



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE
Engenharia Aeroespacial

Desenvolvimento de metodologia para avaliação da resistência a impacto de materiais utilizados em EPIs para motociclistas: caracterização numérica e experimental

Autor: Giovanni Assante
Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos
Junior

Brasília, DF

2025



Giovanni Assante

**Desenvolvimento de metodologia para avaliação da
resistência a impacto de materiais utilizados em EPIs
para motociclistas: caracterização numérica e
experimental**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Aeroespacial da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE

Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Brasília, DF
2025

Giovanni Assante

Desenvolvimento de metodologia para avaliação da resistência a impacto de materiais utilizados em EPIs para motociclistas: caracterização numérica e experimental/ Giovanni Assante. – Brasília, DF, 2025-

91 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE , 2025.

1. Simulação de Impacto. 2. EPI. I. Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Junior. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de metodologia para avaliação da resistência a impacto de materiais utilizados em EPIs para motociclistas: caracterização numérica e experimental

Giovanni Assante

Desenvolvimento de metodologia para avaliação da resistência a impacto de materiais utilizados em EPIs para motociclistas: caracterização numérica e experimental

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 26 de Fevereiro de 2025:

**Professor Dr. Manuel Nascimento
Dias Barcelos Junior**
Orientador

**Professor Dr. Sergio Henrique Da
Silva Carneiro**
Convidado 1

**Professor Dr. Emmanuel Pacheco
Rocha Lima**
Convidado 2

Brasília, DF
2025

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditaram em meus sonhos e me auxiliaram durante minha jornada para deixar meu legado no mundo.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a toda instituição da Universidade de Brasília, aos professores que me ensinaram os princípios fundamentais da engenharia ao longo da minha formação e ao meu orientador Professor Dr. Manuel Barcelos por pavimentar minha trajetória na árdua formação em Engenharia Aeroespacial, realizando assim um dos meus sonhos.

Também gostaria de agradecer ao grande incentivo que recebi da minha família, principalmente de minha mãe e meu pai, Maria Paula e Luís, que me ajudaram a alcançar um objetivo tão grande com seus conselhos, amor e carinho, e que continuarão a me apoiar ao longo da minha vida.

Agradeço também a minha futura esposa e companheira de vida, Ana Clara, que vem me apoiando e auxiliando a realizar meus sonhos ao longo dessa jornada tão longa, sempre sendo uma base sólida para me apoiar nos momentos de dificuldade e iluminando toda escuridão nos trechos mais difíceis.

Por último agradeço aos colegas e amigos que fiz ao longo dessa jornada, amigos que espero ter para toda vida, e desejo boa sorte também no caminho de todos aqueles que encontrei na Universidade de Brasília.

*"Com sabedoria se constrói a casa, e com
discernimento ela se consolida."
(Provérbios 24:3)*

Resumo

A análise de estruturas submetidas a cargas dinâmicas é fundamental para o desenvolvimento de componentes mecânicos em diversos setores, especialmente no contexto de veículos, que operam sob constante movimento. Entre os fenômenos dinâmicos mais relevantes, destaca-se o impacto, cuja avaliação é essencial para garantir a segurança dos usuários. Uma das formas de analisar com precisão o comportamento mecânico de estruturas sujeitas a esse tipo de solicitação é por meio da análise numérica, utilizando simulações computacionais que reproduzem eventos como a colisão de um projétil ou detrito contra um anteparo. Neste trabalho, propõe-se a avaliação e validação dos dados obtidos por simulações computacionais de impacto, comparando-os com modelagens analíticas e com resultados experimentais, a fim de verificar a aderência dos modelos numéricos à realidade. Por fim, é realizado um estudo sobre o comportamento mecânico de uma estrutura sanduíche, visando sua aplicação como equipamento de proteção individual (EPI) para motociclistas.

Palavras-chaves: Simulação de Impacto. Modelagem Analítica. Cargas Dinâmicas. Estrutura Sanduíche. Equipamento de Proteção Individual (EPI).

Abstract

Dynamic analyses are essential for the development of most structures, especially when dealing with transportation vehicles, which are inherently in constant motion. Thus, understanding the mechanical behavior of certain structures under dynamic loads is crucial for assessing the safety provided to the users of these vehicles. One of the most precise methods for evaluating the mechanical behavior of a structure subjected to dynamic loads is numerical analysis, where computational simulations can replicate scenarios such as debris or projectile collisions with a target. This study aims to evaluate and validate the data obtained from computational impact simulations through comparison with analytical modeling and experimental methods, confirming that the numerically presented mechanical behavior is consistent with real-world conditions. Following this, a study on the mechanical behavior of a sandwich structure will be presented, assessing its usability as personal protective equipment for motorcyclists.

Key-words: Impact Simulation. Analytical Modeling. Dynamic Loads. Sandwich Structure. Personal Protective Equipment (PPE).

Listas de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de geometria e materiais de um EPI para motociclista. (ARAUJO; ASSANTE, 2023)	21
Figura 2 – Classificação da Legislação Brasileira de Trânsito em relação a controle de velocidade. (OMS, 2023)	25
Figura 3 – Equipamento de proteção individual para motociclista. (DAINES, 2011)	27
Figura 4 – Maquinário para ensaio de impacto em capacetes de motociclistas. (ABNT, 2021)	29
Figura 5 – Maquinário para ensaio de impacto em equipamentos de proteção para membros. Fonte: SATRA. PPE – EN1621 Motorcycle protectors. Disponível em: < https://www.satra.com/ppe/EN1621.php >. Acesso em: 28 jun. 2025.	31
Figura 6 – Representação esquemática da aproximação entre efeitos dinâmicos e estáticos no impacto vertical de uma massa. (a) Impacto de uma massa W sobre uma estrutura, resultando em deflexão dinâmica; (b) Gráfico de deflexão ao longo do tempo, com destaque para a deflexão estática δ_{stat} , a deflexão máxima δ_{max} , e o comportamento oscilatório; (c) Modelo de equivalência com aplicação de força estática amplificada P , representando os efeitos dinâmicos do impacto. Fonte: (AKIN, 2015).	32
Figura 7 – Condições de contorno da placa fina utilizadas. (SOARES, 2004).	36
Figura 8 – Representação esquemática das configurações estruturais analisadas: (a) placa sanduíche com núcleo de PETG e lâminas externas de fibra de vidro; (b) placa de alumínio com reforço assimétrico em uma face.	41
Figura 9 – Fluxograma do planejamento geral do estudo, organizado em três etapas principais: (1) avaliação de placa de alumínio com 1 e 2 mm de espessura; (2) avaliação de placa reforçada com fibra de vidro; e (3) análise de estrutura sanduíche com núcleo em PETG e laminado simétrico. Cada etapa contempla abordagens analíticas, numéricas e, quando aplicável, experimentais.	44
Figura 10 – Análise de convergência da deflexão da placa em relação ao número de interações.	46
Figura 11 – Perfil de malha com três zonas de controle de densidade. (ASSANTE, 2023).	47
Figura 12 – Geometria e configuração de malha para simulação estática.	48
Figura 13 – Geometria e condições de contorno da simulação dinâmica. Fonte: Amaral e Assante (2025)	50
Figura 14 – Montagem experimental do teste quasi-estático com esfera de impacto.	51

Figura 15 – Estrutura de fixação das placas de 2 mm de alumínio na máquina de ensaio para todos os lados engastados.	51
Figura 16 – Estrutura de fixação das placas de 1 mm de alumínio na máquina de ensaio para 2 lados apoiados e 2 lados engastados.	52
Figura 17 – Gráfico representativo do experimento quasi-estático (força × deslocamento). A curva à esquerda apresenta os dados brutos obtidos durante o carregamento de um dos corpos de prova. A imagem à direita mostra um recorte ampliado do final do carregamento, evidenciando a dispersão dos pontos. Essa característica reforça a necessidade de aplicar uma média móvel para suavizar os dados e permitir uma análise mais precisa da resposta estrutural.	52
Figura 18 – Configuração da laminação no módulo <i>ACP (Pre)</i>	54
Figura 19 – Visualização da orientação das camadas no modelo ACP.	55
Figura 20 – Fluxograma da integração entre ACP (Pre), simulações estáticas e dinâmicas.	55
Figura 21 – Fixação da placa reforçada com todas as bordas engastadas. Fonte: Autor, 2024.	56
Figura 22 – Placa Sanduíche que será utilizada nas três metodologias de análise.	57
Figura 23 – Processo de laminação a vácuo das placas de PETG com fibra de vidro e resina epóxi.	60
Figura 24 – Placa composta finalizada após corte e lixamento.	61
Figura 25 – Placas compostas com duas cavidades impressas e reforço laminar aplicado.	61
Figura 26 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 1).	81
Figura 27 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 2).	81
Figura 28 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 3).	82
Figura 29 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 4).	82
Figura 30 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 5).	83
Figura 31 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 6).	83
Figura 32 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 7).	84
Figura 33 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 8).	84

Figura 34 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 1).	85
Figura 35 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 2).	85
Figura 36 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 3).	86
Figura 37 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 1).	87
Figura 38 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 2).	87
Figura 39 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 3).	88
Figura 40 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 4).	88
Figura 41 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 5).	89
Figura 42 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 1).	90
Figura 43 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 2).	90
Figura 44 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 3).	91
Figura 45 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 4).	91

Lista de tabelas

Tabela 1 – Coeficientes $f(a/b)$ para placas com todas as extremidades engastadas sob carga concentrada no centro	38
Tabela 2 – Propriedades mecânicas das chapas de alumínio utilizadas.	49
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na estrutura sanduíche. .	58
Tabela 4 – Valores de deslocamento máximo obtidos pelos métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm submetida a uma carga concentrada de 3,62 N no centro da estrutura.	63
Tabela 5 – Fatores de impacto calculados e respectivos deslocamentos máximos para a placa de alumínio de 1 mm, considerando diferentes condições de contorno. Os resultados foram obtidos pelas abordagens analítica, numérica e experimental com base na amplificação da carga estática. .	63
Tabela 6 – Deslocamentos máximos obtidos por simulação numérica dinâmica (explícita) para a placa de alumínio de 1 mm, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.	64
Tabela 7 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm de espessura, considerando diferentes condições de contorno.	64
Tabela 8 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação dinâmica) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm de espessura, considerando diferentes condições de contorno.	64
Tabela 9 – Valores de deslocamento máximo obtidos pelas abordagens analítica, numérica (simulação) e experimental para a placa de alumínio com 2 mm de espessura, fixada com todas as extremidades engastadas e submetida a uma carga concentrada no centro.	65
Tabela 10 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 2 mm de espessura, considerando a condição de contorno com todas as extremidades engastadas.	65
Tabela 11 – Dados de deflexão no centro da placa de alumínio reforçada considerando carga estática igual a força peso da esfera, para o método analítico, numérico estático e experimental.	65
Tabela 12 – Dados de deflexão no centro da placa de alumínio reforçada considerando carga estática amplificada, para o método analítico, numérico estático e experimental.	66

Tabela 13 – Deslocamentos máximos obtidos por metodologia numérica dinâmica (explícita) para a placa de alumínio de 2 mm e reforçada por fibra de vidro e resina, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.	66
Tabela 14 – Diferenças percentuais entre os três métodos considerados para a placa de alumínio reforçada (2 mm).	67
Tabela 15 – Diferenças percentuais entre os três métodos considerados para a placa de alumínio reforçada (2 mm) tendo como base a simulação dinâmica.	67
Tabela 16 – Dados de Deflexão para a estrutura sanduíche com núcleo de PETG considerando a metodologia analítica, numérico estático e experimental.	68
Tabela 17 – Fatores de impacto calculados e respectivos deslocamentos máximos para a placa sanduíche, considerando diferentes condições de contorno. Os resultados foram obtidos pelas abordagens analítica, numérica para o caso estático e experimental com base na amplificação da carga estática.	68
Tabela 18 – Deslocamentos máximos obtidos por simulação numérica dinâmica (explícita) para a placa sanduíche, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.	69
Tabela 19 – Diferenças percentuais entre os métodos (utilizando simulação estática para o numérico) para a estrutura sanduíche.	69
Tabela 20 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação dinâmica) e experimental para a placa sanduíche, considerando diferentes condições de contorno.	70

Lista de abreviaturas e siglas

EPI	Equipamento de Proteção Individual.
PLA	Ácido Polilático.
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol-modificado.
OMS	Organização Mundial da Saúde.
CNT	Confederação Nacional do Transporte.
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito.
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
CTB	Código de Trânsito Brasileiro.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
NBR	Norma Brasileira.
CE	Conformidade Europeia.
UKCA	Conformidade Avaliada no Reino Unido.
CEN	Comitê Europeu de Normalização.
EN	Norma Europeia.
SATRA	Organização global independente de pesquisa e certificação.

Listas de símbolos

W	Peso de um Objeto em Newtons.
P	Força peso amplificada pelo fator de impacto.
δ_{est}	Deflexão estática devido a uma força peso aplicada de maneira contínua.
δ_{max}	Deflexão máxima sofrida pelo corpo com o impacto de um objeto ou uma força peso amplificada aplicada de maneira estática.
η	Eficiência de uma colisão.
n	Fator de Impacto.
h	Altura de Queda de um Objeto.
v	Velocidade de deslocamento de um objeto.
D	Rigidez à flexão de um material.
E	Módulo de Elasticidade de um Material.
t	Espessura de uma estrutura (Viga ou Placa).
ν	Coeficiente de Poisson de um material.
w	Deflexão sofrida por uma viga ou placa fina.
x	Deslocamento no Eixo X.
y	Deslocamento no Eixo Y.
Σ	Somatório.
A_{mn}	Coeficiente Desconhecido dependendo do número de meias ondas em x e y.
a_{mn}	Coeficiente dependente da rigidez à flexão e carregamento imposto.
m	Número de meias ondas em x.
n	Número de meias ondas em y.
a	Representa o tamanho longitudinal da placa fina.
b	Representa o tamanho lateral da placa fina.

α_m Termo que depende da geometria da placa fina.

g Aceleração da Gravidade.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização do Trabalho	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivo Geral	21
1.2.2	Objetivo Específico	22
1.3	Abordagem do Estudo e Descrição do Trabalho	22
1.4	Disposição dos Capítulos	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Dados e Legislação de Trânsito	24
2.1.1	Mortalidade no Trânsito e Incidência de Tipos de Lesões	24
2.1.2	Legislação Brasileira de Trânsito	25
2.1.3	Eficiência dos Equipamentos de Proteção Veicular	26
2.2	Certificação e Parâmetros Técnicos	28
2.2.1	Certificação de EPIs para motociclistas no Brasil e Resto do Mundo	28
2.2.1.1	Certificação no Brasil	28
2.2.1.2	Certificação no Resto do Mundo	29
3	REFERENCIAL TEÓRICO	32
3.1	Análise de uma situação de Impacto	32
3.1.1	Deflexão em Placa com Todas as Extremidades Simplesmente Apoiadas	35
3.1.2	Placa com Duas Bordas Engastadas e Duas Simplesmente Apoiadas	36
3.1.3	Deflexão em Placa com todas as extremidades engastadas	36
3.2	Estimativa de Propriedades Equivalentes para Estruturas Reforçadas	38
3.2.1	Cálculo das propriedades da lâmina	39
3.2.2	Matriz de rigidez reduzida da lâmina	39
3.2.3	Propriedades equivalentes do laminado	40
3.2.4	Aplicação prática	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Planejamento Inicial	42
4.1.1	Planejamento Geral do Estudo	43
4.2	Etapa 1 (Placa de Alumínio)	44
4.2.1	Modelagem Analítica	44
4.2.2	Modelagem Computacional	47
4.2.2.1	Refinamento de Malha	47

4.2.2.2	Simulação Estática	47
4.2.2.3	Simulação Dinâmica	49
4.2.3	Método Experimental	49
4.3	Etapa 2 (Placa de Alumínio Reforçada)	52
4.3.1	Modelagem Analítica	52
4.3.2	Modelagem Computacional	53
4.3.3	Método Experimental	55
4.4	Etapa 3 (Placa Sanduíche)	57
4.4.1	Método Analítico	57
4.4.2	Método Computacional	58
4.4.3	Método Experimental	59
5	RESULTADOS	62
5.1	Placa de Alumínio Sem Reforço	62
5.1.1	Placa de Alumínio de 1 mm (Alumínio 1100-H14)	62
5.1.2	Placa de Alumínio de 2 mm (Liga Genérica)	64
5.2	Parte 2 - Placa de Alumínio Reforçada	65
5.2.1	Resultados dos métodos	65
5.2.2	Diferença entre os métodos	66
5.3	Parte 3 — Estrutura Sanduíche com Núcleo de PETG	67
5.3.1	Resultados dos métodos	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.1	Conclusão	71
6.2	Trabalhos Futuros	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	75
	APÊNDICE A – CÓDIGO MATLAB PARA CÁLCULO DE DEFLEXÃO EM PLACAS REFORÇADAS OU SANDUÍCHE	76
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE DEFLEXÃO POR FORÇA APLICADA PARA PLACAS DE ALUMÍNIO SEM REFORÇO COM 1 MM DE ESPESSURA.	81

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE DEFLEXÃO POR FORÇA APLICADA PARA OS EXPERIMENTOS COM AS PLACAS DE ALUMÍNIO SEM REFORÇO DE 2MM.	85
APÊNDICE D – GRÁFICOS DE DEFLEXÃO POR FORÇA APLICADA PARA OS EXPERIMENTOS COM AS PLACAS DE ALUMÍNIO DE 2 MM COM REFORÇO.	87
APÊNDICE E – GRÁFICOS DE DEFLEXÃO POR FORÇA APLICADA PARA OS EXPERIMENTOS COM AS PLACAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO PETG DE 1 MM.	90

1 Introdução

1.1 Contextualização do Trabalho

Ao longo dos anos, o desenvolvimento social e tecnológico impulsionou uma busca intensa por métodos que aumentem a expectativa e qualidade de vida, um objetivo que permeia várias áreas do conhecimento, incluindo medicina, engenharia, segurança pública e muitos outros campos. Diversas pesquisas são realizadas com o intuito de reduzir riscos à vida, seja em ambientes de trabalho, no trânsito, ou em atividades cotidianas, resultando em avanços que beneficiam a segurança pessoal e coletiva.

Um método amplamente utilizado para a proteção da vida é o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). Os EPIs são fundamentais para proteger indivíduos em diversas situações de risco, desde atividades laborais com exposição a materiais e ferramentas perigosas até o deslocamento seguro em veículos de transporte. Com a evolução constante da tecnologia de transportes, observamos uma melhoria na velocidade e desempenho dos veículos, o que, por sua vez, exige uma atenção ainda maior para a segurança de motoristas e passageiros.

Devido a isso, na indústria de transporte, o estudo de impactos é essencial tanto para aprimorar a estrutura dos veículos, aumentando sua capacidade de proteger os ocupantes em caso de colisões, quanto para desenvolver EPIs específicos, como capacetes, cintos de segurança e roupas de proteção, que ajudam a mitigar lesões durante acidentes. A importância dos testes de impacto é especialmente notável no desenvolvimento de equipamentos de proteção para motociclistas, um grupo particularmente vulnerável no trânsito devido à exposição direta ao ambiente externo.

Motociclistas enfrentam riscos elevados em comparação com outros condutores, já que as motocicletas oferecem pouca proteção física contra colisões. Assim, a pesquisa e o desenvolvimento de EPIs para esses usuários são críticos. Os capacetes, por exemplo, passam por rigorosos testes de impacto para garantir que, em caso de acidente, consigam absorver e distribuir a força do impacto, protegendo o crânio e o cérebro. Esses testes envolvem simulações e testes experimentais para avaliar a eficácia de diferentes materiais e desenhos estruturais. Porém, mesmo com a regulamentação que torna obrigatório a utilização do capacete para os motociclistas nos tempos atuais, a proteção dessa parcela vulnerável de condutores carece de pesquisas e desenvolvimento de EPIs para outros membros do corpo, e essa afirmação é acentuada pelo trabalho de ([SIMONETI, 2015](#)) que apresenta que a maioria das lesões sofridas por esses condutores em acidentes de transito são nas regiões dos membros inferiores, membros superiores e torax.

O desenvolvimento de EPIs é um trabalho complicado e custoso, que demanda muitos testes e protótipos para análises de impacto, e um dos motivos são suas formas complexas e os diferentes tipos de materiais usados, como pode ser observado na Figura 1, e por isso a utilização de ferramentas computacionais pode auxiliar a diminuir o tempo de desenvolvimento e os custos inerentes ao projeto.



Figura 1 – Exemplo de geometria e materiais de um EPI para motociclista. ([ARAUJO; ASSANTE, 2023](#))

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo validar os resultados obtidos em simulações de impacto aplicadas ao desenvolvimento de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) para motociclistas. A pesquisa é conduzida na Universidade de Brasília (UnB), em parceria com a UnB Ceilândia e a Faculdade de Ciências e Tecnologia em Saúde (FCTES). A validação ocorre por meio da comparação entre dados computacionais, modelagens analíticas e ensaios experimentais controlados, com o intuito de avaliar de forma precisa o desempenho dos equipamentos desenvolvidos.

Adicionalmente, considera-se que os modelos validados apresentam potencial de aplicação em outras áreas da engenharia, como o setor aeroespacial, que faz uso intensivo de estruturas em placas finas para fins estruturais e de segurança.

1.2.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste estudo incluem:

- Desenvolver e validar uma ferramenta de análise numérica aplicada a situações de impacto, permitindo a avaliação do comportamento mecânico de equipamentos de proteção individuais e outras estruturas sujeitas a cargas dinâmicas.
- Comparar os resultados obtidos por diferentes abordagens – analítica, numérica e experimental – de modo a garantir maior confiabilidade e precisão na modelagem dos impactos.
- Avaliar o desempenho de estruturas fabricadas por impressão 3D em situações de impacto, analisando sua viabilidade como EPIs.
- Demonstrar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em outros setores industriais, incluindo os segmentos automotivo, aeroespacial e da saúde.

1.3 Abordagem do Estudo e Descrição do Trabalho

A análise de impacto em estruturas complexas apresenta desafios significativos, tanto na modelagem matemática quanto na execução de ensaios experimentais. Para contornar essas limitações, adota-se uma abordagem simplificada utilizando uma placa fina como modelo representativo, submetida ao impacto de um projétil. Essa escolha é coerente com a presença de placas rígidas em diversos EPIs para motociclistas, permitindo que os resultados tenham aplicação prática.

A metodologia envolve análises analíticas, numéricas e experimentais para avaliar o comportamento mecânico da estrutura no momento do impacto. A comparação entre os métodos valida a modelagem numérica como alternativa viável ao uso extensivo de protótipos físicos, otimizando tempo e custo no desenvolvimento de novos EPIs.

A abordagem também é aplicada à análise de protótipos produzidos por impressão 3D, compostos por núcleos em PLA e PETG laminados com fibra de vidro, formando estruturas do tipo sanduíche. Os resultados experimentais são confrontados com normas brasileiras e europeias de certificação, permitindo avaliar a viabilidade dos dispositivos como soluções acessíveis e eficazes em segurança veicular.

Nas análises numéricas, emprega-se o software ANSYS Explicit Dynamics com formulação lagrangeana explícita, adequada para simulações de impacto devido à sua capacidade de acompanhar grandes deformações. Embora a abordagem ALE seja considerada em casos específicos, o método principal adotado neste estudo permanece o lagrangeano, dada sua eficiência em simulações de alta intensidade e curta duração.

1.4 Disposição dos Capítulos

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, abordando dados sobre acidentes de trânsito envolvendo motociclistas, tipos de lesões mais frequentes e a legislação brasileira aplicada à proteção desses condutores. Também são descritas as certificações nacionais e internacionais voltadas aos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), com destaque para os critérios técnicos exigidos nos ensaios de impacto.

No terceiro capítulo, é exposto o referencial teórico necessário para a condução das análises de impacto. São desenvolvidos os equacionamentos utilizados na modelagem analítica, além de conceitos aplicados à modelagem computacional e à estimativa de propriedades equivalentes de estruturas reforçadas.

O quarto capítulo apresenta a metodologia empregada no estudo. São descritas as etapas do planejamento, os procedimentos de modelagem analítica e numérica, os ensaios experimentais, bem como os materiais, geometrias e condições de contorno adotadas.

O quinto capítulo traz os resultados obtidos pelas abordagens analítica, numérica e experimental, com a devida comparação entre elas. Essa análise busca validar a metodologia desenvolvida e discutir a coerência entre os diferentes métodos aplicados.

Por fim, o sexto capítulo reúne as considerações finais do trabalho, destacando as principais conclusões e apresentando sugestões para futuras pesquisas na área.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Dados e Legislação de Trânsito

Uma das motivações da criação do trabalho de desenvolvimento dos EPI para motociclistas que ocorre na Universidade de Brasília e que consequentemente originou esta pesquisa, são as condições perigosas que os motociclistas estão submetidos ao utilizar as vias públicas. Dito isso, nessa seção será apresentado dados relativos a tipos de ferimentos e óbitos acometidos no trânsito em relação a motociclistas e também os aspectos abordados pela legislação de trânsito brasileira para proteção destes condutores.

2.1.1 Mortalidade no Trânsito e Incidência de Tipos de Lesões

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) ([OMS, 2023](#)), o Brasil registrou mais de 31 mil óbitos decorrentes de acidentes de trânsito em 2021. Desse total, 35% foram de condutores de motocicletas. Este índice representa um número alarmante de fatalidades, especialmente quando comparado a outros países com populações similares ou superiores à do Brasil. Atualmente, o Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de mortes no trânsito. Além disso, estima-se que existam aproximadamente 30,2 milhões de motocicletas registradas em território brasileiro ([OMS, 2023](#)), o que evidencia a expressiva presença de veículos de duas rodas em circulação diariamente nas vias públicas.

Outro aspecto relevante abordado no documento emitido pela OMS é a classificação das legislações de trânsito de diferentes países em critérios como controle de velocidade, consumo de álcool, restrições ao uso de substâncias ilícitas por condutores e utilização de equipamentos de segurança. Essas legislações são categorizadas como fortes, medianas ou fracas, conforme o nível de efetividade em cada aspecto. Segundo o relatório Road Safety Brazil 2023, a legislação brasileira referente ao controle de velocidade foi classificada como fraca, indicando baixa eficiência na proteção dos condutores nas vias do país ([OMS, 2023](#)). Essa avaliação pode ser visualizada na Figura 2, onde a marcação em vermelho representa uma classificação desfavorável para o controle de velocidade.

Outro ponto de destaque ao analisar os riscos enfrentados por motociclistas no Brasil são os tipos de lesões mais recorrentes em acidentes de trânsito. Estudos indicam que a maioria das lesões por segmento anatômico ocorre nos membros inferiores e superiores, seguidas por lesões no abdômen, face e dorso, respectivamente ([SIMONETI, 2015](#)). Esses dados revelam que grande parte dos traumas afetam áreas do corpo desprotegidas por equipamentos de segurança obrigatórios, conforme estabelecido pela legislação vigente.

Entre 2008 e 2016, cerca de 1,9 milhão de motociclistas foram aposentados por

invalidez em decorrência de acidentes graves de trânsito. Esse grupo é majoritariamente composto por indivíduos jovens, o que gera um impacto significativo tanto na perda de produtividade quanto no âmbito econômico, devido ao pagamento de indenizações e benefícios previdenciários ([CNT, 2016](#)).

ROAD USER BEHAVIOUR		(E)
Legislation on urban speed limits for passenger cars and motorcycles ²		█
National law setting a speed limit	Yes	=
Maximum urban speed limit	80 km/h	=
Maximum rural speed limit	100 km/h	=
Maximum motorway speed limit	110 km/h	=
Local authorities can modify limits	Yes	=
Presence of targets to reduce speeds nationally (year) ²	National (2028)	N/A
Available types of enforcement	Manual	=

Figura 2 – Classificação da Legislação Brasileira de Trânsito em relação a controle de velocidade. ([OMS, 2023](#))

Apesar da utilização obrigatória do capacete como equipamento de segurança, o número de motociclistas aposentados por invalidez no Brasil continua elevado. Embora o capacete seja eficaz na proteção contra traumas crânioencefálicos, ele não oferece cobertura para outras partes vulneráveis do corpo, como membros inferiores e superiores, que frequentemente sofrem lesões graves em acidentes. Isso reforça a necessidade de uma abordagem mais ampla para a segurança dos motociclistas, incluindo políticas públicas que promovam o uso de equipamentos adicionais de proteção e melhorem as condições de infraestrutura das vias.

2.1.2 Legislação Brasileira de Trânsito

A legislação brasileira de trânsito estabelece diversas medidas para proteger os condutores de veículos automotores, abrangendo tanto os requisitos de segurança que os veículos disponíveis no mercado devem atender quanto a obrigatoriedade do uso de equipamentos de proteção pelos condutores. De acordo com a Resolução nº 940 de 2022 do Conselho Nacional de Trânsito ([CONTRAN, 2022](#)), é obrigatório que todos os condutores de motocicletas utilizem capacetes de proteção regulamentados pelo INMETRO. Na ausência do capacete, é permitido o uso de óculos de proteção, desde que estejam em boas condições de uso, garantindo maior segurança durante a condução em vias públicas. Como pode-se observar o único equipamento de proteção de motociclistas que tem obrigatoriedade de uso pela Lei é o capacete, porém, dependendo do caso nem precisa ser utilizado.

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB) abrange aspectos fundamentais para a segurança viária, como a definição de limites de velocidade em vias públicas, regras de

conduta e boas práticas no trânsito. Esses pontos são essenciais tanto para garantir a segurança de todos os condutores quanto para permitir que os órgãos fiscalizadores atuem de maneira efetiva. No entanto, apesar de o Brasil atender adequadamente a várias recomendações do relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS) — como as restrições ao consumo de drogas ilícitas e álcool por condutores, a proibição de distrações durante a direção, e o uso obrigatório de capacetes para motociclistas —, a legislação referente ao controle de velocidade apresenta fragilidades significativas ([OMS, 2023](#)).

Segundo a OMS, os dados fornecidos pelo governo brasileiro indicam que, desde 2009, não houve avanços significativos na melhoria da legislação sobre controle de velocidade. As regulamentações atuais permanecem praticamente inalteradas por quase duas décadas e já não atendem às recomendações estabelecidas pela organização ([OMS, 2023](#)). Atualmente, o limite de velocidade para regiões urbanas no Brasil é de 80 km/h, enquanto para a maioria das rodovias federais e interestaduais é de até 110 km/h. Esses limites em áreas urbanas estão acima do recomendado pela OMS e carecem de ajustes, especialmente considerando que as áreas urbanas concentram o maior número de acidentes envolvendo motociclistas. Além disso, nas rodovias federais e interestaduais, a fiscalização precisa ser mais rigorosa para garantir um controle eficiente do tráfego e mitigar acidentes.

Quando se correlaciona o limite de velocidade permitido em regiões urbanas — onde ocorre a maior parte dos acidentes envolvendo motociclistas — com a energia de impacto durante uma colisão, percebe-se que a legislação tem influência direta sobre a gravidade desses acidentes. Velocidades mais altas em áreas urbanas contribuem para que os impactos sejam mais severos, resultando em lesões mais graves e, consequentemente, em um maior número de fatalidades ou aposentadorias por invalidez. Assim, a revisão dos limites de velocidade e o fortalecimento da fiscalização tornam-se indispensáveis para a redução dos riscos nas vias públicas.

2.1.3 Eficiência dos Equipamentos de Proteção Veicular

Um dos questionamentos levantados ao longo deste trabalho diz respeito à eficácia dos Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) destinados a motociclistas na prevenção de lesões graves em acidentes. Dada a imprevisibilidade das circunstâncias em que esses acidentes podem ocorrer, é possível que determinados equipamentos não ofereçam proteção suficiente contra certos tipos de lesões. Para investigar essa questão, o estudo de Rome et al. (2011) analisou a eficiência de diversos EPIs, com exceção dos capacetes, na redução da gravidade das lesões, como ilustrado na Figura 3.

A pesquisa incluiu entrevistas com 212 motociclistas que sofreram acidentes ao longo de um ano na Austrália. Os resultados indicaram que o uso de equipamentos como joelheiras, caneleiras e protetores de torso desempenha um papel crucial na diminuição da gravidade das lesões e na redução da necessidade de internações hospitalares. Esses

dispositivos provaram ser ferramentas preventivas indispensáveis para a segurança dos condutores ([ROME, 2011](#)).

O estudo revelou uma redução significativa de danos em diferentes partes do corpo entre motociclistas que utilizavam EPIs em comparação com aqueles que não os utilizavam. Por exemplo:

- O uso de equipamentos de proteção no torso reduziu os danos sofridos em 23% nessa parte do corpo.
- Equipamentos para mãos, pulsos, pés e tornozelos proporcionaram uma redução de aproximadamente 45% nos danos a estas partes do corpo.
- O uso de proteções para as pernas resultou em uma redução de 40% nos ferimentos e lesões nos membros inferiores.

Com base nesses dados, Rome et al. (2011) concluem que o uso de equipamentos de proteção, além do capacete, é altamente eficaz na mitigação da gravidade de lesões em acidentes envolvendo motociclistas. No entanto, o estudo também destaca a ineficiência de tornar obrigatório o uso desses equipamentos por meio de legislação, sugerindo que medidas como incentivos fiscais para os usuários podem ser uma abordagem mais eficaz para promover sua adoção.



Figura 3 – Equipamento de proteção individual para motociclista. ([DANESE, 2011](#))

2.2 Certificação e Parâmetros Técnicos

Com exceção dos capacetes, não há equipamentos de proteção individual (EPIs) obrigatórios para motociclistas no Brasil. Essa ausência de obrigatoriedade resulta na inexistência de certificações específicas para esse tipo de EPI no âmbito nacional, sendo aplicadas apenas regulamentações genéricas organizadas pelo INMETRO para equipamentos de proteção voltados a esportes.

Consequentemente, muitos motociclistas recorrem ao uso de equipamentos adaptados, como aqueles destinados ao skatismo, ou optam por adquirir produtos importados, como macacões completos com proteção para a coluna. No entanto, essa prática é restrita a uma pequena parcela dos motociclistas em território nacional, visto que esses equipamentos, geralmente, possuem custos elevados e são menos acessíveis para a maioria dos condutores.

2.2.1 Certificação de EPIs para motociclistas no Brasil e Resto do Mundo

2.2.1.1 Certificação no Brasil

No Brasil, a Portaria nº 231 ([INMETRO, 2021](#)) regulamenta a certificação do único equipamento de proteção individual obrigatório para motociclistas: o capacete. De acordo com essa portaria, todos os capacetes devem passar pelos rigorosos testes estabelecidos pela Norma ABNT NBR 7471, sendo proibida a comercialização de capacetes que não sejam aprovados nos ensaios regulamentados em território nacional.

A Norma NBR 7471 ([ABNT, 2021](#)) determina que os testes sejam realizados em capacetes de diferentes tamanhos, utilizando cabeças de ensaio metálicas específicas para cada dimensão, com massas definidas pela norma. Durante o teste, o conjunto formado pelo capacete e a cabeça de ensaio deve ser liberado de uma altura determinada, de modo que, no momento em que o conjunto estiver entre 10 mm e 60 mm da superfície de impacto, alcance uma velocidade de $(7 \pm 0,15)$ m/s em uma superfície plana ou $(6 \pm 0,15)$ m/s em uma superfície hemisférica, ambas regulamentadas pela norma.

Para que o capacete seja validado, a norma exige que o acelerômetro posicionado no interior do capacete não registre, em nenhum momento, uma desaceleração superior a 300 G. Além disso, não é permitido que a desaceleração ultrapasse 150 G por um período superior a 5 ms. A metodologia de ensaio descrita na NBR 7471 é ilustrada na Figura 4.

Em contrapartida, em relação aos equipamentos de proteção complementares ou adaptados frequentemente utilizados por motociclistas brasileiros, não há qualquer certificação exigida pelo INMETRO, uma vez que não existe, atualmente, uma resolução do CONTRAN que torne obrigatório o uso de outros equipamentos de proteção além do capacete.

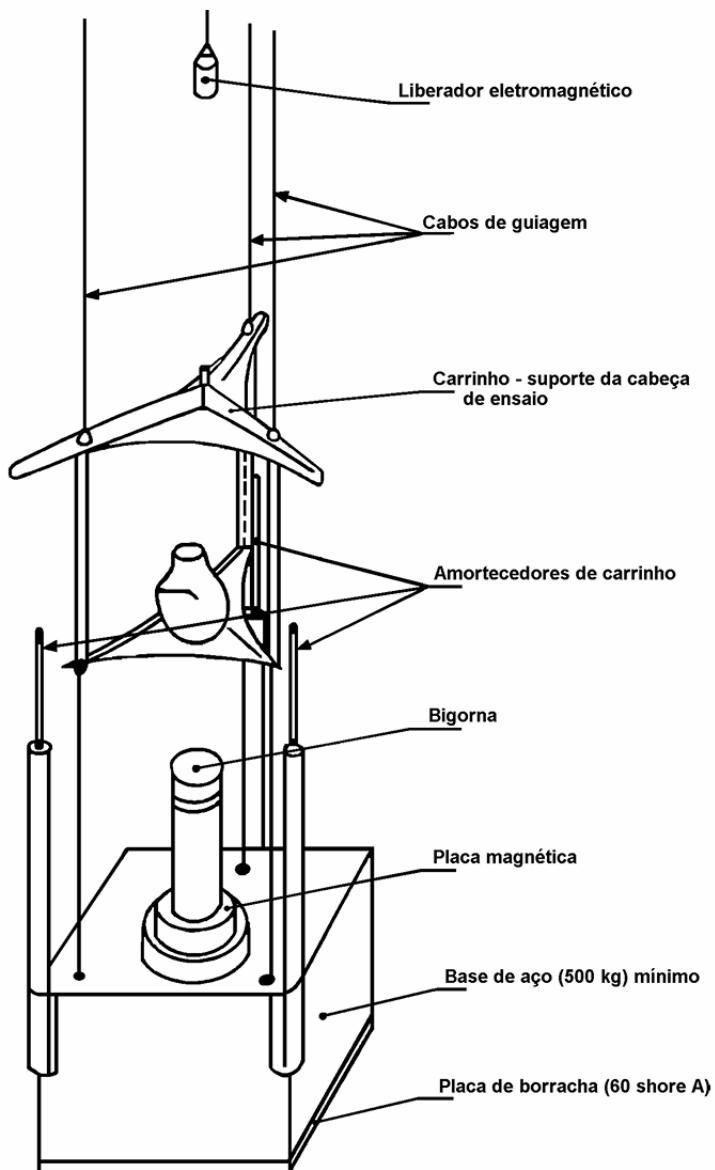


Figura 4 – Maquinário para ensaio de impacto em capacetes de motociclistas. ([ABNT, 2021](#))

2.2.1.2 Certificação no Resto do Mundo

Um dos principais órgãos reguladores de equipamentos de proteção para motociclistas no cenário internacional é o sistema europeu de certificação, que emite os selos CE e UKCA. Essas certificações seguem normas técnicas rigorosas, amplamente reconhecidas, inclusive em esportes de alto desempenho, como o MotoGP.

As normas são estabelecidas pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN), destacando-se especialmente a série EN1621, que define os requisitos para diferentes tipos de proteção corporal:

- **EN1621-1:2012:** refere-se à proteção dos membros dos motociclistas;

- EN1621-2:2014: aborda a proteção das costas e da coluna vertebral;
- EN1621-3:2018: regulamenta a proteção do peito.

Esses equipamentos são classificados em dois níveis de desempenho, com base em sua capacidade de absorção de impacto. Os testes são realizados com as mesmas condições padronizadas, ou seja, com massa e velocidade de impacto idênticas, o que permite comparar objetivamente a eficiência dos diferentes níveis:

- **Nível 1:** destinado ao uso geral. Os equipamentos classificados nesse nível devem oferecer proteção eficaz, atendendo aos requisitos mínimos de segurança, saúde e proteção ambiental da União Europeia. Para aprovação, o equipamento deve transmitir no máximo 35 kN de força ao sensor posicionado atrás da peça durante o impacto.
- **Nível 2:** recomendado para atividades de maior risco, como competições ou uso profissional. Esses equipamentos são submetidos ao mesmo teste de impacto que os de nível 1, porém devem apresentar desempenho superior: a força transmitida não pode ultrapassar 20 kN, demonstrando maior eficiência na absorção de energia e proteção contra lesões.

Além das normas específicas para protetores localizados, a norma EN17092:2020 regulamenta o vestuário completo para motociclistas, avaliando a proteção de diferentes zonas do corpo e o desempenho global da vestimenta em condições de impacto e abrasão.

Como exemplo prático, nos ensaios realizados segundo a norma EN1621-1:2012, o equipamento é fixado sobre uma bigorna com massa mínima de 500 kg. Um golpeador padronizado, com massa de (5000 ± 10) g, é liberado de altura suficiente para gerar uma energia de impacto de (50 ± 2) J. Ao contrário do ensaio para capacetes — que mede aceleração —, neste teste o critério de aprovação se baseia na força máxima transmitida ao sensor após o impacto.

Dessa forma, a certificação europeia oferece um padrão técnico preciso e exigente, promovendo maior segurança e confiabilidade nos equipamentos comercializados. Essa abordagem serve como referência internacional e será utilizada neste trabalho para avaliação comparativa dos dispositivos desenvolvidos. A Figura 5 ilustra a metodologia de teste aplicada.

Pode-se concluir que a certificação europeia para equipamentos de proteção individual voltados a motociclistas é extremamente rigorosa, com regulamentações que abrangem tanto testes individuais quanto coletivos. Essa abordagem promove uma maior confiabilidade e segurança nos equipamentos, garantindo que apenas produtos devidamente

testados e aprovados sejam comercializados, não apenas no continente europeu, mas em todo o mundo.

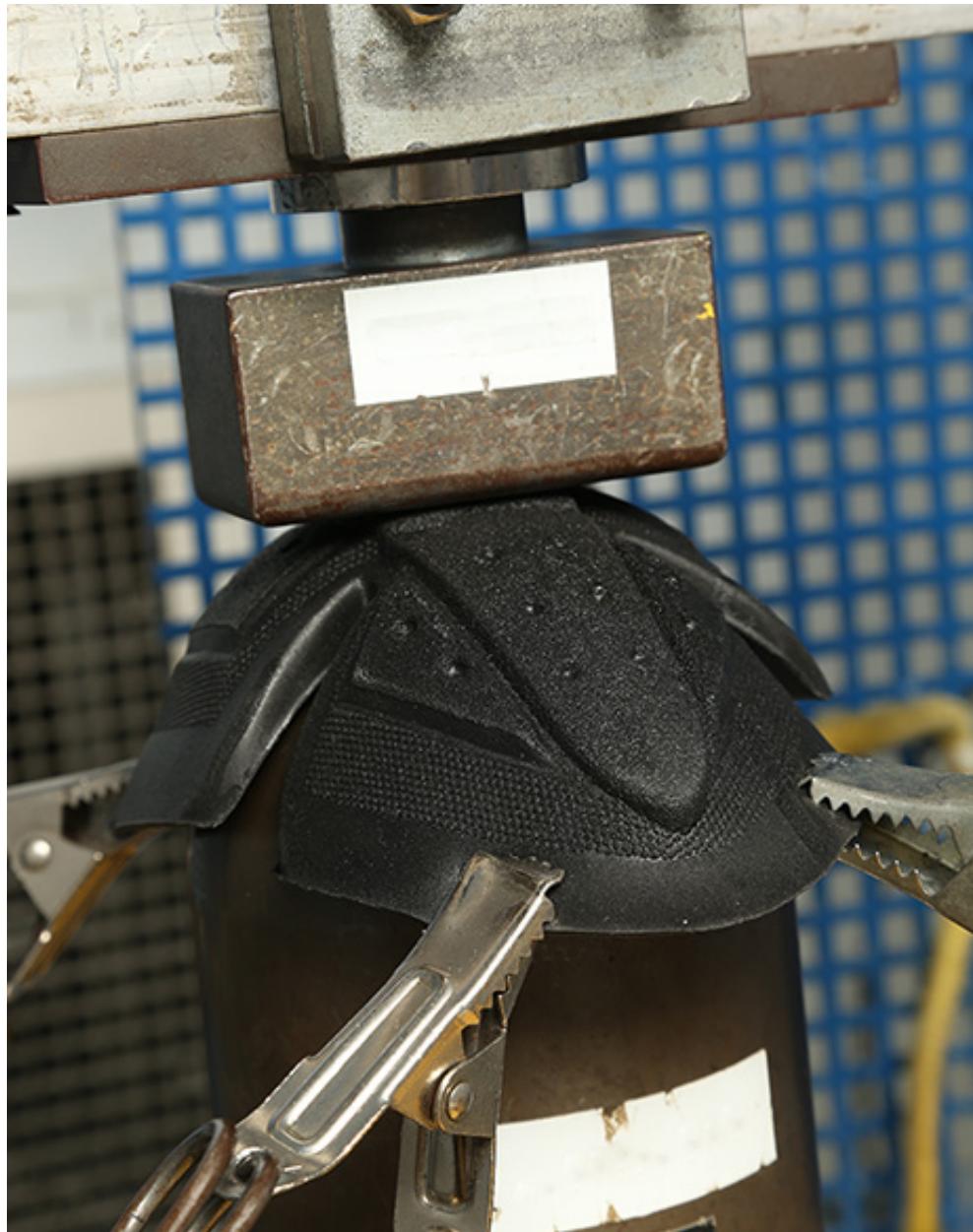


Figura 5 – Maquinário para ensaio de impacto em equipamentos de proteção para membros. Fonte: SATRA. PPE – EN1621 Motorcycle protectors. Disponível em: <<https://www.satra.com/ppe/EN1621.php>>. Acesso em: 28 jun. 2025.

A proposta deste trabalho, em última instância, é utilizar os parâmetros estabelecidos pelas certificações europeias para equipamentos de proteção, comparando-os com os resultados obtidos nas análises do comportamento mecânico das peças desenvolvidas. Essa abordagem visa avaliar, de forma padronizada e regulamentada, a eficácia desses equipamentos na proteção dos motociclistas.

3 Referencial Teórico

Este capítulo apresenta o embasamento teórico que fundamenta o trabalho, abrangendo o desenvolvimento dos equacionamentos utilizados nos cálculos da metodologia, os estudos sobre refinamento de malha aplicados às simulações numéricas e a revisão dos artigos científicos que serviram como referência para a realização dos experimentos.

3.1 Análise de uma situação de Impacto

Para o equacionamento da situação de impacto, podem-se adotar diferentes abordagens. Uma delas considera a interação da dinâmica de estruturas, modelando o impacto como a aplicação de uma função de pulso de duração infinitesimal, representando a força de excitação atuando sobre uma estrutura amortecida. Essa abordagem é válida para uma análise de impacto horizontal. Outra possibilidade é a análise de impacto vertical, na qual o projétil é liberado de uma determinada altura. Nesse caso, além da função de pulso, também se faz necessária a inclusão de uma função degrau, pois, após a colisão, a força peso da esfera continua a atuar sobre a placa ([INMAN, 2018](#)). A Figura 6 na parte (a) e (b) ilustra essa situação em uma estrutura genérica.

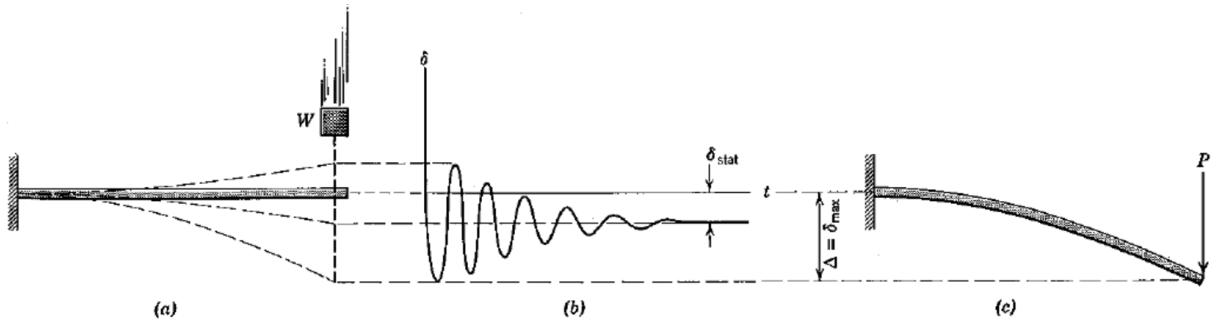


Figura 6 – Representação esquemática da aproximação entre efeitos dinâmicos e estáticos no impacto vertical de uma massa W sobre uma estrutura, resultando em deflexão dinâmica; (b) Gráfico de deflexão ao longo do tempo, com destaque para a deflexão estática δ_{stat} , a deflexão máxima δ_{max} , e o comportamento oscilatório; (c) Modelo de equivalência com aplicação de força estática amplificada P , representando os efeitos dinâmicos do impacto. Fonte: ([AKIN, 2015](#)).

No entanto, essa análise apresenta algumas dificuldades, especialmente no que diz respeito à determinação da força aplicada em um intervalo de tempo extremamente curto, característico de uma situação de impacto. Além disso, quantificar com precisão a duração do contato entre os corpos durante a colisão é um desafio, uma vez que esse

intervalo de tempo é extremamente reduzido e depende de diversos fatores, como a rigidez dos materiais envolvidos e as condições da interação entre as superfícies.

Desta forma, com a ideia de simplificar os equacionamentos para situações de impacto, foi publicado um artigo na Universidade de Rice em Houston no Texas uma solução que ao invés de utilizar uma análise dinâmica completa para uma situação de impacto, utiliza uma análise estática ampliada (AKIN, 2015).

Segundo (AKIN, 2015), em uma análise de tensão estática, a força estática (ou peso da massa) deve ser aumentada por um Fator de Impacto para obter uma boa aproximação da deflexão e da tensão máxima dinâmicas. Para materiais com comportamento elástico e baixa dissipação de energia, o Fator de Impacto para impactos verticais é sempre maior ou igual a dois. Podemos exemplificar essa explicação com a Figura 6, parte (c), que apresenta uma carga estática amplificada, P , utilizada para estimar a máxima deflexão e tensão em uma viga, considerando a resposta dinâmica de um peso W caindo verticalmente sobre ela.

Outro ponto a ser apresentado é que na análise de impactos na mecânica dos sólidos, um método amplamente utilizado para estimar a carga estática equivalente é o balanço de energia. Esse princípio considera que a energia cinética da massa em movimento é convertida em energia de deformação do corpo impactado, com uma eficiência representada por η (AKIN, 2015).

Caso sejam desprezadas as perdas de energia devido a fatores como dissipação térmica, ruído e deformações plásticas, e considerando que a massa do corpo atingido seja irrelevante, pode-se assumir $\eta = 1$, o que caracteriza uma colisão com 100% de eficiência. Entretanto, equações de engenharia ajustam essa estimativa levando em conta a relação entre a massa do objeto em movimento e a do objeto impactado. Dito isto, para Akin (2015) na maioria dos casos, essas correções indicam uma eficiência superior a $\eta = 0,95$.

Dessa forma, Akin (AKIN, 2015) apresenta a equação para o cálculo do Fator de Impacto (n), conforme mostrado na Equação 3.1. Esse fator adimensional, quando multiplicado pela força estática W , fornece a carga estática amplificada P , permitindo estimar a deflexão máxima da estrutura ao considerar a resposta dinâmica do impacto.

$$n = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h\eta}{\delta_{est}}} \quad (3.1)$$

Na equação apresentada, observa-se que o Fator de Impacto é aplicado a um cenário de queda livre do objeto. Os parâmetros envolvidos incluem h , que representa a altura de queda; η , que indica a eficiência da colisão; e δ_{est} , correspondente à deflexão sofrida pela estrutura quando submetida à aplicação da força peso W no ponto de impacto. Para uma situação de colisão horizontal, o Fator de Impacto é obtido pela Equação 3.2.

$$n = \sqrt{\frac{\eta v^2}{g\delta_{est}}} \quad (3.2)$$

Aqui, diferentemente da equação anterior, é necessário considerar a velocidade do objeto antes do impacto (v) e a aceleração gravitacional (g).

Assim, com os dois métodos apresentados para o cálculo do Fator de Impacto, é possível estimar a força amplificada (P) e, sob determinadas condições, a deflexão máxima (δ_{max}) da estrutura sujeita a cargas dinâmicas, conforme expresso nas Equações 3.3 e 3.4.

$$P = W \cdot n \quad (3.3)$$

$$\delta_{max} = \delta_{est} \cdot n \quad (3.4)$$

É importante destacar que a validade da Equação 3.4 pressupõe que o sistema estrutural opere dentro do regime linear-elástico, ou seja, que o material não ultrapasse seu limite elástico e que as deformações ocorram de forma proporcional à carga aplicada. Em situações que envolvam deformações plásticas, histerese ou efeitos não lineares significativos, essa relação deixa de ser válida e deve ser substituída por modelos mais complexos.

Com base no estudo de Akin (AKIN, 2015), é possível estimar de maneira eficiente a deflexão máxima de uma estrutura submetida ao impacto de um corpo de massa conhecida. Embora a abordagem original trate especificamente da deflexão em vigas, uma adaptação semelhante pode ser aplicada a placas planas, uma vez que o método se baseia no cálculo da deflexão por meio de uma carga estática equivalente.

Além disso, a metodologia permite definir o ponto de aplicação da força em qualquer região da placa. No entanto, para este trabalho, a força é considerada no centro da placa, com o objetivo de simplificar os equacionamentos e facilitar a análise dos resultados.

A determinação da deflexão em placas pode ser realizada com base na teoria de placas finas, amplamente utilizada na engenharia aeroespacial. Segundo Megson (MEGSON, 2007), uma placa fina é caracterizada por apresentar espessura pequena em relação às outras dimensões, o que se aplica à geometria adotada neste trabalho.

O comportamento da deflexão em uma placa depende das propriedades do material, principalmente da sua rigidez à flexão, a qual é fundamental para o cálculo de deslocamentos causados por cargas distribuídas ou concentradas. O equacionamento da rigidez à flexão, ainda conforme Megson, pode ser observado na Equação 5 deste capítulo.

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.5)$$

3.1.1 Deflexão em Placa com Todas as Extremidades Simplesmente Apoiadas

Agora considerando as condições de contorno definidas para este trabalho, temos uma placa fina com todas as extremidades simplesmente apoiadas, demonstradas na Equação 6 e 7 a representação de uma borda que não tem momento ao permitir a rotação da mesma e tem um deslocamento $w = 0$.

$$(w)_{x=0,a} = 0 \quad ; \quad \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{x=0,a} = 0 \quad (3.6)$$

$$(w)_{y=0,b} = 0 \quad ; \quad \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{x=0,b} = 0 \quad (3.7)$$

No trabalho de Navier (1820) é demonstrado que essas condições são satisfeitas ao representar a deflexão (w) como um trigonométrico infinito ou série de Fourier.

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \quad (3.8)$$

Aqui temos que m representa o número de meias ondas em x e n representa o número de meias ondas em y. Para o termo A_{mn} , Megson (2007) apresenta que ele será dependente da Rígidez à Flexão (D) e do termo a_{mn} que também depende do carregamento que a placa estará sendo submetida, podendo ser uma carga distribuída ou uma carga concentrada. Desta forma, manipulando o equacionamento, é possível encontrar o equacionamento proposto no Livro (MEGSON, 2007) e que está apresentado na Equação 9.

$$w = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{mn}}{\left[\left(\frac{m^2}{a^2} \right) + \left(\frac{n^2}{b^2} \right) \right]^2} \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left(\frac{n\pi y}{b} \right) \quad (3.9)$$

Agora é necessário considerar o carregamento para substituir o coeficiente a_{mn} e encontrar a forma final da equação para uma placa retangular. Como consideramos uma situação de impacto de uma esfera em uma placa, deve-se considerar que a área de contato entre a placa e a esfera é infinitesimalmente pequena, isso remete a um tipo de carregamento concentrado, desta forma manipulando a Equação 9, chegamos à deflexão sofrida pela placa na Equação 10 deste capítulo.

$$w = \frac{4 \cdot W}{\pi^4 D ab} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\left(\frac{m+n}{2}-1\right)} \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left(\frac{n\pi y}{b} \right)}{\left[\left(\frac{m^2}{a^2} \right) + \left(\frac{n^2}{b^2} \right) \right]^2} \quad (3.10)$$

Vale ressaltar que a força de carregamento representada por W na equação é referente à força peso W apresentada anteriormente para o objeto que irá colidir com o anteparo.

3.1.2 Placa com Duas Bordas Engastadas e Duas Simplesmente Apoiadas

Além da condição de contorno com todas as bordas simplesmente apoiadas, também será analisada uma segunda configuração: placas com duas bordas engastadas e duas bordas simplesmente apoiadas. A inclusão de múltiplas condições de contorno tem como objetivo aumentar a robustez da metodologia adotada, permitindo a avaliação do desempenho estrutural sob diferentes restrições mecânicas.

Essa abordagem possibilita verificar a influência do tipo de fixação nos resultados de deflexão e proporciona maior confiabilidade na comparação entre os modelos analítico, numérico e experimental. A Figura 7 ilustra algumas das configurações de fixação utilizadas ao longo deste trabalho.

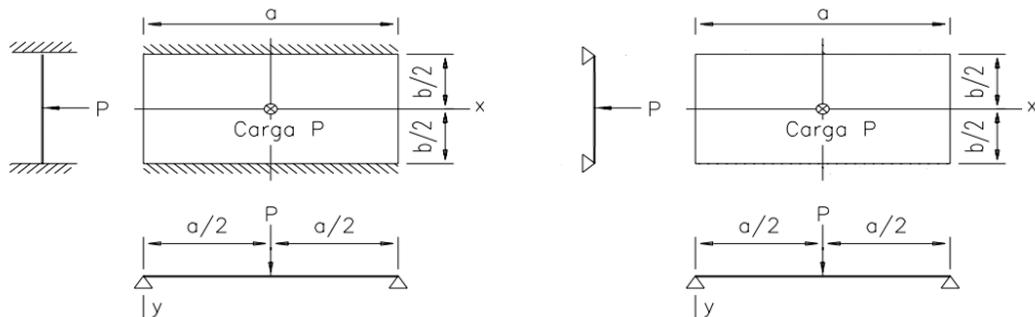


Figura 7 – Condições de contorno da placa fina utilizadas. (SOARES, 2004).

Seguindo o mesmo procedimento apresentado nos outros equacionamentos, e apenas mudando as condições de contorno, é possível encontrar o seguinte equacionamento para a **segunda configuração de fixação da placa** (SOARES, 2004).

$$w = \frac{W b^2}{2 \pi^3 D} \left(\sum_{m=1,3,5...}^{\infty} \frac{1}{m^3} \left(tgh \alpha_m - \frac{\alpha_m}{cosh^2 \alpha_m} \right) - \frac{\pi^2}{4} \sum_{n=1,3,5...}^{\infty} \frac{1}{m} \frac{tgh^2 \alpha_m}{senh(\alpha_m)cosh(\alpha_m) + \alpha_m} \right) \quad (3.11)$$

Aqui temos um termo utilizado no equacionamento que é o α_m , esse é um termo referente à geometria da placa, e pode ser encontrado por meio da Equação 12 deste capítulo.

$$\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a} \quad (3.12)$$

3.1.3 Deflexão em Placa com todas as extremidades engastadas

Além das configurações de contorno previamente abordadas, foi considerada uma terceira condição: placas com todas as extremidades engastadas. A inclusão dessa confi-

guração visa não apenas ampliar a confiabilidade da metodologia, ao possibilitar a comparação entre diferentes situações de contorno, mas também facilitar a execução do ensaio experimental. Isso porque, na prática, a fixação completa das bordas é a forma mais viável e precisa para reproduzir a condição de contorno no laboratório, garantindo maior controle sobre os parâmetros do sistema. Dessa forma, espera-se obter maior concordância entre os resultados experimentais, analíticos e numéricos. Nesse tipo de configuração, a rigidez à flexão da placa é maximizada devido à completa restrição de deslocamentos e rotações nas bordas, resultando em deflexões significativamente menores sob a mesma carga aplicada.

A solução analítica para a deflexão máxima sob carga concentrada no centro da placa, considerando esse tipo de engastamento, pode ser expressa como:

$$w_{\max} = f(a/b) \cdot \frac{Pa^2}{D} \quad (3.13)$$

em que:

- w_{\max} é a deflexão máxima no centro da placa [m];
- P é a carga concentrada aplicada [N];
- a é o comprimento da placa na direção de carregamento [m];
- D é a rigidez flexional da placa, dada por:

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.14)$$

- $f(a/b)$ é um coeficiente adimensional que depende da razão entre os lados da placa.

Os valores de $f(a/b)$ para placas com todas as bordas engastadas foram obtidos a partir de tabelas disponíveis na literatura especializada, como Timoshenko & Woinowsky-Krieger ([TIMOSHENKO; WOINOWSKY-KRIEGER, 1959](#)), e interpolados numericamente para a razão a/b correspondente. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos de flexão de placas finas quando a solução analítica exata completa torna-se impraticável.

Para a geometria utilizada neste trabalho ($a = 200$ mm, $b = 180$ mm), a razão $a/b = 1.11$ foi aplicada à tabela de coeficientes, e o valor de $f(a/b)$ foi obtido via interpolação linear. Esse valor foi então substituído na equação da deflexão máxima, resultando em uma estimativa precisa da resposta da estrutura sob a condição de engastamento completo.

Essa terceira condição de contorno permite avaliar a influência da restrição nas bordas sobre o comportamento estrutural da placa, complementando as análises realizadas

Tabela 1 – Coeficientes $f(a/b)$ para placas com todas as extremidades engastadas sob carga concentrada no centro

Razão a/b	Coeficiente $f(a/b)$
1,0	0,00540
1,1	0,00527
1,2	0,00517
1,3	0,00508
1,5	0,00494
2,0	0,00473
3,0	0,00455
4,0	0,00447
5,0	0,00442
10,0	0,00433

Fonte: Adaptado de Timoshenko & Woinowsky-Krieger (1959) ([TIMOSHENKO; WOINOWSKY-KRIEGER, 1959](#)).

com bordas simplesmente apoiadas ou parcialmente engastadas. A inclusão desse caso amplia o escopo da validação analítica, permitindo comparações mais abrangentes com os modelos numéricos e experimentais.

3.2 Estimativa de Propriedades Equivalentes para Estruturas Reforçadas

Para aplicar as equações de deflexão apresentadas na Seção 3.1 às estruturas compostas analisadas neste trabalho, é necessário determinar propriedades mecânicas equivalentes. Em particular, busca-se calcular o módulo de elasticidade efetivo (E_{eq}) e o coeficiente de Poisson efetivo (ν_{eq}), que representem o comportamento global da estrutura sob carregamento.

As estruturas consideradas incluem diferentes configurações de reforço, como placas do tipo sanduíche — compostas por um núcleo leve (como PETG impresso em 3D) entre lâminas externas de fibra de vidro e resina epóxi — e também placas metálicas (como alumínio) com reforço assimétrico aplicado em apenas uma das faces. Nesses dois cenários, a heterogeneidade dos materiais justifica a adoção de modelos de homogeneização, com o objetivo de estimar propriedades equivalentes que possam ser empregadas nas formulações analíticas.

A determinação dessas propriedades foi realizada com base na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), conforme descrita por Jones ([JONES, 1999](#)) e Hyer ([HYER, 2009](#)), e adaptada conforme a distribuição e espessura das camadas envolvidas. Essa abordagem permite representar a resposta mecânica da estrutura reforçada de maneira simplificada,

mas ainda consistente com seu comportamento real sob flexão.

3.2.1 Cálculo das propriedades da lâmina

As lâminas compostas são formadas por uma matriz (resina epóxi) reforçada com fibras (E-glass), que conferem rigidez ao material. O comportamento mecânico de uma única lâmina ortotrópica é caracterizado por propriedades distintas nas direções longitudinal e transversal em relação à orientação das fibras. Essas propriedades principais são:

- E_1 : módulo de elasticidade na direção das fibras (longitudinal);
- E_2 : módulo de elasticidade perpendicular às fibras (transversal);
- G_{12} : módulo de cisalhamento no plano da lâmina;
- ν_{12} : coeficiente de Poisson na direção longitudinal-transversal.

Essas propriedades são estimadas por modelos de mistura, que assumem uma distribuição homogênea entre os constituintes (fibra e matriz), ponderada pela fração volumétrica de fibras V_f . As expressões utilizadas são:

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (3.15)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + (1 - V_f) E_f} \quad (3.16)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_f G_m + (1 - V_f) G_f} \quad (3.17)$$

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m \quad (3.18)$$

Nessas equações, os subscritos f e m referem-se à fibra e à matriz, respectivamente, e os valores típicos de propriedades foram obtidos da literatura ([GIBSON, 2016](#)).

3.2.2 Matriz de rigidez reduzida da lâmina

Com os valores de E_1 , E_2 , G_{12} e ν_{12} , pode-se montar a matriz de rigidez reduzida \mathbf{Q} , que descreve a resposta da lâmina a carregamentos no seu plano, considerando seu comportamento ortotrópico:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Os termos da matriz são definidos como:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2}, \quad (\text{rigidez na direção das fibras}) \quad (3.20)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}^2}, \quad (\text{rigidez transversal}) \quad (3.21)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12}^2}, \quad (\text{acoplamento longitudinal-transversal}) \quad (3.22)$$

$$Q_{66} = G_{12}, \quad (\text{rigidez ao cisalhamento}) \quad (3.23)$$

Essa matriz **Q** representa o comportamento de uma lâmina única orientada a 0°. Para considerar diferentes orientações das fibras (como 90°), essa matriz deve ser transformada para o sistema global por meio de operações de rotação.

3.2.3 Propriedades equivalentes do laminado

Com a matriz **Q** e a espessura de cada lâmina, monta-se a matriz de rigidez extensional do laminado (**A**), integrando-se a contribuição de cada camada ao longo da espessura total do painel. Essa matriz reflete a resposta global da estrutura ao carregamento.

O módulo de elasticidade equivalente do laminado é obtido a partir do termo A_{11} :

$$E_{\text{eq}} = \frac{A_{11}}{t_{\text{total}}} \quad (3.24)$$

Esse valor representa a rigidez efetiva do laminado na direção predominante de carregamento.

Para o coeficiente de Poisson equivalente, foi utilizada uma média ponderada por rigidez entre as lâminas e o núcleo, segundo:

$$\nu_{\text{eq}} = \frac{\sum(E_i \cdot \nu_i \cdot t_i)}{\sum(E_i \cdot t_i)} \quad (3.25)$$

onde E_i , ν_i e t_i são o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a espessura da i -ésima camada.

3.2.4 Aplicação prática

Com os valores de E_{eq} e ν_{eq} estimados, as equações de deflexão originalmente desenvolvidas para placas homogêneas, como as de alumínio, podem ser aplicadas diretamente às estruturas compostas analisadas neste trabalho. Essa substituição permite representar, de forma simplificada, o comportamento global de diferentes configurações, como placas do tipo sanduíche ou estruturas com reforço unidirecional.

Essa abordagem proporciona uma base comum para a comparação entre geometrias e materiais distintos sob as mesmas condições de carregamento quasi-estático, mantendo a coerência metodológica da análise e facilitando a integração entre os modelos analítico, numérico e experimental.

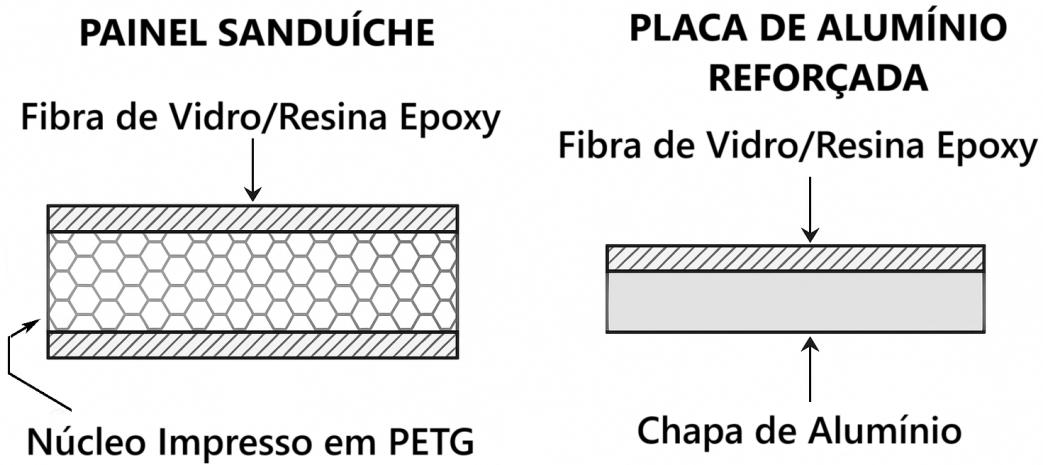


Figura 8 – Representação esquemática das configurações estruturais analisadas: (a) placa sanduíche com núcleo de PETG e lâminas externas de fibra de vidro; (b) placa de alumínio com reforço assimétrico em uma face.

4 Metodologia

4.1 Planejamento Inicial

Conforme apresentado na introdução, as análises deste trabalho serão simplificadas para uma geometria básica, representada por uma placa fina. Essa escolha proporciona maior praticidade na formulação dos equacionamentos necessários para o cálculo da deflexão da placa durante o impacto de um projétil, além de viabilizar a realização do experimento de maneira controlada. Caso uma geometria mais complexa fosse utilizada, como uma caneleira, a fixação da estrutura apresentaria desafios significativos, especialmente devido à ausência de equipamentos específicos para esse tipo de teste.

Outro aspecto relevante desta etapa do estudo é a definição da configuração experimental adotada para a validação dos modelos analítico e numérico. Diferentemente de um ensaio de impacto dinâmico, optou-se por um experimento quasi estático, realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos. Nessa configuração, uma carga concentrada é aplicada por meio de uma esfera metálica posicionada centralmente sobre a superfície da placa. Esse método possibilita maior controle sobre os parâmetros do carregamento e facilita a obtenção de dados precisos de força e deslocamento, fundamentais para a comparação entre os modelos desenvolvidos. Vale ressaltar que a adoção do ensaio quasi estático deve-se, em grande parte, aos desafios operacionais associados aos experimentos de impacto, como a necessidade de câmeras de alta velocidade para captura dos eventos transitórios e a complexidade envolvida na construção e controle de uma torre de queda para o lançamento do projétil.

Com a metodologia experimental definida, também foi necessário estabelecer a geometria da placa e as condições de contorno a serem analisadas. Utilizou-se uma placa retangular com dimensões de 200 mm × 180 mm e espessura de 1 mm. Foram consideradas três configurações distintas de fixação: (i) todas as bordas simplesmente apoiadas; (ii) duas bordas engastadas e duas simplesmente apoiadas; e (iii) todas as bordas engastadas. A inclusão da terceira configuração visa ampliar o escopo de análise e avaliar a influência do grau de restrição nas bordas sobre a resposta estrutural da placa. Essas condições foram implementadas tanto nos modelos analíticos quanto nas simulações numéricas, garantindo coerência entre as abordagens.

Para o projétil, optou-se por uma esfera de aço com diâmetro de 45 mm e massa de 0,369 kg. Essa escolha se deve à disponibilidade do material no mercado, facilitando sua aquisição e garantindo viabilidade para os testes experimentais. A velocidade de impacto da esfera foi definida como 0,7 m/s, valor selecionado com base em simulações

preliminares realizadas durante a fase inicial do projeto. Nessas simulações, observou-se que a deflexão da placa retornava à sua posição original após o carregamento, sem indícios de deformação plástica, indicando que o regime de deformação se mantinha no campo elástico. Essa condição é essencial, uma vez que as equações analíticas de deflexão utilizadas neste trabalho — baseadas na teoria clássica de placas finas — assumem pequenas deformações e comportamento linear-elástico, conforme discutido por Soares ([SOARES, 2004](#)). A adoção dessa velocidade, portanto, garante compatibilidade com os pressupostos teóricos e assegura a validade das comparações com os resultados obtidos analítica e numericamente.

Diante da definição das configurações geométricas, materiais e condições de contorno, tornou-se necessário organizar as etapas do estudo de modo a estruturar a execução dos ensaios, simulações e análises teóricas. A seguir, é apresentado o planejamento geral das avaliações realizadas neste trabalho, com a descrição das fases experimentais, numéricas e analíticas previstas.

4.1.1 Planejamento Geral do Estudo

O presente estudo está estruturado em três grandes etapas, organizadas com o objetivo de validar a metodologia de análise de deflexão por meio de diferentes abordagens e configurações de material.

A primeira etapa consiste na avaliação de placas de alumínio puro com duas espessuras distintas: 1 mm e 2 mm. Consideradas como materiais isotrópicos, essas placas servem como referência para aplicação dos modelos analítico, computacional e experimental, permitindo a comparação entre os métodos e a verificação da coerência dos resultados obtidos. A variação da espessura tem como propósito avaliar a sensibilidade dos métodos aplicados frente a alterações geométricas simples.

Na segunda etapa, é analisada uma placa de alumínio com 2 mm de espessura, reforçada com uma lâmina de fibra de vidro e resina epóxi aplicada em uma de suas faces. A comparação entre essa configuração e a placa de alumínio não reforçada permite avaliar a influência da camada compósita na rigidez estrutural e na redução da deflexão resultante do impacto.

Por fim, na terceira etapa, é realizada a análise de uma estrutura do tipo sanduíche, composta por um núcleo de PETG impresso em 3D e laminado simétrico de fibra de vidro em ambas as faces. Essa estrutura também é avaliada por meio das três abordagens — analítica, computacional e experimental —, buscando validar a metodologia desenvolvida e explorar o potencial da configuração sanduíche para uso em Equipamentos de Proteção Individual (EPIs).

A Figura 9 apresenta, de forma esquemática, a organização do planejamento do

estudo, destacando as três principais etapas desenvolvidas e suas respectivas abordagens metodológicas.

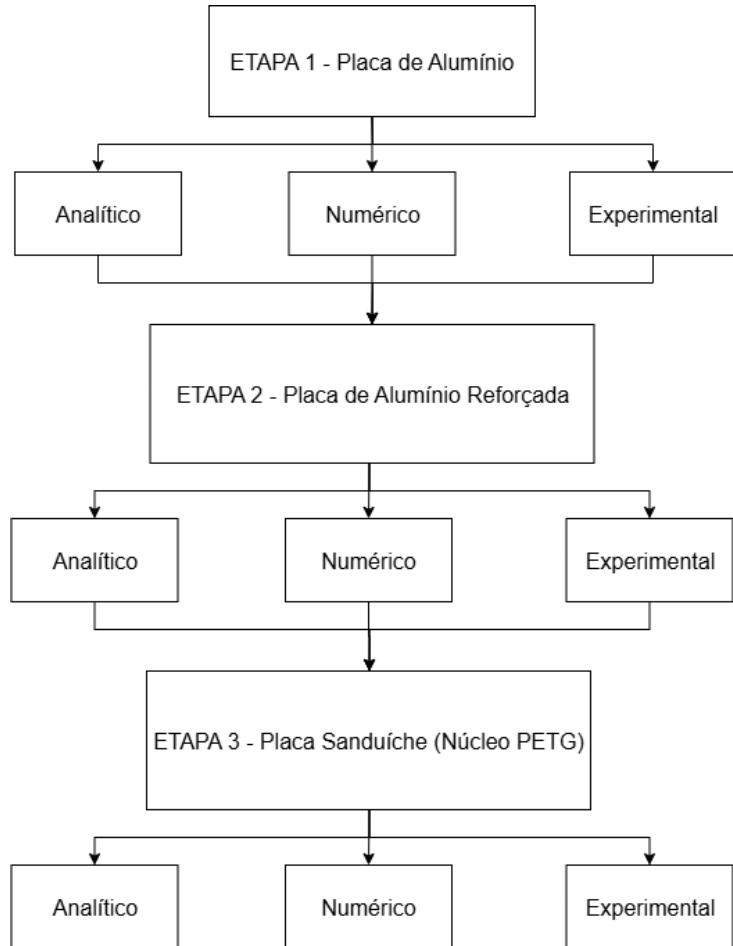


Figura 9 – Fluxograma do planejamento geral do estudo, organizado em três etapas principais: (1) avaliação de placa de alumínio com 1 e 2 mm de espessura; (2) avaliação de placa reforçada com fibra de vidro; e (3) análise de estrutura sanduíche com núcleo em PETG e laminado simétrico. Cada etapa contempla abordagens analíticas, numéricas e, quando aplicável, experimentais.

4.2 Etapa 1 (Placa de Alumínio)

4.2.1 Modelagem Analítica

Para a primeira etapa deste estudo, foi realizada uma abordagem analítica com o objetivo de calcular a deflexão sofrida por placas de alumínio sob ação de uma carga concentrada no centro da superfície. O modelo baseia-se nas equações de flexão de placas finas apresentadas no Capítulo 3, aplicadas a diferentes condições de contorno. Foram consideradas três configurações: (i) todas as extremidades simplesmente apoiadas; (ii) duas extremidades engastadas e duas apoiadas; e (iii) todas as extremidades engastadas.

A geometria da placa foi mantida constante, com dimensões de 200 mm × 180 mm, sendo avaliadas duas espessuras distintas: 1 mm e 2 mm. A carga foi aplicada por meio de uma esfera metálica com diâmetro de 45 mm e massa de 0,369 kg, colidindo com a placa a uma velocidade de 0,7 m/s.

Apesar de se tratar originalmente de uma situação de impacto, os cálculos analíticos foram formulados com base em uma carga estática equivalente. Essa abordagem é justificada pela teoria do fator de impacto apresentada por Akin (AKIN, 2015), conforme discutido no Capítulo 3. Segundo essa metodologia, é possível estimar os efeitos de uma colisão dinâmica ao aplicar uma carga concentrada estática amplificada, proporcional ao fator de impacto n , definido como a razão entre a deflexão provocada pela colisão dinâmica e a deflexão obtida com a carga peso do projétil.

Neste trabalho, considerou-se como carga concentrada inicial a força peso da esfera, dada por:

$$P = m \cdot g = 0,369 \cdot 9,81 = 3,6199 \text{ N}.$$

Com a deflexão gerada por essa força estática sendo calculada analiticamente para cada configuração, foi possível aplicar o fator de impacto n para estimar a carga equivalente ao impacto da esfera com velocidade de 0,7 m/s. Esse procedimento foi adotado tanto para a placa de 1 mm quanto para a de 2 mm, e em todas as configurações de contorno. Os resultados completos dessa análise comparativa serão apresentados no Capítulo 5.

A Figura 10 mostra a análise de convergência empregada para garantir a precisão dos resultados analíticos, obtidos por meio de um código em MATLAB, detalhado nos Apêndices A.

A definição do material da placa leva em consideração a necessidade de validar o modelo analítico com um material isotrópico de fácil aquisição, garantindo simplicidade e confiabilidade nos cálculos iniciais. Por esse motivo, utilizou-se o alumínio, cujas propriedades facilitam a modelagem por apresentarem comportamento mecânico homogêneo e linear-elástico.

Contudo, é importante destacar que foram utilizadas duas ligas de alumínio diferentes ao longo da etapa experimental. A chapa de 1 mm de espessura foi adquirida como alumínio 1100-H14 segundo dados apresentados pelo próprio vendedor, enquanto a chapa de 2 mm corresponde a uma liga de alumínio sem informação, por isso vamos utilizar as propriedades do ANSYS para liga genérica. Essa diferença justifica a utilização de propriedades mecânicas distintas para cada caso nos cálculos analíticos, respeitando a coerência entre os métodos analítico, numérico e experimental.

As propriedades adotadas para cada espessura são:

- **Placa de 1 mm (Alumínio 1100-H14):**

Módulo de Elasticidade (E): 68,9 GPa;

Coeficiente de Poisson (ν): 0,33 ([MatWeb, LLC, 2024](#)).

- **Placa de 2 mm (Liga de Alumínio):**

Módulo de Elasticidade (E): 71 GPa;

Coeficiente de Poisson (ν): 0,33.

Com base nessas definições, foram aplicadas as Equações 3.10, 3.11 e 3.13 (apresentadas no Capítulo 3) para obter a deflexão máxima da placa em cada uma das configurações de contorno. Os resultados foram calculados com diferentes níveis de refinamento, permitindo observar a convergência da solução por meio de somatórios infinitos. Esse processo reforça a confiabilidade dos dados obtidos analiticamente, além de permitir comparações mais consistentes com os métodos numérico e experimental.

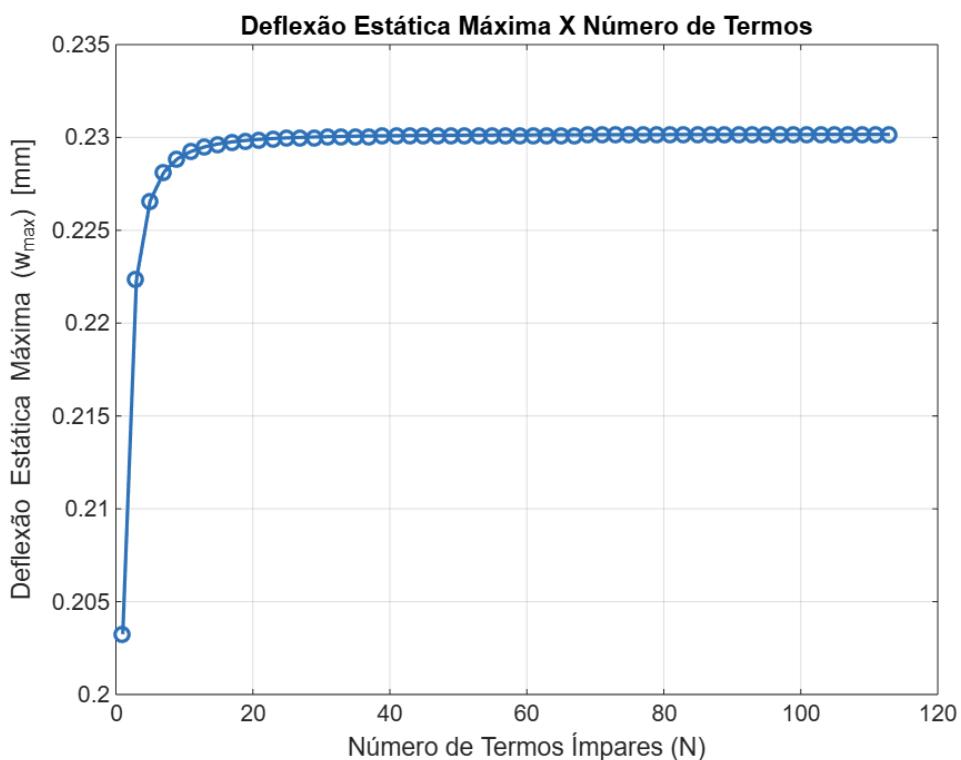


Figura 10 – Análise de convergência da deflexão da placa em relação ao número de integrações.

A partir da Figura 10, observa-se que os valores de deflexão tornam-se praticamente constantes após 40 termos somatórios na série. Dessa forma, para garantir a precisão dos resultados, todos os cálculos analíticos realizados no MATLAB consideraram mais de 40 termos na formulação, assegurando a convergência adequada das soluções.

4.2.2 Modelagem Computacional

A modelagem computacional deste estudo foi realizada no software ANSYS Workbench, por meio dos módulos *Static Structural* e *Explicit Dynamics*, com o objetivo de avaliar o comportamento de placas de alumínio de 1 mm e 2 mm de espessura, submetidas a uma carga concentrada no centro.

4.2.2.1 Refinamento de Malha

Na simulação numérica, a malha pode ser estruturada ou não estruturada, sendo possível realizar modificações em ambas para controlar a densidade dos elementos em diferentes regiões. Essa flexibilidade permite otimizar a precisão dos resultados, garantindo a convergência das soluções, ao mesmo tempo em que reduz o custo computacional quando necessário.

Para garantir precisão e eficiência computacional, foi adotado um perfil de malha estruturada com três zonas concêntricas de diferentes densidades. Essa abordagem, conforme demonstrado por Assante ([ASSANTE, 2023](#)), permite concentrar elementos menores na região de aplicação da carga, reduzindo o custo computacional nas regiões periféricas.

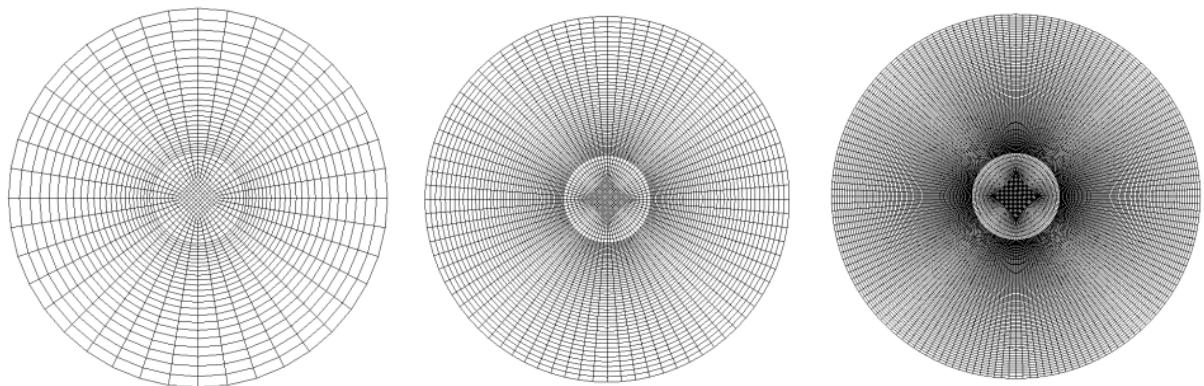


Figura 11 – Perfil de malha com três zonas de controle de densidade. ([ASSANTE, 2023](#)).

4.2.2.2 Simulação Estática

A simulação estática foi realizada utilizando o software comercial *ANSYS Workbench*, que emprega o método dos elementos finitos (MEF) para análise mecânica de geometrias modeladas. O módulo *Static Structural* foi empregado para avaliar a deformação de placas de alumínio sob a ação de uma carga concentrada em sua região central.

A escolha por realizar simulações estáticas, mesmo diante de um cenário originalmente de impacto, se justifica pela abordagem apresentada por Akin ([AKIN, 2015](#)), que demonstra a possibilidade de representar cargas dinâmicas equivalentes através de um

fator de amplificação aplicado a uma carga estática. Dessa forma, torna-se possível analisar o comportamento da estrutura com maior simplicidade e menor custo computacional, sem perda significativa de precisão. Assim, foram realizadas duas simulações para cada condição de contorno: uma com a força peso da esfera (3,6199 N) e outra com a carga amplificada pelo fator de impacto calculado a partir da deflexão inicial.

A geometria da placa foi representada por elementos de casca (*Shell*), visando otimizar o desempenho computacional e reduzir significativamente o tempo de processamento em comparação à modelagem tridimensional sólida. A malha utilizada foi estruturada com três zonas de refinamento, conforme discutido no refinamento de malha e ilustrado na Figura 12. Essa abordagem permite maior densidade de elementos na região central, onde a carga é aplicada, e menor densidade nas bordas, mantendo a precisão dos resultados e reduzindo o custo computacional (ASSANTE, 2023).

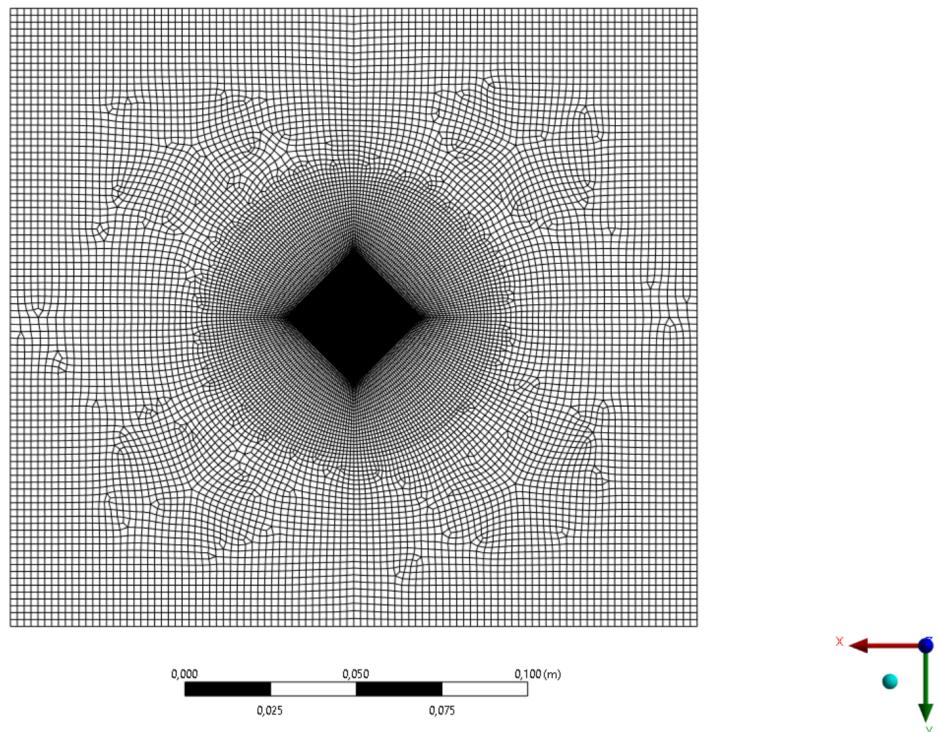


Figura 12 – Geometria e configuração de malha para simulação estática.

Três configurações de contorno foram simuladas: (i) placa com todas as extremidades simplesmente apoiadas, (ii) duas extremidades engastadas e duas apoiadas, e (iii) todas as extremidades engastadas. Cada configuração foi aplicada às duas espessuras de chapa utilizadas no estudo (1 mm e 2 mm). Para representar corretamente os materiais, foi utilizado o modelo *Aluminum Alloy* presente na biblioteca do ANSYS para a placa de 2 mm, com módulo de elasticidade de 71 GPa. Para a placa de 1 mm (liga 1100-H14), foi configurado um material personalizado com módulo de elasticidade de 68,9 GPa, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das chapas de alumínio utilizadas.

Espessura	Liga	E (GPa)	ν
1 mm	1100-H14 (MatWeb, LLC, 2024)	68,9	0,33
2 mm	Aluminum Alloy (ANSYS)	71	0,33

As condições de contorno foram implementadas por meio de restrições nos nós da placa e a carga foi aplicada em uma pequena área quadrada central, como alternativa à aplicação pontual, que não é possível de representar diretamente em simulações por elementos finitos.

Importante destacar que o fator de impacto empregado nas simulações não foi o mesmo do método analítico. Em vez disso, o valor foi calculado com base na deflexão obtida na própria simulação estática com a carga de 3,6199 N, conforme metodologia descrita por Akin ([AKIN, 2015](#)). A partir da deflexão w obtida numericamente, o fator de impacto n foi calculado utilizando as equações apresentadas no referencial teórico e todos os resultados serão apresentados no capítulo de resultados.

Todos os dados simulados para as diferentes configurações de material, espessura e fixação serão apresentados e discutidos no capítulo de resultados.

4.2.2.3 Simulação Dinâmica

Para a simulação de impacto, foi utilizado o módulo *Explicit Dynamics*. A geometria da esfera de 45 mm de diâmetro e massa de 0,369 kg foi incluída, com velocidade inicial de 0,7 m/s. O tempo total da simulação foi de 0,006 s, suficiente para observar a deflexão máxima.

A simulação foi realizada para ambas as espessuras e nas três condições de contorno. Os resultados serão apresentados no Capítulo de Resultados. É possível observar na Figura 13 as condições de contorno e a geometria aplicados no *Explicit Dynamics*.

4.2.3 Método Experimental

Para validar os resultados obtidos pelas modelagens analítica e computacional, foi realizada uma série de testes quasi-estáticos em placas de alumínio com espessuras de 1 mm e 2 mm. A metodologia experimental adotada consistiu na aplicação de uma carga concentrada, equivalente ao peso da esfera de aço (3,6199 N), no centro da placa, replicando as condições de contorno e carregamento utilizadas nas análises anteriores.

A opção por ensaios quasi-estáticos se deve às limitações práticas da realização de testes de impacto dinâmico, que exigiriam equipamentos especializados, como torre de

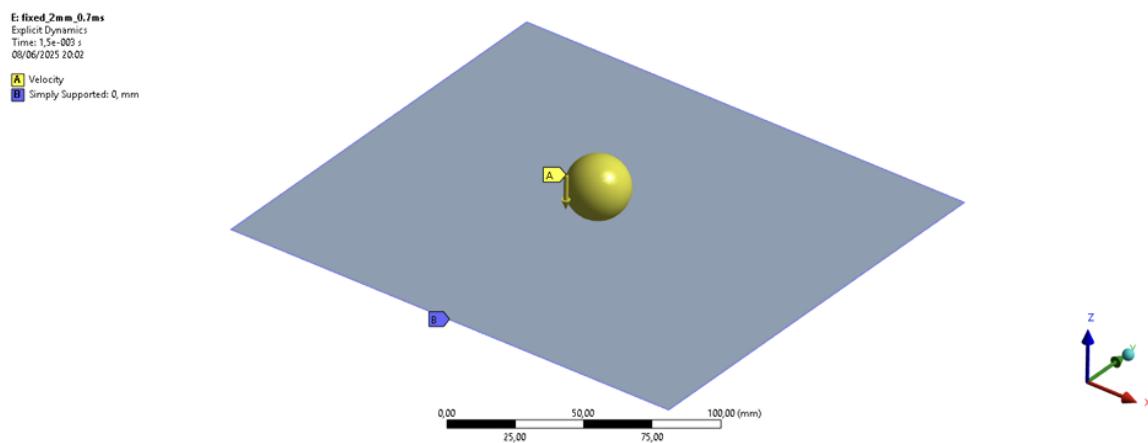


Figura 13 – Geometria e condições de contorno da simulação dinâmica. Fonte: Amaral e Assante (2025)

queda e câmeras de alta velocidade para captura do instante de máxima deflexão. Além disso, conforme discutido no referencial teórico, a equivalência entre impacto e carga estática amplificada é viável por meio da metodologia de Akin (AKIN, 2015), permitindo que o teste quasi-estático represente adequadamente o comportamento estrutural da placa no regime elástico.

Os experimentos foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON 8801, conforme ilustrado na Figura 14. Para aplicar a carga concentrada, foi utilizada uma esfera de aço com 45 mm de diâmetro, fixada a um vergalhão metálico conectado à parte superior da máquina. A força foi aplicada no centro da placa por meio de deslocamento controlado da esfera no eixo Z, com avanço de 1 mm/min até um deslocamento total de 6 mm. Essa escolha se deu pelo fato de precisar não só dos dados para uma força de 3,6199 N como também para a força amplificada pelo fator de impacto; desta forma, a escolha de 6 mm de deslocamento total é segura por englobar todos os dados relevantes.

Para ampliar a análise das condições de contorno, foram adotadas duas configurações distintas de fixação, cada uma aplicada a um tipo de ensaio independente. Na placa de 1 mm, utilizou-se uma estrutura metálica que simula a condição de contorno com duas bordas engastadas e duas simplesmente apoiadas. Já na placa de 2 mm, a fixação foi projetada para simular o engaste em todas as extremidades. A escolha por condições de contorno diferentes tem o objetivo de avaliar o comportamento da metodologia em cenários variados, sem estabelecer qualquer comparação direta entre as placas de espessuras distintas. As Figuras 15 e 16 apresentam as estruturas de fixação utilizadas nos ensaios.

A base da estrutura é composta por uma chapa de aço de 10 mm de espessura, que garante rigidez suficiente para evitar deformações indesejadas. Sobre ela, foi fixada uma moldura metálica feita com tubos de aço 25x25 mm, que serve de apoio para a borda da

placa. A fixação propriamente dita foi feita com o uso de sargentos metálicos e morsas, permitindo o engaste conforme a configuração desejada.

Cada ensaio forneceu dados de deslocamento e força ao longo do tempo, gerados automaticamente pela INSTRON. Esses dados foram utilizados para construir os gráficos força versus deslocamento, como ilustrado na Figura 17, que mostra um dos resultados obtidos. A aplicação de média móvel foi empregada para suavizar os dados e facilitar a análise. Os demais gráficos dos oito experimentos com as placas de 1 mm e os cinco experimentos com as placas de 2 mm estão disponíveis nos Apêndices.



Figura 14 – Montagem experimental do teste quasi-estático com esfera de impacto.



Figura 15 – Estrutura de fixação das placas de 2 mm de alumínio na máquina de ensaio para todos os lados engastados.

Para garantir reproduzibilidade e confiabilidade dos dados, foram realizados oito testes com placas de 1 mm e outros cinco com placas de 2 mm. Essa repetição permitiu

reduzir o impacto de variabilidades, como: pequenas variações na espessura da chapa, imperfeições na fixação, e desalinhamento da carga. A deflexão máxima obtida para a carga de 3,6199 N em cada configuração foi utilizada para posterior comparação com os resultados analíticos e computacionais, apresentados no capítulo de resultados.



Figura 16 – Estrutura de fixação das placas de 1 mm de alumínio na máquina de ensaio para 2 lados apoiados e 2 lados engastados.

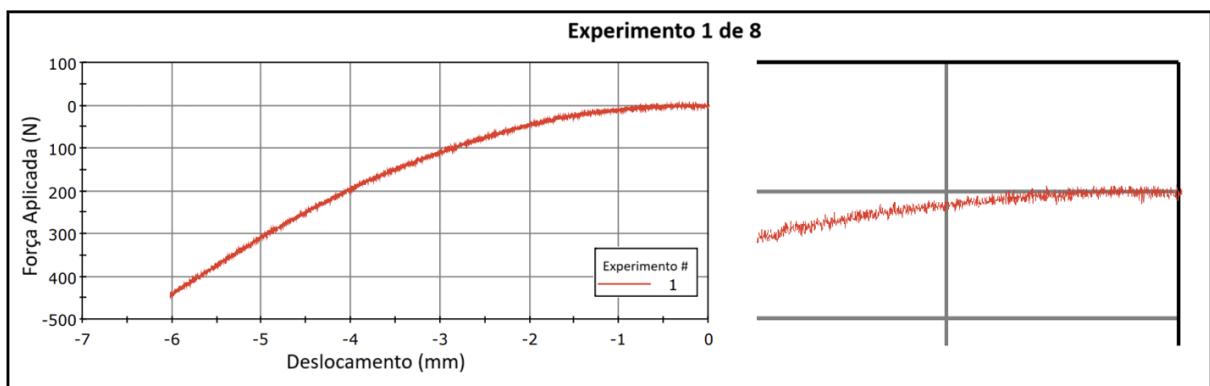


Figura 17 – Gráfico representativo do experimento quasi-estático (força × deslocamento). A curva à esquerda apresenta os dados brutos obtidos durante o carregamento de um dos corpos de prova. A imagem à direita mostra um recorte ampliado do final do carregamento, evidenciando a dispersão dos pontos. Essa característica reforça a necessidade de aplicar uma média móvel para suavizar os dados e permitir uma análise mais precisa da resposta estrutural.

Com isso, a primeira etapa que foi discretizada no Planejamento Geral do Estudo é finalizada, desta forma a proxima etapa será analisando apenas placas de alumínio de 2 mm de espessura reforçadas com fibra de vidro.

4.3 Etapa 2 (Placa de Alumínio Reforçada)

4.3.1 Modelagem Analítica

Para o método analítico de análise de deflexão da placa reforçada com fibra de vidro e resina em uma das faces, foi adotado o mesmo procedimento descrito na Seção 4.2.1,

com adaptações para representar o novo perfil estrutural. A geometria da placa, as condições de contorno e a carga aplicada seguem as mesmas definições anteriores, permitindo comparações diretas entre os resultados.

A placa considerada nesta etapa é composta por uma base de alumínio com espessura de 2 mm, sobre a qual foi adicionada uma única camada de reforço compósito. Essa configuração caracteriza uma estrutura laminada assimétrica, cuja rigidez à flexão foi calculada com base na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), conforme metodologia apresentada no Capítulo 3.

O cálculo do módulo de elasticidade equivalente E_{eq} e do coeficiente de Poisson equivalente ν_{eq} foi realizado a partir dos parâmetros geométricos e das propriedades mecânicas dos materiais componentes, conforme Equações 3.24 e 3.25, apresentadas anteriormente.

A espessura total da placa reforçada foi medida como 2,9 mm, sendo 2 mm da base metálica e 0,9 mm do compósito. Para o cálculo da rigidez equivalente D_{eq} , foram considerados os momentos de inércia individuais de cada camada e seus respectivos módulos, a fim de obter um comportamento equivalente isotrópico para aplicação nas equações de deflexão.

A carga utilizada foi a força peso da esfera, $P = 3,6199 \text{ N}$, e posteriormente foi aplicado o fator de impacto n calculado pela metodologia de Akin (AKIN, 2015), utilizando a deflexão estimada sob a carga estática. Com isso, foi possível obter a carga equivalente ao impacto a 0,7 m/s.

A análise foi realizada para as três configurações de contorno já apresentadas: (i) todas as bordas simplesmente apoiadas, (ii) duas bordas engastadas e duas simplesmente apoiadas, e (iii) todas as bordas engastadas. Os coeficientes $f(a/b)$ correspondentes foram interpolados com base nas tabelas da literatura para cada condição.

Os resultados obtidos a partir desse modelo analítico serão apresentados no Capítulo 5, onde serão comparados com os dados provenientes da simulação computacional (Seção 4.3.2) e dos ensaios experimentais (Seção 4.3.3).

4.3.2 Modelagem Computacional

A modelagem computacional da placa de alumínio reforçada com fibra de vidro e resina foi realizada de forma semelhante à metodologia adotada na Seção 4.2.2. A principal diferença, contudo, está no uso do módulo ACP (Pre) do software ANSYS, que permite a definição de materiais compostos por camadas (*plies*) de reforço.

Na ferramenta ACP (Pre), a geometria da placa foi composta por duas regiões: o núcleo de alumínio e as camadas de fibra de vidro aplicadas sobre uma das faces,

representando o reforço superficial. A Figura 18 apresenta a configuração da árvore de modelagem utilizada no ACP (Pre) com os grupos de modelagem (*Modeling Groups*) definidos para o núcleo (*Core*) e para o reforço (*Top*).

Cada camada do reforço foi definida individualmente, com espessura e orientação controladas. Para este trabalho, adotou-se o alinhamento de todas as camadas a 90°, simulando uma distribuição unidirecional perpendicular ao eixo principal de carregamento. A Figura 19 ilustra a visualização 3D do empilhamento das camadas no módulo ACP, onde é possível observar a orientação e espessura de cada camada (*ply*).

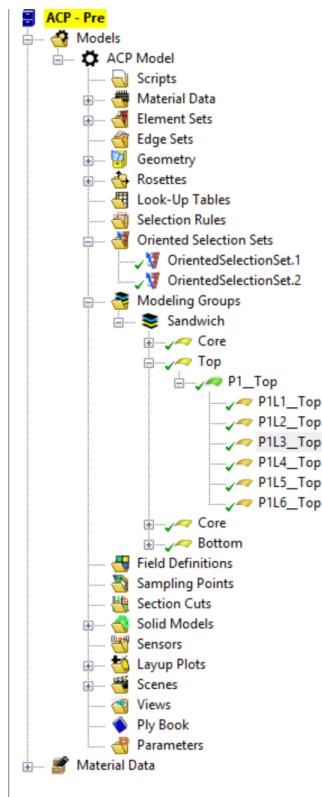


Figura 18 – Configuração da laminação no módulo *ACP (Pre)*.

Após a definição da laminação no ACP (Pre), o modelo foi exportado para a análise estrutural utilizando o módulo *Static Structural* e *Explicit Dynamics*, conforme ilustrado na Figura 20, que apresenta o fluxo de trabalho implementado para as simulações estáticas e dinâmicas.

A malha foi gerada utilizando o mesmo esquema estruturado de três zonas de refinamento já validado nas simulações da Seção 4.2.2. Com a malha e os materiais definidos, foram aplicadas as três configurações de contorno: (i) todas as bordas simplesmente apoiadas; (ii) duas engastadas e duas apoiadas; e (iii) todas engastadas.

Para cada configuração, foram realizadas as seguintes análises:

- Simulação estática com força concentrada de 3,6199 N (peso da esfera);

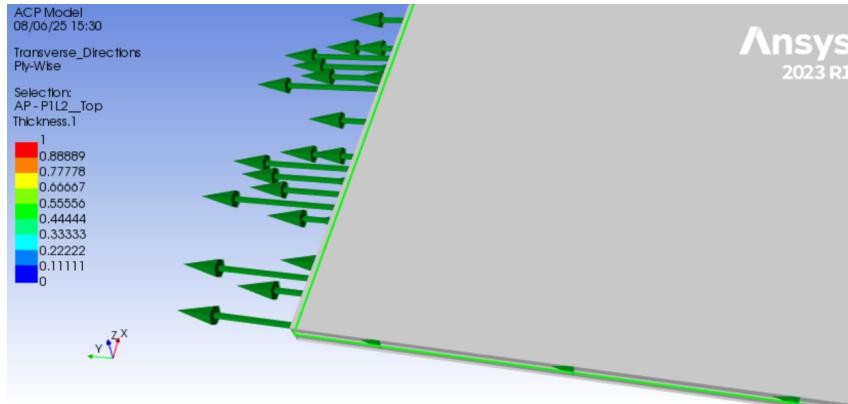


Figura 19 – Visualização da orientação das camadas no modelo ACP.

- Simulação estática com a carga amplificada pelo fator de impacto;

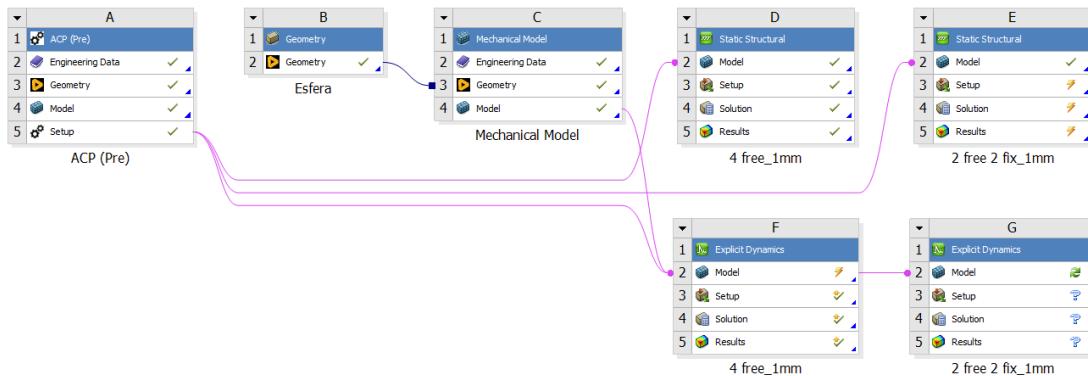


Figura 20 – Fluxograma da integração entre ACP (Pre), simulações estáticas e dinâmicas.

Vale ressaltar aqui que, para a simulação dinâmica de impacto, devido a um fator desconhecido, para simulações no *explicit dynamics* utilizando a ferramenta ACP (Pre), a simulação não consegue identificar a placa mesmo com as condições de contorno e contato aplicadas, fazendo com que o projétil atravessasse a placa. Desta maneira, não foram obtidos dados referentes à simulação dinâmica para a placa reforçada de alumínio.

4.3.3 Método Experimental

A metodologia experimental aplicada à análise da placa de alumínio reforçada com fibra de vidro foi desenvolvida de forma semelhante à descrita na Seção 4.2.3, com algumas adaptações específicas.

O ensaio foi conduzido de forma quasi-estática, utilizando a mesma máquina universal de ensaios mecânicos (INSTRON 8801), com o objetivo de obter a deflexão da placa submetida à aplicação de uma força concentrada de 3,6199 N — equivalente ao peso da esfera de aço utilizada na simulação de impacto.

A principal diferença metodológica em relação aos testes realizados com as chapas de alumínio sem reforço (Seção 4.2.3) está na condição de fixação adotada. No caso das placas reforçadas, todas as extremidades foram fixadas de modo a simular uma condição de engastamento completo. Essa escolha visou garantir uma comparação direta com os experimentos realizados para as chapas de alumínio de 2 mm, que são utilizadas como núcleo das estruturas reforçadas.



Figura 21 – Fixação da placa reforçada com todas as bordas engastadas. Fonte: Autor, 2024.

A fixação da placa foi realizada utilizando a mesma estrutura mostrada anteriormente (Figura 21), composta por uma base de aço com 10 mm de espessura, uma moldura metálica para apoio e sargentos aplicados ao longo das bordas para garantir o travamento completo da peça.

A aplicação da carga foi feita, como anteriormente, por meio de uma esfera de aço soldada a um vergalhão e acoplada à parte superior da máquina de ensaio, permitindo a

aplicação de força concentrada no centro da placa. A Figura 21 apresenta um exemplo da fixação da placa reforçada durante o experimento.

A máquina INSTRON 8801 registrou os dados de deslocamento e força aplicada durante o avanço da esfera no eixo Z. Assim como nos experimentos anteriores, a movimentação foi limitada a 6 mm, e os dados brutos foram posteriormente processados com média móvel para filtrar ruídos e facilitar a análise dos resultados.

Foram realizados múltiplos ensaios experimentais com a placa reforçada, garantindo a reproduzibilidade dos resultados. Os gráficos de força versus deslocamento estão nos apêndices e as análises obtidas com esses dados estão apresentados no Capítulo 5 deste trabalho, permitindo a comparação direta com os métodos analítico e computacional.

4.4 Etapa 3 (Placa Sanduíche)

4.4.1 Método Analítico

A modelagem analítica da estrutura sanduíche laminada nas duas faces segue a mesma lógica descrita anteriormente para a placa de alumínio com reforço unidirecional (Seção 4.3.1), com a diferença de que, neste caso, a estrutura compósita é formada por três regiões distintas: núcleo de PETG e duas mantas de fibra de vidro com resina epóxi, posicionadas nas faces superior e inferior da placa, assim como pode ser observado na Figura 22.

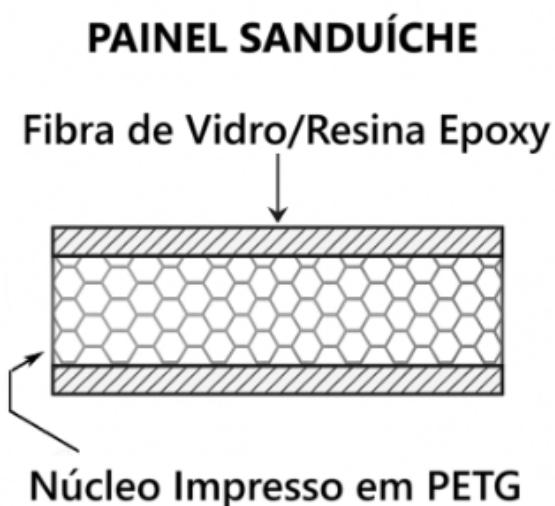


Figura 22 – Placa Sanduíche que será utilizada nas três metodologias de análise.

Para a obtenção das propriedades equivalentes da placa compósita, foram utilizadas as equações apresentadas no referencial teórico com base na Teoria Clássica dos Laminados (TCL), considerando o empilhamento simétrico das camadas. A configuração

adotada é do tipo $[90^\circ]_s$, utilizando mantas de fibra de vidro com orientação ortogonal (90°), conforme o padrão das fibras disponíveis para o experimento.

O núcleo da estrutura sanduíche é composto por uma camada de PETG com 1 mm de espessura. As camadas externas, constituídas por mantas de fibra de vidro embebidas em resina epóxi, possuem espessura total de 0,9 mm cada, considerando o conjunto fibra + matriz. A seguir, a Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas adotadas para cada material, com base nos dados disponíveis no software ANSYS.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados na estrutura sanduíche.

Material	Módulo de Elasticidade (E) [GPa]	Coeficiente de Poisson (ν)
PETG (núcleo)	1,41	0,35
Fibra de vidro (reforço)	73,00	0,22
Resina epóxi (matriz)	3,73	0,35

Com base nas propriedades apresentadas e na geometria simétrica do empilhamento, foi possível calcular o módulo de elasticidade equivalente (E_{eq}) e o coeficiente de Poisson equivalente (ν_{eq}) para a estrutura composta, conforme metodologia apresentada no Capítulo 3.

Com os valores de E_{eq} e ν_{eq} estimados, foi possível aplicar diretamente as equações de deflexão para placas finas submetidas a uma carga concentrada, conforme já apresentadas no referencial teórico. O mesmo processo de cálculo analítico foi realizado para as três condições de contorno previamente estabelecidas neste trabalho: (i) bordas simplesmente apoiadas; (ii) duas bordas engastadas e duas apoiadas; e (iii) todas as bordas engastadas.

A carga aplicada foi calculada com base no peso da esfera (3,6199 N) e, posteriormente, com a carga amplificada de acordo com o fator de impacto determinado com base na metodologia de Akin (AKIN, 2015), como nas seções anteriores. Com isso, os deslocamentos máximos teóricos foram obtidos por meio de uma rotina implementada no MATLAB, empregando as mesmas equações e critérios de convergência definidos anteriormente (mais de 40 termos para precisão adequada, conforme Figura 10).

Os resultados para esta análise serão apresentados no Capítulo 5 deste trabalho, permitindo a comparação direta com os demais métodos avaliados.

4.4.2 Método Computacional

A modelagem computacional da estrutura sanduíche laminada nas duas faces foi realizada por meio do software ANSYS, utilizando novamente a ferramenta ACP (Pre) para a definição da geometria e da configuração do laminado. Nesse módulo, foi definido o núcleo em alumínio e, nas faces superior e inferior, a adição de mantas de fibra de vidro com resina epóxi, totalizando uma estrutura do tipo sanduíche.

O processo de modelagem é semelhante ao adotado na Seção 4.3.2, com a diferença de que, neste caso, as camadas foram definidas simetricamente nas duas faces da placa. A orientação das fibras foi mantida em 90° em relação ao eixo da placa, de acordo com o padrão das mantas utilizadas no estudo.

A ferramenta ACP (Pre) permite o controle preciso da espessura e orientação de cada camada do laminado, além da correta associação entre o modelo de materiais compostos e o núcleo isotrópico de alumínio. A geometria resultante foi, então, integrada às simulações estruturais, tanto estáticas quanto dinâmicas.

Para a análise estática, foram realizados dois tipos de simulações para cada condição de contorno (i) todas as bordas simplesmente apoiadas; (ii) duas bordas engastadas e duas apoiadas; e (iii) todas as bordas engastadas:

- Simulação com carga estática equivalente ao peso da esfera (3,6199 N), aplicada em uma pequena área central da placa;
- Simulação com carga amplificada, conforme o fator de impacto obtido com base na metodologia de Akin ([AKIN, 2015](#)), utilizando como referência a deflexão da simulação anterior.

É importante ressaltar novamente que, devido a um problema desconhecido durante a utilização do ACP (Pre) para simulações no Explicit Dynamics, em que o projétil atravessa o anteparo mesmo com todas as condições de contorno, e as definições de contato entre a esfera e a placa feitas, não foi possível obter os dados da simulação dinâmica para a placa sanduíche.

Toda a configuração de malha, representada por três zonas com diferentes densidades, foi mantida conforme o procedimento apresentado na Seção 4.2.2, com o objetivo de garantir boa precisão numérica com custo computacional reduzido.

4.4.3 Método Experimental

A realização do experimento para a estrutura sanduíche envolveu a fabricação manual das placas compostas utilizando o processo de laminação a vácuo. Inicialmente, foram impressas chapas planas de PETG com espessura de 1 mm utilizando tecnologia de manufatura aditiva (impressão 3D). Para garantir a adequada adesão da resina às chapas, as superfícies do PETG foram lixadas, promovendo rugosidade superficial e melhor ancoragem das camadas de reforço.

O processo de laminação foi conduzido com a utilização de mantas de fibra de vidro entrelaçadas em 90° e impregnadas com resina epóxi, aplicadas sobre ambas as faces da

chapa de PETG. As camadas foram organizadas e dispostas sobre a superfície do núcleo, e posteriormente seladas em uma bolsa plástica com auxílio de Tacky Tape.

Para gerar pressão sobre a estrutura durante o processo de cura da resina, foi utilizado um sistema de laminação a vácuo. A sucção do ar da bolsa foi realizada através de um dispositivo de travamento acoplado a uma válvula e uma bomba a vácuo. O tempo de cura adotado foi de 48 horas, de forma a assegurar a completa polimerização da resina epóxi.

Após a cura, as estruturas laminadas foram retiradas da bolsa de vácuo e submetidas a um processo de acabamento, que incluiu lixamento das bordas e corte das placas em dimensões adequadas à fixação no dispositivo de ensaio. As amostras foram, então, montadas de forma a simular uma condição de contorno com engastamento total (quatro bordas fixadas), com o objetivo de padronizar os ensaios de deflexão e permitir comparações diretas com os modelos analítico e numérico.

As Figuras 23, 24 e 25 ilustram, respectivamente, o processo de laminação a vácuo, placas após o processo de cura e remoção da bolsa a vácuo e o produto final após tratamento da placa.

Posteriormente, as placas passaram pelo mesmo processo de ensaio de deflexão da placa reforçada, com os resultados apresentados no Capítulo 5.



Figura 23 – Processo de laminação a vácuo das placas de PETG com fibra de vidro e resina epóxi.



Figura 24 – Placa composta finalizada após corte e lixamento.



Figura 25 – Placas compostas com duas cavidades impressas e reforço laminar aplicado.

5 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no Capítulo 4, abrangendo o método analítico, computacional e experimental. O objetivo é comparar os diferentes métodos aplicados às três configurações de placas investigadas, permitindo avaliar a eficácia dos modelos teóricos e numéricos frente aos dados experimentais.

Os resultados estão organizados em três partes principais:

- **Parte 1 – Placa de Alumínio Sem Reforço:** Avaliação da resposta estrutural de chapas de alumínio de 1 mm e 2 mm de espessura, consideradas como materiais isotrópicos.
- **Parte 2 – Placa de Alumínio Reforçado:** Análise de uma chapa de alumínio de 2 mm reforçada com manta de fibra de vidro e resina epóxi aplicada em uma das faces.
- **Parte 3 – Estrutura Sanduíche:** Estudo da resposta de uma estrutura composta por núcleo de alumínio e laminação em ambas as faces com fibra de vidro e resina.

Cada parte abordará os dados de deslocamento máximo obtidos por meio dos três métodos (analítico, computacional e experimental), permitindo uma comparação direta entre os resultados e discutindo possíveis divergências, limitações e validações.

5.1 Placa de Alumínio Sem Reforço

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para as análises das placas de alumínio sem reforço, com espessuras de 1 mm e 2 mm. Os resultados comparam três abordagens: método analítico, simulação numérica (estática e dinâmica) e método experimental. Após a apresentação dos dados de deslocamento, são discutidas as diferenças percentuais entre as metodologias.

5.1.1 Placa de Alumínio de 1 mm (Alumínio 1100-H14)

Para a placa de 1 mm de espessura, foi utilizado o módulo de elasticidade de 68,9 GPa, referente ao alumínio 1100-H14.

A Tabela 4 apresenta os valores de deslocamento máximo obtidos por cada abordagem metodológica para as três condições de contorno estudadas.

Tabela 4 – Valores de deslocamento máximo obtidos pelos métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm submetida a uma carga concentrada de 3,62 N no centro da estrutura.

Condição de Contorno	Analítico (mm)	Simulação (mm)	Experimental (mm)
Simplesmente apoiadas	0,2325	0,2333	—
2 engastadas + 2 apoiadas	0,1307	0,1310	0,1233
Totalmente engastada	0,1180	0,1120	—

A Tabela 5 apresenta os fatores de impacto e deslocamentos máximos obtidos com carga estática amplificada.

Tabela 5 – Fatores de impacto calculados e respectivos deslocamentos máximos para a placa de alumínio de 1 mm, considerando diferentes condições de contorno. Os resultados foram obtidos pelas abordagens analítica, numérica e experimental com base na amplificação da carga estática.

Condição de Contorno	Analítico		Simulação		Experimental	
	Fator de Impacto	Desloc. (mm)	Fator de Impacto	Desloc. (mm)	Fator de Impacto	Desloc. (mm)
Simplesmente apoiadas	14,656	3,408	14,633	3,413	—	—
2 lados engastados e 2 apoiados	19,546	2,555	19,529	2,558	20,152	2,612
Todas as extremidades engastadas	20,574	2,428	21,118	2,369	—	—

Os resultados mostram excelente correlação entre métodos analítico e numérico, com diferenças inferiores a 1% para a maioria das condições, reforçando a consistência do modelo computacional. A comparação com dados experimentais na condição intermediária apresentou diferença inferior a 6%, validando o uso da simulação para este tipo de estrutura.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na simulação numérica dinâmica explícita.

Com base nos resultados obtidos, foram calculadas as diferenças percentuais entre as abordagens, tanto para a simulação estática (Tabela 7) quanto para a dinâmica (Tabela 8).

Tabela 6 – Deslocamentos máximos obtidos por simulação numérica dinâmica (explícita) para a placa de alumínio de 1 mm, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.

Condição de Contorno	Deslocamento (mm)
Simplesmente apoiadas	3,626
2 lados engastados e 2 apoiados	2,673
Todas as extremidades engastadas	2,477

Tabela 7 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm de espessura, considerando diferentes condições de contorno.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação estática (simplesmente apoiada)	0,313
Analítico / Simulação estática (2 engastadas + 2 apoiadas)	0,176
Analítico / Simulação estática (totalmente engastada)	5,085
Experimental / Analítico (2 engastadas + 2 apoiadas)	5,684
Experimental / Simulação estática (2 engastadas + 2 apoiadas)	5,850

Tabela 8 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação dinâmica) e experimental para a placa de alumínio de 1 mm de espessura, considerando diferentes condições de contorno.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação dinâmica (simplesmente apoiada)	5,990
Analítico / Simulação dinâmica (2 engastadas + 2 apoiadas)	4,300
Analítico / Simulação dinâmica (totalmente engastada)	4,360
Experimental / Simulação dinâmica (2 engastadas + 2 apoiadas)	2,280

5.1.2 Placa de Alumínio de 2 mm (Liga Genérica)

Para a placa de 2 mm de espessura, foi adotado o módulo de elasticidade de 71 GPa, compatível com liga genérica presente na biblioteca do software ANSYS.

A Tabela 9 apresenta os valores de deslocamento máximo obtidos por cada abordagem para a condição de contorno com todas as extremidades engastadas.

As diferenças percentuais entre métodos para a placa de 2 mm são apresentadas na Tabela 10.

Observa-se que as diferenças entre métodos analítico, numérico e experimental foram inferiores a 6%, confirmando a confiabilidade dos modelos empregados.

Tabela 9 – Valores de deslocamento máximo obtidos pelas abordagens analítica, numérica (simulação) e experimental para a placa de alumínio com 2 mm de espessura, fixada com todas as extremidades engastadas e submetida a uma carga concentrada no centro.

Condição de Contorno	Analítico (mm)	Simulação (mm)	Experimental (mm)
Totalmente Engastada	0,0143	0,01355	0,01373

Tabela 10 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação estática) e experimental para a placa de alumínio de 2 mm de espessura, considerando a condição de contorno com todas as extremidades engastadas.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação estática (totalmente engastada)	5,224
Experimental / Analítico (totalmente engastada)	3,980
Experimental / Simulação estática (totalmente engastada)	1,310

5.2 Parte 2 - Placa de Alumínio Reforçada

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a placa de alumínio com 2 mm de espessura reforçada com uma camada de fibra de vidro e resina em apenas uma das faces. Os procedimentos de cálculo seguiram a mesma metodologia adotada nas análises anteriores, respeitando as condições de contorno com todos os lados engastados, conforme utilizado também nos experimentos. Serão abordados a seguir, os valores de deslocamento obtidos pelos métodos analítico, computacional e experimental, bem como suas respectivas comparações percentuais.

5.2.1 Resultados dos métodos

A Tabela 11 apresenta os valores de deslocamento no centro da placa obtidos pelos métodos analítico, numérico estático e experimental. Também são mostrados os fatores de impacto obtidos em cada uma das metodologias.

Tabela 11 – Dados de deflexão no centro da placa de alumínio reforçada considerando carga estática igual a força peso da esfera, para o método analítico, numérico estático e experimental.

Condição de Contorno	Analítico (mm)	Simulação (mm)	Experimental (mm)
Totalmente Engastada	0,00539	0,00513	0,00549
Fator de Impacto (n)	96,265	98,674	92,969

Com a apresentação desses dados observa-se uma ordem de grandeza nas medições experimentais para deslocamentos de micrômetros. Embora a INSTRON 8801 registre tais valores, a exatidão e a repetibilidade nessa faixa não podem ser asseguradas para o arranjo empregado, dado o impacto de resolução, ruído e alinhamento. Para reduzir a influência dessas incertezas e tornar a comparação mais representativa, adotou-se, no confronto com os dados experimentais, a resposta sob carga estática amplificada pelo fator de impacto equivalente, resultando em uma força aplicada de aproximadamente 318 N. Esse procedimento eleva o nível de deslocamento, melhora a razão sinal-ruído e fornece um critério comparativo mais robusto entre as abordagens. Os dados da carga amplificada podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados de deflexão no centro da placa de alumínio reforçada considerando carga estática amplificada, para o método analítico, numérico estático e experimental.

Condição de Contorno	Analítico (mm)	Simulação (mm)	Experimental (mm)
Totalmente Engastada	0,518	0,506	0,524

Por fim, a apresentação dos dados para simulação dinâmica para um placa de alumínio reforçada é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Deslocamentos máximos obtidos por metodologia numérica dinâmica (explícita) para a placa de alumínio de 2 mm e reforçada por fibra de vidro e resina, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.

Condição de Contorno	Deslocamento (mm)
Simplesmente apoiadas	0,612
2 lados engastados e 2 apoiados	0,477
Todas as extremidades engastadas	0,446

5.2.2 Diferença entre os métodos

Os resultados indicam excelente proximidade entre as abordagens quando considerado com a simulação estática. A diferença entre o valor obtido pelo método analítico e o da simulação foi de 2,317%, mostrando alta consistência entre o modelo teórico e o numérico. Entre o método experimental e o analítico, a variação foi de apenas 1,145%, evidenciando a boa representatividade da formulação mesmo com a adição do reforço. O maior desvio observado, de 3,434%, ocorreu na comparação entre experimental e simulação, mas ainda dentro de limites considerados aceitáveis.

Tabela 14 – Diferenças percentuais entre os três métodos considerados para a placa de alumínio reforçada (2 mm).

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação Estática (totalmente engastada)	2,317
Experimental / Analítico (totalmente engastada)	1,145
Experimental / Simulação Estática (totalmente engastada)	3,434

Estes resultados reforçam que a metodologia adotada — combinando modelagem analítica, simulação numérica e ensaio experimental com carga amplificada — é eficaz e confiável para avaliar o comportamento estrutural de placas metálicas reforçadas.

Para a simulação dinâmica realizada no ANSYS teremos os resultados apresentados na Tabela 15, mostrando a diferença percentual em relação às outras metodologias da simulação.

Tabela 15 – Diferenças percentuais entre os três métodos considerados para a placa de alumínio reforçada (2 mm) tendo como base a simulação dinâmica.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação Dinâmica (totalmente engastada)	13,89
Experimental / Simulação Dinâmica (totalmente engastada)	14,88

Aqui já é possível perceber um pequeno aumento da diferença percentual quando comparadas às metodologias analítica e experimental com a simulação dinâmica, mas ainda dentro de uma faixa esperada. Considerando as possíveis variáveis que podem acontecer e as simplificações adotadas pelo ANSYS durante a simulação, era possível uma diferença na casa dos 10%.

5.3 Parte 3 — Estrutura Sanduíche com Núcleo de PETG

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a estrutura sanduíche formada por um núcleo de PETG e duas camadas externas compostas por fibra de vidro embebida em resina epóxi. Diferentemente das configurações anteriores, nesta análise o núcleo da estrutura não é metálico, mas sim de material polimérico (PETG), cujas propriedades mecânicas foram extraídas diretamente da base de dados do ANSYS. As propriedades dos três materiais utilizados na composição da estrutura estão detalhadas na Tabela 3.

5.3.1 Resultados dos métodos

Tabela 16 – Dados de Deflexão para a estrutura sanduíche com núcleo de PETG considerando a metodologia analítica, numérico estático e experimental.

Condição de Contorno	Analítico (mm)	Simulação (mm)	Experimental (mm)
Simplesmente apoiada	0,0272	0,0274	—
2 engastadas + 2 apoiadas	0,0159	0,0159	—
Todas as extremidades engastadas	0,0138	0,0139	0,0141

Para avaliar os efeitos dinâmicos de maneira coerente com o referencial teórico adotado, estimou-se o *fator de impacto* n a partir da Equação (3.1), usando a força peso correspondente à massa da esfera ($m = 0,369 \text{ kg}$) e as deflexões estáticas δ_{est} da Tabela 16. A carga aplicada ao modelo estático passa a ser $P = W \cdot n$. Os fatores obtidos e os deslocamentos previstos para a placa sanduíche encontram-se na Tabela 17. Observa-se elevada concordância entre a previsão analítica e a resposta numérica sob carga estática amplificada para as três condições de contorno avaliadas, com diferenças desprezíveis.

Tabela 17 – Fatores de impacto calculados e respectivos deslocamentos máximos para a placa sanduíche, considerando diferentes condições de contorno. Os resultados foram obtidos pelas abordagens analítica, numérica para o caso estático e experimental com base na amplificação da carga estática.

Condição de Contorno	Analítico		Simulação		Experimental	
	Fator de Impacto	Desloc. (mm)	Fator de Impacto	Desloc. (mm)	Fator de Impacto	Desloc. (mm)
Simplesmente apoiadas	41,7677	1,1360	41,6150	1,1402	—	—
2 lados engastados e 2 apoiados	54,6432	0,8683	54,6226	0,8687	—	—
Todas as extremidades engastadas	58,5587	0,8103	58,5795	0,8100	58,0035	0,8180

Em seguida, executou-se a simulação de impacto direto via Explicit Dynamics, mantendo a mesma massa de impacto e a aplicação central do contato. Os deslocamentos máximos de pico extraídos da história temporal estão sintetizados na Tabela 18. As diferenças relativas entre a simulação estática amplificada e a dinâmica foram da ordem de 6,6% (simplesmente apoiada: 1,136 mm vs. 1,061 mm), 5,2% (2 engastadas + 2 apoiadas: 0,868 mm vs. 0,823 mm) e 4,6% (todas engastadas: 0,810 mm vs. 0,773 mm), indicando

boa coerência entre as metodologias e reforçando a validade do uso do fator de impacto como estimador de primeira ordem para o pico de deflexão.

Tabela 18 – Deslocamentos máximos obtidos por simulação numérica dinâmica (explícita) para a placa sanduíche, com diferentes condições de contorno e aplicação de carga de impacto central.

Condição de Contorno	Deslocamento (mm)
Simplesmente apoiadas	1,061
2 lados engastados e 2 apoiados	0,823
Todas as extremidades engastadas	0,773

Os dados apresentados na Tabelas 19 evidenciam uma excelente concordância entre os métodos analítico e computacional, com diferenças percentuais inferiores a 4% em todas as condições de contorno analisadas. O menor desvio foi observado na configuração totalmente engastada, com apenas 0,065%, demonstrando a consistência da modelagem adotada para a estrutura sanduíche quando consideramos a simulação estática.

Tabela 19 – Diferenças percentuais entre os métodos (utilizando simulação estática para o numérico) para a estrutura sanduíche.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação (simplesmente apoiada)	0,730
Analítico / Simulação (2 engastadas + 2 apoiadas)	3,774
Analítico / Simulação (totalmente engastada)	0,065
Experimental / Analítico (totalmente engastada)	1,893
Experimental / Simulação (totalmente engastada)	1,957

Adicionalmente, os resultados obtidos por meio dos ensaios experimentais também demonstraram boa compatibilidade com os métodos teórico e numérico estático. A proximidade dos valores observados reforça a confiabilidade do procedimento experimental adotado e valida, de forma mais ampla, a metodologia de análise aplicada à estrutura composta. Esses achados evidenciam o potencial da abordagem para representar com precisão o comportamento de estruturas fabricadas com materiais e técnicas de manufatura aditiva, como o núcleo em PETG impresso em 3D.

Além disso, com vistas a quantificar a aderência entre as previsões quasiestáticas amplificadas e a resposta dinâmica direta, calculou-se a diferença percentual de deflexão tomando a simulação explícita como referência.

Tabela 20 – Diferenças percentuais entre os métodos analítico, numérico (simulação dinâmica) e experimental para a placa sanduíche, considerando diferentes condições de contorno.

Comparação	Diferença (%)
Analítico / Simulação dinâmica (simplesmente apoiada)	6,602
Analítico / Simulação dinâmica (2 engastadas + 2 apoiadas)	5,217
Analítico / Simulação dinâmica (totalmente engastada)	4,603
Experimental / Simulação dinâmica (Totalmente Engastado)	5,501

Tomando a simulação dinâmica explícita como referência do estudo, a Tabela 20 apresenta as diferenças percentuais entre os métodos. A métrica empregada foi $\Delta\% = |\delta_{método} - \delta_{din}|/\delta_{din} \times 100\%$, em que δ_{din} é o deslocamento máximo obtido na análise explícita. Os desvios entre a previsão analítica (carga estática amplificada) e a dinâmica foram de 6,602% para a placa simplesmente apoiada, 5,217% para 2 engastadas + 2 apoiadas e 4,603% para todas engastadas. A comparação experimental–dinâmica para a configuração com todas as extremidades engastadas resultou em 5,501%. Em todos os casos, as diferenças ficaram abaixo de 10%, o que sustenta a confiabilidade da simulação dinâmica do ANSYS para estimar o pico de deflexão sob impacto. As pequenas discrepâncias observadas são compatíveis com simplificações de contato, ausência de amortecimento material explícito e efeitos de discretização, que podem levar a leves variações em relação à resposta medida ou à estimativa quasiestática amplificada.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo validar a metodologia de análise estrutural por meio de simulações computacionais, utilizando como referência comparativa os modelos analíticos e os resultados experimentais. Tal validação visa auxiliar o desenvolvimento de equipamentos de proteção individual (EPIs) para motociclistas, produzidos via manufatura aditiva.

Foram avaliadas três configurações estruturais distintas:

- Placas de alumínio puras (1 mm e 2 mm);
- Placas de alumínio reforçadas com fibra de vidro em uma das faces;
- Estruturas sanduíche compostas por núcleo de PETG e lamination dupla com fibra de vidro e resina.

Em cada caso, foram aplicados três métodos complementares de análise: cálculo analítico baseado na Teoria das Placas, simulação computacional por elementos finitos (ANSYS) e ensaio experimental quasi-estático.

De maneira geral, as pequenas diferenças observadas entre os três métodos demonstram a robustez da metodologia adotada. A comparação entre resultados mostra que:

- A modelagem analítica, mesmo com simplificações, foi eficiente na estimativa dos deslocamentos máximos das estruturas;
- As simulações computacionais conseguiram reproduzir o comportamento mecânico com alta fidelidade, inclusive em materiais compostos, utilizando ferramentas especializadas como o módulo ACP do ANSYS;
- Os ensaios experimentais validaram os resultados teóricos e computacionais, mesmo diante de limitações práticas e variações esperadas no ambiente de laboratório.

As diferenças percentuais observadas entre os métodos permaneceram, na maioria dos casos, abaixo de 5%, o que evidencia uma forte correlação entre as abordagens. Isso valida o uso de análise estática amplificada como estratégia eficaz para representar situações de impacto em placas delgadas, conforme demonstrado pela metodologia de Akin (2015).

Por fim, a metodologia proposta demonstrou desempenho consistente tanto em materiais isotrópicos, como ligas metálicas, quanto em estruturas compostas reforçadas e sistemas híbridos, a exemplo das configurações sanduíche com núcleo de PETG e laminacão em fibra de vidro. A integração entre modelagem analítica, simulação computacional e validação experimental mostrou-se uma estratégia robusta e confiável para a previsão do comportamento mecânico de placas finas submetidas a carregamentos de impacto. Esse conjunto de abordagens permitiu não apenas quantificar com precisão os deslocamentos máximos, mas também compreender, de forma abrangente, a influência das propriedades dos materiais e das condições de contorno no desempenho estrutural, fornecendo uma base sólida para o projeto e otimização de componentes de proteção.

6.2 Trabalhos Futuros

Com a validação da metodologia desenvolvida neste trabalho para análise de impacto em placas planas representando EPIs para motociclistas, abre-se um leque de possibilidades para pesquisas futuras e aprimoramentos da abordagem proposta.

Uma das direções mais promissoras é o aprimoramento da metodologia para cenários de impacto mais severos, nos quais os níveis de energia envolvidos são significativamente maiores e as condições de contorno tornam-se mais complexas. Isso exige não apenas um refinamento nas simulações numéricas — com modelos de material mais sofisticados e abordagens não lineares — mas também o desenvolvimento de protótipos com materiais de maior desempenho mecânico e tecnologias avançadas de fabricação, como impressão 3D com materiais compostos de alta resistência.

Além disso, destaca-se o potencial de aplicação da metodologia em outros setores da engenharia, como o aeronáutico e o automotivo, onde estruturas submetidas a impacto — como painéis de fuselagem, estruturas de absorção de energia em veículos ou reforços internos — são críticas para a segurança. A capacidade de simular e validar o comportamento dinâmico de estruturas laminadas e sanduíche nestes contextos pode contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, leves e de menor custo.

Outro desdobramento possível é a extensão da abordagem para análises de impacto oblíquo ou múltiplos impactos consecutivos, cenários mais próximos das situações reais enfrentadas por motociclistas em acidentes. Também seria interessante explorar modelos biomecânicos que correlacionem os dados estruturais com a redução efetiva de lesões no corpo humano, integrando a engenharia com aspectos da área médica e de segurança veicular.

Referências

- AKIN, J. E. Impact load factors for static analysis. 2015. Disponível em: <<https://www.clear.rice.edu/mech403/HelpFiles/ImpactLoadFactors.pdf>>. Citado 11 vezes nas páginas 9, 32, 33, 34, 45, 47, 49, 50, 53, 58 e 59.
- ARAUJO, L. M. C.; ASSANTE, G. Analise numerica estatica equipamento de protecao individual para motociclistas feito com manufatura aditiva. In: *12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- ASSANTE, G. Analise numerica de impacto em equipamentos de protecao individual para motociclistas feitos com manufatura aditiva. In: *12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. [S.l.: s.n.], 2023. v. 1. Citado 3 vezes nas páginas 9, 47 e 48.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7471: Capacetes para ocupantes de motocicletas e similares*. Rio de Janeiro, 2021. 31 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 28 e 29.
- CNT. Violência no trânsito: Brasil tem 2,5 milhões de casos de invalidez permanente em sete anos. 2016. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-2-milhoes-de-casos-de-invalidez-permanente-em-razao-de-acidentes-em-sete-anos>>. Citado na página 25.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. *RESOLUCAO CONTRAN Nº 940: Disciplina o uso de capacete para condutor e passageiro de motocicletas, motonetas, ciclomotores, triciclos motorizados e quadriciclos motorizados*. Distrito Federal, 2022. Citado na página 25.
- DAINENSE. Dainese d-air racing suit. 2011. Disponível em: <<https://www.autoevolution.com/news/dainese-d-air-racing-suit-airbag-system-supports-google-earth-36800.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 27.
- GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016. Citado na página 39.
- HYER, M. W. *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009. Citado na página 38.
- INMAN, D. J. *Vibrações Mecânicas*. [S.l.]: GEN LTC, 2018. ISBN 9788535288902. Citado na página 32.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. *Portaria Nº 231: Requisitos de avaliação da conformidade para capacetes para condutores e passageiros de motocicletas e similares*. Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 28.
- JONES, R. M. *Mechanics of Composite Materials*. 2. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999. Citado na página 38.

- MatWeb, LLC. *Aluminum 1100-H14: Material Property Data*. 2024. <<https://www.matweb.com/>>. Acesso em: 16 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c0652f2efec49b89b50e7e4c6fba759>>. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 49.
- MEGSON, T. H. G. *Aircraft Structures for engineering students*. [S.l.]: Elsevier Science, 2007. (4th Edition). ISBN 9780750667395. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- OMS. *Road safety Brazil 2023 country profile*. Genebra, Suiça, 2023. 1 p. Citado 4 vezes nas páginas 9, 24, 25 e 26.
- ROME, e. a. L. de. Motorcycle protective clothing: Protection from injury or just the weather? Sidney, Austrália, p. 1893–1900, 2011. Citado na página 27.
- SIMONETI, F. S. Padrão de vítimas e lesões no trauma com motocicletas. *Revista da Faculdade de Ciências Médicas de Sorocaba*, São Paulo, Brazil, p. 36–40, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.
- SOARES, A. M. *ANÁLISE COMPARATIVA DE ESFORÇOS E DEFLEXÕES EM PLACAS RETANGULARES FINAS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 10 2004. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3766>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 36 e 43.
- TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1959. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

Apêndices

APÊNDICE A – Código MATLAB para cálculo de deflexão em placas reforçadas ou Sanduíche

```

1 % Script unificado para cálculo da deflexão de placas laminadas
2 % Modelo aplicado para placa sanduíche com núcleo de PETG.
3 % Para utilização com outros materiais de núcleo (ex.: alumínio),
4 % é necessário alterar as propriedades mecânicas do núcleo nas seções
5 % indicadas.
6
7 clc; clear all; close all;
8
9 %% =====
10 % 1. Seleção da condição de contorno
11 % O usuário escolhe entre três condições:
12 % 1 - Placa com todas as extremidades simplesmente apoiadas
13 % 2 - Duas extremidades engastadas e duas apoiadas
14 % 3 - Placa totalmente engastada
15 % Essa condição afeta diretamente a fórmula de cálculo da deflexão.
16 % =====
17 fprintf("Selecione a condição de contorno:\n");
18 fprintf("1 - Todas as extremidades simplesmente apoiadas\n");
19 fprintf("2 - Duas engastadas e duas apoiadas\n");
20 fprintf("3 - Todas as extremidades engastadas\n");
21 contorno = input("Digite a opção (1/2/3): ");
22
23 %% =====
24 % 2. Configuração do empilhamento de lâminas
25 % O usuário define quantas lâminas de compósito há em cada lado da placa
26 %
27 % A sequência de ângulos alterna entre 0 e 90 para simular
28 % uma configuração ortotrópica equilibrada.
29 % =====
30 n_layers = input('Digite o número de lâminas por lado (ex: 2 ou 4): ');
31 angles = zeros(1, n_layers);
32 for i = 1:n_layers
33     if mod(i,2) == 1
34         angles(i) = 90; % Lâmina ímpar      fibras a 90
35     else
36         angles(i) = 0; % Lâmina par       fibras a 0

```

```
37     end
38 end
39
40 %% =====
41 % 3. Propriedades dos materiais
42 % Núcleo: PETG
43 % Fibra: E-Glass
44 % Matriz: Resina epóxi
45 % Nota: Para outro núcleo, alterar apenas E_core, v_core e t_core.
46 % =====
47 % Núcleo (PETG)
48 t_core = 1e-3;           % Espessura [m]
49 E_core = 1.408e9;        % Módulo de elasticidade [Pa]
50 v_core = 0.35;          % Coeficiente de Poisson
51
52 % Fibra (E-Glass)
53 E_f = 7.3e10;           % [Pa]
54 G_f = 2.9918e10;         % [Pa]
55 v_f = 0.22;              % [-]
56
57 % Matriz (Resina Epóxi)
58 E_m = 3.78e9;            % [Pa]
59 G_m = 1.4e9;              % [Pa]
60 v_m = 0.35;                % [-]
61
62 fv_f = 0.5;             % Fração volumétrica de fibras
63 thickness_layer = 0.3e-3;           % Espessura por lâmina [m]
64 thicknesses = thickness_layer * ones(1, n_layers);
65 t_total = 2 * sum(thicknesses) + t_core; % Espessura total da placa [m]
66
67 %% =====
68 % 4. Cálculo das propriedades equivalentes do laminado
69 % Usamos regras de mistura e relações clássicas de laminados para
70 % determinar módulos equivalentes (E1, E2, G12, v12) e matriz de rigidez
71 %
72 % =====
73 E1 = fv_f * E_f + (1 - fv_f) * E_m;
74 E2 = (E_f * E_m) / (fv_f * E_m + (1 - fv_f) * E_f);
75 G12 = (G_f * G_m) / (fv_f * G_m + (1 - fv_f) * G_f);
76 v12 = fv_f * v_f + (1 - fv_f) * v_m;
77 Q11 = E1 / (1 - v12^2);
78 Q22 = E2 / (1 - v12^2);
79 Q12 = v12 * E2 / (1 - v12^2);
80 Q66 = G12;
81
82 % Montagem da matriz A (rigidez extensional)
```

```
83 A = zeros(3, 3);
84 z = -t_total / 2;
85 for i = 1:n_layers
86     z(end + 1) = z(end) + thicknesses(i);
87 end
88 z(end + 1) = z(end) + t_core;
89 for i = 1:n_layers
90     z(end + 1) = z(end) + thicknesses(i);
91 end
92
93 for i = 1:(2 * n_layers + 1)
94     if i == (n_layers + 1)
95         % Camada do núcleo
96         A_core = E_core * t_core / (1 - v_core^2);
97         A(1, 1) = A(1, 1) + A_core;
98         continue;
99     end
100    z_eff = z(i + 1) - z(i);
101    A(1, 1) = A(1, 1) + Q11 * z_eff;
102    A(1, 2) = A(1, 2) + Q12 * z_eff;
103    A(2, 1) = A(2, 1) + Q12 * z_eff;
104    A(2, 2) = A(2, 2) + Q22 * z_eff;
105    A(3, 3) = A(3, 3) + Q66 * z_eff;
106 end
107
108 % Módulo de elasticidade equivalente da placa
109 E_c = (1 / t_total) * A(1, 1);
110
111 % Cálculo do coeficiente de Poisson equivalente
112 v_laminado_num = 0; v_laminado_den = 0;
113 for i = 1:n_layers
114     t_layer = thicknesses(i);
115     v_laminado_num = v_laminado_num + v12 * E2 * t_layer;
116     v_laminado_den = v_laminado_den + E2 * t_layer;
117 end
118 v_core_num = v_core * E_core * t_core;
119 v_core_den = E_core * t_core;
120 v_c = (v_laminado_num + v_core_num) / (v_laminado_den + v_core_den);
121
122 %% =====
123 % 5. Parâmetros geométricos e carregamento
124 % Dimensões, módulo de flexão D, massa e altura de queda da esfera.
125 % =====
126 a = 0.20; b = 0.18; t = t_total; E = E_c; v = v_c;
127 D = (E * t^3) / (12 * (1 - v^2)); % Rígidez flexão
128 m = 0.369; g = 9.81; P = m * g; % Peso da esfera [N]
129 h = 4.81; eta = 0.95; v_impacto = 0.7;
```

```
130
131 %% =====
132 % 6. Cálculo da deflexão estática máxima
133 % Fórmulas específicas para cada condição de contorno.
134 % =====
135 switch contorno
136     case 1 % Todas apoiadas
137         N_max = 113;
138         w_max = 0;
139         for N = 1:2:N_max
140             F = 0;
141             for m_i = 1:2:N
142                 for n_i = 1:2:N
143                     numerador = (-1)^(((m_i + n_i)/2) - 1) * sin(m_i*pi/2) * sin(n_i*pi/2);
144                     denominador = ((m_i/a)^2 + (n_i/b)^2)^2;
145                     termo = numerador / denominador;
146                     F = F + termo;
147                 end
148             end
149             w_max = (4 * P) / (pi^4 * D * a * b) * F;
150         end
151
152     case 2 % 2 engastadas + 2 apoiadas
153         S1 = 0; S2 = 0;
154         for m_i = 1:2:199
155             alfa = (m_i * pi * b) / (2 * a);
156             termo1 = (1 / m_i^3) * (tanh(alfa) - alfa / cosh(alfa)^2);
157             termo2 = (1 / m_i) * ((tanh(alfa)^2) / (sinh(alfa) * cosh(alfa) + alfa));
158             S1 = S1 + termo1;
159             S2 = S2 + termo2;
160         end
161         w_max = (P * b^2) / (2 * pi^3 * D) * ((a^2 / b^2) * S1 - (pi^2 / 4) * S2);
162
163     case 3 % Todas engastadas
164         % Método da interpolação baseado em tabelas de coeficientes
165         a_b_tab = [1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0];
166         f_tab = [0.00540, 0.00527, 0.00517, 0.00508, 0.00494, 0.00473,
167                  0.00455, 0.00447, 0.00442, 0.00433];
168         ab_ratio = a / b;
169         f_interp = interp1(a_b_tab, f_tab, ab_ratio, 'linear');
170         w_max = f_interp * P * a^2 / D;
171
172     otherwise
173         error('Opção inválida. Selecione 1, 2 ou 3.');
```

```
173 end
174
175 fprintf('Deflexão estática máxima: %.4f mm\n', w_max * 1e3);
176
177 %% =====
178 % 7. Cálculo da deflexão dinâmica (impacto)
179 % Utiliza fator de impacto baseado na energia cinética e altura de queda
180 %
181 fator_v = 1 + sqrt(1 + (2 * h / w_max));
182 Wv_max_din = w_max * fator_v;
183 Pv_max = P * fator_v;
184
185 fator_h = sqrt((eta * v_impacto^2) / (w_max * g));
186 Wh_max_din = w_max * fator_h;
187 Ph_max = P * fator_h;
188
189 fprintf('Fator de impacto QE: %.4f\n', fator_h);
190 fprintf('Deflexão de impacto QE máxima: %.4f mm\n', Wh_max_din * 1e3);
```

Listing A.1 – Código MATLAB para Análise de Impacto em Placa Fina.

APÊNDICE B – Gráficos de deflexão por força aplicada para placas de alumínio sem reforço com 1 mm de espessura.

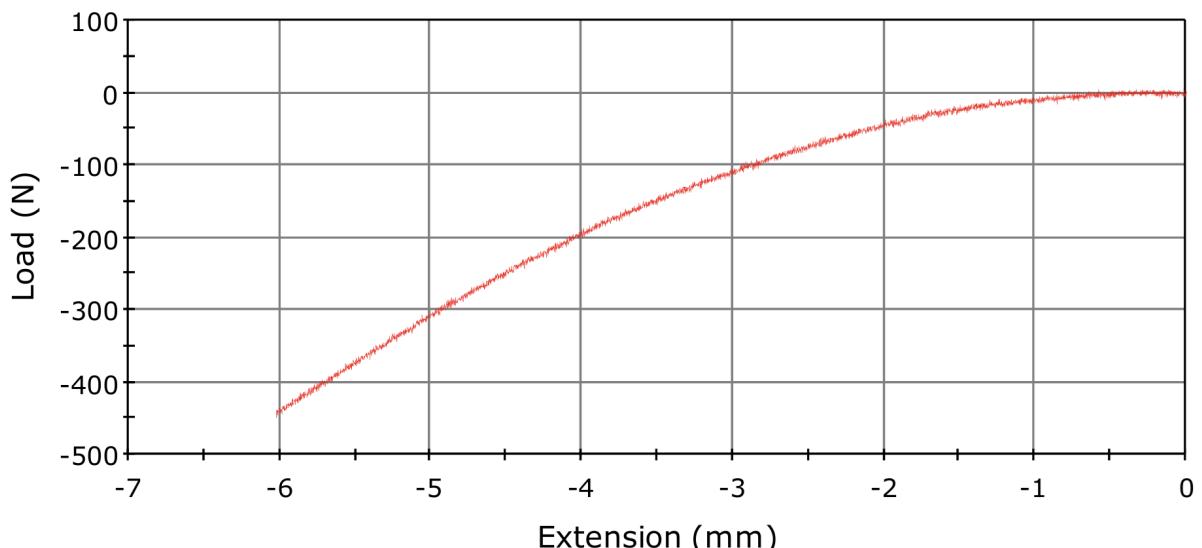


Figura 26 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 1).

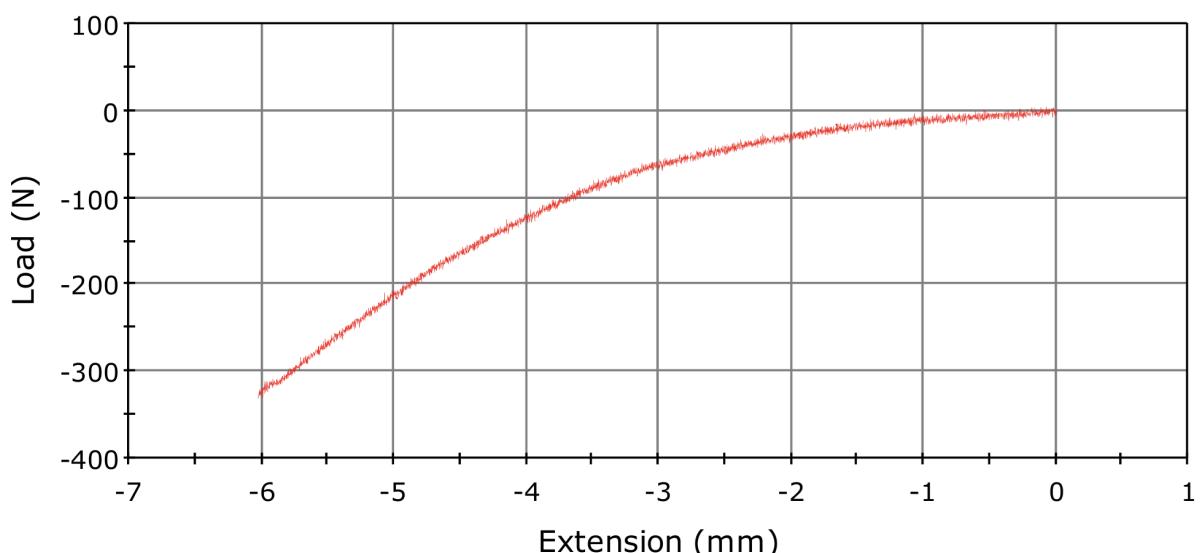


Figura 27 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 2).

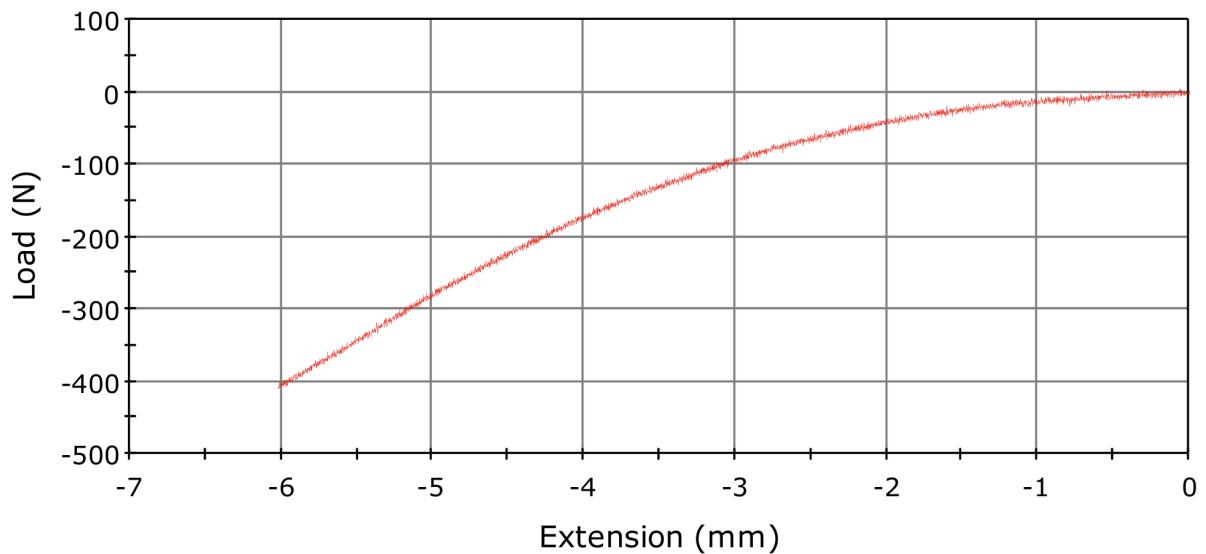


Figura 28 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 3).

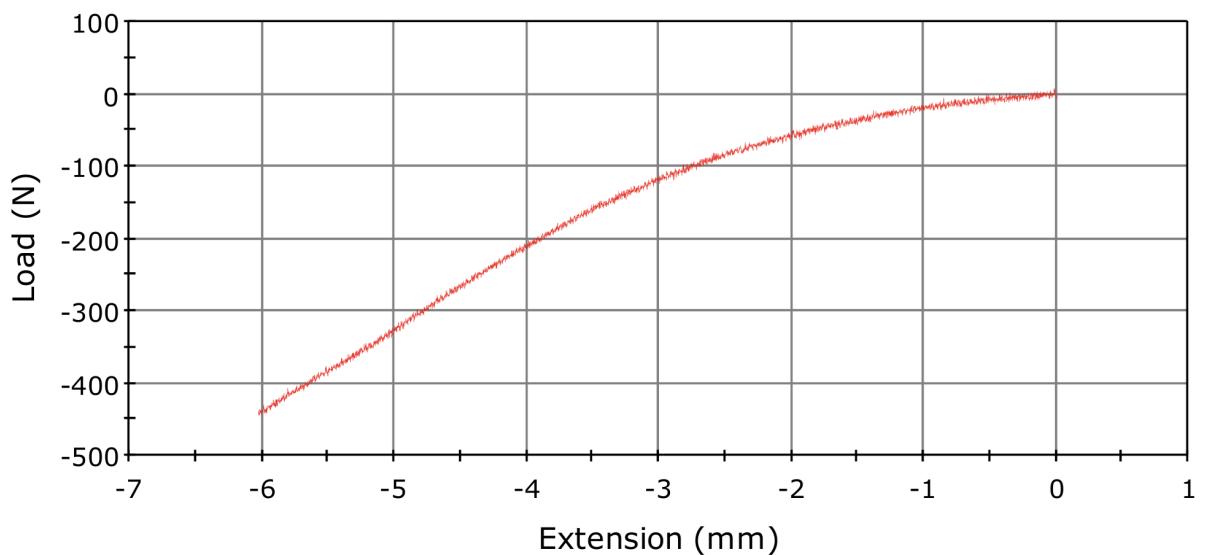


Figura 29 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 4).

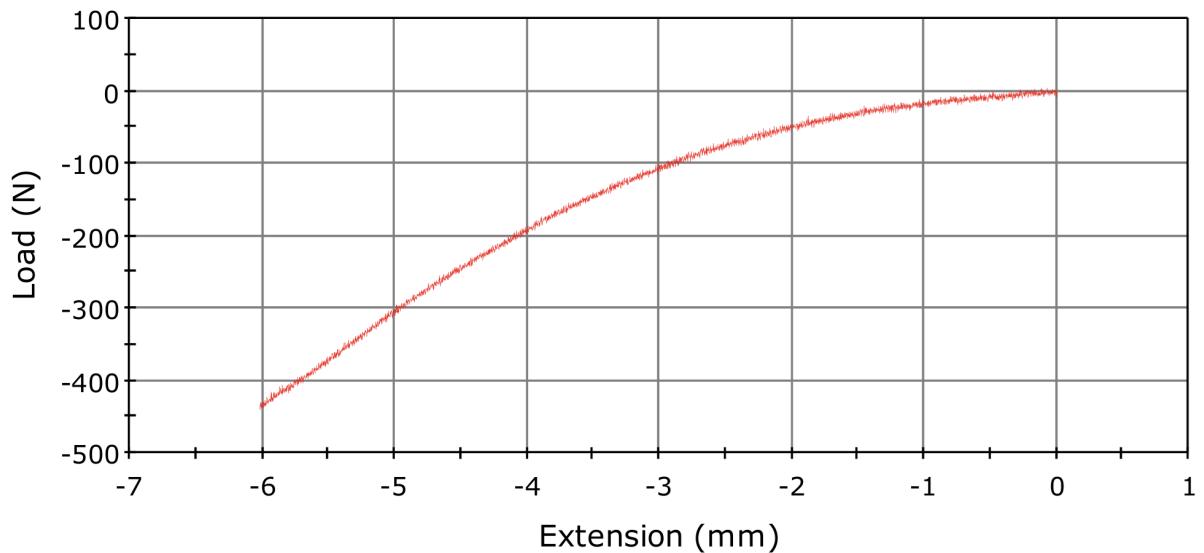


Figura 30 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 5).

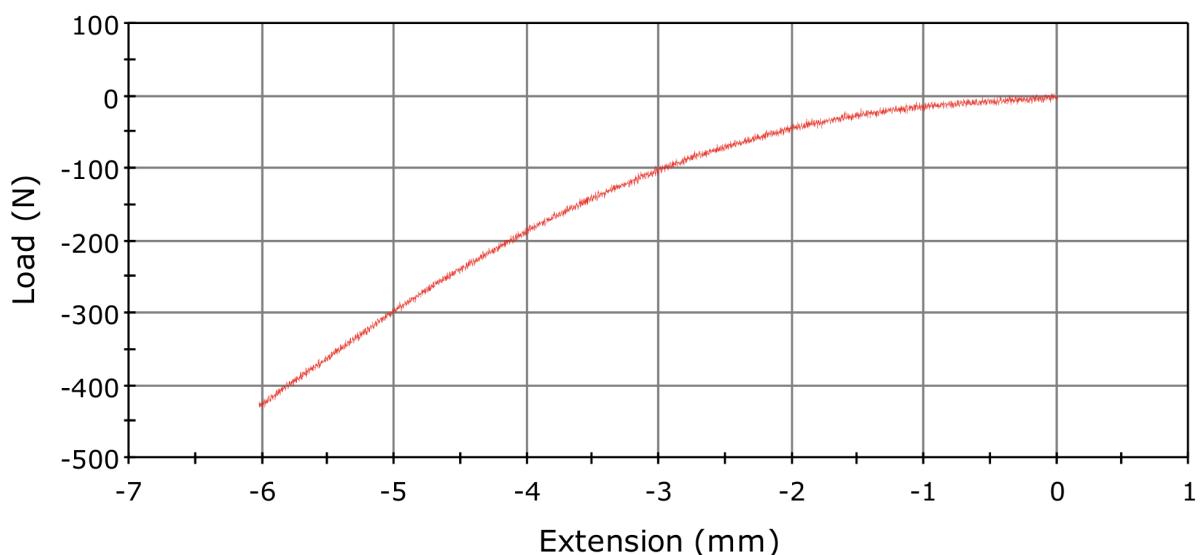


Figura 31 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 6).

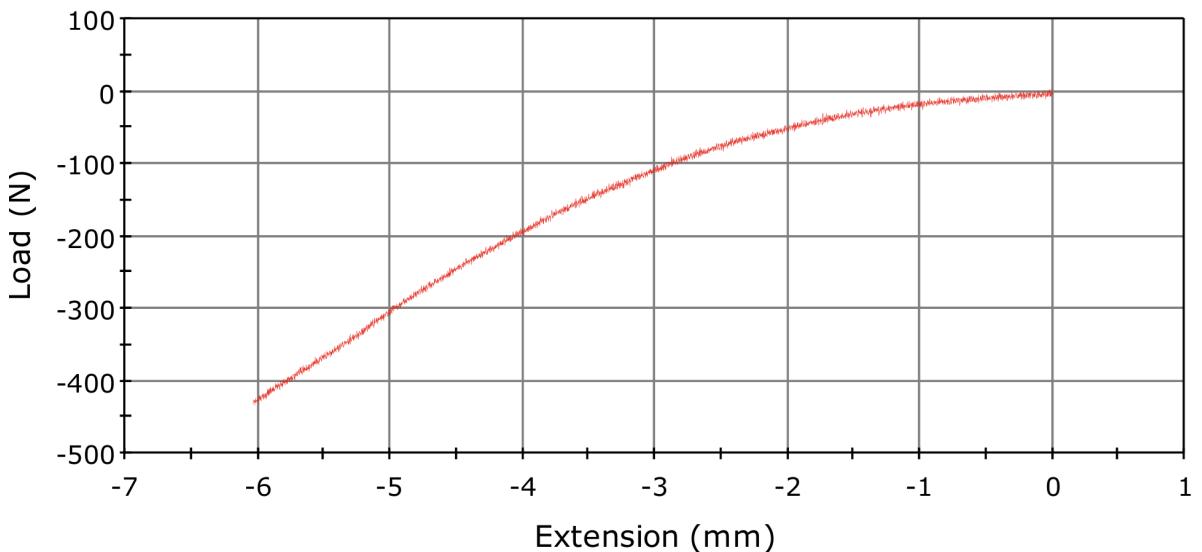


Figura 32 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 7).

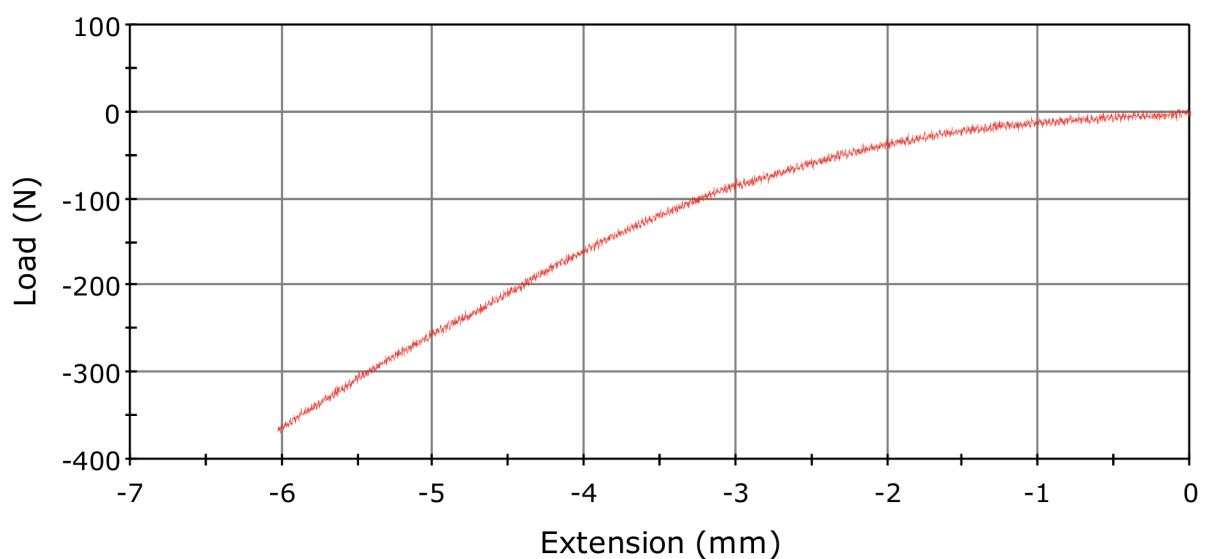


Figura 33 – Gráfico bruto de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 1 mm (Experimento 8).

APÊNDICE C – Gráficos de deflexão por força aplicada para os experimentos com as placas de alumínio sem reforço de 2mm.

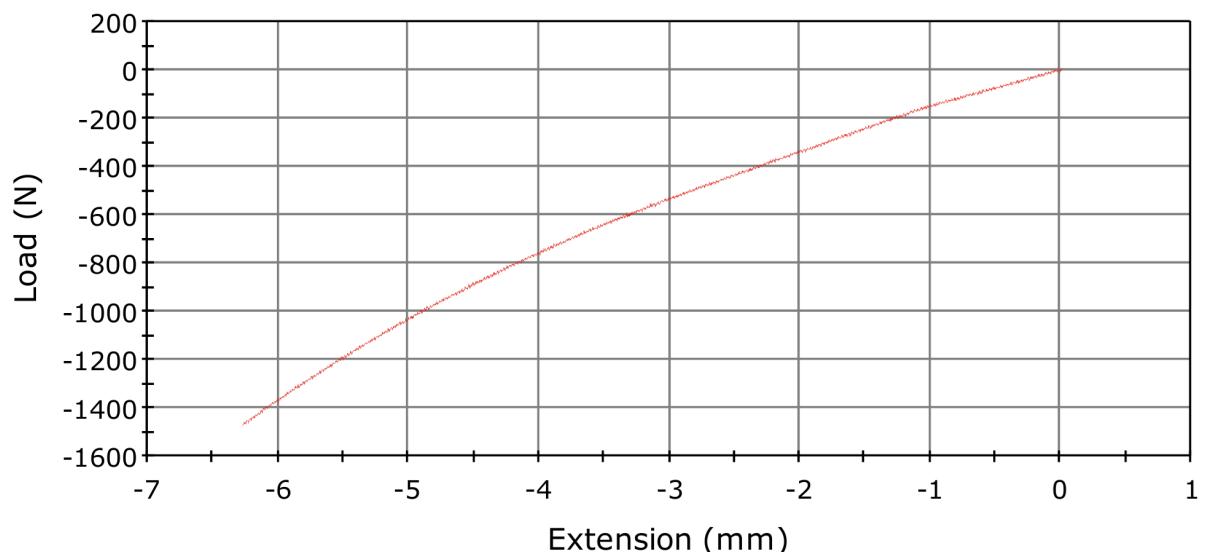


Figura 34 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 1).

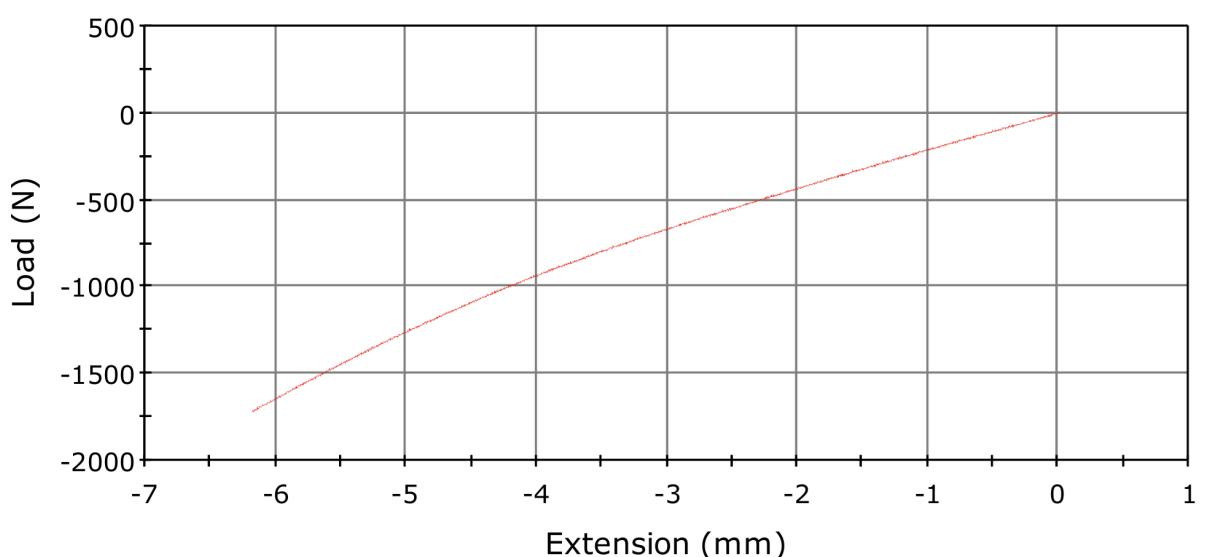


Figura 35 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 2).

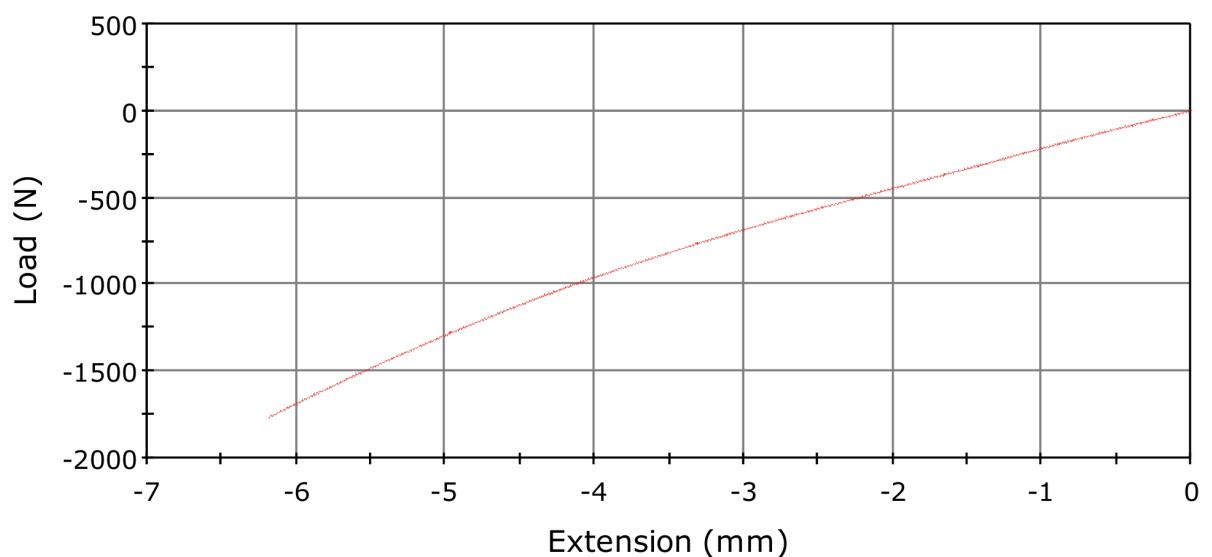


Figura 36 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm sem reforço (Experimento 3).

APÊNDICE D – Gráficos de deflexão por força aplicada para os experimentos com as placas de alumínio de 2 mm com reforço.

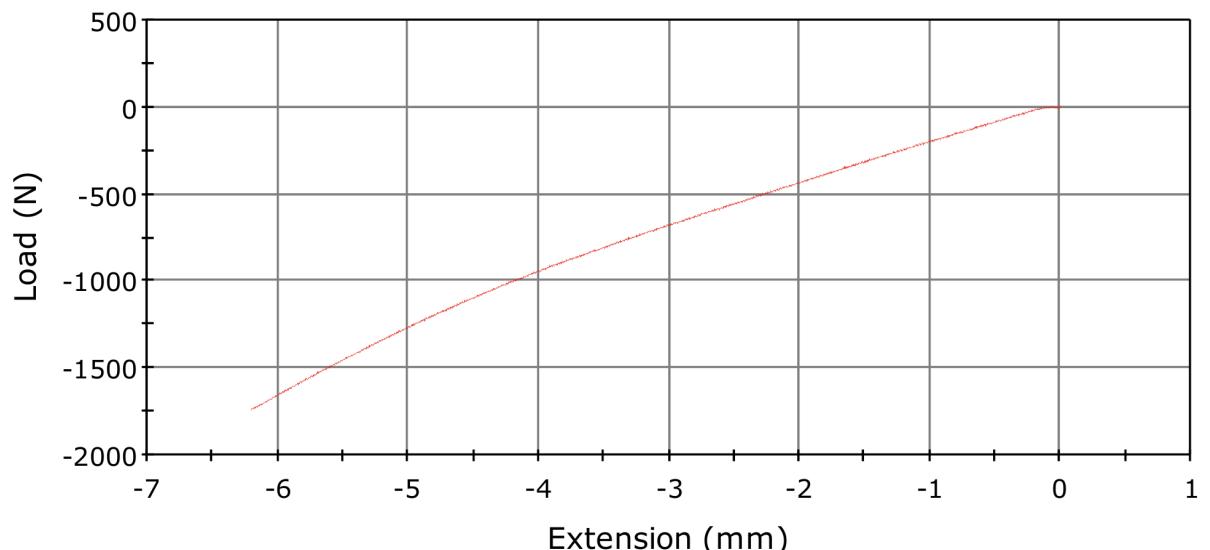


Figura 37 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 1).

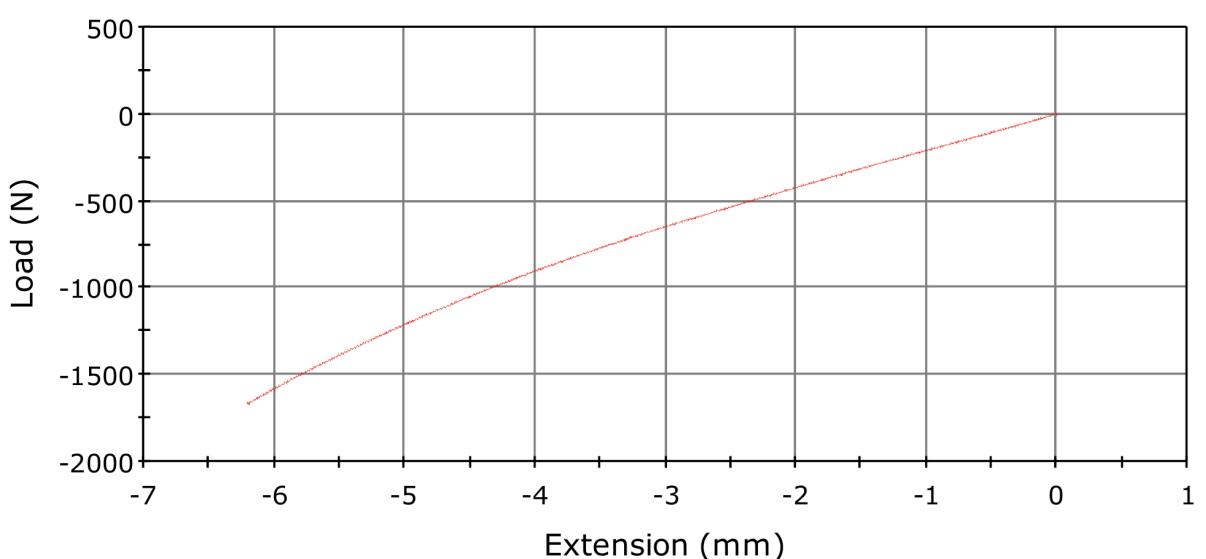


Figura 38 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 2).

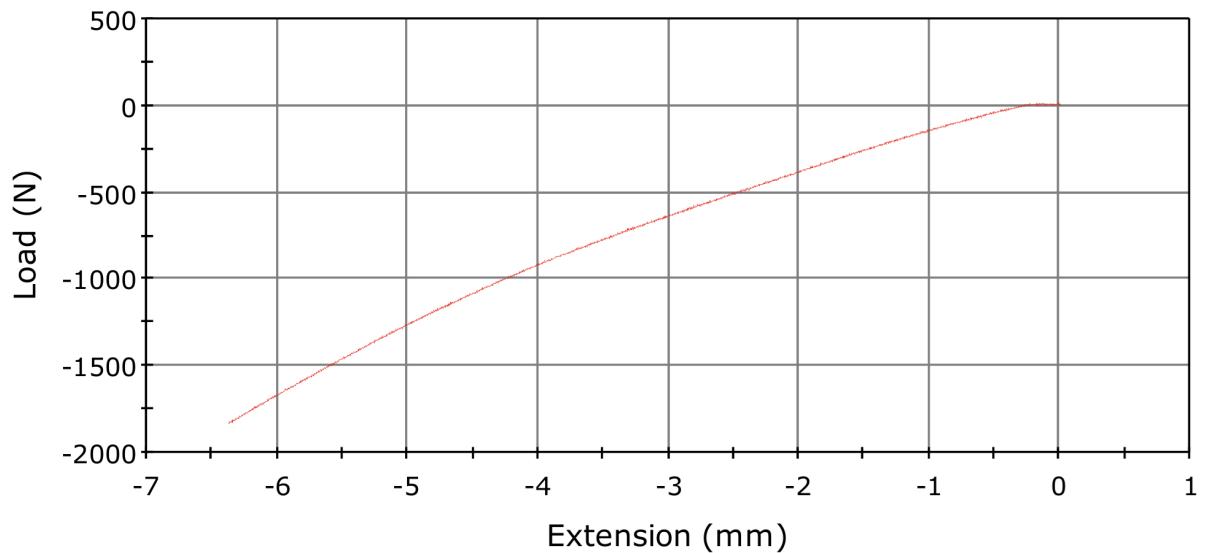


Figura 39 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 3).

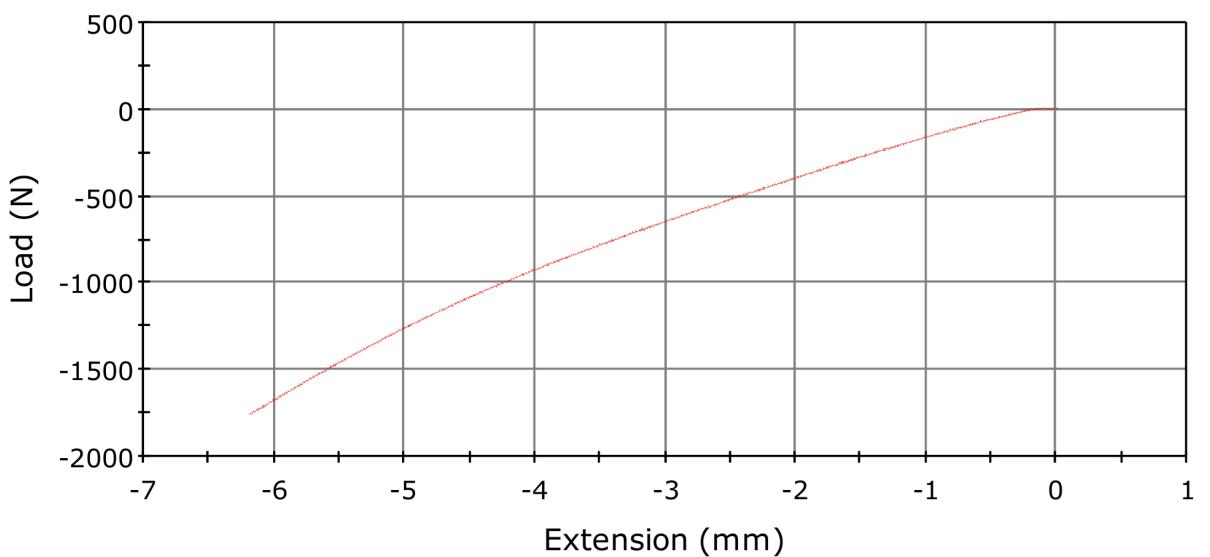


Figura 40 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 4).

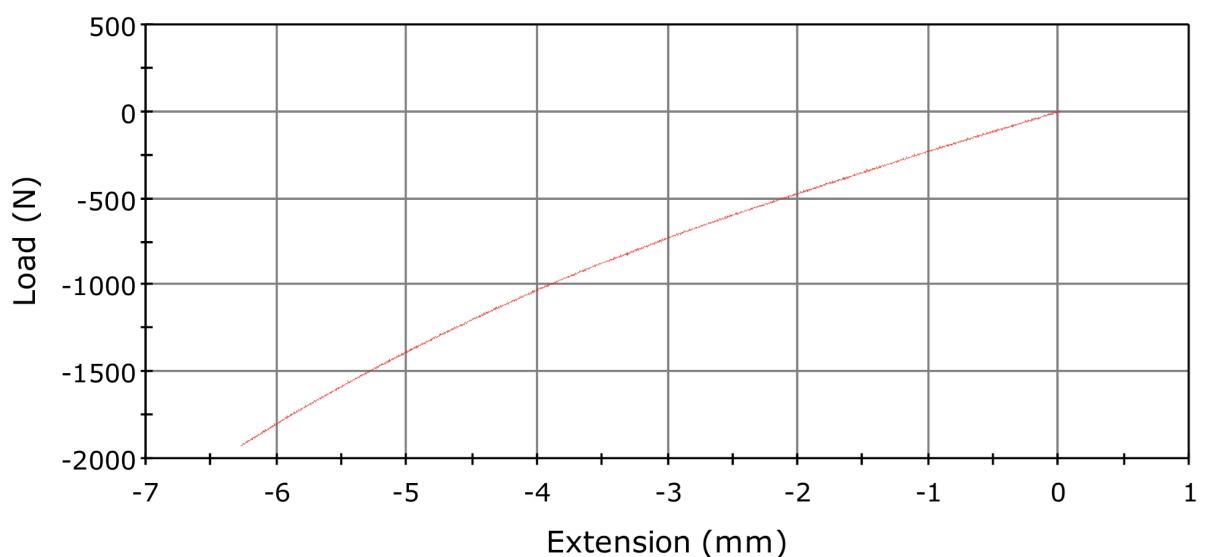


Figura 41 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa de alumínio de 2 mm com reforço (Experimento 5).

APÊNDICE E – Gráficos de deflexão por força aplicada para os experimentos com as placas sanduíche com núcleo PETG de 1 mm.

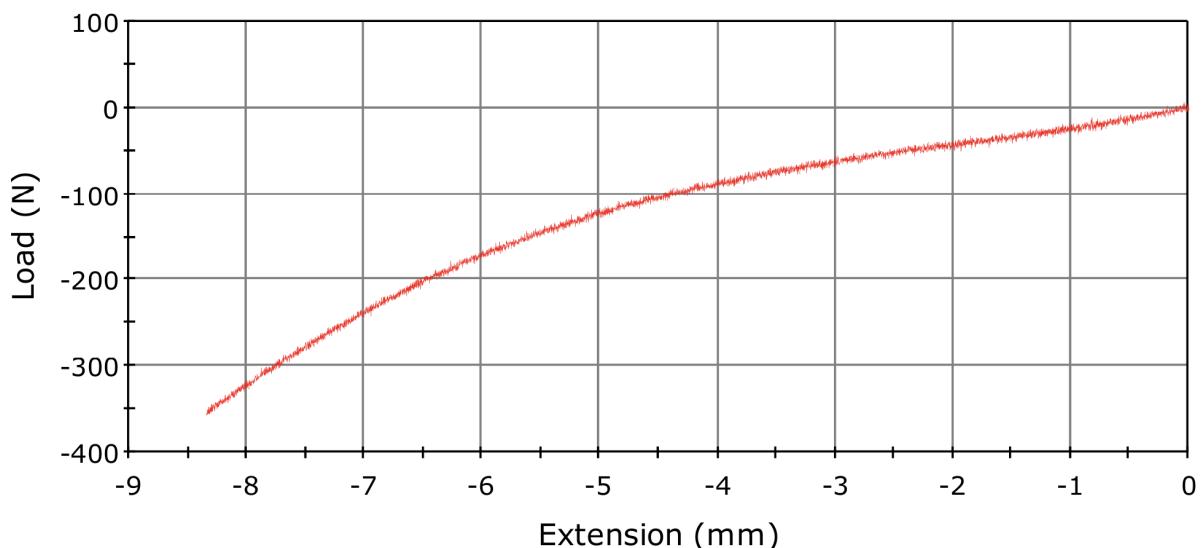


Figura 42 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 1).

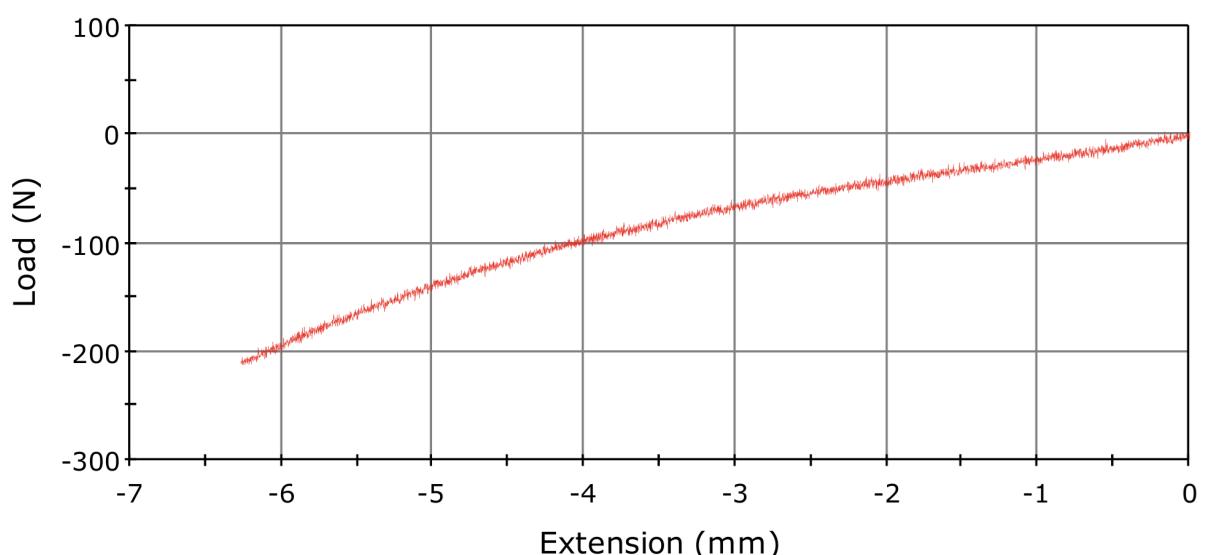


Figura 43 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 2).

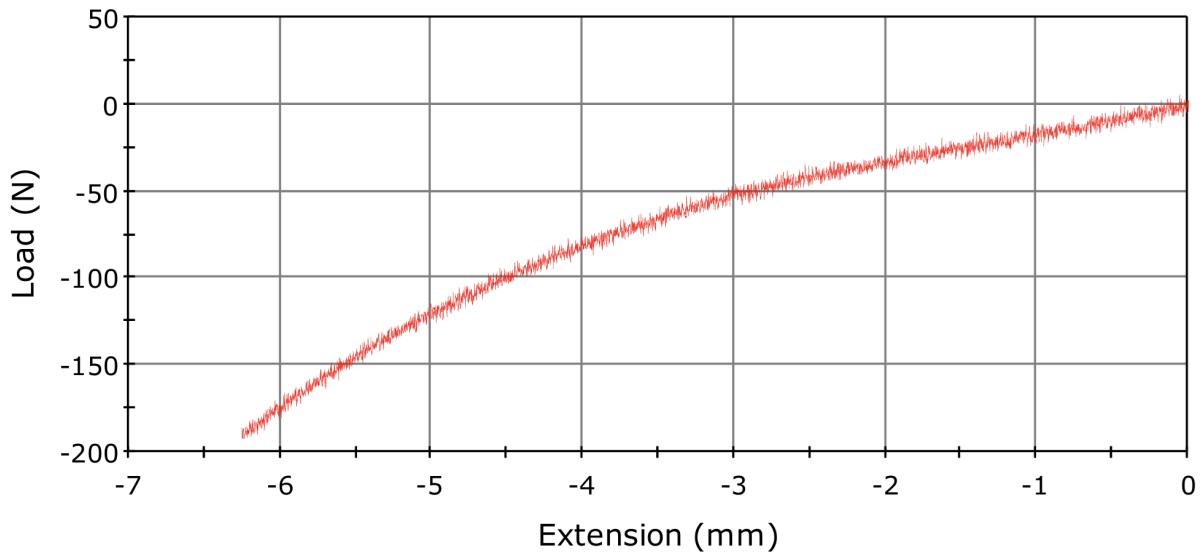


Figura 44 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 3).

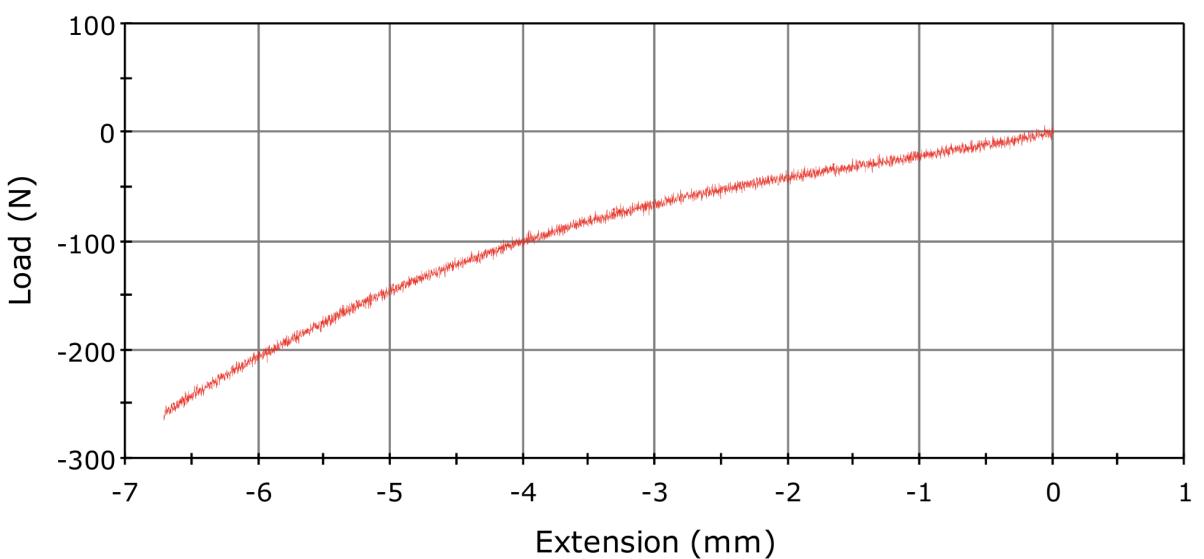


Figura 45 – Gráfico de deflexão por força aplicada para placa sanduíche com núcleo PETG (Experimento 4).