

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE FALHA DE CILINDROS DE MATERIAL
COMPÓSITO MANUFATURADOS ATRAVÉS DE *FILAMENT WINDING*

por

Leonardo Gosmann Morais

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, junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DE FALHA DE CILINDROS DE MATERIAL
COMPÓSITO MANUFATURADOS ATRAVÉS DE *FILAMENT WINDING*

por

Leonardo Gosmann Morais

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
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, junho de 2018

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo amor, carinho, incentivo e suporte ao longo de toda minha vida.

À minha namorada Laura, por toda dedicação, carinho, amor e compreensão, mas principalmente por ter sido minha maior companheira no último ano.

Aos meus amigos, pela amizade e apoio durante toda minha trajetória na UFRGS.

Ao professor Rato e ao Tales, por me guiarem nesse projeto e sempre com dedicação e paciência puderam me auxiliar com maestria.

MORAIS, L. G. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE FALHA DE CILINDROS DE MATERIAL COMPÓSITO MANUFATURADOS ATRAVÉS DE *FILAMENT WINDING***. 2018. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Utilizando-se um material compósito, formado por uma matriz polimérica e reforçado de fibra de carbono, produzido por *filament winding*, foi feito um estudo de seu comportamento mecânico e da influência que determinados padrões de enrolamento podem ter sobre as cargas de falha. Foram realizados ensaios mecânicos de tração radial em três *patterns* diferentes, com o mesmo grau de cobertura e mesmo número de ciclos, com o intuito de compará-los. Os resultados mostram uma diferença de até 46% de carga de falha entre *patterns* distintos e apontam para a tendência do maior padrão de enrolamento filamentar ser o mais adequado para resistir a altas cargas, para um mesmo grau de cobertura.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito, enrolamento filamentar, padrão de enrolamento.

MORAIS, L. G. EXPERIMENTAL STUDY OF FAILURE OF CYLINDERS OF COMPOSITE MATERIAL MANUFACTURED BY FILAMENT WINDING. 2018. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

Using a composite material, formed by a polymeric and reinforced carbon fiber matrix, produced by filament winding, a study was made of its mechanical behavior and the influence that certain winding patterns can have on the failure loads. Mechanical tests of radial tensile were carried out in three different patterns, with the same degree of coverage and the same number of cycles, in order to compare them. The results show a difference of up to 46% in failure load between different patterns and point to the tendency of the higher filament winding pattern to be the most adequate to withstand high loads for this degree of coverage.

KEYWORDS: Composite, filament winding, pattern

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1	<i>Filament Winding</i>	2
4.2	Processo de fabricação	3
4.2.1	Impregnação e preparação do mandril	3
4.2.2	Enrolamento	3
4.2.3	Desmandrilhamento	3
4.3	Tipos de enrolamento	3
5.	<i>PATTERN</i>	4
6.	METODOLOGIA	5
6.1	Montagem de equipamentos.....	5
6.2	Corpos de prova	6
6.3	Ensaio experimentais	7
6.4	Análise de falhas	8
7.	RESULTADOS	8
7.1	Comparação de <i>patterns</i>	8
7.2	Análise Estatística	10
8.	CONCLUSÕES.....	12
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
	ANEXO A	14

1. INTRODUÇÃO

Os plásticos reforçados aparecem cada vez mais nas nossas vidas em aplicações de alto desempenho e baixo peso. Isso deve-se ao fato de possuírem, entre outras características, uma elevada rigidez específica, alta resistência específica e a integração de diferentes componentes em um só (Correia, 2008).

É inquestionável que os materiais compósitos, sob as mais diversas formas, têm aumentado sua importância na engenharia atual. Sobre esses materiais tem recaído a atenção e o interesse dos mais variados centros tecnológicos de investigação e desenvolvimento, constituindo-se assim numa fonte de inovação (Simões, 1992).

Os materiais compósitos são constituídos por, no mínimo, dois componentes: o reforço e a matriz (Hahn *et al.*, 1994). O reforço pode ser particulado, de fibra curta, longa ou contínua. Já a matriz, pode ser cerâmica, metálica ou polimérica. As propriedades mecânicas do material compósito dependem tanto da constituição das fibras como da interação na interface entre fibra e matriz, da fração de fibras e da orientação destas (Zu, 2012).

Na fabricação destes materiais, diversos processos podem ser adotados. Entre eles, o processo de enrolamento filamentar assume uma relativa importância na obtenção de determinadas estruturas. Esse é um processo singular e característico que surgiu em aplicações na indústria aeroespacial e que rapidamente se estendeu à obtenção de produtos comerciais (Simões, 1992).

O processo de enrolamento filamentar, ou *filament winding* (FW), é uma técnica eficiente, versátil e viável, usada normalmente em produção em massa de produtos compósitos de fibras reforçadas. A técnica é relativamente simples, envolvendo o enrolamento de fibras contínuas, advindas de bobinas impregnadas ou imersas em banho de resina, depositadas e enroladas em um mandril girante (Sousa, 2007).

O FW possui vantagens frente a outras técnicas de processamento de compósitos, como precisão no posicionamento das fibras e altas produtividade e repetitividade. O uso de fibras contínuas no FW simplifica a fabricação de muitas peças e aumenta a confiabilidade (Almeida, 2016). Na fabricação por FW, certos padrões de enrolamentos podem ser construídos. Esses padrões são conhecidos como *patterns* (PTR) e têm grande importância nas propriedades mecânicas do material.

O desafio proposto é de identificar se esses padrões de enrolamentos influenciam na carga de falha do compósito. A avaliação correta do problema proposto, por meio de estudos teóricos e ensaios experimentais, leva a otimização de processos de manufatura, aumentando a eficiência mecânica desses componentes, além de reduzir custos do processo.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar um procedimento experimental de ruptura em cilindros fabricados através de enrolamento filamentar. Os ensaios serão baseados em um ensaio de tração radial e visam determinar se o padrão de enrolamento das fibras, com uma configuração específica de grau de cobertura e número de ciclos, influi de forma considerável sobre as cargas de falha dos cilindros. Como objetivo específico, pretende-se obter uma correlação entre os diversos *patterns* e as alterações nas cargas de ruptura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O emprego de laminação por enrolamento filamental foi observado pela primeira vez na publicação de uma patente sobre instrumentos aplicados ao enrolamento filamental (Lohest (1957)). A partir disso, Baxter Jr. (1965) patenteou a primeira máquina de FW, a qual ainda era operada manualmente.

Ao longo dos anos, o uso de materiais compósitos como componentes estruturais cresceu de forma acentuada, bem como o interesse científico e industrial. Muitas melhorias foram feitas, principalmente no que concerne a automação e a concepção de novos projetos.

Hahn (1994) cita que a maneira mais econômica de incorporar materiais compostos em grandes estruturas é usar técnicas de produção automatizada. O mesmo autor refere-se ao fato de que o *filament winding* é uma das principais técnicas para isso, visto que uma ampla quantidade de matérias-primas pode ser rápida e precisamente enrolada em um mandril com o uso de um sistema de enrolamento controlado por computador.

Com o processo de FW, Hahn (1994) ainda constatou que padrões de entrelace podem ser construídos. Esses padrões são caracterizados por figuras romboidais repetidas, desenvolvendo três regiões distintas no componente: os círculos de cruzamento circunferencial, as regiões de cruzamento helicoidal e as regiões similares ao entrelaçamento nos tecidos.

Segundo Jones (1996), o conhecimento do processo da formação do *pattern* é importante, visto que as inúmeras variáveis que influem na sua constituição podem ser ajustadas, dentro de alguns limites, para melhor atender o projeto. Ainda, de acordo com o autor, no que concerne a teoria da laminação, padrões distintos correspondem ao mesmo modelo matemático.

Em sua pesquisa, Koussious (2004) validou a tese de Jones afirmando que o *pattern* influencia de maneira muito forte nas propriedades mecânicas dos componentes fabricados por enrolamento filamental.

No entanto, as conclusões dessa influência ainda divergem na literatura. Para pressão interna, por exemplo, Mozorov (2006) constatou que *patterns* distintos resultam em diferenças de mais de duas vezes na falha do laminado, diferentemente dos trabalhos anteriores de Rousseau (1999), que não obteve diferenças significativas em seus experimentos. Além disso, no trabalho de Hernandez-Moreno (2008), o comportamento de flambagem não foi afetado pelo padrão, mas sob torção tem forte influência dependendo do mecanismo de falha. Os resultados divergentes podem ser causados pelo processo de geração do padrão.

Atualmente, vários experimentos continuam sendo realizados para compreender com exatidão a resposta mecânica de componentes fabricados por FW e a influência do *pattern*, dependendo das características da carga.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 *Filament Winding*

Filament winding é um processo de fabricação difundido para materiais compósitos e é normalmente aplicado para obtenção de peças rotativas como tubos e vasos de pressão.

O processo de enrolamento filamental consiste numa simples operação, na qual

reforços contínuos, sob a forma de *rovings* ou monofilamentos, metálicos ou não metálicos, são enrolados em torno de um mandril em rotação. O controle do ângulo de enrolamento e a colocação da fibra são efetuados por máquinas de enrolamento, nas quais a velocidade transversal do alimentador é sincronizada com o movimento de rotação do mandril.

As altas velocidade e precisão no enrolamento de fibras contínuas reforçadas são as bases do processo.

4.2 Processo de fabricação

O processo de fabricação do filamento envolve três etapas: impregnação e preparação do mandril, enrolamento e desmandrilhamento.

4.2.1 Impregnação e preparação do mandril

A resina e o reforço são ligados em um processo de impregnação, que pode ser a seco ou úmido (Simões, 1992).

No enrolamento a seco, o conteúdo de resina é uniforme e a largura de fita bem controlada. É um enrolamento de maior qualidade, sendo assim mais oneroso. Já no enrolamento úmido, a impregnação é feita puxando a fibra através de um banho de resina. É o mais aplicado, pois tem menor custo. Vários fatores podem alterar o conteúdo da resina, como por exemplo a tensão de enrolamento, a viscosidade da resina e o diâmetro do mandril.

4.2.2 Enrolamento

Para obter o enrolamento desejado, o operador da máquina deve inserir vários parâmetros, tais como diâmetros do mandril, velocidade de mandril, largura da fita e ângulo enrolamento. Nessa fase, é importante que o operador faça um rigoroso controle de qualidade. O processo FW termina curando o laminado em um forno.

4.2.3 Desmandrilhamento

Para finalizar o processo, a peça deve ser retirada do mandril. Para facilitar, um agente de liberação é aplicado inicialmente no mandril, o que pode influenciar o coeficiente de deslizamento entre a fita e o mandril.

4.3 Tipos de enrolamento

Para que sejam distinguidos um tipo de enrolamento de outro, são analisados alguns aspectos, como largura de banda dos *rovings*, velocidade de rotação do mandril e velocidade transversal do alimentador. Geralmente, os modos de enrolamento são divididos em três tipos: polar, o arco e helicoidal.

No enrolamento helicoidal, os movimentos devem ser repetitivos para obtenção de superfície e espessura uniformes. Devido à continuidade do processo, um procedimento de retorno nas extremidades do mandril deve ser realizado.

Com FW, podem ser enroladas quantas camadas forem necessárias. No enrolamento helicoidal, duas camadas emaranhadas são simultaneamente enroladas e têm direções opostas, o que resulta num laminado antisimétrico. As camadas podem ser

enroladas com fitas colocadas lado a lado, ou com uma sobreposição de acordo com o número de camadas requeridas.

Ademais, esse tipo de enrolamento implica necessariamente numa interligação das fibras, o que permite uma excelente resistência interlaminar, porém prejudica a resistência na direção paralela às fibras, devido à curvatura a qual fica sujeita a fibra nos pontos de entrelace (Simões, 1992).

No enrolamento de arco, a fita é posicionada lado a lado e o ângulo de enrolamento resultante é próximo de 90° .

No enrolamento polar, aplicado na fabricação de vasos, a trajetória da fita vai de um domo ao outro, tocando a abertura polar de cada lado para retornar. É o tipo de enrolamento mais indicado para geometrias esféricas.

5. PATTERN

O *pattern* é uma característica especial do processo de enrolamento de filamentos. São certos padrões que podem ser formados e que podem ter grande importância nas propriedades mecânicas do material. O principal fator para gerar o *pattern* no compósito é a trajetória de retorno, realizada nas extremidades do mandril.

Do ponto de vista da teoria da laminação, *patterns* distintos podem corresponder matematicamente ao mesmo tipo de empilhamento/orientação de fibras e, portanto, mesmo modelo matemático. Na prática, no entanto, tem-se verificado variações que podem ser explicadas pelo tipo de enrolamento empregado. Mesmo tendo a mesma quantidade de material e quase o mesmo tempo de produção, padrões diferentes podem ter impacto na mecânica dos componentes, dependendo das características de carga.

O *pattern* é organizado em uma geometria de diamante-mosaico, como mostrado na Figura 5.1. Dois exemplos são apresentados e ambos são desenvolvidos no mesmo mandril, largura de fita e ângulo de enrolamento: o componente na Figura 5.1(a) mostra cinco diamantes na direção transversal, enquanto que a da Figura 5.1 (b) apresenta nove. Cada losango é dividido em dois triângulos principais, um lado com ângulo de enrolamento $+\alpha$ o outro lado com $-\alpha$. Abaixo da camada superficial, a fita apresenta um ângulo com o sinal oposto.

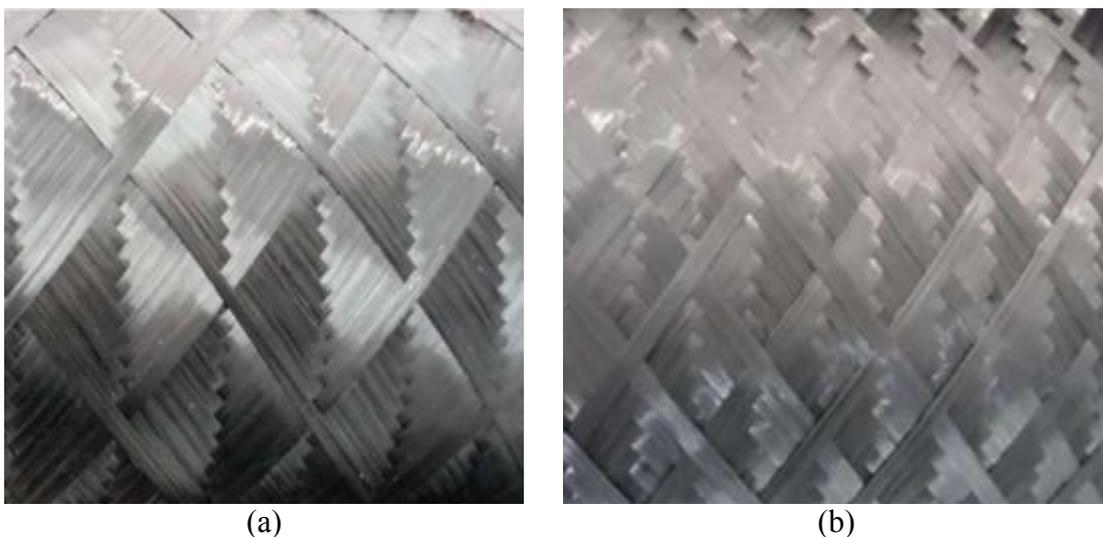


Figura 5.1 - Componente com os mesmos parâmetros geométricos onde (a) tem 5 diamantes e (b) tem 9 diamantes na periferia do mandril.

6. METODOLOGIA

6.1 Montagem de equipamentos

Foram projetadas quatro placas (Figura 6.1) e quatro pinos (Figura 6.2) com aço 1020. Dos últimos, dois são de 17 mm e dois de 9,5 mm.

Como o ensaio de tração radial não é normalizado, para auxiliar no projeto, foi utilizado o *software* de elementos finitos Ansys. Como condição de contorno, uma força de 5kN foi aplicada no centro de cada placa. Constatou-se que com essa geometria, 90 mm de altura e 50 mm de largura, seguindo a NBR 8800 (2008), o risco de rasgamento de pino seria evitado. Ainda, foi aplicada uma tinta *spray* na cor preta, a fim de evitar a corrosão na placa. Os pinos foram usinados no torno do próprio laboratório.



Figura 6.1- Quatro placas de aço 1020 projetadas para o ensaio, após a aplicação de tinta spray na cor preta.



Figura 6.2 - Dois pinos com 17 mm de diâmetro (à esquerda) e dois pinos com 9,5 mm de diâmetro (à direita), usinados no próprio GMAp.

6.2 Corpos de prova

Foram utilizados quinze corpos de prova no ensaio, produzidos no Laboratório de Polímeros (LAPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O número de amostras de cada um dos três *patterns* (1/1, 3/1 e 7/1) é o mesmo. A escolha desses padrões deve-se ao fato de todos possuírem o mesmo grau de cobertura, o mesmo número de ciclos e, portanto, igual quantidade de material e tempo de produção. O compósito é um tubo de, em média, 100mm de comprimento e 50mm de diâmetro, como apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4. Todos os corpos de prova foram catalogados antes do experimento.



Figura 6.3 - Vista lateral do compósito produzido por enrolamento filamental.



Figura 6.4 - Vista superior do corpo de prova.

6.3 Ensaios experimentais

Todos os experimentos foram realizados nas dependências do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul a uma temperatura ambiente de 23°C, na máquina de ensaios Shimadzu Autograph AG-X plus, equipada com uma célula de carga de 250kN. Todos os ensaios foram realizados até o rompimento da primeira lâmina do compósito. Foi aplicada uma velocidade de operação da máquina de 5 mm/min, e o principal dado coletado foi a força máxima (em kN) suportado pelo compósito até a falha.

O ensaio realizado foi de tração radial. A razão principal para a escolha desse tipo de experimento é buscar mais exatidão nos resultados de carga de falha, visto que em ensaios de compressão o contato da placa com a superfície externa tem leves variações de espessura, diferentemente da parte interna do corpo de prova, que é formada por uma resina termoplástica lisa. A figura 6.5 mostra o momento do ensaio.

Foram realizados ensaios de três diferentes patterns, cada um com cinco amostras. É necessário realizar o ensaio com diferentes amostras para estimar corretamente o erro associado ao ensaio. Os dados foram analisados estatisticamente pelo método One Way Anova, pois avalia a significância dos diversos fatores controláveis e interações que envolvem uma variável resposta. O método está descrito no Anexo A.

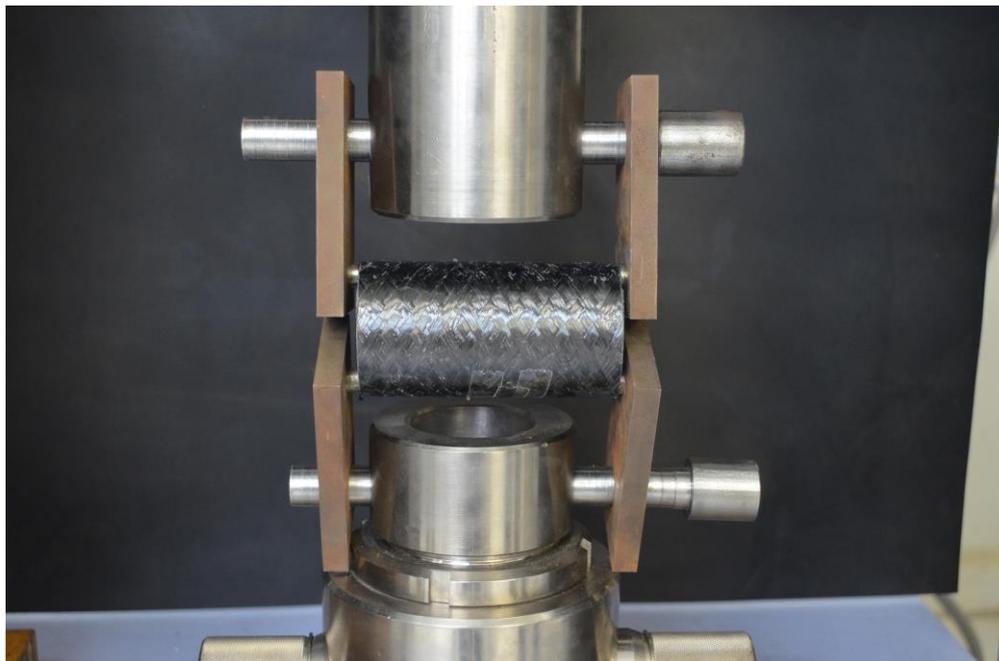


Figura 6.5 - Corpo de prova posicionado momentos antes do ensaio de tração começar.

6.4 Análise de falhas

Nos critérios usuais da Mecânica dos Materiais Laminados, as amostras são idênticas, pois a espessura, orientação e propriedades das fibras são as mesmas. Ou seja, a teoria não enxerga a diferença causada pelo *pattern*.

A análise de falhas consistiu em dois passos. Primeiro foi realizada uma análise qualitativa no gráfico, selecionando um trecho de mudança súbita na inclinação da curva carga x deslocamento. Posteriormente, foram observados os dados do trecho antes escolhido e então selecionado o valor da máxima carga antes da queda repentina de inclinação.

7. Resultados

7.1 Comparação de *patterns*

Foram analisados e comparados três *patterns* distintos com a mesma configuração, ou seja, mesma quantidade de material e mesmo tempo de produção. Os padrões 1/1, 3/1 e 7/1 apresentam um grau de cobertura de 102,26% e 20 ciclos em sua formação, e, assim, podem ser comparados entre si.

Cinco amostras de cada *pattern* foram ensaiadas, e as curvas experimentais resultantes para a carga de falha em função do deslocamento podem ser vistas nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3, para os padrões 1/1, 3/1 e 7/1, respectivamente.

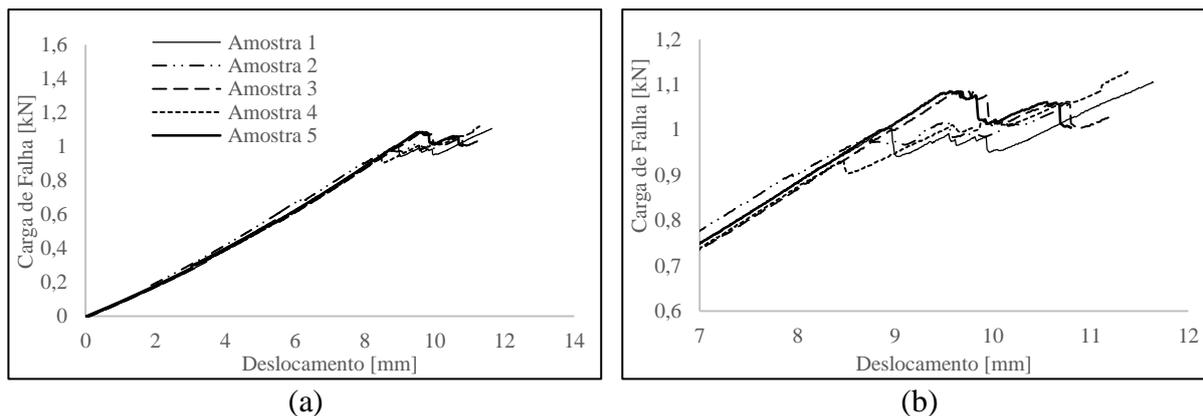


Figura 7.1 - Curvas dos dados analisados do pattern 1/1 mostrando (a) toda sua trajetória e (b) o foco no momento da falha.

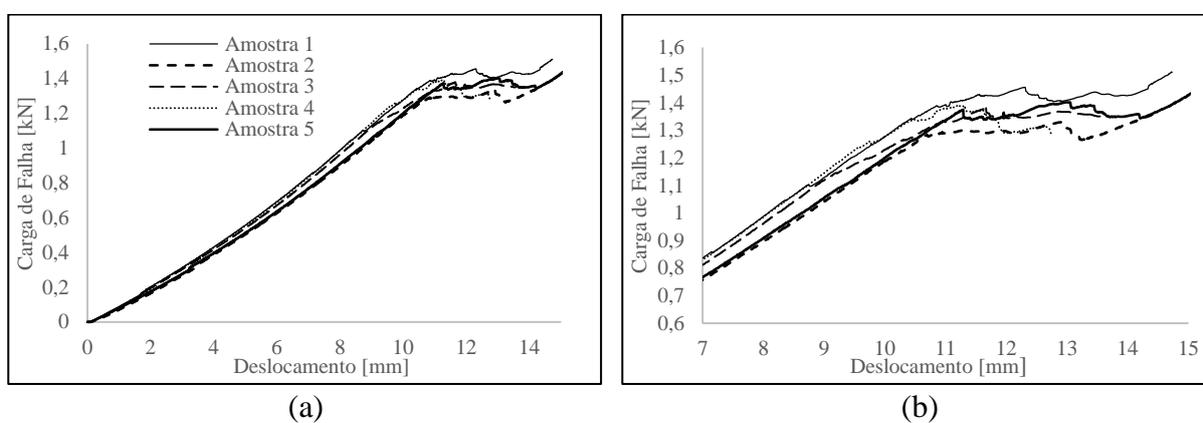


Figura 7.2 - Curvas dos dados analisados do pattern 3/1 mostrando (a) toda sua trajetória e (b) o foco no momento da falha.

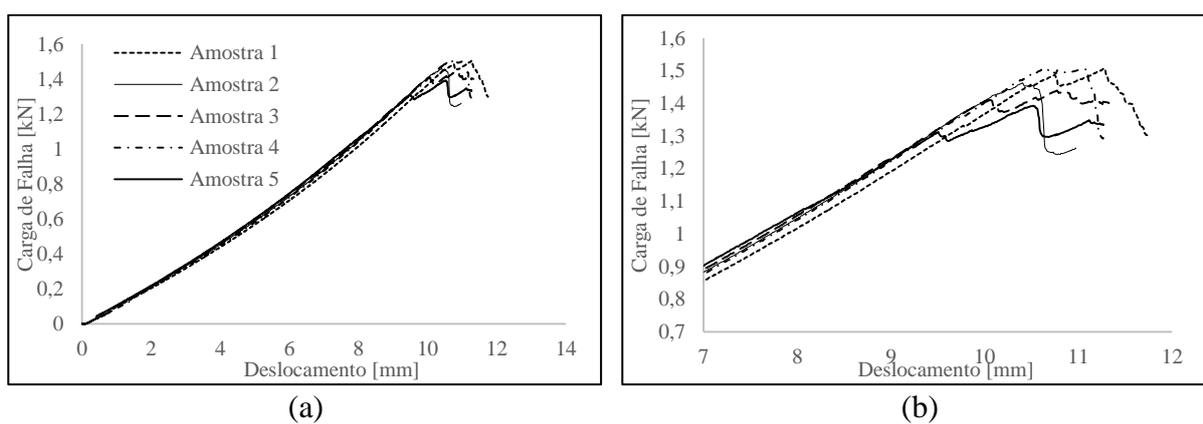


Figura 7.3 - Curvas dos dados analisados do pattern 7/1 mostrando (a) toda sua trajetória e (b) o foco no momento da falha.

A Figura 7.4 mostra a diferença de carga de falha entre as amostras com o mesmo grau de cobertura.

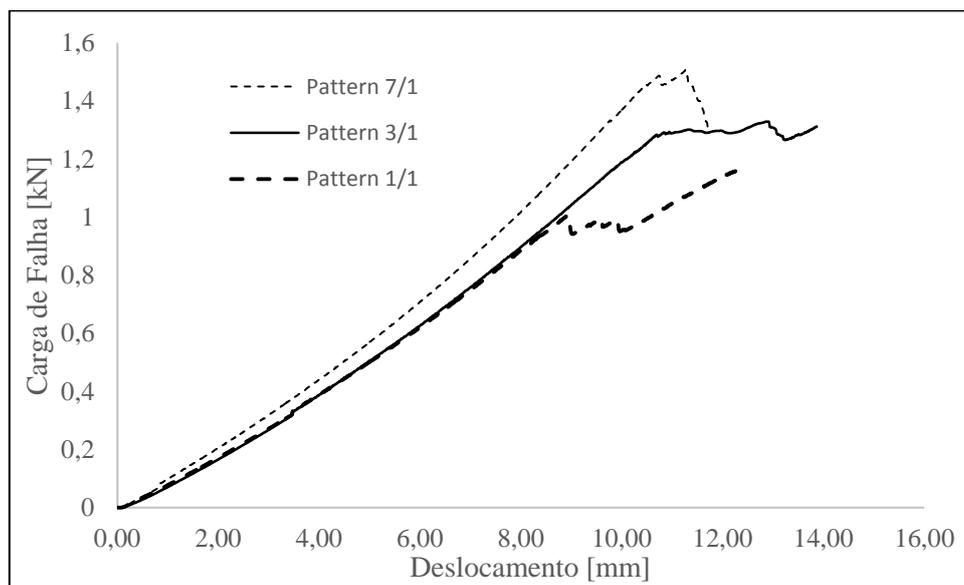


Figura 7.4 – Curvas de carga x deslocamento de amostras dos três patterns estudados comparando sua trajetória até a falha.

Nota-se uma tendência que, para essa configuração, quanto maior o *pattern*, mais carga o FW suporta. Entretanto, essa deve ser validada por um método estatístico adequado.

7.2 Análise Estatística

O objetivo da análise estatística consistiu na interpretação de forma correta da diferença entre as cargas de falha para os diversos *patterns*, podendo essa ser significativa ou não.

O método de análise utilizado foi o *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA), que avalia a significância dos diversos fatores controláveis e interações que envolvem uma variável resposta. A formulação do método *One-Way* ANOVA pode ser encontrado no Anexo A. Há suposições básicas para validar a análise de variância, sendo elas distribuição normal de dados, aleatoriedade dos erros e independência estatística dos valores observados.

As Tabelas 7.1 e 7.2 mostram os resultados obtidos e a tabela ANOVA gerada pelo *software* Minitab, respectivamente.

Pattern	1/1	3/1	7/1	
	1,004	1,332	1,485	
	0,975	1,231	1,388	
Carga de Falha [kN]	0,98	1,294	1,531	
	0,932	1,12	1,38	
	0,981	1,19	1,361	
Total	4,872	6,167	7,145	T.. = 18,184
Nº Obs.	5	5	5	N = 15
Médias	0,974	1,233	1,429	$\bar{Y}_{..} = 1,212$
Desvios	0,0262	0,0839	0,0746	

Tabela 7.1 - Valores obtidos para a carga de falha dos patterns 1/1, 3/1 e 7/1, bem como suas médias e desvios.

Anova One-Way					
Fonte	GDL	SQ	MQ	Fcalc	Ftab
Pattern	2	0,5202	0,2601	58,71	0
Erro	12	0,05314	0,00443		
Total	14	0,4086			

Tabela 7.2 - Tabela gerada pelo software Minitab com os resultados obtidos para a análise de estatística.

Para avaliar a significância é necessário o cálculo do Teste F, que compara a variância entre grupos e a variância dentro do grupo. Para isso, devem ser comparados os valores F_{calc} e F_{tab} . Ao passo que F_{calc} é a razão entre as variâncias entre grupos e dentro do grupo, F_{tab} é determinado pelo valor tabelado da Distribuição de Fisher para um determinado Nível de Significância. Nesse trabalho, foi considerado um Nível de Significância de 5%. Caso F_{calc} seja maior que F_{tab} , pode-se concluir que o efeito do fator controlável é significativo sobre a variável de resposta.

Pela Tabela 7.2, percebe-se que o efeito do fator mudança de *pattern* é significativo sobre a variável de resposta carga de falha. Como esse efeito se mostrou significativo, deve ser realizada uma comparação múltipla de médias para identificar qual *pattern* otimiza a variável resposta. Essa otimização pode levar em conta qualidade, economia ou ambos. Em princípio, buscamos um enrolamento que possa suportar a maior carga possível, isto é, a variável foi considerada como do tipo maior-é-melhor.

Na comparação múltipla de médias pelo Método de Duncan considera-se que as médias diferem se a média de um grupo estiver fora da curva da média de outro grupo, ou seja, quando a distância entre elas for maior do que três vezes o desvio padrão das médias. Em termos práticos, para calcular o limite de decisão basta multiplicar por três o desvio padrão das médias obtido pelo Teorema do Limite Central. A Tabela 7.3 mostra o valor das médias das amostras dos diferentes *patterns*.

Pattern	Média [kN]	Desvio [kN]
1/1	0,974	0,0262
3/1	1,233	0,0839
7/1	1,429	0,0746

Tabela 7.3 - Resultados obtidos para a média e desvio padrão dos três patterns estudados.

Na Tabela 7.4 é apresentada a comparação múltipla das médias, o desvio padrão das médias e o limite de decisão. Se a diferença entre duas médias é maior que o LD, então existe diferença significativa entre cada *pattern*.

Comparação Múltipla de Médias	
3/1 - 1/1	0,259
7/1 - 3/1	0,196
Desvio padrão das médias	0,029
Limite de decisão	0,089

Tabela 7.4 - Comparação Múltipla de médias, desvio padrão das médias e o limite de decisão.

De maneira prática, como temos diferença significativa entre os padrões, se levarmos em conta a resistência a altas cargas, é conclusivo que o 7/1 é o mais satisfatório, comparado com os outros dois padrões.

8. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi realizado um ensaio experimental de tração radial para identificar se diferentes padrões de enrolamento influenciam de maneira significativa nas cargas de falha do cilindro fabricado por enrolamento filamentar. É importante mencionar que, do ponto de vista da Mecânica dos Materiais Laminados, todas as amostras são idênticas, independentemente do *pattern*. Assim, uma análise de falha pelos critérios usuais (máxima tensão, Tsai-Wu, Tsai-Hill, etc.) resultariam no mesmo resultado para carga de falha. No presente estudo, constatou-se que devido a diferença considerável no resultado dos *patterns* estudados, é possível melhorar a resposta mecânica de componentes produzidos por FW alterando as propriedades do processo, mantendo tempo de produção e quantidade de material. Há uma clara tendência de que, para essa configuração, o maior *pattern* é o mais adequado para suportar altas cargas. Desta forma ficou demonstrado experimentalmente que existe influência do *pattern* na carga limite dessas estruturas, em carregamentos de tração, e que os critérios de falha deveriam incorporar o mesmo de alguma forma nas suas equações.

Como o experimento foi realizado com apenas um grau de cobertura específico, para trabalhos futuros, como sugestão de estudo, poderiam ser analisados diferentes graus de cobertura para ser possível a generalização dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida Jr, J. H. S. **“Dano e falha em compósitos estruturais de carbono/epóxi processados por filament winding”**. 2016. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **“Projetos de estruturas de aço e estruturas”**. Rio de Janeiro, p. 85, 2008.

Baxter Jr., J. et. Al. Filament Winding Machine- US3380675 – 1965. In: **“United States Patent Office Magazine”**. N° 430702. Washington: United States Patent Office, p. 15, 1968.

Correia, N. **“Enrolamento filamentar de materiais compósitos”**. Cad Project, Porto, 2008.

Hahn, H. T. et al. **“Structural design criteria for filament-wound composite shells”**. NASA Technical Reports Server, University Park, 1994.

Hernández-Moreno, H. **“Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure”**. Composites Science and Technology, 2008.

Jones, Robert M. **“Mechanics of Composite Materials”**. 1st. Philadelphia: Taylor & Francis, 1996.

Koussios. S. **“Filament Winding - A Unified Approach”**. Doutorado de dissertação, Universit at Delft, 2004.

Lohest, H. Filament Winding Machine – US3082361 – 1957. In: **“United States Patent Office Magazine”**. N° 776532. Washington: United States Patent Office, p. 5, 1963.

Mozorov, E. V. **“The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells”**. Composite Structures, v. 76, n. 1-2, p. 123–129, 2006

Rousseaua. et al. **“The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. Composites Science and Technology”** 59(9):1439–1449, 1999.

Simões, J. A. **“Enrolamento Filamentar: Simulação visual de trajetórias geodésicas e não-geodésicas”**. 1992. 239f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Universidade do Porto, Porto, 1992.

Sousa, S. R. M. **“Estudo de Uma Máquina de Enrolamento de filamentos e análise de seu produto por elementos finitos”**. Dissertação Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Zu, L. et al. **“Pattern design for non-geodesic winding toroidal pressure vessels”**. In Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, 2007.

ANEXO A - Formulação *One-Way* ANOVA

Fator A	A1	A2	..	Ak
	Y_{11}	Y_{12}	..	Y_{1k}
	Y_{21}	Y_{22}	..	Y_{2k}
	Y_{ij}	..

	$Y_{n1,1}$	$Y_{n2,2}$..	$Y_{nk,k}$
Totais $T_{.j}$	$T_{.1}$	$T_{.2}$..	$T_{..} =$
Nº Obs. n_j	n_1	n_2	..	$N =$
Médias $\bar{Y}_{.1}$	$\bar{Y}_{.1}$	$\bar{Y}_{.2}$..	$\bar{Y}_{..} =$

Anova One-Way				
Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F
Entre Grupos	K-1	SQG	MQG	$F = MQG / MQR$
Dentro Grupos	N-K	SQR	MQR	
Total	N-1	SQT		

$$TC = T_{..}^2 / N$$

$$SQT = \sum (Y_{ij}^2) - TC$$

$$SQG = \sum (T_{.j}^2 / n_j) - TC$$

$$SQR = SQT - SQG$$

$$MQG = SQG / (K - 1)$$

$$MQR = SQR / (N - K)$$