior	$\nu_{12}$	---	0.34
Coefficiente de Poisson menor	$\nu_{21}$	---	0.029
Resistência à tração longitudinal (MPa)	$S_{t1}$	2550	1822
Resistência à tração transversal (MPa)	$S_{t2}$	69	63.2
Resistência à compressão longitudinal (MPa)	$S_{c1}$	1470	840
Resistência à compressão transversal (MPa)	$S_{c2}$	---	153
Resistência ao cisalhamento (MPa)	$T_{12}$	---	76.7
Fração volumétrica de fibras	$V_f$	0,7	0,71
Espessura da fita (mm)	---	---	0,2-0,4
Largura da fita (mm)	---	---	2,0-2,5
Peso da fita tex (g/1000m)	---	800	---
Peso específico da fibra (g/cm <sup>3</sup> )	---	1,8	---
Peso específico da resina (g/cm <sup>3</sup> )	---	1,2	---
Diâmetro dos filamentos (µm)	---	7	7,1]

Tabela 3.2 Tensão de ruptura para uma fita individual. (DALIBOR, Ingo Hermann, 2020)

	Força de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)
Média	1912,9	1292,3
Desvio padrão	69,04	239,3
Coefficiente de variação	3,6%	18,5%

Com isso, é possível determinar uma metodologia para encontrar um EVR adequado que consiga representar as características macromecânicas e micromecânicas. Além disso, há um ponto de partida para a criação de um modelo reduzido com os dados geométricos fornecidos por (DALIBOR, Ingo Hermann, 2020).

As fases do compósito podem se distribuir de diferentes formas, e influenciam nas propriedades do material. Estas podem ser aleatórias ou periódicas. Enquanto abordagens de homogeneização em mesoescala podem ser feitas com EVR para compósitos com distribuição randômica, o conceito de célula unitária pode ser usado para compósitos com distribuição periódica. As células unitárias são tais que quando colocadas lado a lado, em uma série infinita, deve constituir todo o material heterogêneo. A célula unitária não é uma representação de EVR, pois não precisa atender a hipótese de que a dimensão característica da heterogeneidade tem que ser muito menor que a dimensão característica da estrutura. Entretanto um conjunto de células unitárias forma o EVR, a Figura 3.7 exemplifica isso. O EVR por sua vez precisa cumprir com a hipótese que a dimensão característica da heterogeneidade tem que ser muito

menor que a dimensão característica do EVR (COSTA, 2017). Para um laminado composto, está célula unitária pode ser o menor bloco do tecido, que se repete ao longo do laminado (Dixit, 2014).

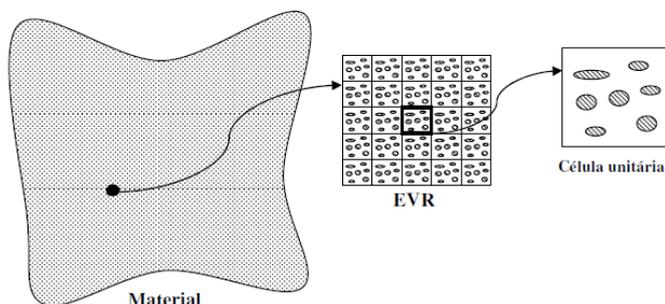


Figura 3.7 Exemplo de como uma célula unitária forma um EVR (COSTA, 2017).

## 4 METODOLOGIA

A fim de estudar a possibilidade da existência de um modelo reduzido representativo (EVR), e a resposta de uma célula unitária para diferentes tamanhos de modelos reduzidos, a seguintes etapas serão feitas: estipular uma geometria de tubo confeccionado pelo método de FW, desenvolver um CAD com base nessa geometria, modelar a geometria no *software* de elementos finitos aplicando as propriedades do material, extrair e comparar os resultados do modelo numérico.

### 4.1 Definição da Geometria

A base do trabalho está na célula unitária do composto produzido pelo FW, que é formato do menor padrão que se repete ao longo de um tubo, o também chamado *diamond-mosaic*. O diamante foi modelado com o auxílio do *software* TexGen, nele foi aplicado as informações de altura e largura do filamento, formato da seção transversal, a distância entre as fibras, o número de fibras e a disposição do entrelaçamento. O TexGen é um *software* aberto desenvolvido pela universidade de Nottingham com o objetivo de criar e desenvolver modelos tridimensionais de malhas utilizada em materiais compósitos (BROWN *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2019).

No presente trabalho foram utilizados seis feixes, três para cada direção (padrão 3x3-FW). Foi escolhido que a seção transversal deveria ter um formato elíptico, conforme descrito na seção 3.4. Com as informações da Tabela 3.1 definiu-se uma espessura de 0,2 mm, uma largura de 2 mm, uma distância entre as fibras de 2,4 mm, uma angulação entre os feixes de 11,5° e uma disposição de entrelaçamento semelhante a que ocorre em um FW. Na Figura 4.1 é possível ver a geometria criada no *software* TexGen.

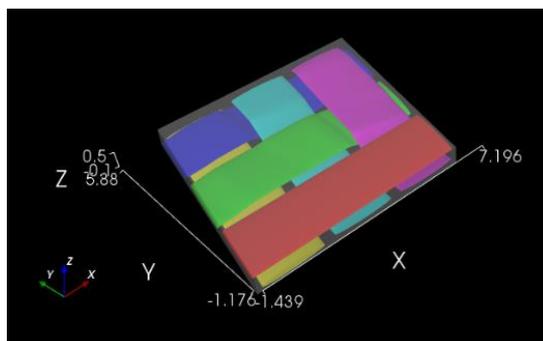


Figura 4.1 Geometria criada no software Texgen.

A geometria que o *software* TexGen cria é plana, como o estudo foi feito sobre um tubo essa geometria foi importada para um *software* CAD, *Computer Aided Design*, onde o diamante criado foi curvado com um raio de 5,8 mm. Criado o padrão curvo do diamante eles foram agrupados a fim de formar a representação do tubo de FW que foi usado como base para o desenvolvimento dos demais modelos. Na Figura 4.2 é possível ver o *diamond-mosaic* plano, curvado e agrupado como um tubo.

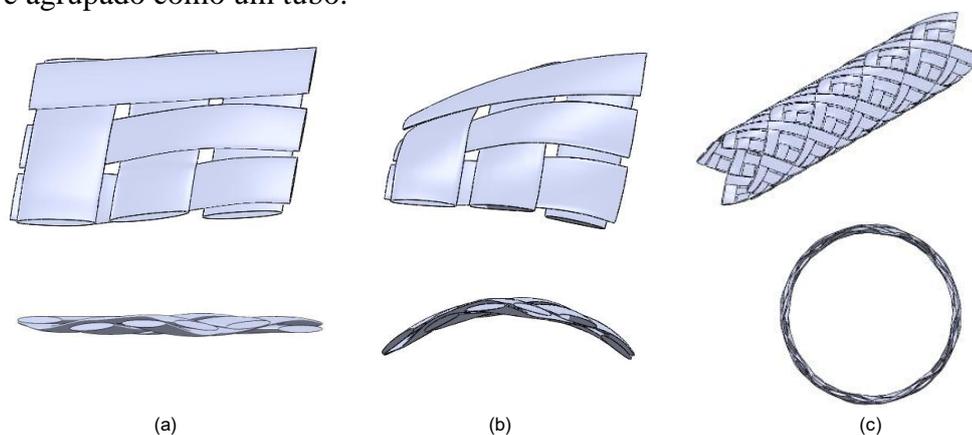


Figura 4.2 Modelo geométrico do FW (a) plano, (b) curvo e (c) agrupado como um tubo.

Nesse cilindro foram realizados cortes a fim de criar os modelos de tamanhos distintos. O menor volume representativo deveria conter pelo menos as regiões descritas na seção 3.1, além disso, foi adicionado partes de outros padrões para criar uma geometria que cresceria de forma constante. Assim, o menor modelo seria um arco de  $90^\circ$  com uma largura de 11,15 mm e os demais teriam acréscimos constantes de  $90^\circ$  no arco e 11,15 mm na largura em relação ao plano médio. Na Figura 4.3 é possível ver os volumes que foram criados, onde a estrutura reduzida 03 contém a célula unitária, e contornos definidos de forma que se possa aplicar condições de contorno periódicas, para um problema com carregamento por pressão interna.

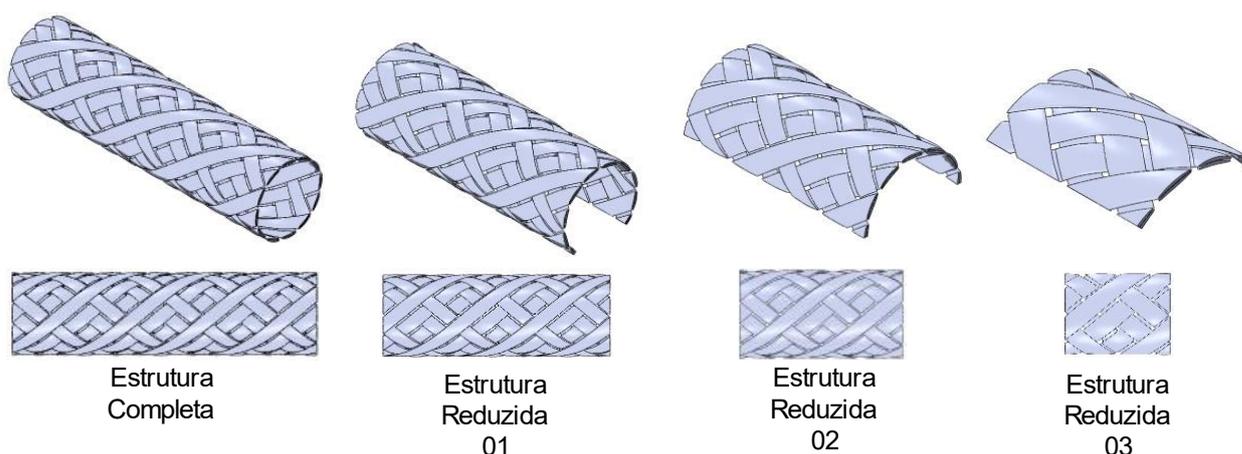


Figura 4.3 Estruturas consideradas

## 4.2 Modelo Numérico

Os modelos geométricos foram importados para o *software* de elementos finitos a fim de se realizar as análises dos modelos estruturais.

Os modelos foram divididos em dois grupos, o primeiro seria o modelo com todos os detalhes que um tubo de FW tem e o outro seriam os modelos reduzidos do tubo.

Ressalta-se que mesmo o FW não possuindo uma matriz, que envolve todos os feixes de fibras, foi criada uma matriz com o objetivo de aplicar a condição de pressão interna em todas as fibras de maneira semelhante para todos os modelos. Como essa matriz não faz parte do componente procurou-se utilizar o menor modulo de elasticidade possível para a matriz e, assim, diminuir sua influência sobre o modelo. Este artifício foi necessário para aplicar de forma condizente as condições de contorno no software de elementos finitos. Sem isto, as condições de contorno não eram transferidas para as fibras de forma adequada, produzindo resultados fisicamente implausíveis.

## 4.2.1 Modelo da estrutura completa

### 4.2.1.1 Material

Os feixes de fibras foram modelados como um material ortotrópico com as propriedades da Tabela 3.1. A matriz foi modelada como um material isotrópico com modulo de Young de 0,1 GPa, como dito, buscou-se utilizar um material com o menor modulo de elasticidade possível para não influenciar na resposta das fibras do FW, ou seja, apenas para ajudar nas transferências de esforços para as fibras.

### 4.2.1.2 Condições de contorno e carregamento

Nesse modelo foi aplicado, nas suas extremidades, uma condição de simetria em relação ao comprimento do tubo a fim de dar maior estabilidade ao problema e garantir que todos os modelos tenham condições análogas. Além disso, foi aplicada uma pressão unitária na parte interna do tubo de 0,1 MPa, esse valor de pressão foi escolhido para garantir que as deformações sejam suficientemente pequenas impedindo que os termos de alta ordem da equação de deformação influenciem o problema e tornem-no não linear.



Figura 4.4 Destacado em vermelho as regiões de aplicação da condição de simetria (a) e da pressão interna (b).

### 4.2.1.3 Interação entre os componentes do modelo

A fim de manter o problema linear foi aplicado uma condição de “colado” entre todas as peças, visto que o problema é por hipótese linear, com pequenas deformações e materiais lineares. Essa condição impõe que os deslocamentos relativos entre o nós dos elementos colados sejam nulos.

## 4.2.2 Modelo da estrutura reduzida

As estruturas reduzidas foram modeladas de forma semelhante diferenciando-se apenas em uma condição de contorno. Nos Modelos Reduzidos (MR) as geometrias não formam uma circunferência completa, dessa forma, adicionalmente, aplicou-se uma condição de simetria circunferencial (SYS cilíndrico). Na Figura 4.5 é possível ver um exemplo da condição de simetria sendo aplicada para o primeiro modelo reduzido, ressalta-se que essa condição também foi aplicada para os outros modelos reduzidos.



Figura 4.5 Exemplo da aplicação da condição de simetria circunferencial, destacado em vermelho a região de aplicação.

### 4.3 Comparação entre o modelo completo e os reduzidos

Para realizar uma análise comparativa entres os modelos, que possuem as mesmas condições de contorno, foram avaliadas regiões da célula unitária, que é apresentada na Figura 4.6. A escolha dessas regiões foram baseadas nas regiões descritas por (AZEVEDO, 2019; DALIBOR, Ingo Hermann, 2020) e estão dispostas na seção 3.1.

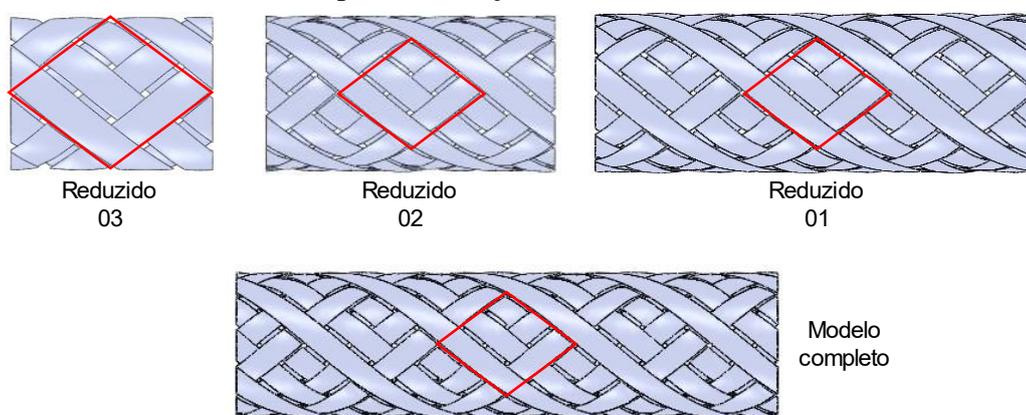


Figura 4.6 *Diamond-mosaic* que se repete em todos os Modelos Reduzidos (MR).

Três regiões foram escolhidas para serem analisadas: R1, R2 e R3. A região R1 compreenderia a região que o FW teria comportamento de laminado, R2 a região de *circumferential crossover circles* e a região R3 representaria a região de entrelaçamento helicoidal, conforme apresentado na Figura 4.7.

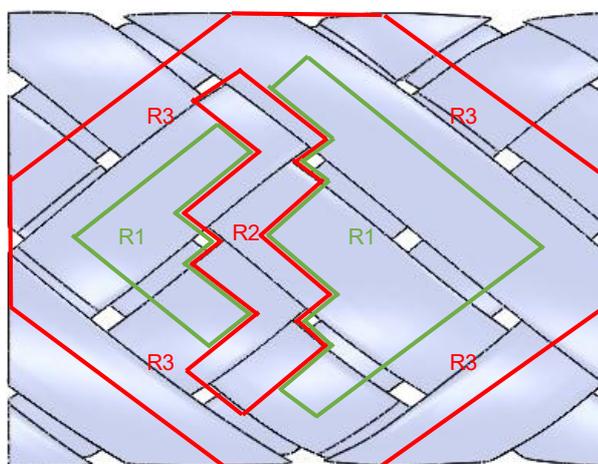


Figura 4.7 As três regiões que foram analisadas.

Em cada uma dessas regiões, de cada um dos modelos, foram obtidas respostas mecânicas relacionadas a efeitos locais, como os valores de deformação na direção normal a seção transversal a fibra, tensão na direção normal a seção transversal a fibra. Com estes dados se obtém as tensões máximas e deformações máximas na direção da fibra para a realização das análises do comportamento de falha. Esses valores foram agrupados e os valores máximos, mínimos, médios e medianos de cada região foram comparados entre si. Neste trabalho, será considerada a falha quando ocorre a ruptura de uma fibra, ou seja, quando o estado de tensão alcança a tensão máxima do regime elástico.

Além disto, apenas para realizar uma verificação da diferença nas distribuições do estado de tensões, aplicou-se a tensão equivalente de Von Mises devido a sua resposta suave no domínio, o que não ocorre com os gráficos com tensões na direção da fibra, que muda a cada elemento.

## 5 RESULTADOS

Para facilitar o entendimento da distribuição de tensões na região da célula unitária, os resultados das três regiões serão apresentados na Figura 5.1.

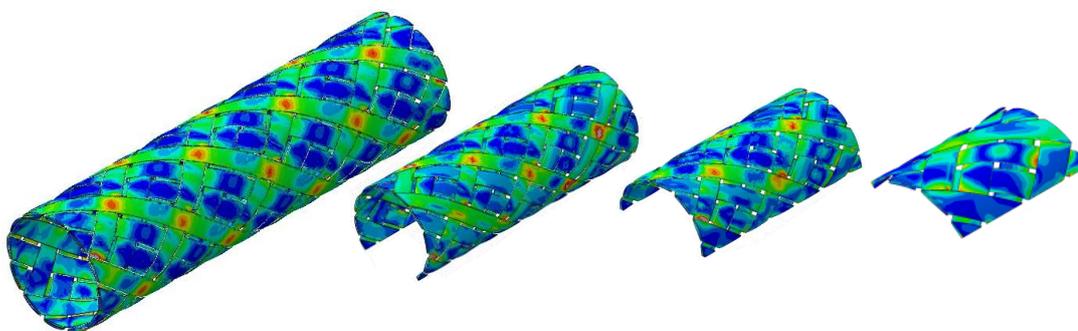


Figura 5.1 Distribuição de tensões nos modelos.

### 5.1 Região R1

Os resultados das tensões máximas e deformações máximas na direção da fibra são apresentados na Figura 5.2, onde o tamanho 1 é o Modelo Reduzido (MR) 03, o tamanho 2 o MR02, o tamanho 3 o MR 01 e o tamanho 4 o Modelo Completo, ordenando assim o menor modelo até o maior, que corresponde ao modelo sem simplificações geométricas, sendo este a referência.

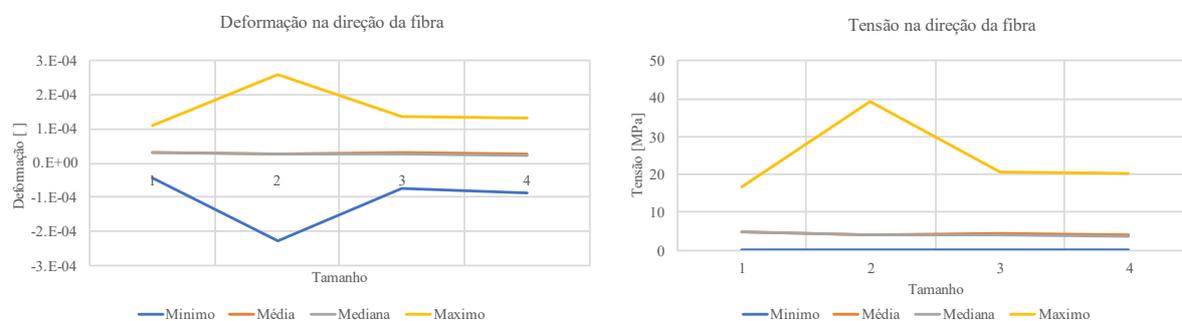


Figura 5.2 Resultados de deformação e tensão para cada tamanho de modelo na região R1.

Não obstante, ainda foi feito um cálculo do erro relativo de cada modelo reduzido em relação ao modelo completo. Essa comparação pode ser vista na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Erro relativo dos três modelos reduzidos em comparação ao modelo completo na região R2.

	Erro Modelo Reduzido 01		Erro Modelo Reduzido 02		Erro Modelo Reduzido 03	
	Direção Fibra		Direção Fibra		Direção Fibra	
	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão
<b>Mínimo</b>	12.99%	-	-164.79%	-	-46.40%	-
<b>Média</b>	10.52%	10.45%	-5.65%	-2.29%	15.58%	17.24%
<b>Mediana</b>	13.78%	13.75%	5.28%	8.69%	30.82%	30.84%
<b>Máximo</b>	2.10%	2.00%	95.53%	93.08%	-18.08%	-18.34%

A região R1, posição que o FW teria resposta semelhante a um laminado, apresenta valores interessantes no que diz respeito a uma possível diminuição do modelo numérico. Pode-se ver que o modelo reduzido 01 apresenta valores próximos do modelo completo dando indícios que seria possível utilizar um modelo numérico reduzido para uma estrutura tubular que está sobre efeito de uma pressão interna.

## 5.2 Região R2

Assim como a região R1 os resultados da R2 foram apresentados na Figura 5.3, e os erros relativos foram plotados na Tabela 5.2.

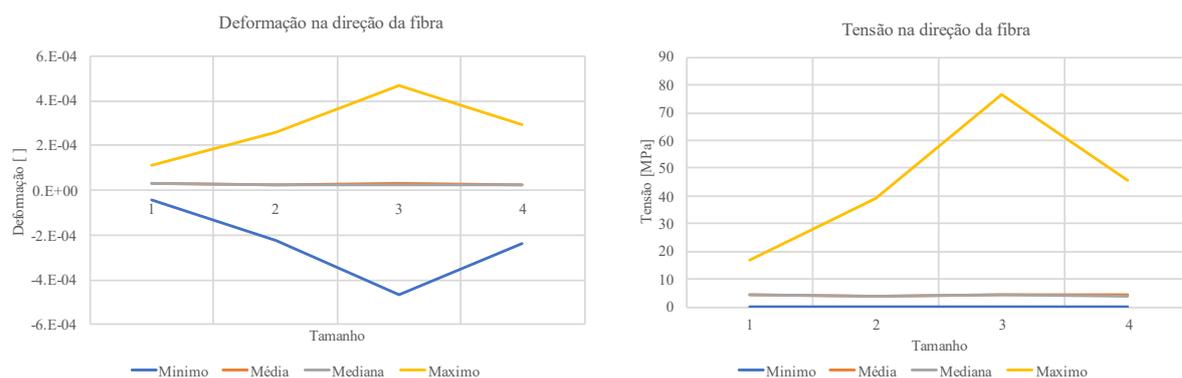


Figura 5.3 Resultados de deformação e tensão para cada tamanho de modelo na região R2.

Tabela 5.2 Erro relativo dos três modelos reduzidos em comparação ao modelo completo na região R2.

	Erro Modelo Reduzido 01		Erro Modelo Reduzido 02		Erro Modelo Reduzido 03	
	Direção Fibra		Direção Fibra		Direção Fibra	
	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão
<b>Mínimo</b>	-95.46%	-	4.65%	-	-82.11%	-
<b>Média</b>	6.12%	7.33%	-3.76%	-1.04%	10.12%	10.28%
<b>Mediana</b>	7.91%	8.85%	0.36%	2.55%	11.46%	11.24%
<b>Máximo</b>	61.16%	67.12%	-11.57%	-14.24%	-62.55%	-63.06%

Essa região compreende a posição em que há o cruzamento dos filamentos. Essa região, ao contrário da região anterior, não mostrou haver uma estabilização entre os valores do modelo completo com os dos modelos reduzidos. Opondo-se a percepção que a região anterior mostrava essa região indica não haver possibilidade de diminuir o modelo e ainda ter dados coerentes com o modelo base.

Com esses valores ainda é possível criar uma correlação entre a existência do cruzamento de fibras e a impossibilidade de utilizar teorias de homogeneização mais simples como a teoria de laminado clássica. Pode-se inferir ainda que a não seria possível usar modelos reduzidos para esse tipo de problema, visto que, mesmo com condições simples de operação, apenas pressão interna, os modelos reduzidos foram incapazes de reproduzirem os valores encontrados pelo modelo completo.

Outro ponto interessante foi que essa região foi a que apresentou maiores valores de tensão indicando que essa seria uma região propícia a falha. Esse resultado corrobora com o trabalho de (SHEN; HAN, 2018) que notou que a região de cruzamento de fibras apresenta maiores tensões e maior probabilidade de falha em relação a região de laminado.

### 5.3 Região R3

Assim como a região R1 os resultados da R3 foram plotados em gráficos, Figura 5.3, e os erros relativos foram plotados na Tabela 5.3.

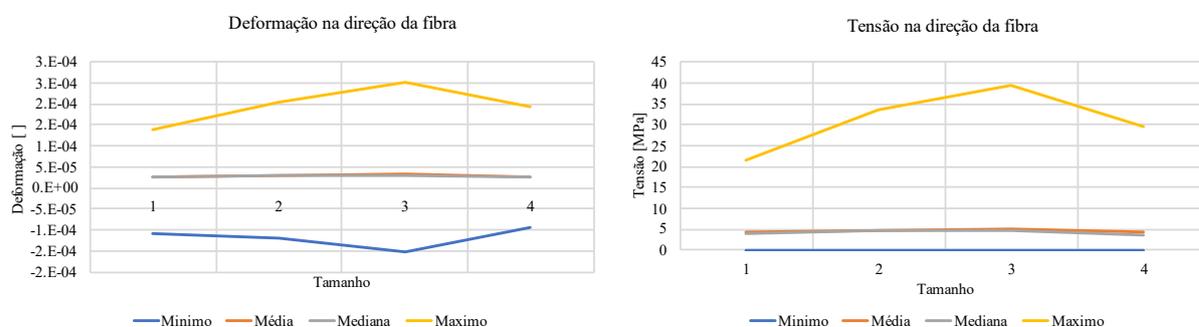


Figura 5.4 Resultados de deformação e tensão para cada tamanho de modelo na região R3.

Tabela 5.3 Erro relativo dos três modelos reduzidos em comparação ao modelo completo na região R3.

	Erro Modelo Reduzido 01		Erro Modelo Reduzido 02		Erro Modelo Reduzido 03	
	Direção Fibra		Direção Fibra		Direção Fibra	
	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão	Deformação	Tensão
<b>Mínimo</b>	-63.09%	-	-27.42%	-	16.13%	-
<b>Média</b>	17.63%	17.37%	10.74%	10.89%	-4.90%	1.32%
<b>Mediana</b>	26.50%	26.25%	19.93%	19.95%	5.95%	7.07%
<b>Máximo</b>	30.29%	32.54%	5.97%	12.81%	-27.51%	-27.17%

Essa região compreende a transição entre os padrões de *diamon-mosaics* existentes, essa região apresenta cruzamento de fibras, mas em menor quantidade do que a região anterior. O fato dessa região apresentar uma estabilidade maior que a região R2 e menor que a região R1 é interessante, pois, essa região, em comparação com as outras duas, apresenta uma quantidade intermediária de cruzamento de fibras e uma condição intermediária de estabilização. Isso pode indicar que a quantidade de cruzamento de fibras prejudica a simplificação do problema por meio de um volume representativo.

## 6 CONCLUSÃO

Com a metodologia proposta foi possível realizar análises comparativas de respostas mecânicas de falha de tubo sob pressão interna, entre modelos reduzidos que avaliam desde a célula unitária produzida pelo FW até um modelo completo sem simplificações no modelamento.

Os resultados demonstram que nenhum modelo reduzido foi capaz prever, com acurácia, as respostas da região da célula unitária no modelo completo. Apesar de umas das regiões, R1, apresentar um tamanho que o resultado fica próximo do valor encontrado no modelo completo, essa não é a região de provável falha o que torna, essa aproximação, pouco relevante.

Os resultados também demonstram que a região R2 apresenta as maiores tensões, corroborando com as informações encontradas na literatura. Adicionalmente, percebe-se que regiões com maiores quantidades de cruzamento de fibras são mais difíceis de serem simplificadas com um volume representativo.

Por fim, considerando as relações geométricas estudadas, é possível afirmar que não é possível obter um número suficiente de células unitárias para formar um EVR. Porém, recomenda-se que em trabalhos futuros estude-se relações geométricas diferentes, aumentando por exemplo o diâmetro da estrutura, sem aumentar o tamanho da célula unitária (padrão de *diamon-mosaics*). Ademais, também sugere-se realizar análises para diferentes aplicações, ou seja, que envolvam diferentes condições de contorno de força e deslocamento, a fim de verificar suas influências no modelo. Além disso, seria de interesse realizar uma tomografia computadorizada de uma estrutura fabricado em FW para utilizar no modelo uma geometria mais próxima da verdadeira.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSAR, M.; XINWEI, W.; CHOUWEI, Z. Modeling strategies of 3D woven composites: A review. **Composite Structures**, [s. l.], v. 93, n. 8, p. 1947–1963, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.010>

AZEVEDO, C. B. De. **Efeito do padrão de enrolamento em cilindros sob compressão axial**. 79 f. 2019. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2019.

BROWN, L. P. *et al.* Characterisation and modelling of complex textile geometries using TexGen. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 406, n. 1, p. 0–8, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/406/1/012024>

BUCHANAN, S. *et al.* Analytical elastic stiffness model for 3D woven orthogonal interlock composites. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v. 70, n. 11, p. 1597–1604, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.05.019>

CARNIEL, T. A. INVESTIGAÇÕES NUMÉRICAS MULTIESCALA DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE TECIDOS TENDINOSOS. **UFSC**, [s. l.], v. 4, p. 9–15, 2017.

DALIBOR, I. H. *et al.* A geometric approach for filament winding pattern generation and study of the influence of the slippage coefficient. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 576, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2083-2>. Acesso em: 15 mar. 2021.

DALIBOR, Ingo Hermann. ESTUDO ANALÍTICO , NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DO PROCESSO FILAMENT WINDING EM PARÂMETROS DO PROCESSO FILAMENT WINDING EM SUPERFÍCIES. [s. l.], 2020.

DE LEON, D. M. Otimização Estrutural de Placas Compostas Laminadas Sujeitas a Efeitos Aeroelásticos. [s. l.], 2011.

EFENDIEV, Y.; HOU, T. Y. **Multiscale Methods. Theory and Applications**. [S. l.: s. n.], 2009. *E-book*.

EGGERS, F. **COMPORTAMENTO DE ANÉIS CARBONO/EPÓXI PRODUZIDOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR SOB COMPRESSÃO E CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO**. Porto Alegre: [s. n.], 2019.

FURTADO, R. de L. A. Filament Winding Simulation. [s. l.], n. March, 2016.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials Jones 1999**. [S. l.: s. n.], 1999. ISSN 01915665.

KNIGHT, N. F. *et al.* Global/local methods research using a common structural analysis framework. **Finite Elements in Analysis and Design**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 91–112, 1991. Available at: [https://doi.org/10.1016/0168-874X\(91\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0168-874X(91)90053-2)

ROUSSEAU, J.; PERREUX, D.; VERDIÈRE, N. The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. **Composites Science and Technology**, [s. l.], v.

59, n. 9, p. 1439–1449, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00184-5)

SHARMA, P. *et al.* **Geometric modeling and finite element analysis of kevlar monolithic and carbon-kevlar hybrid woven fabric unit cell.** [*S. l.: s. n.*], 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.023>

SHEN, C.; HAN, X. Damage and failure analysis of filament wound composite structure considering fibre crossover and undulation. **Advanced Composites Letters**, [*s. l.*], v. 27, n. 2, p. 55–70, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1177/096369351802700202>

VOLETI, S. R.; CHANDRA, N.; MILLER, J. R. Global-local analysis of large-scale composite tructures using finite element methods. **Computers and Structures**, [*s. l.*], v. 58, n. 3, p. 453–464, 1996. Available at: [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(95\)00172-D](https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00172-D)

YIN, D. mei *et al.* Prediction of three-dimensional elastic behavior of filament-wound composites based on the bridging model. **Journal of Physics: Conference Series**, [*s. l.*], v. 1507, n. 6, p. 2–9, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.04.006>