



**CONFORME SOLICITAÇÃO DO AUTOR, ESTA  
PRODUÇÃO INTELECTUAL POSSUI RESTRIÇÃO  
DE ACESSO**

**CAXIAS DO SUL  
2025**

Mauricio Lazzari

Metodologia numérico-experimental para a  
representação do comportamento  
multiescala de polímeros termoplásticos  
reforçados com fibras longas

Caxias do Sul - RS, Brasil

2025

Mauricio Lazzari

**Metodologia numérico-experimental para a  
representação do comportamento multiescala de  
polímeros termoplásticos reforçados com fibras longas**

Trabalho supervisionado por Robinson Carlos Dudley Cruz, apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Universidade de Caxias do Sul – UCS  
Engenharia e Ciência dos Materiais  
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Robinson Carlos Dudley Cruz

Caxias do Sul - RS, Brasil

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

L432m Lazzari, Mauricio

Metodologia numérico-experimental para a representação do comportamento multiescala de polímeros termoplásticos reforçados com fibras longas [recurso eletrônico] / Mauricio Lazzari. – 2025.

Dados eletrônicos.

Tese (Doutorado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2025.

Orientação: Robinson Carlos Dudley Cruz.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Materiais compostos. 2. Compostos poliméricos. 3. Materiais - Testes. 4. Termoplásticos. 5. Fibras de vidro. I. Cruz, Robinson Carlos Dudley, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.168

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

Mauricio Lazzari

**Metodologia numérico-experimental para a representação do comportamento multiescala de polímeros termoplásticos reforçados com fibras longas**

Trabalho supervisionado por Robinson Carlos Dudley Cruz, apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Trabalho aprovado. Caxias do Sul - RS, Brasil, Brasil, 29 de setembro de 2025:

---

**Robinson Carlos Dudley Cruz**  
Orientador

---

**Luciano Tedesco Matozo**

---

**Eduardo Alberto Fancello**

---

**Janaína da Silva Crespo**

---

**André Luiz Martinotto**

---

**Gustavo Roberto Ramos**

Caxias do Sul - RS, Brasil

2025

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por mais essa oportunidade de desenvolvimento pessoal e profissional. Agradecimentos especiais à minha esposa, Letícia Clara Formolo Fonseca, pela paciência e suporte ao longo dessa jornada; ao meu orientador Prof. Dr. Robinson Carlos Dudley Cruz pelos direcionamentos e apoio ao trabalho, ao Professor Dr. Cláudio Antônio Perottoni pelas discussões, orientações e ensinamentos ao longo de todo o curso e da elaboração dessa pesquisa, e aos membros da banca, que aceitaram avaliar este trabalho e contribuir com suas sugestões.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da Fras-le, do CTR, do IHR e da STE Parts que, direta ou indiretamente, auxiliaram no desenvolvimento desse estudo e à CAPES pela taxa concedida.

“Adquire sabedoria, adquira inteligência,  
e não te esqueças nem te apartes das palavras da minha boca.  
Não a abandones e ela te guardará; ama-a, e ela te protegerá.

A sabedoria é a coisa principal; adquira pois a sabedoria,  
emprega tudo o que possuis na aquisição de entendimento.  
Exalta-a, e ela te exaltará; e, abraçando-a tu, ela te honrará.”

(Bíblia Sagrada, Provérbios 4:5-8)

# Resumo

O apelo ambiental intenso em âmbito global tem ampliado o uso de materiais compósitos de engenharia no mercado automotivo. A redução de massa, de consumo de combustível e de emissão de CO<sub>2</sub> obtidos, quando comparados ao uso de materiais metálicos convencionais, é o principal motivador desse avanço tecnológico, porém não é o único. A reciclabilidade ou reprocessabilidade de componentes mecânicos após o fim de vida estão cada vez mais em voga, fazendo com que até mesmo os compósitos de base termofixa sejam repensados, realçando as bases termoplásticas como uma tecnologia de futuro promissor no mercado de veículos mundial. Para tanto, o conhecimento das propriedades mecânicas como rigidez e resistência de maneira direcional é imprescindível, de modo a garantir os benefícios do material sem acrescentar risco à operação, tendo em vista a anisotropia inerente dessa classe de materiais. Em mercados muito competitivos, como o automotivo de grande volume, o custo das peças manufaturadas também acaba limitando a tecnologia empregada, fazendo com que materiais mais nobres, como aqueles reforçados com fibras de carbono ou contínuas, sejam inviáveis. Nesse sentido, o uso de termoplásticos com fibras de vidro longas acabam sendo uma excelente alternativa, embora seu projeto estrutural seja mais complexo devido aos importantes efeitos do processamento. Quando moldados por compressão a quente, a determinação da orientação das fibras ainda é um desafio e, na maioria das vezes, o desenvolvimento de um componente mecânico acaba sendo totalmente empírico. Motivado por esses fatos, é proposta uma metodologia numérico-experimental de homogeneização multiescala baseada em Elementos de Volume Representativo (EVR), com o objetivo de estimar a orientação local das fibras de uma peça através de ensaios de DMA e de tração, calibrar parâmetros do EVR para determinação da resposta viscoelástica e da resistência mecânica em diferentes direções. Após, foi construído um modelo computacional completo, combinando o material multiescala com a orientação das fibras, advinda do processo de manufatura, em uma análise estrutural de um suporte de para-lamas desenvolvido para caminhões extra-pesados. A validação dos EVRs se deu através da comparação da resposta predita pelas homogeneizações com os resultados experimentais de DMA em frequência e ensaios de tração, resultando em erros inferiores a 3,2% na predição da resposta dinâmica e propriedades estáticas dentro dos limites experimentais verificados para dois compósitos de polipropileno reforçado com fibras de vidro longas, além do comparativo visual com imagens de MEV. Já a validação do modelo estrutural do suporte de para-lamas se deu através do comparativo da resposta da simulação virtual de um teste destrutivo realizado em uma peça manufaturada em termos de forças de ruptura final e modo de falha, com erros abaixo de 9,7% na força de ruptura e predição correta da região de falha.

**Palavras-chave:** compósito termoplástico, fibras longas, aplicação estrutural, multiescala, homogeneização, orientação de fibras.

# Abstract

The intense global environmental appeal has expanded the use of engineering composite materials in the automotive market. The reduction in mass, fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions achieved, when compared to the use of conventional metallic materials, is the main driver of this technological advancement, but it is not the only one. The recyclability or reprocessability of mechanical components after their end of life is increasingly in vogue, causing even thermoset-based composites to be reconsidered, highlighting thermoplastic matrix composites as a promising future technology in the global automotive market. To this end, knowledge of mechanical properties such as directional stiffness and strength is essential to ensure the material's benefits without adding operational risk, given the inherent anisotropy of this class of materials. In highly competitive markets, such as the high-volume automotive industry, the cost of the manufactured parts also limits the technology employed, making more premium materials, such as those reinforced with carbon and continuous fibers, unviable. In this sense, the use of thermoplastics with long glass fibers proves to be an excellent alternative, although their structural design is more complex due to significant processing effects. When molded by hot compression, determining fiber orientation remains a challenge, and in most cases, the development of a mechanical component ends up being entirely empirical. Motivated by these facts, a numerical-experimental multiscale homogenization methodology based on Representative Volume Elements (RVE) is proposed, aiming to estimate of the local fiber orientation of a part through DMA and tensile tests, calibrate RVE parameters to determine the viscoelastic response and the mechanical strength in different directions. After that, a complete computational model was developed, combining the multiscale material with the fiber orientations resulted from the manufacturing process, in a structural analysis of a fender bracket for extra-heavy duty trucks. The RVEs were validated by the comparison of the predicted homogenization response with experimental DMA in frequency sweep and tensile tests, resulting in errors lower than 3,2% for the dynamic response and static mechanical properties within the limits obtained experimentally for two polypropylene composites reinforced with long glass fibers, along with visual comparison with SEM images. The structural model of the fender bracket was validated by comparing the response of a virtual simulation of a destructive test performed on a part manufactured with one of the composites in question, in terms of ultimate rupture forces and failure mode, with errors below 9.7% in the rupture force and the correct failure region prediction.

**Keywords:** thermoplastic composite, long fibers, structural application, multiscale, homogenization, fiber orientation.