



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA PARA MANUFATURAR PERFIS ESTRUTURAIS EM MATERIAIS COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MACHINE FOR MANUFACTURING STRUCTURAL PROFILES IN COMPOSITE MATERIALS USING THE FILAMENT WINDING PROCESS

Márcio Marques da Silva^{1, i}

Jonas de Carvalho^{2, ii}

José Tadeu Aldrigue^{3, iii}

Data de submissão: (07/06/2024) Data de aprovação: (26/06/2024)

RESUMO

Materiais Compósitos Reforçados por Fibras Sintéticas (MCRFS) tem sido aplicado em várias áreas da engenharia em substituição aos materiais metálicos com a vantagem de baixo peso e elevada resistência mecânica obtidos com a combinação adequada de resinas e fibras sintéticas. Dentre os vários processos de manufatura de perfis em MCRFS, o processo de *Filament Winding (FW)*, permite a obtenção de perfis estruturais de revolução, com fibras contínuas impregnadas com resina. Nesse trabalho foi projetado e construída uma máquina automatizada e programável para manufatura de perfis estruturais a partir do processo de FW voltada à manufatura de peças de pequeno porte e uma ampla variedade de aplicações tais como automobilística, esportiva, dentre outras.

Palavras-chave: compósitos; *filament winding*; perfis estruturais.

ABSTRACT

Fiber Reinforced Composite materials (FRCM) have been applied in many different areas as a substitute of metallic materials with advantages of low weight and high mechanical strength which are obtained by the appropriate combination of resins and synthetic fibers.

Among the various manufacturing processes available to produce FRCM parts, the Filament Winding (FW) process allows for the obtaining of structural revolution profiles, with continuous fibers being impregnated with resin during the process. In this work, an automated and programmable Filament Winding machine was designed and built for the manufacturing of small and medium size structural profiles which can be applied to a variety of areas such as automotive, sports and others.

Keywords: composites; filament winding; structural profiles.

¹ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo – EESC (2015), Professor na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe. E-mail: marcio.msilva@sp.senai.br

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Católica de Leuven, Bélgica (1996), Professor Titular no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo, EESC. Diretor Técnico da Fundação Parque de Alta Tecnologia São Carlos. E-mail: prjonas@sc.usp.br

³ Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela Universidade de São Paulo – ESALQ (2023); E-mail: tadeualdrigue@gmail.com



1. INTRODUÇÃO

Componentes em MCRFS podem ser fabricados por meio de diversos processos de fabricação, dentre eles, o processo de *FW* se destaca para a obtenção de perfis de revolução com fibras contínuas para aplicações onde é necessário alto desempenho mecânico dos componentes, associado a baixo peso. A resposta às solicitações exigidas para cada componente depende dos ângulos de enrolamento das fibras, previamente definidos em função dos carregamentos a que o componente está sujeito quando em serviço. A trajetória destas fibras ao longo do mandril é calculada a partir da definição do projeto e dos movimentos dos eixos da máquina que deve possuir graus de liberdade necessários para realizar a combinação destes movimentos e assim produzir o perfil projetado. Esses componentes, obtidos pelo processo de *FW*, devem ter seu desempenho superior frente àqueles obtidos por materiais e métodos tradicionais.

Problema de pesquisa

- Obter uma máquina que atenda às necessidades da pesquisa com um programa computacional capaz de calcular as trajetórias das fibras e se comunicar com a mecatrônica da máquina;
- Produzir pelo processo de *FW* e avaliar por meio de ensaios os componentes.

Objetivo(s)

- Projetar e construir uma máquina de *FW* para peças de pequeno porte;
- Desenvolver um programa computacional para calcular as trajetórias das fibras e se comunicar com a mecatrônica da máquina de *FW*;
- Projetar peças em MCRFS e fabricar as peças pelo processo de *FW*;
- Realizar ensaios mecânicos e testes de campo com as peças fabricadas para avaliar o desempenho.

Justificativa

Esse trabalho permitiu atingir com sucesso os objetivos propostos e gerou uma startup no PIPE FAPESP Fase 1 (processo 2017-08694-2).

2. REVISÃO DE LITERATURA

MCRFS tem se tornado cada vez mais atraentes na produção de equipamentos, principalmente quando se requer alto desempenho mecânico e baixo peso. Segundo Padilha (1997) materiais compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características (principalmente mecânicas) desejáveis de dois ou mais materiais e segundo Baran (2016) materiais compósitos reforçados com fibras têm sido cada vez mais utilizados em diversos componentes estruturais nos setores aeroespacial, marítimo, automotivo, de energia eólica, entre outros. Os processos de fabricação em MCRFS escolhidos de acordo com a complexidade da geometria e aplicação das peças. Os processos de manufatura devem ser escolhidos de modo a maximizar o potencial dos compósitos (Strong, 2008).

O processo de *FW* é indicado para a fabricação de peças cilíndricas entre 100mm e 1000mm de comprimento e diferentes diâmetros, com ângulos de enrolamentos que variam entre 20° e 90° (Abdalla, 2007). Esse processo permite a variação dos ângulos de enrolamento entre as camadas, direcionando

as fibras na direção das solicitações. A tecnologia CNC e a evolução do computador proporcionaram um salto crítico no processo de enrolamento filamentar ou *FW*. Isto forneceu condições para controlar o posicionamento da fibra, a rotação do mandril e a precisão do sistema de controle, tornando possível a interação entre a máquina, software e simulação do processo (Quanjin, 2018).

Silva (2015) realizou um experimento com *FW* num torno CNC, utilizando um programa computacional que gerava o código CNC para o *setup* do processo. No trabalho foi possível enrolar tubos com fibras de vidro. O custo da matéria prima ainda é uma dificuldade e pesquisas tem sido realizada na produção de matéria prima e de processos de manufatura mais econômicos, visando atender demanda do mercado.

3. METODOLOGIA

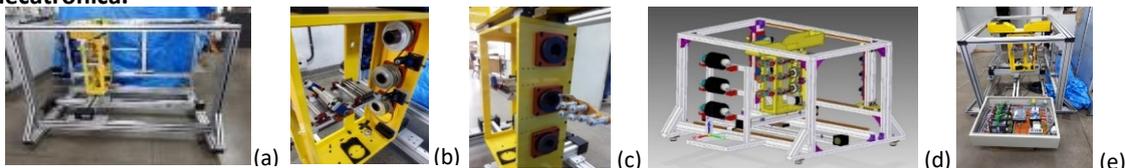
A metodologia adotada para a execução do projeto partiu das etapas de construção e setup da máquina para posterior validação dos resultados. Estas etapas estão resumidas a seguir.

3.1 Máquina: Foi projetada e construída uma máquina acionada por Comando Numérico Computadorizado (CNC) e controlada por Controlador Lógico Programável (CLP). A máquina conta com servo motores, dispositivos para guiar, tensionar e banhar as fibras em resinas.

3.2 Programa computacional: Foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C# para calcular as trajetórias das fibras para as peças a serem fabricadas e gerar o código CNC em linguagem ISO G.

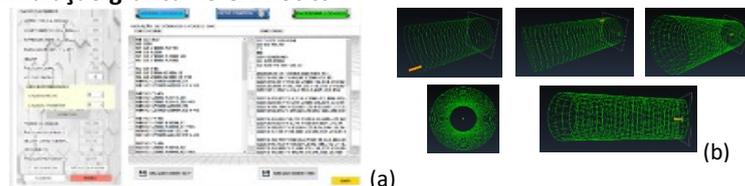
A figura 1 ilustra a máquina e seus componentes. A figura 2 ilustra o programa desenvolvido para calcular as trajetórias das fibras.

Figura 1 - Componentes da máquina. (a) estrutura; (b) molhador de resina; (c) olhal; (d) projeto em CAD; (e) mecatrônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2 - Programa computacional desenvolvido para o trabalho. (a) programa para cálculo das trajetórias e geração de G-Code. (b) Simulação gráfica no CAMotics.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Ensaios de validação: Foram realizados ensaios com vários tipos de geometria e enrolamento para testar a capacidade da máquina e validar o programa computacional desenvolvido para calcular as trajetórias das fibras.

3.4 Peças fabricadas: Foram fabricados eixos de suspensão para o carro de corridas da equipe Fórmula SAE da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP), a partir do processo de *FW* com fibras de carbono e resina epóxi.

3.5 Materiais: As fibras usadas neste trabalho são AS-12K do fornecedor Hexcel® e as resinas (matrizes) usadas foram GY 260, Aradur HY 2918 e acelerador DY 062.

3.6 Ensaios de engenharia: Foram realizadas simulações virtuais com ferramentas CAE (Computer Aided Engineering) ANSYS. Foram fabricados corpos de prova que passaram por ensaios destrutivos para validar o modelo virtual.

A figura 3 ilustra o projeto do eixo tubular e a figura 4 ilustra o eixo fabricado.

Figura 3 - Carro de corridas do Fórmula SAE EESC-USP. Eixos tubulares da suspensão e simulação em software CAE (Ansys).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4 - Eixo tubular em fibra de carbono em fabricação e finalizado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A máquina atendeu de maneira satisfatória ao propósito da construção, possibilitando a fabricação do eixo tubular em MCRFS e outras peças que foram fabricadas para testes. A partir da fabricação das peças produzidas, a equipe adquiriu conhecimentos específicos do processo de *FW* e fez modificações que aprimoraram o processo.

O programa computacional atendeu às necessidades e qualquer alteração pode ser realizada dentro do algoritmo ou mediante a implementação de mais algoritmos. Esse procedimento não depende de fornecedor, sendo uma vantagem para o programa frente a outras necessidades de programação que poderão surgir no futuro.

Foram fabricados corpos de prova que passaram por ensaios destrutivos para validar o modelo matemático do software CAE. Os corpos de prova estavam dentro dos requisitos de desempenho desejados. Na sequência foram produzidos eixos para testes em campo, no carro de corridas da equipe Fórmula SAE da EESC-USP.

5. CONCLUSÃO

Pelo processo de *FW* foi possível produzir um eixo tubular de suspensão para o carro de corridas. Comparado com os tubos em aço 4130 tratado termicamente, o ganho em resistência pelo critério de Tsai-Wu para o eixo em compósito ficou com fator de segurança



de 1.856 contra 1.528 pelo critério de Von Mises no aço. O peso do eixo em aço é de 1.063,6 g contra 240g do eixo em MCRFS (Grizotto, 2023).

O processo de FW, utilizado na máquina e o programa computacional desenvolvidos, se mostraram adequados e capazes de produzirem componentes com requisitos de alto desempenho estrutural. Ainda não foi medido o ganho em combustível, mas pela redução de massa pode ser esperado uma leve redução do consumo e ganho de velocidade do carro, principalmente em retomadas.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, F. H. *et al.* Design and fabrication of low-cost filament winding machine. **Materials and Design**. v. 28, n. 1, 2007. Pages 234 – 239.

BARAN, I., CINAR, K., ERSOY, N. *et al.* A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. **Arch Computat Methods Eng**, v. 24, 365–395, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>

GRIZOTTO, F. L. Estudo de tubos fabricados em material compósito para uma suspensão de Fórmula SAE através de MEF. **TCC apresentado à EESC-USP** em 2023. Disponível em <https://bdta.abcd.usp.br/item/003187474>. Acesso em: 18 mai. 2024.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. Rio de Janeiro: Hermus, 2006.

QUANJIN, M. *et al.* Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure. *In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING*, v. 342, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/342/1/012029>

SILVA, M. S. **Desenvolvimento e implementação de um sistema integrado para o projeto, otimização e fabricação de peças através do processo de filament winding**. Tese - (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (USP), 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18146/tde-19072018-160209/>. Acesso em: 18 mai. 2024.

STRONG, A. B. fundamentals of composites manufacturing materials methods and applications. **Society of Manufacturing Engineers**. USA 2008.

AGRADECIMENTOS

A Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC-USP) que proporcionou o trabalho de pós-doutorado.

Ao orientador e amigo Prof. Dr. Jonas de Carvalho que incentivou e proporcionou o trabalho.

À Fapesp que proporcionou recursos para o projeto PIPE Fase 1.

À Hexcel® e seu representante Sr. Edmundo Ortiz pelo fornecimento da matéria prima.

Sobre os Autores

ⁱ Márcio Marques da Silva



Pós-doutorado (2023), doutorado (2015) e mestrado (2005) pela EESC-USP. Graduação em Análise de Sistemas pela UNICEP (2002). Atualmente é professor na Faculdade de Tecnologia Senai Antonio Adolpho Lobbe. <https://orcid.org/0000-0002-3076-9836>

ⁱⁱ Jonas de Carvalho



Possui graduação em EESC-USP (1984), mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela K. U. Leuven – Bélgica. Atualmente é Professor Titular da EESC – USP, atuando nos seguintes temas: máquinas ferramentas, projeto e fabricação em materiais compósitos poliméricos, elementos finitos e Manufatura Aditiva. <http://orcid.org/0000-0002-2614-6206>

ⁱⁱⁱ José Tadeu Aldrigue



Mestrando em Engenharia de Sistemas Agrícolas (2022) pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESLAQ-USP). Graduação em Análise e Desenvolvimento de Sistemas Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (2009) – IFSP Campus São Carlos.