

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

GILMARA DA SILVA VIEIRA AVANÇO

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO GAMA NA ESTIMATIVA DA RIGIDEZ
À FLEXÃO E DAS TENSÕES NORMAIS EM VIGAS COMPOSTAS DE
MADEIRA SERRADA COM SEÇÃO T**

Ilha Solteira - SP

2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GILMARA DA SILVA VIEIRA AVANÇO

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO GAMA NA ESTIMATIVA DA RIGIDEZ
À FLEXÃO E DAS TENSÕES NORMAIS EM VIGAS COMPOSTAS DE
MADEIRA SERRADA COM PERFIL T**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Borges de Moura Aquino

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A946a Avanço, Gilmara da Silva Vieira.
Avaliação do método Gama na estimativa da rigidez à flexão e das tensões normais em vigas compostas de madeira serrada com seção T / Gilmara da Silva Vieira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
142 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas Estruturais Construtivos, 2026

Orientador: Vinicius Borges de Moura Aquino

Inclui bibliografia

1. Método Gama. 2. Vigas compostas de madeira. 3. Rigidez à flexão. 4. Tensões normais. 5. Simulação numérica.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta significativo potencial de impacto ao ampliar o entendimento sobre o comportamento mecânico de vigas compostas de madeira serrada, tema diretamente relacionado aos atuais desafios de otimização estrutural, segurança e uso eficiente de recursos naturais. Por meio de modelagem numérica e estudos paramétricos, revela-se como a variação geométrica e a rigidez das conexões influenciam a eficiência global do sistema. Essa abordagem fornece subsídios técnicos aplicáveis a distintos contextos normativos e construtivos, com foco principal na redução do superdimensionamento na construção civil. Os resultados obtidos reforçam a viabilidade do emprego da madeira como material estrutural principal, estimulam o desenvolvimento de soluções de ligação otimizadas e econômicas e contribuem para a convergência entre inovação tecnológica via programação e os objetivos globais de sustentabilidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research presents significant potential impact by expanding the understanding of the mechanical behavior of built-up timber beams, a topic directly related to current challenges in structural optimization, safety, and the efficient use of natural resources. Through numerical modeling and parametric studies, it is demonstrated how geometric variation and connection stiffness influence the overall efficiency of the system. This approach provides technical insights applicable to various normative and constructive contexts, with a primary focus on reducing overdesign in civil construction. The obtained results reinforce the viability of using timber as a primary structural material, stimulate the development of optimized and more economical connection solutions, and contribute to the convergence of technological innovation via programming and global sustainability goals.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do método gama na estimativa da rigidez à flexão e das tensões normais em vigas compostas de madeira serrada com perfil T

AUTORA: GILMARA DA SILVA VIEIRA AVANÇO

ORIENTADOR: VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO**
Data: 07/07/2026 11:57:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VINICIUS BORGES DE MOURA AQUINO (Participação Virtual)
Instituto de Engenharia do Araguaia / Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - UNIFESSPA

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA**
Data: 24/06/2026 13:51:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Itapeva - ICE

Documento assinado digitalmente
 **NILSON TADEU MASCIA**
Data: 24/06/2026 18:13:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. NILSON TADEU MASCIA (Participação Virtual)

Ilha Solteira, 23 de junho de 2026.

"Feliz é o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire conhecimento. Porque melhor é a sua mercadoria do que a mercadoria de prata, e a sua renda do que o ouro mais fino."

Provérbios 3:13-14

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos."

Provérbios 16:3

"A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo".

Albert Einstein

"Acredito firmemente que a Bíblia é a palavra de Deus, escrita por pessoas inspiradas. Eu a estudo todos os dias."

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por ser meu sustento, minha rocha e minha fortaleza. Agradeço por renovar minhas forças nos momentos de exaustão, por iluminar minha mente quando os caminhos pareciam incertos e por segurar minha mão ao longo de toda esta trajetória. Sem a Tua graça, sabedoria e amparo constante, a realização deste sonho não seria possível.

Ao meu marido, Rafael, pelo amor incondicional, companheirismo e paciência infinita. Obrigada por caminhar ao meu lado em todos os momentos, por ser meu porto seguro e por acreditar no meu potencial mesmo quando eu mesma duvidei de mim. Esta conquista também é sua.

Ao meu filho, Vicente, que me acompanhou ainda na barriga da mamãe durante grande parte desta caminhada. Você, meu pequeno, foi a minha maior motivação, a doçura nos dias difíceis e a força diária que me impulsionou a ir até o fim.

Aos meus pais, pelo amor imensurável, cuidado e por plantarem em mim a semente do incentivo que me moldou ao longo de toda a vida.

À minha irmã, Samara, pelo carinho, apoio constante e por sempre estar presente quando precisei.

Ao professor Vinícius, pela orientação exemplar, permanente dedicação e paciência fundamentais ao longo de todo este processo. Minha profunda gratidão por transmitir seu conhecimento com tanta generosidade, estimulando o pensamento crítico e moldando os rumos desta pesquisa. Sua condução brilhante, pautada pela excelência acadêmica e pelo incentivo constante, foi indispensável para a superação dos desafios e para a consolidação deste estudo.

Ao Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia e ao Prof. Dr. Marcos Cesar de Moraes Pereira, membros da minha banca de qualificação, pelas valiosas contribuições, apontamentos e sugestões de melhoria. O olhar atento e o rigor técnico compartilhados por ambos foram fundamentais para o aprimoramento e o amadurecimento desta pesquisa.

Ao professor Pedro Jardim, pela imensa disponibilidade, apoio técnico e pelas valiosas contribuições que enriqueceram esta pesquisa.

Ao Guilherme dos Santos Silva, pelo apoio dedicado, pela troca de ideias e por sua valiosa contribuição para o aprimoramento deste estudo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), ao Departamento de Engenharia Civil e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, meu muito obrigado pela sólida base institucional, pela infraestrutura oferecida e por viabilizarem o pleno desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Prof. Dr. Victor Almeida de Araujo, Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim e Prof. Dr. Alex Micael Dantas de Sousa, pelas valiosas contribuições, pelo apoio e por enriquecerem o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação, Andressa, Ezequiel e Sílvio, pela parceria fiel e pelas ricas trocas acadêmicas.

Às minhas amigas de uma vida inteira, Vanessa, Vandressa e Amanda, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, me ouvindo e torcendo pelo meu sucesso.

A todos que, de forma direta ou indireta, torceram, ajudaram e contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, o meu muito obrigada.

RESUMO

A madeira desempenha um papel de destaque na construção civil devido ao seu apelo sustentável e à sua elevada resistência específica. Diante de limitações dimensionais da madeira serrada, as vigas compostas com seções do tipo T e ligações pregadas surgem como uma alternativa estrutural viável, cujo dimensionamento por interação parcial passou a ser regido no cenário nacional pelo Método Gama, incorporado à ABNT NBR 7190-1:2022. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a precisão do Método Gama na estimativa da rigidez à flexão e das tensões normais em vigas compostas de madeira serrada de seção T. A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: o desenvolvimento de um modelo numérico no *software* Abaqus; a validação deste modelo com base em dados experimentais da literatura; a realização de um estudo paramétrico focado na variação de parâmetros geométricos e mecânicos dos conectores; e a análise comparativa dos resultados. Ao todo, foram investigadas 512 configurações distintas, variando-se as dimensões da alma e da mesa (altura e base), o comprimento do vão, bem como o diâmetro e o espaçamento dos elementos de ligação. O modelo numérico demonstrou elevada consistência frente aos dados experimentais, apresentando erros relativos de apenas 4,21% para a força máxima e 3,40% para a rigidez global (k). A confrontação entre as respostas numéricas e as estimativas pelo Método Gama revelou distorções crescentes com o aumento do porte estrutural. A avaliação dos grupos estruturais, pautada na relação vão-altura, evidenciou os limites críticos de aplicabilidade do Método Gama, que tende a superestimar ou subestimar substancialmente o comportamento real do sistema a depender da geometria. Para solucionar essas discrepâncias, foi desenvolvida uma equação de ajuste do Método Gama em relação ao Modelo em Elementos Finitos (MEF). Por fim, a análise paramétrica indicou que o espaçamento e o diâmetro dos conectores exercem influência preponderante na rigidez à flexão do sistema composto.

Palavras-chave: método gama; vigas compostas de madeira; rigidez à flexão; tensões normais; simulação numérica.

ABSTRACT

Wood plays a prominent role in civil construction due to its sustainable appeal and high specific strength. Faced with the dimensional limitations of sawn timber, built-up beams with T-sections and nailed connections emerge as a viable structural alternative, whose design by partial interaction is governed in the Brazilian national scenario by the Gamma Method, incorporated into ABNT NBR 7190-1:2022. In this context, this study aims to evaluate the accuracy of the Gamma Method in estimating the bending stiffness and normal stresses in sawn timber built-up beams with a T-section. The methodology was structured into four main stages: the development of a numerical model in Abaqus software; the validation of this model based on experimental data from the literature; a parametric study focusing on the variation of geometric parameters and connection mechanical properties; and a comparative analysis of the results. In total, 512 distinct configurations were investigated, varying the dimensions of the web and flange (height and base), the span length, as well as the diameter and spacing of the connection elements. The numerical model demonstrated high agreement with the experimental data, presenting relative errors of only 4.21% for the maximum force and 3.40% for the global stiffness (k). The confrontation between the numerical responses and the estimates obtained by the Gamma Method revealed increasing distortions with the increase in structural size. The evaluation of the structural groups, based on the span-to-height ratio, evidenced the critical limits of applicability of the Gamma Method, which tends to substantially overestimate or underestimate the actual behavior of the system depending on the geometry. To solve these discrepancies, an adjustment equation for the Gamma Method in relation to the Finite Element Model (FEM) was developed. Finally, the parametric analysis indicated that the spacing and diameter of the connectors exert a preponderant influence on the bending stiffness of the built-up system.

Keywords: gamma method; built-up timber beams; bending stiffness; normal stress; numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição das florestas mundiais	30
Figura 2	Área de florestas plantadas por espécie no Brasil (2015–2023)	31
Figura 3	Área de florestas plantadas por espécie no Brasil (2015–2023) em milhões de hectares.	32
Figura 4	Florestas plantadas com pinus no Brasil por região.	33
Figura 5	Representação esquemática do corte transversal do tronco, evidenciando as principais regiões anatômicas da madeira.	35
Figura 6	Direções principais da madeira: longitudinal, radial e tangencial.	36
Figura 7	Tipos de vigas compostas: (a) viga composta de madeira maciça; (b) viga lamelada colada; (c) viga com alma esbelta; (d) viga em treliça.	44
Figura 8	Exemplos de configurações de seções transversais compostas com diferentes formas de solidarização entre elementos.	45
Figura 9	Diagrama força × deslocamento para ligações em madeira: (a) colada; (b) com anel metálico; e (c) com pino metálico.	48
Figura 10	Curva típica de força versus deslocamento para ligações com pinos metálicos.	49
Figura 11	Ensaio de flexão modelo de referência.	56
Figura 12	Modelo analisado: vista longitudinal (a) e transversal (b).	58
Figura 13	Configuração do modelo numérico da viga composta.	60
Figura 14	Malha tridimensional com elementos C3D8R adotada no modelo numérico da viga.	61
Figura 15	Modelo numérico da viga composta e respectivas condições de contorno.	62
Figura 16	Esquema de nomenclatura adotado para identificação dos modelos numéricos	65

Figura 17	Esquema estrutural da viga submetida a carregamento em quatro pontos.	68
Figura 18	Seções transversais e distribuição de tensões	69
Figura 19	Curva força versus deslocamento do modelo de validação	75
Figura 20	Correlação entre a rigidez à flexão pelo MEF (EI_{MEF}) e pelo Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 1, com altura total de 240 mm, em relação à linha de igualdade 1:1.	80
Figura 21	Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 1 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	82
Figura 22	Rigidez efetiva à flexão estimada pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 nos vãos de 2600 mm e 4100 mm.	83
Figura 23	Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e por Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 2 ($h = 260$ mm) em relação à linha de referência 1:1.	86
Figura 24	Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 2 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	87
Figura 25	Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 2 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	88
Figura 26	Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e por Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 3 ($h = 340$ mm) em relação à linha de referência 1:1.	91
Figura 27	Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 3 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	92
Figura 28	Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 3 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	92
Figura 29	Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e pelo Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 4 ($h = 360$ mm) em relação à linha de referência 1:1.	95
Figura 30	Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 4 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	96
Figura 31	Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 4 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.	97
Figura 32	Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes espaçamentos entre conectores.	101

Figura 33	Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes diâmetros dos conectores.	102
Figura 34	Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes comprimentos de viga.	103
Figura 35	Relação entre as tensões normais obtidas pelo Método Gama e pelo MEF em elementos finitos, com linha de igualdade 1:1.	105
Figura 36	Relação entre as tensões normais σ_{MEF}/σ_y em função dos parâmetros analisados: (A) espaçamento entre conectores; (B) diâmetro dos conectores; (C) comprimento da viga.	106
Figura 37	Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 240 mm.	108
Figura 38	Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 260 mm.	108
Figura 39	Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 340 mm.	109
Figura 40	Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 360 mm.	109
Figura 41	Complexidade versus MSE	111
Figura 42	Valor real versus valor predito no conjunto completo de dados – conjunto total	112
Figura 43	Valor real versus valor predito no conjunto completo de dados – conjunto total	113

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Classes de resistência da madeira obtidas em ensaios com peças estruturais.	38
Tabela 2	Propriedades elásticas da madeira em peças estruturais	38
Tabela 3	Propriedades físicas da madeira.	39
Tabela 4	Propriedades mecânicas de espécies de florestas nativas	39
Tabela 5	Valores característicos das propriedades mecânicas e físicas de madeiras de florestas plantadas por classe de resistência.	40
Tabela 6	Propriedades elásticas da madeira.	58
Tabela 7	Propriedades elásticas do Aço dos conectores.	59
Tabela 8	Definição dos conjuntos em função da altura da viga	64
Tabela 9	Dimensões dos blocos considerados	64
Tabela 10	Variáveis e níveis adotados no estudo paramétrico	65
Tabela 11	Valores característicos adotados para as classes de resistência da madeira.	67
Tabela 12	Parâmetros do algoritmo e variáveis utilizadas na regressão simbólica.	72
Tabela 13	Comparação da força máxima (F) e da rigidez global (k) dos modelos experimental e numérico	76
Tabela 14	Comparativo de rigidez média ($\overline{EI}$) e erro relativo médio $\overline{Erro}$ entre o Método Gama e o MEF.	78
Tabela 15	Tabela 15: Comparativo de rigidez média ($\overline{EI}$) e erro relativo médio $\overline{Erro}$ entre o Método Gama e o MEF.	79
Tabela 16	Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 1	79

Tabela 17	Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão (EI) por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 com vão de 2600 mm.	84
Tabela 18	Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão (EI) por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 com vão de 4100 mm.	84
Tabela 19	Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 2	86
Tabela 20	Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 2 com vão de 2600 mm.	89
Tabela 21	Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 2 com vão de 4100 mm.	86
Tabela 22	Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 3	90
Tabela 23	Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 3 com vão de 2600 mm.	93
Tabela 24	Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 3 com vão de 4100 mm.	94
Tabela 25	Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 4	95
Tabela 26	Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 4 com vão de 2600 mm.	98
Tabela 27	Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 4 com vão de 4100 mm.	98
Tabela 28	Métricas do modelo - treinamento	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abaqus/CAE	<i>Abaqus/CAE – Computer-Aided Engineering</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEN	<i>European Committee for Standardization</i>
CLT	CLT – Madeira Lamelada Colada Cruzada (<i>Cross Laminated Timber</i>)
CV	Coeficiente de Variação
EI	Rigidez à flexão
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EN	<i>EN – European Norm</i>
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GL24h	Classe de resistência de madeira lamelada colada (MLC) homogênea
Glulam	Glulam – <i>Glue Laminated</i> (Madeira Lamelada Colada)
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
LVL	LVL – <i>Laminated Veneer Lumber</i>
MAPE	Erro Percentual Absoluto Médio
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLC	Madeira Lamelada Colada
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPa	Mega Pascal
MSE	Erro Quadrático Médio
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RP _s	<i>Reference Points</i>
SFP	Serviço Florestal Brasileiro
ZSYMM	Restrição de simetria no plano Z

LISTA DE SÍMBOLOS

1:1	Linha de igualdade entre os métodos
A	Área de cada parte da seção transversa
a	Distância do centroide da área
B_{alma}	Base da alma
b_f	Largura da mesa
B_{mesa}	Base da mesa
E	Módulo de elasticidade
$E_{0,05}$	Módulo de elasticidade inferior (percentil 5%)
$E_{0,m}$	Módulo de elasticidade médio paralelo às fibras (0°)
$E_{90,m}$	Módulo de elasticidade médio perpendicular às fibras (90°)
EI	Rigidez à flexão
EI_{ef}	Rigidez efetiva à flexão
EI_{MEF}	Rigidez à flexão obtida pelo modelo numérico
EI_γ	Rigidez à flexão estimada pelo Método Gama
F	Força aplicada
$f_{b,k}$	Resistência característica à flexão
$f_{c,0,k}$	Resistência característica à compressão paralela às fibras
$f_{c,90,k}$	Resistência característica à compressão perpendicular às fibras
$f_{t,0,k}$	Resistência característica à tração paralela às fibras
$f_{t,90,k}$	Resistência característica à tração perpendicular às fibras
$f_{v,k}$	Resistência característica ao cisalhamento
G	Módulo de cisalhamento
G_m	Módulo de elasticidade transversal médio
H_{alma}	Altura da alma
H_{mesa}	Altura da mesa
H_t	Altura total da viga
I	Momento de inércia
k	Rigidez global da viga

K	Módulo de deslizamento da ligação
L	Comprimento da viga / Vão estrutural
L/h	Relação entre comprimento e altura da seção
M	Momento fletor
R ²	Coefficiente de Determinação
s	Espaçamento entre conectores
t _f	Espessura da mesa
U1	Deslocamento em X
U2	Deslocamento em Y
U3	Deslocamento em Z
UR1	Rotação em X
UR2	Rotação em Y
D	Diâmetro dos conectores
α	Coefficiente corretivo entre os métodos
γ	Gama / Coeficiente de interação
δ	Deslocamento vertical
$\rho_{12\%}$	Densidade a 12% de umidade
σ	Tensão normal
$\sigma_{MEF} / \sigma_{\gamma}$	Razão entre tensões obtidas pelo modelo numérico e Método Gama

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	JUSTIFICATIVA.....	22
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA.....	23
1.3	OBJETIVOS.....	24
1.3.1	Geral.....	24
1.3.2	Específicos.....	24
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	24
1.5	ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	ASPECTOS INICIAIS DO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO.....	28
2.2	USO DA MADEIRA NO BRASIL: AVANÇOS E DESAFIOS.....	29
2.3	DISPONIBILIDADE FLORESTAL E IMPLICAÇÕES ESTRUTURAIS.....	31
2.4	MADEIRA MACIÇA PARA USO ESTRUTURAL.....	34
2.4.1	Estrutura anatômica e comportamento trópico.....	34
2.4.2	Propriedades Físicas Mecânicas.....	37
2.4.3	Comportamento mecânico de elementos de madeira maciça.....	41
2.5	VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS.....	42
2.6	COMPORTAMENTO E ANÁLISE DE VIGAS COMPOSTAS.....	45
2.6.1	Comportamento e Rigidez das Ligações Mecânica.....	47
2.6.2	Método Gama para análise de vigas compostas.....	50
2.6.3	Métodos alternativos de análise.....	51
2.6.4	Síntese da revisão e implicações para o estudo	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
3.1	MATERIAIS.....	54
3.1.1	Estudo experimental de referência	54

3.1.2	Geometria da viga de referência.....	55
3.1.3	Propriedades Mecânicas dos materiais.....	57
3.2	MÉTODOS	58
3.2.1	Calibração do Modelo.....	58
3.2.2	Construção geométrica no Abaqus.....	59
3.2.3	Elemento finito e malha.....	60
3.2.4	Interações e Condições de Contorno.....	61
3.2.5	Geração Automatizada via código Python.....	62
3.3	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	62
3.3.1	Organização dos grupos e conjuntos.....	62
3.3.2	Variáveis consideradas e níveis adotados.....	64
3.3.3	Procedimento de simulação numérica e determinação da rigidez à flexão.....	65
3.4	MÉTODO GAMA.....	65
3.5	DESLOCAMENTO MÁXIMO.....	67
3.6	ANÁLISE DE TENSÕES PELO MÉTODO GAMA.....	68
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA E REGRESSÃO SIMBÓLICA.....	69
3.7.1	Definição da variável resposta.....	69
3.7.2	Regressão simbólica.....	70
3.7.3	Métricas de avaliação do modelo.....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	73
4.2	RIGIDEZ À FLEXÃO DAS VIGAS COMPOSTAS.....	76
4.2.1	Análise do Grupo 1.....	78

4.2.2	Análise do Grupo 2.....	84
4.2.3	Análise do Grupo 3.....	89
4.2.4	Análise do Grupo 4.....	93
4.2.5	Síntese paramétrica e análise comparativa entre os métodos.....	98
4.3	INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CONECTORES.....	99
4.4	INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS CONECTORES.....	101
4.5	INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA VIGA.....	102
4.6	ANÁLISE DAS TENSÕES NORMAIS.....	103
4.7	ANÁLISE DA CURVA FORÇA versus DESLOCAMENTO.....	106
4.8	REGRESSÃO SIMBÓLICA.....	109
4.9	SÍNTESE GERAL DOS RESULTADOS.....	112
	CONCLUSÕES.....	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A.....	122
	APÊNDICE B.....	127
	APÊNDICE C.....	132
	APÊNDICE D.....	137

1 INTRODUÇÃO

A madeira é amplamente empregada na construção civil devido à sua disponibilidade, caráter renovável e elevada relação resistência/peso. Sua aplicação abrange diferentes elementos e sistemas estruturais, como vigas, pilares, treliças, placas, chapas e pórticos, além de compor sistemas estruturais como pontes (Forest Products Laboratory, 2010; Pfeil e Pfeil, 2017; Ren *et al.*, 2024).

Ao comparando com materiais convencionais, como aço e concreto, destaca-se pelo elevado desempenho mecânico específico associado à baixa densidade, além do menor impacto ambiental e da reduzida energia incorporada em seu ciclo produtivo (Food and Agriculture Organization - FAO, 2016; Araújo, 2002).

Além dos atributos mecânicos, a crescente demanda por soluções construtivas sustentáveis tem ampliado o interesse pelo uso estrutural da madeira. Seu caráter renovável, aliado à capacidade de armazenamento de carbono e ao menor impacto associado ao processamento quando comparado a materiais tradicionais, tem impulsionado pesquisas e aplicações voltadas à ampliação do seu uso na construção civil (Cabral; Blanchet, 2021).

Nas últimas décadas, esse movimento foi acompanhado pelo avanço de produtos engenheirados, como Madeira Lamelada Colada (MLC), *Laminated Veneer Lumber* (LVL) e *Cross Laminated Timber* (CLT), que ampliaram significativamente as possibilidades de aplicação estrutural da madeira, permitindo soluções de maior porte, maior industrialização e melhor desempenho. Nesse contexto, Ramage *et al.* (2017) ressaltam que o potencial estrutural da madeira está associado não apenas às propriedades intrínsecas do material, mas também ao desenvolvimento de soluções de engenharia capazes de ampliar sua eficiência e competitividade frente a outros materiais estruturais.

No cenário brasileiro, a ampla disponibilidade de recursos florestais e a elevada diversidade de espécies reforçam o potencial da madeira como material estrutural (Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2022). Essa condição favorece o desenvolvimento de soluções construtivas baseadas em recursos locais, especialmente em sistemas estruturais que conciliem desempenho mecânico, racionalidade construtiva e sustentabilidade (Shigue, 2018).

No entanto, apesar desses avanços, a disponibilidade de produtos engenheirados ainda pode ser limitada por fatores produtivos, logísticos ou econômicos. Nesses casos, especialmente em regiões com abundância de madeira serrada e menor acesso a sistemas industrializados, a associação de elementos de menores dimensões constitui alternativa viável para aplicações de maior porte.

Nesse contexto, as vigas compostas madeira-madeira surgem como solução para superar limitações dimensionais e ampliar a capacidade resistente e a rigidez dos elementos estruturais. A atuação conjunta dos componentes permite que esses sistemas apresentem comportamento composto, aproximando-se, em diferentes graus, do comportamento de uma seção monolítica (Góes, 2003; Pfeil e Pfeil, 2017).

A eficiência desse comportamento depende diretamente das condições de ligação entre os elementos componentes, uma vez que a deformação das conexões influencia a transferência de esforços e, consequentemente, a rigidez global do sistema. Entre as alternativas disponíveis, as ligações pregadas permanecem amplamente utilizadas devido à simplicidade executiva, ao custo relativamente reduzido e à aplicabilidade em sistemas compostos de madeira (Meghlat *et al.*, 2013; Prevatt *et al.*, 2014).

Além dos aspectos relacionados às ligações, o comportamento dessas vigas é influenciado pelas características constitutivas da madeira. Embora naturalmente anisotrópica, para aplicações em engenharia estrutural a madeira é frequentemente tratada como material ortotrópico, considerando a variação de propriedades nas direções longitudinal, radial e tangencial (Mascia; Lahr, 2006).

Essa característica influencia a distribuição de tensões e deformações, sobretudo em sistemas com interação parcial entre os elementos.

Em vigas compostas madeira-madeira, a deformação das ligações pode resultar em interação parcial, tornando necessária a utilização de métodos analíticos capazes de estimar a rigidez efetiva do sistema. Entre os métodos disponíveis destacam-se o Método K (*Composite Theory*), o Método da Analogia de Cisalhamento (*Shear Analogy Method*), a teoria de viga de Timoshenko e o Método Gama, também conhecido como *Mechanically Jointed Beams Theory* (Karacabeyli; Gagnon, 2019; Santos; Miotto, 2024).

Dentre esses procedimentos, o Método Gama destaca-se por sua ampla difusão em documentos normativos europeus e por sua incorporação recente ao contexto normativo brasileiro por meio da ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Entretanto, apesar de sua consolidação normativa, sua aplicação em vigas compostas madeira-madeira com seção T ainda carece de investigações específicas que avaliem sua adequação na estimativa da rigidez à flexão, bem como das componentes de tensão, considerando a influência da rigidez das ligações, da geometria da seção e da interação parcial entre os elementos.

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de estudos que analisem sistematicamente o desempenho do Método Gama nesse tipo de configuração estrutural, explorando a variabilidade dos parâmetros envolvidos e sua influência nos resultados obtidos. Para tanto, a aplicação de técnicas de regressão simbólica surge como uma ferramenta promissora na identificação de correlações matemáticas entre os parâmetros geométricos, as propriedades das ligações e o comportamento estrutural, viabilizando a formulação de equações preditivas mais simplificadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Método Gama, previsto na ABNT NBR 7190-1:2022 e difundido em documentos normativos internacionais, é empregado no dimensionamento de estruturas de madeira composta. Essa abordagem considera a eficiência da

ligação, associada ao grau de solidarização entre os elementos longitudinais e transversais (Amorim *et al.*, 2017).

Sua incorporação à ABNT NBR 7190-1:2022 consolidou seu uso no contexto normativo brasileiro, estabelecendo critérios para a estimativa da rigidez efetiva de vigas compostas com interação parcial.

No entanto, apesar dessa consolidação normativa, ainda há lacunas quanto à aplicação do método em determinadas configurações estruturais, especialmente em vigas compostas de madeira serrada com seção T. Nesse sentido, justifica-se a realização de estudos que avaliem a aplicabilidade do Método Gama na estimativa da rigidez à flexão e na representação do comportamento estrutural desses sistemas.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Embora o Método Gama seja amplamente empregado na estimativa da rigidez à flexão de sistemas compostos, sua capacidade de representar com precisão a distribuição de tensões ainda apresenta limitações, especialmente em sistemas madeira-madeira com ligações pregadas.

Além disso, os estudos comparativos entre modelos analíticos e numéricos concentram-se majoritariamente em sistemas mistos madeira-concreto ou madeira-aço, havendo menor enfoque em vigas compostas formadas exclusivamente por elementos de madeira serrada conectados por pregos. Diante dessa lacuna, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa:

O Método Gama é capaz de representar adequadamente a rigidez à flexão e a distribuição das componentes de tensão em vigas compostas com seção T, constituídas por madeira serrada e ligações pregadas? E, caso apresente limitações, como é possível propor uma formulação alternativa ou corretiva para essas situações?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Avaliar a precisão do Método Gama na estimativa da rigidez efetiva à flexão e das tensões normais em vigas compostas de madeira serrada com seção T, considerando ligações pregadas, propondo um equacionamento para correções de inconsistências.

1.3.2 Específicos

- i. Validar os resultados obtidos pelo Método Gama por meio da comparação com dados experimentais disponíveis na literatura;
- ii. Verificar a influência dos parâmetros geométricos da alma (base e altura) na rigidez à flexão, por meio do modelo do Método Gama e das simulações numéricas;
- iii. Verificar a influência dos parâmetros geométricos da mesa (base e altura) na rigidez à flexão das vigas compostas;
- iv. Verificar a influência do diâmetro dos pregos e do espaçamento da ligação na rigidez efetiva;
- v. Comparar os resultados obtidos pelo Método Gama com aqueles provenientes das simulações numéricas quanto à rigidez efetiva e às tensões normais, identificando as inconsistências e as limitações do método normativo;
- vi. Empregar técnicas de regressão simbólica para propor uma equação corretiva para a estimativa da rigidez efetiva, baseada nos resultados obtidos pelo modelo numérico.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho delimita-se à análise de vigas compostas de madeira serrada por meio de simulações numéricas em Método dos Elementos Finitos (MEF), implementadas no software ABAQUS/CAE, versão 2019 (*Dassault Systèmes*), com foco na estimativa da rigidez à flexão e na distribuição das tensões normais.

O estudo contempla uma análise paramétrica, com variação da geometria da seção T, do diâmetro dos pregos e do espaçamento entre pregos, visando avaliar a influência desses parâmetros na rigidez à flexão e na distribuição das tensões normais. A validação do modelo numérico foi realizada por meio da comparação com resultados experimentais reportados na literatura.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está organizado conforme a seguinte estrutura:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta o contexto geral da pesquisa, destacando a relevância das estruturas de madeira e a importância do estudo de vigas compostas com interação parcial entre os elementos estruturais. Também são apresentados os objetivos da pesquisa, a justificativa do estudo e a delimitação do trabalho, evidenciando a aplicação do Método Gama na estimativa da rigidez e das tensões normais em vigas compostas de perfil T.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: reúne os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do tema e para o desenvolvimento das análises realizadas na pesquisa. Inicialmente, são abordados os aspectos essenciais da madeira maciça como material estrutural, incluindo sua constituição anatômica, propriedades físico-mecânicas e comportamento sob solicitações de flexão. Na sequência, são apresentados os princípios de análise de vigas e os modelos aplicáveis a sistemas compostos, estabelecendo o referencial teórico necessário para a avaliação da rigidez e da distribuição de tensões, além da discussão sobre sistemas de ligação, interação parcial e aplicação do Método Gama.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: descreve os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa, incluindo as características geométricas e mecânicas das vigas analisadas, os parâmetros relacionados aos conectores e os critérios de definição dos modelos estudados. Também são apresentados os procedimentos de modelagem numérica em elementos finitos realizados no *software Abaqus*, contemplando

propriedades dos materiais, contatos, condições de contorno e carregamentos, bem como a aplicação do Método Gama e os critérios utilizados para comparação entre os resultados do Método Gama e numéricos.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: apresenta os resultados obtidos a partir das análises realizadas, incluindo a comparação entre os valores estimados pelo Método Gama e aqueles obtidos por meio da modelagem numérica em elementos finitos. São discutidas as influências dos parâmetros geométricos e de ligação no comportamento estrutural das vigas compostas, considerando a rigidez à flexão, as tensões normais e as curvas de força versus deslocamento, buscando avaliar o nível de concordância entre os métodos analisados.

Capítulo 5 – Conclusão: apresenta as considerações finais da pesquisa com base nos resultados obtidos, destacando as principais contribuições do estudo em relação à aplicação do Método Gama na estimativa da rigidez e das tensões normais em vigas compostas de madeira com perfil T. Também são discutidas as limitações observadas ao longo das análises, as influências dos parâmetros geométricos e de ligação no comportamento estrutural das vigas e sugestões para trabalhos futuros relacionados às estruturas compostas de madeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento desta pesquisa, abordando conceitos relacionados ao uso da madeira na construção civil, às propriedades estruturais da madeira maciça e ao comportamento de vigas compostas. A revisão bibliográfica busca fornecer o embasamento necessário para a compreensão dos mecanismos de interação entre os elementos estruturais e dos métodos empregados na análise da rigidez e da distribuição de tensões em vigas compostas de madeira.

A Seção 2.1 aborda os aspectos iniciais do uso da madeira na construção, apresentando uma contextualização histórica da aplicação desse material estrutural e sua evolução ao longo do tempo. Na sequência, a Seção 2.2 discute o uso da madeira no Brasil, destacando avanços tecnológicos, potencialidades e desafios relacionados à sua utilização na construção civil. Complementando essa abordagem, Seção 2.3 apresenta aspectos relacionados à disponibilidade florestal e suas implicações estruturais, considerando fatores ligados à produção, manejo e disponibilidade de espécies com potencial estrutural.

Posteriormente, a Seção 2.4 trata da madeira maciça para uso estrutural, reunindo os principais conceitos relacionados ao comportamento do material. A Subseção 2.4.1 aborda a estrutura anatômica da madeira e seu comportamento ortotrópico, destacando a influência da direção das fibras nas propriedades mecânicas. A Subseção 2.4.2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas da madeira, incluindo parâmetros relevantes para aplicações estruturais.

A Subseção 2.4.3 discute o comportamento mecânico de elementos de madeira maciça submetidos a solicitações estruturais, com ênfase no comportamento à flexão e nos mecanismos resistentes envolvidos.

Na sequência, a Seção 2.5 apresenta os conceitos relacionados às vigas de madeira compostas, abordando os princípios de funcionamento desses sistemas e os mecanismos de interação entre seus elementos. Complementando essa discussão.

A Seção 2.6 aborda o comportamento e a análise de vigas compostas, enfatizando os efeitos da interação parcial na resposta estrutural desses elementos. A Subseção 2.6.1 apresenta os fundamentos do Método Gama aplicado à análise de vigas compostas, enquanto a Subseção 2.6.2 reúne métodos alternativos de análise utilizados na literatura para avaliação da rigidez e das tensões em sistemas compostos.

Por fim, a Subseção 2.6.3 apresenta uma síntese da revisão bibliográfica, destacando as principais contribuições da literatura e suas implicações para o desenvolvimento deste estudo.

2.1 ASPECTOS INICIAIS DO USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO

A madeira é utilizada na construção civil em diferentes contextos, abrangendo desde aplicações tradicionais até sistemas estruturais mais complexos. Sua presença em projetos de engenharia está associada à combinação de propriedades físicas e mecânicas que permitem sua adaptação a diferentes demandas construtivas.

No âmbito estrutural, a madeira pode ser empregada em elementos lineares, planos e tridimensionais, sendo utilizada na composição de vigas, pilares, sistemas de cobertura e painéis estruturais. A escolha do material e da solução construtiva depende de fatores como disponibilidade, características mecânicas e condições de aplicação, o que resulta em diferentes formas de utilização ao longo do tempo e entre distintas regiões.

A evolução das técnicas construtivas e dos processos produtivos tem ampliado as possibilidades de aplicação da madeira na engenharia, permitindo maior controle das propriedades do material e maior previsibilidade do

comportamento estrutural. Esse avanço tem contribuído para a consolidação de soluções que vão desde sistemas baseados em madeira serrada até configurações mais elaboradas, que envolvem a associação de elementos e o uso de ligações mecânicas.

Dessa forma, o uso da madeira na construção civil pode ser compreendido a partir da relação entre suas características materiais, as condições de aplicação e as soluções estruturais adotadas, portanto, constitui-se um campo de estudo que envolve tanto aspectos tecnológicos quanto de comportamento estrutural.

2.2 USO DA MADEIRA NO BRASIL: AVANÇOS E DESAFIOS

A utilização da madeira como material estrutural no Brasil apresenta particularidades associadas à disponibilidade de recursos, à tradição construtiva e à evolução técnica do setor. Historicamente, o predomínio de sistemas convencionais em concreto armado limitou a inserção mais ampla da madeira em aplicações estruturais, especialmente em empreendimentos de maior porte (Molina e Calil, 2010).

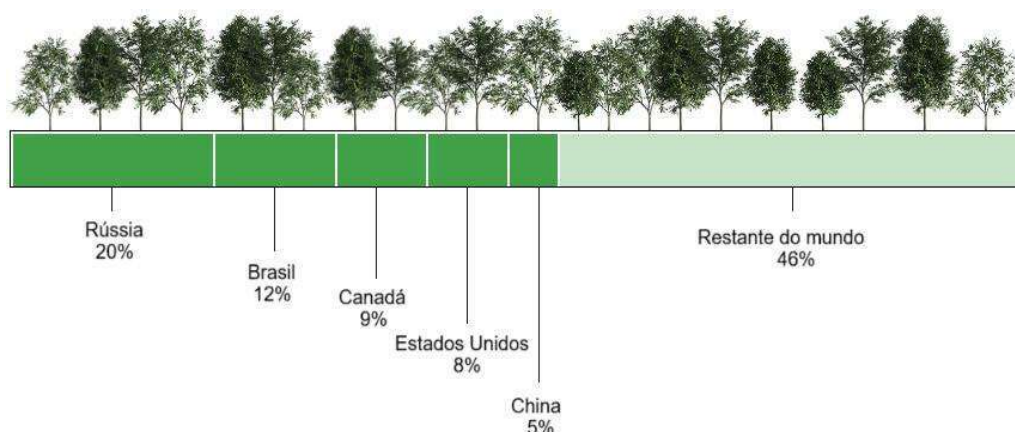
Nos últimos anos, observa-se uma mudança gradual nesse cenário, impulsionada por avanços técnicos, ampliação do conhecimento especializado e maior disseminação de tecnologias construtivas em madeira (De Araujo et al., 2022a; 2022b). Esse processo tem contribuído para a diversificação das soluções estruturais adotadas no país, abrangendo desde sistemas tradicionais até aplicações com maior grau de industrialização.

Esse desenvolvimento também se reflete na consolidação de práticas de projeto, execução e controle mais alinhadas às exigências de desempenho estrutural. A adoção de diretrizes normativas, aliada à evolução dos processos produtivos e ao fortalecimento da cadeia técnica, tem favorecido a ampliação do uso da madeira em contextos anteriormente pouco explorados (De Araujo; Garcia, 2024; Espíndola, 2017).

Apesar desses avanços, ainda persistem desafios relacionados à padronização, à capacitação técnica e à difusão do conhecimento aplicado à engenharia de estruturas em madeira. A variabilidade do material e as particularidades de seu comportamento estrutural exigem abordagens específicas de dimensionamento e modelagem, o que ainda pode representar uma barreira à sua adoção em maior escala.

Nesse contexto, a disponibilidade de recursos florestais torna-se um fator relevante para a ampliação do uso estrutural da madeira no Brasil, aspecto discutido na seção seguinte. Para dimensionar esse potencial em escala global, a Figura 1 ilustra a distribuição das florestas mundiais, evidenciando a expressividade da cobertura florestal do território brasileiro em comparação aos demais países

Figura 1 - Distribuição das florestas mundiais.



Fonte: FAO (2020).

Segundo a FAO (2020), o Brasil concentra aproximadamente 12% da cobertura florestal mundial, posicionando-se entre os países com maior disponibilidade de recursos florestais. Essa condição favorece o desenvolvimento da cadeia produtiva da madeira e amplia seu potencial de uso em aplicações estruturais.

Sob essa perspectiva, observa-se uma ampliação do uso da madeira na construção civil brasileira, especialmente em sistemas estruturais que demandam maior eficiência e confiabilidade. Essa evolução reforça a necessidade de estudos voltados à compreensão do comportamento estrutural desses sistemas, com destaque para a estimativa da rigidez e da distribuição de tensões em elementos compostos.

2.3 DISPONIBILIDADE FLORESTAL E IMPLICAÇÕES ESTRUTURAIS

A disponibilidade de recursos florestais é um fator relevante para o uso da madeira na construção civil, pois influencia diretamente sua viabilidade em diferentes sistemas estruturais. No Brasil, a presença de florestas nativas e plantadas amplia o potencial de aplicação do material, favorecendo soluções construtivas baseadas em recursos locais (MMA, 2024; IBÁ, 2024).

Nos últimos anos, observa-se o crescimento das áreas de florestas plantadas no país, com predominância dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, amplamente utilizados pela indústria madeireira nacional. A evolução dessas áreas é mostrada na Figura 2.

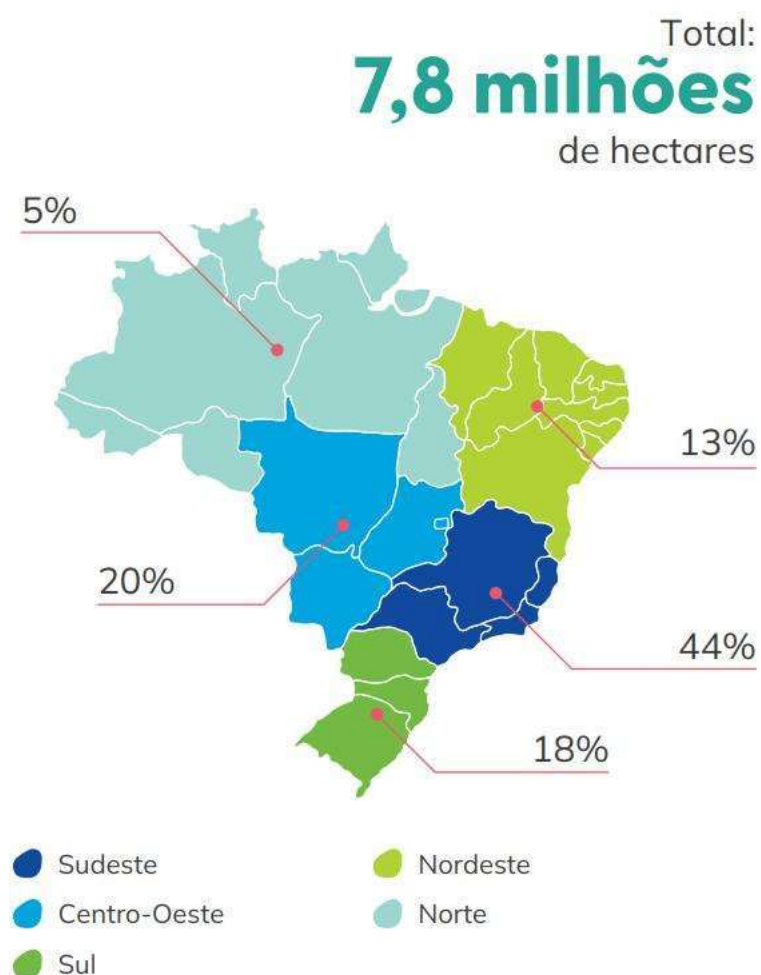
Figura 2 – Área de florestas plantadas por espécie no Brasil (2015–2023).



Fonte: IBÁ (2024).

Observa-se que o *Eucalyptus* concentra a maior parcela das áreas plantadas no país, seguido pelo *Pinus*, evidenciando a predominância dessas espécies na cadeia produtiva florestal brasileira (IBÁ, 2024). Além da predominância em área cultivada, essas espécies apresentam distribuição regional distinta no território nacional, influenciada por fatores climáticos, logísticos e produtivos. As Figuras 3 e 4 apresentam a distribuição regional das áreas plantadas de eucalipto e pinus no Brasil.

Figura 3 – Área de florestas plantadas por espécie no Brasil (2015–2023) em milhões de hectares.



Fonte: IBÁ (2024).

Figura 4 – Florestas plantadas com pinus no Brasil por região.



Fonte: IBÁ (2024).

Observa-se maior concentração do cultivo de eucalipto nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, enquanto o pinus apresenta predominância na região Sul. Essa distribuição está associada às condições edafoclimáticas favoráveis e à consolidação da cadeia produtiva florestal nessas regiões (IBÁ, 2024).

Entretanto, a diversidade de espécies e a variabilidade de suas propriedades físicas e mecânicas representam desafios para a engenharia estrutural. A limitação de dados consolidados sobre o comportamento mecânico de muitas espécies, especialmente nativas, dificulta sua aplicação em projetos estruturais que demandam maior previsibilidade e controle de desempenho (Pfeil; Pfeil, 2017; ABNT, 2022).

Nesse contexto, observa-se uma predominância do uso de espécies provenientes de florestas plantadas, como aquelas do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*, que apresentam maior padronização e disponibilidade de dados

técnicos, favorecendo sua utilização em aplicações estruturais (IBÁ, 2024). Essa condição contribui para a consolidação de práticas construtivas mais controladas, ainda que limite, em certa medida, o aproveitamento da diversidade florestal existente.

Dessa forma, a disponibilidade de matéria-prima, associada à necessidade de caracterização adequada de suas propriedades, influencia diretamente o desenvolvimento de soluções estruturais em madeira. A superação dessas limitações está relacionada ao avanço de estudos experimentais e à consolidação de modelos capazes de representar o comportamento do material com maior precisão.

2.4 MADEIRA MACIÇA PARA USO ESTRUTURAL

A madeira maciça constitui um material estrutural de comportamento mecânico complexo, cuja resposta está diretamente relacionada à sua estrutura anatômica e à orientação das fibras. Diferentemente dos materiais isotrópicos, as propriedades da madeira variam conforme a direção de solicitação, exigindo uma abordagem específica na análise estrutural (Kollmann; Côté, 1968; Bodig; Jayne, 1982; *Forest Products Laboratory*, 2010).

A compreensão das propriedades da madeira é fundamental para a avaliação da rigidez e da distribuição de tensões em elementos submetidos à flexão. A variabilidade intrínseca da madeira, associada a fatores anatômicos, ambientais e de crescimento, exige a adoção de critérios normativos para sua adequada caracterização (Dinwoodie, 2004; CEN, 2009; ABNT, 2022), constituindo base teórica para a análise estrutural de vigas de madeira maciça.

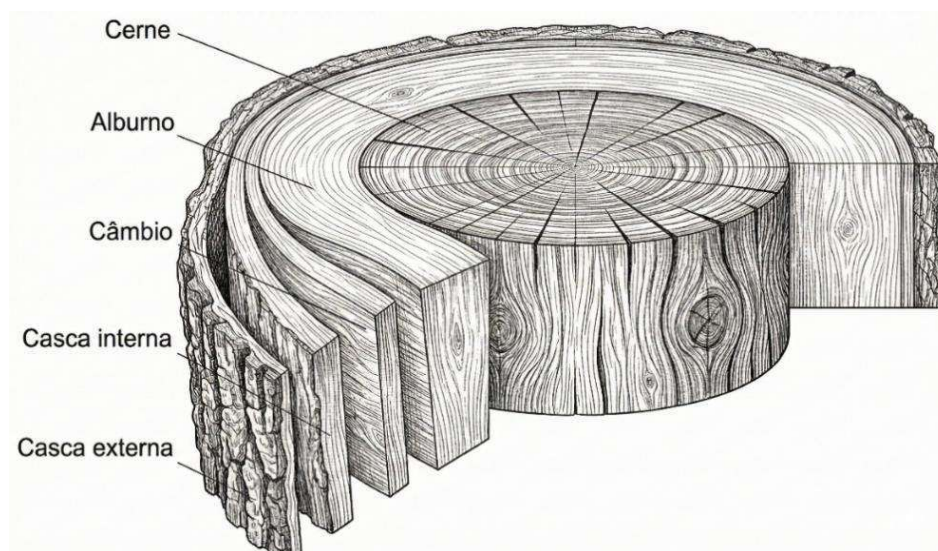
2.4.1 Estrutura anatômica e comportamento ortotrópico

A madeira maciça utilizada em estruturas é proveniente, majoritariamente, do desdobro de toras, processo no qual o tronco das árvores é transformado em peças com dimensões comerciais destinadas à construção civil. Esse material

apresenta organização celular decorrente do crescimento exógeno das árvores, responsável pela formação dos anéis de crescimento e pela orientação das fibras ao longo do tronco. Essas características anatômicas influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, influenciando a resistência, a rigidez e o comportamento estrutural do material (Dinwoodie, 2004; Pfeil; Pfeil, 2017).

No corte transversal do tronco, distinguem-se diferentes regiões anatômicas, dentre as quais se destacam o cerne e o alburno. O cerne corresponde à região interna, composta por células inativas, enquanto o alburno constitui a camada mais externa e fisiologicamente ativa. Essas diferenças estruturais podem influenciar propriedades como densidade, permeabilidade e durabilidade, com implicações diretas no desempenho estrutural da madeira (Coradin; Camargos, 2002; Pfeil; Pfeil, 2017). A organização dessas camadas no tronco está ilustrada na Figura 5, evidenciando as principais regiões anatômicas da madeira.

Figura 5 – Representação esquemática do corte transversal do tronco, evidenciando as principais regiões anatômicas da madeira.



Fonte: Adaptado de *Forest Products Laboratory* (2010).

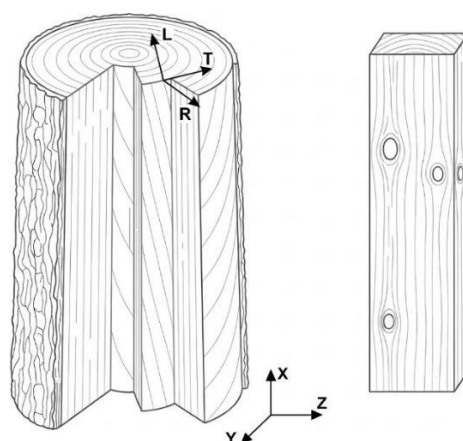
Nota: Imagem aprimorada graficamente com o auxílio de Inteligência Artificial (Nano Banana).

As propriedades da madeira variam em função da espécie, das condições de crescimento e da presença de irregularidades naturais, tais como nós e inclinação das fibras (Bell, 2022; Gillis, 1972; Ritter, 1990). Essa variabilidade intrínseca resulta na dispersão estatística dos parâmetros mecânicos, justificando a adoção de valores característicos no dimensionamento estrutural.

Do ponto de vista mecânico, a madeira apresenta comportamento anisotrópico, com propriedades distintas em quaisquer direções, destacando-se nas direções ortogonais entre si, longitudinal, radial e tangencial, que constituem as direções principais ao se adotar o modelo ortotrópico para a madeira. A direção longitudinal acompanha o sentido predominante das fibras, enquanto as direções radial e tangencial estão relacionadas à disposição dos anéis de crescimento no tronco da árvore.

A Figura 6 ilustra esquematicamente as direções principais da madeira em relação à geometria do tronco e a um elemento estrutural obtido a partir do desdobro da madeira. No caso do tronco, as direções principais estão associadas a um sistema de coordenadas local decorrente da geometria cilíndrica natural da árvore. Já em elementos estruturais serrados, adota-se frequentemente uma simplificação ortotrópica retolinear para fins de modelagem e análise estrutural (Olsson *et al.*, 2013).

Figura 6 – Direções principais da madeira: longitudinal, radial e tangencial.



Fonte: Olsson *et al.* (2013).

Nota: Imagem aprimorada graficamente com o auxílio de Inteligência Artificial (Nano Banana).

No contexto da análise estrutural, o módulo de elasticidade longitudinal constitui o parâmetro mais relevante para a avaliação da rigidez de elementos submetidos à flexão, enquanto a resistência ao cisalhamento e a resistência à flexão (compreendida como uma combinação das resistências à compressão e à tração) são fundamentais para a verificação da capacidade resistente, sendo esta última a abordagem direta adotada por documentos normativos recentes como a ABNT NBR 7190 e o *Eurocode 5* (Kollmann; Côté, 1968; ABNT, 2022).

2.4.2 Propriedades Físicas e Mecânicas

As propriedades físicas e mecânicas da madeira fundamentam a análise e o dimensionamento estrutural, pois definem a resposta do material às solicitações atuantes e estão diretamente associadas à sua constituição anatômica (ABNT, 2022; Marini *et al.*, 2021; Ozelton; Baird, 2006).

O comportamento físico-mecânico da madeira é influenciado por fatores como estrutura anatômica, massa específica, posição da peça no tronco, presença de defeitos e teor de umidade. Embora a classificação botânica em coníferas e folhosas seja frequentemente associada, respectivamente, às madeiras macias e duras, essa distinção não é suficiente, isoladamente, para estimar sua resistência, devido à elevada variabilidade intra e interespecífica (ABNT, 2022; Pfeil; Pfeil, 2017).

Dentre os parâmetros físicos, a massa específica aparente, definida como a razão entre massa e volume, apresenta correlação com a resistência e a rigidez, sendo frequentemente utilizada como indicador dessas propriedades (Dias; Lahr, 2004). Além disso, variações no teor de umidade e a presença de defeitos naturais podem alterar significativamente o comportamento mecânico da madeira (Branco *et al.*, 2014; Bauer, 2015).

Para fins de projeto, a ABNT NBR 7190-1:2022 estabelece condições de referência para a determinação dessas propriedades, bem como critérios de correção para ensaios realizados em condições distintas, contribuindo para maior confiabilidade e padronização da análise estrutural. Assim, a compreensão

dessas propriedades é essencial para a avaliação do comportamento mecânico da madeira, especialmente em elementos submetidos à flexão. As principais propriedades mecânicas da madeira, seus respectivos símbolos e aplicações no contexto estrutural são apresentadas na Tabela 1. Destacam-se, dentre essas propriedades, o módulo de elasticidade longitudinal e as resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento.

Tabela 1 – Classes de resistência da madeira obtidas em ensaios com peças estruturais.

Propriedade	Símbolo	Aplicação estrutural
Flexão	$f_{b,k}$	Verificação à flexão (ELU)
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	Regiões tracionadas em elementos estruturais
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	Ligações e regiões com tensões transversais
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	Pilares e regiões comprimidas
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	Apoios e zonas de contato
Cisalhamento	$f_{v,k}$	Regiões submetidas a esforço cortante e ligações

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1:2022.

As propriedades elásticas da madeira, diretamente relacionadas à deformação e à rigidez dos elementos estruturais, estão apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 – Propriedades elásticas da madeira em peças estruturais

Propriedade	Símbolo	Aplicação estrutural
Módulo de elasticidade a 0°	$E_{0,m}$	Determinação da rigidez à flexão (EI)
Módulo de elasticidade a 0°	$E_{0,05}$	Verificações de segurança (ELS/ELU)
Módulo de elasticidade a 90°	$E_{90,m}$	Deformações transversais/localizadas
Módulo de elasticidade transversal	G_m	Deformações por cisalhamento

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1:2022.

Por sua vez, as propriedades físicas da madeira, como a densidade, influenciam diretamente seu comportamento mecânico e sua classificação, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas da madeira.

Propriedade	Símbolo	Aplicação estrutural
Densidade característica	ρ_k	Estimativa de resistência e classificação do material
Densidade média	ρ_m	Avaliação de massa e comportamento físico

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1:2022.

A ABNT NBR 7190-1:2022 organiza as propriedades da madeira em classes de resistência, possibilitando o uso de parâmetros padronizados no dimensionamento estrutural. A Tabela 4 apresenta os valores de referência para propriedades mecânicas de espécies de florestas nativas, conforme a norma.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas de espécies de florestas nativas

CLASSE	f_{c0k}	$f_{v0,k}$	$E_{c0,med}$	$\rho_{12\%}$ (kg/m ³)
D20	20	4	10.00	500
D30	30	5	12.00	625
D40	40	6	14.500	750
D50	50	7	16.500	850
D60	60	8	19.500	1.000

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1:2022.

Para madeiras provenientes de florestas plantadas, a norma apresenta valores característicos organizados por classes de resistência, permitindo uma caracterização mais detalhada do material. Nesse contexto, a Tabela 5 reúne as propriedades mecânicas e elásticas associadas a essas classes, incluindo as resistências, os módulos de elasticidade e a densidade.

Tabela 5 – Valores característicos das propriedades mecânicas e físicas de madeiras de florestas plantadas por classe de resistência.

CLASSE	$f_{b,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$
C20	20	12	0,4	19	2,3	3,6
C30	30	18	0,4	23	2,7	4,0
C40	40	24	0,4	26	2,9	4,0
C50	50	30	0,4	29	3,2	4,0
D30	30	18	0,6	23	8,0	4,0
D40	40	24	0,6	26	8,3	4,0
D50	50	30	0,6	29	9,3	4,0
D60	60	36	0,6	32	11	4,5
D70	70	42	0,6	34	13,5	5,0

CLASSE	$E_{0,m}$	$E_{0,05}$	$E_{90,m}$	G_m	ρ_k	ρ_m
C20	9,5	6,4	0,3	0,6	330	390
C30	12	8,0	0,4	0,7	380	460
C40	14	9,4	0,5	0,9	420	500
C50	16	11	0,5	1,0	460	550
D30	11	9,2	0,7	0,7	530	640
D40	13	11	0,9	0,8	560	660
D50	14	12	0,9	0,9	620	750
D60	17	14	1,1	1,1	700	840
D70	20	16,8	1,33	1,25	900	1080

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1:2022.

Conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, as propriedades da madeira podem ser expressas por valores médios, característicos e de cálculo, definidos segundo os critérios estabelecidos na norma. O valor médio corresponde à média aritmética dos resultados experimentais, enquanto o valor característico inferior está associado ao percentil de 5%. Por outro lado, o valor de cálculo é obtido por meio da aplicação de coeficientes de modificação e de minoração, sendo utilizado nas verificações de estados-limite.

Nesse contexto, os valores apresentados nas tabelas anteriores representam propriedades características da madeira, amplamente empregadas no dimensionamento estrutural. O desempenho estrutural da madeira maciça depende diretamente das propriedades de resistência e rigidez adotadas em projeto. Dentre esses parâmetros, o módulo de elasticidade longitudinal assume papel central na análise de elementos submetidos à flexão, servindo de base para o estudo das vigas apresentado na seção seguinte.

Aquino *et al.* (2022), Lahr *et al.* (2021) e Wolenski *et al.* (2019) apontam divergências pontuais entre valores normativos e resultados experimentais, evidenciando a influência de fatores como o teor de umidade e variações mais significativas em propriedades como o cisalhamento e a tração paralela às fibras. Tais evidências reforçam a importância da verificação experimental complementar, quando aplicável.

2.4.3 Comportamento mecânico de elementos de madeira maciça

O comportamento mecânico de elementos de madeira maciça submetidos a carregamentos transversais é caracterizado pelo desenvolvimento simultâneo de tensões normais associadas ao momento fletor e tensões tangenciais de esforço cortante. A análise pode ser conduzida com base na teoria clássica da flexão de vigas, admitindo comportamento elástico-linear e pequenas deformações (Ozelton; Baird, 2006; Ritter, 1990).

Nessas condições, as tensões normais variam linearmente ao longo da altura da seção, sendo expressas pela equação 2.1:

$$\sigma = \frac{M\bar{y}}{I} \quad 2.1$$

em que M é o momento fletor, $\bar{y}$ é a distância ao eixo neutro e I o momento de inércia da seção transversal em relação ao centro de gravidade.

A rigidez à flexão é governada pelo produto EI , sendo E o módulo de elasticidade longitudinal da madeira. Esse parâmetro controla a deformação do elemento sob carregamento e constitui referência central na análise estrutural, conforme estabelecido pela ABNT NBR 7190-1:2022.

Além das tensões normais, desenvolvem-se tensões de cisalhamento associadas ao esforço cortante, com valores máximos próximos à linha neutra. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras é, portanto, considerada nas verificações estruturais, especialmente em regiões sujeitas a elevados esforços cortantes.

Em elementos compostos, essas tensões de cisalhamento assumem papel ainda mais relevante, uma vez que estão diretamente associadas à transferência de esforços entre os componentes da seção. Nesse sentido, o cisalhamento na interface entre os elementos influencia o desempenho das ligações mecânicas, como conectores do tipo prego, afetando o grau de interação entre as partes e, conseqüentemente, a rigidez global do sistema estrutural.

Dessa forma, os fundamentos da flexão e do cisalhamento em vigas de madeira maciça constituem a base para a análise de sistemas compostos, nos quais a interação entre elementos passa a ser um fator determinante no comportamento estrutural.

2.5 VIGAS DE MADEIRA COMPOSTAS

As vigas de madeira compostas são formadas pela associação de duas ou mais peças que atuam conjuntamente sob solicitações, predominantemente

de flexão. Essa configuração permite o aumento do momento de inércia e da rigidez da seção, viabilizando o uso de peças serradas de menores dimensões (Pfeil; Pfeil, 2017; Bodig; Jayne, 1993).

Nesse contexto, vigas compostas formadas por peças de madeira serrada associadas por conectores mecânicos apresentam ampla aplicação estrutural em sistemas com seção em perfil T, permitindo a obtenção de seções mais robustas a partir de elementos de dimensões comerciais (Góes, 2002).

Entre as principais vantagens desses sistemas, destacam-se a possibilidade de vencer maiores vãos, o melhor aproveitamento da matéria-prima, a racionalização do material e a redução da influência de defeitos naturais. Além disso, esses elementos apresentam menor peso próprio em comparação às soluções maciças equivalentes, bem como maior facilidade de transporte e montagem (Pfeil; Pfeil, 2017).

A união entre as peças pode ser realizada por meio de ligações contínuas ou discretas. Nas ligações contínuas por adesivos, o comportamento aproxima-se do monolítico, com deslizamentos desprezíveis na interface. Por outro lado, nas ligações discretas, mecânicas, devem ser considerados os deslizamentos relativos entre as peças, uma vez que influenciam diretamente a rigidez global do sistema (CEN, 2005).

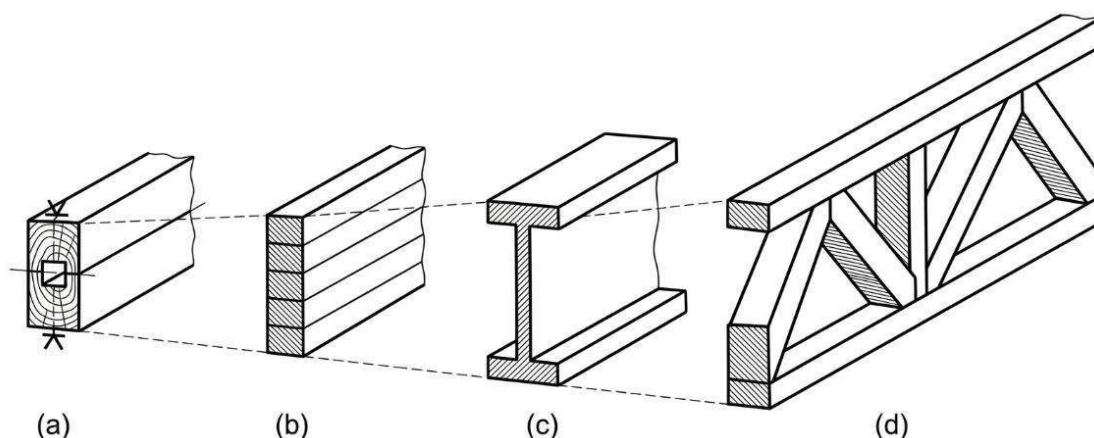
No caso de ligações por pinos metálicos, como pregos e parafusos, esse deslizamento está diretamente associado à rigidez da ligação, resultando na redução da rigidez efetiva da viga em relação a uma seção plenamente solidarizada (Góes, 2002).

Nesse contexto, o desempenho estrutural das vigas compostas depende não apenas das propriedades da madeira, mas também da rigidez das ligações, que condiciona a transferência de esforços e a distribuição de tensões na seção transversal. Em particular, em sistemas com conectores mecânicos, como pregos, a deformação da ligação pode resultar em interação parcial entre os elementos.

A Figura 7 apresenta diferentes tipologias de vigas compostas, incluindo sistemas formados por madeira serrada, elementos laminados, vigas com alma

alta e sistemas treliçados, evidenciando a diversidade de soluções estruturais possíveis.

Figura 7 – Tipos de vigas compostas: (a) viga composta de madeira maciça; (b) viga lamelada colada; (c) viga com alma esbelta; (d) viga em treliça.



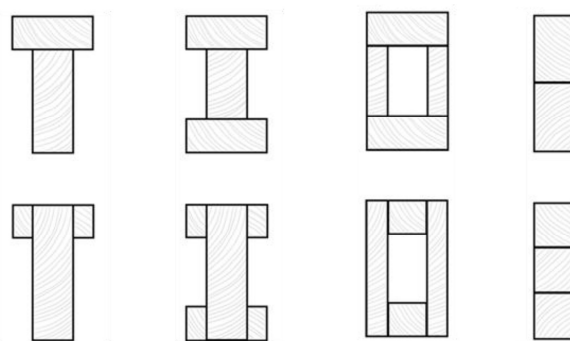
Fonte: Adaptado de Gehri (1988).

A Figura 7 apresenta diferentes soluções de vigas em madeira, mostrando como o material evolui de formas mais simples para configurações estruturais mais eficientes. Em (a), observa-se a viga de madeira maciça, com seção retangular, que pode ser combinada para formar outras geometrias, como T, I ou caixão. Em (b), aparece a madeira lamelada colada, formada por camadas sobrepostas, que melhora a uniformidade e o desempenho mecânico da peça.

Na sequência, em (c), é apresentada a viga com seção em I, que otimiza o uso do material ao concentrar resistência onde ela é mais necessária, aumentando o momento de inércia sem elevar significativamente o peso. Por fim, em (d), a viga em treliça evidencia uma solução ainda mais eficiente para grandes vãos, utilizando elementos diagonais para distribuir melhor os esforços. De modo geral, a figura ilustra como diferentes arranjos estruturais, incluindo o uso de produtos engenheirados como a MLC e painéis como o OSB, ampliam as possibilidades de aplicação e desempenho das vigas de madeira.

A Figura 8 apresenta diferentes configurações de seções compostas em madeira, destacando arranjos usuais empregados em elementos estruturais. Observam-se seções do tipo T e I, formadas pela associação de peças serradas, além de seções do tipo caixão, caracterizadas por uma geometria fechada que aumenta a rigidez. Também são indicadas composições verticais por camadas, representando soluções com peças sobrepostas.

Figura 8 – Exemplos de configurações de seções transversais compostas com diferentes formas de solidarização entre elementos.



Fonte: Adaptado de Góes (2002).

Nota-se que essas composições podem ser executadas por diferentes sistemas de ligação, como pregos, parafusos ou adesivos, o que influencia diretamente o comportamento estrutural do conjunto. De modo geral, as ligações podem ser classificadas em dois grupos: discretas (mecânicas) e contínuas (adesivas). As ligações contínuas por adesivo são consideradas rígidas, pois não permitem deslizamentos significativos entre as partes unidas, enquanto as ligações mecânicas apresentam deformação, devendo suas deformações ser consideradas na análise estrutural (Góes, 2002).

2.6 COMPORTAMENTO E ANÁLISE DE VIGAS COMPOSTAS

Em estruturas com vãos médios e longos, o Estado Limite de Serviço (ELS) tende a governar o dimensionamento, tornando a rigidez efetiva à flexão um dos fatores mais relevantes no projeto de elementos compostos. Essa

propriedade é influenciada tanto pelas características da seção transversal quanto pelo comportamento das conexões, podendo ser avaliada com base na teoria de vigas compostas (Zhang *et al.*, 2022).

A teoria de vigas de Euler-Bernoulli é amplamente utilizada na engenharia civil para descrever a relação entre o carregamento aplicado, a rigidez e a deformação da viga, conforme apresentado na Equação 2.2. Essa teoria baseia-se na hipótese de que as seções transversais permanecem planas e indeformadas após o carregamento. No entanto, em vigas compostas com ligações semirrígidas, essa hipótese apresenta limitações, devido à ocorrência de deslizamento relativo na interface entre os elementos (Auclair, 2020).

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 \delta(x)}{dx^2} \right) = q(x) \quad 2.2$$

em que E representa o módulo de elasticidade do material, I corresponde ao momento de inércia em relação ao eixo de flexão, $\delta(x)$ indica o deslocamento transversal da viga ao longo do comprimento, e $q(x)$ representa a carga distribuída atuante.

Nesse contexto, Möhler (1956) propôs um modelo para análise de vigas compostas com interação parcial, considerando explicitamente o deslizamento na interface entre os elementos. Sua abordagem permite estimar tanto a rigidez quanto os deslocamentos dessas estruturas de forma mais representativa. Baseada em equações diferenciais, essa formulação possibilita avaliar a eficiência das ligações, sendo amplamente empregada em sistemas com comportamento semirrígido e servindo de base para normas como a BS EN 1995-1-1 (2004).

A relevância da consideração da rigidez das ligações em vigas compostas também é evidenciada em estudos experimentais, como o de Góes (2002), que analisou vigas de madeira serrada com seção composta I solidarizadas por pregos. O autor demonstra que o deslizamento relativo entre os elementos, associado à deformação dos conectores, resulta na redução da rigidez efetiva

da viga em relação a uma seção monolítica, destacando a importância da adequada representação desse fenômeno nos modelos de análise.

Diferentemente de sistemas industrializados, como os *I-joists*, que utilizam ligações adesivas e materiais como OSB ou LVL, as vigas compostas formadas por peças de madeira serrada associadas por conectores mecânicos apresentam comportamento distinto, caracterizado pela deformação das ligações e pela interação parcial entre os elementos (Calil Junior *et al.*, 2019; Pfeil; Pfeil, 2017).

Esse fenômeno de escorregamento na interface dos componentes resulta em uma rigidez efetiva inferior à de uma seção perfeitamente solidária, exigindo considerações específicas quanto ao módulo de deslizamento dos conectores, conforme preconizado pela NBR 7190 (ABNT, 2022) e pelo Eurocode 5 (CEN, 2004).

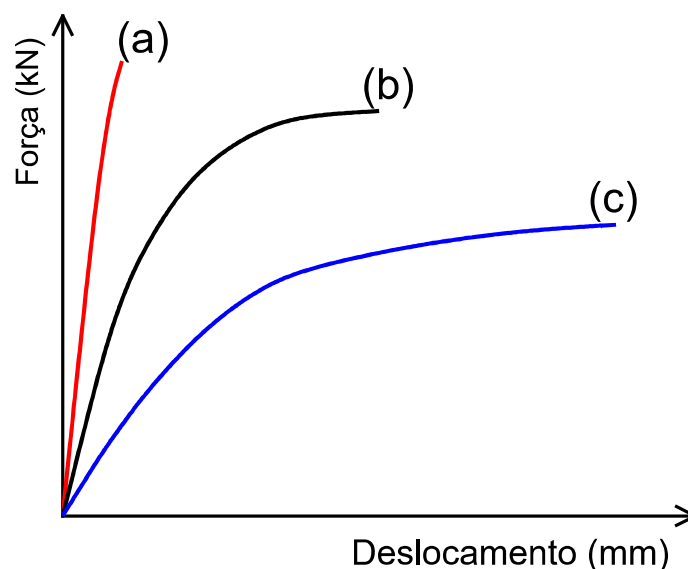
2.6.1 Comportamento e Rigidez das Ligações Mecânicas

A união entre peças estruturais de madeira é essencial para a adequada transferência de esforços e pode ser realizada por diferentes sistemas de fixação. Segundo a ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022), essas ligações podem ser classificadas em quatro categorias: ligações por pinos metálicos, como pregos e parafusos; ligações por anéis metálicos e chapas com dentes estampados; ligações por sambladuras ou entalhes e ligações coladas. Dentre essas tipologias, os elementos de fixação com geometria cilíndrica e comprimento significativamente superior ao diâmetro são definidos na literatura como pinos metálicos (Mendes, 1994).

O comportamento mecânico da união depende do tipo de fixação empregada. Segundo Pfeil e Pfeil (2017), as ligações coladas conferem elevada rigidez e comportamento elastofrágil à estrutura, enquanto as ligações por pinos metálicos apresentam comportamento elastoplástico. Essa diferença está associada à flexibilidade das ligações mecânicas, que permite o deslizamento relativo entre as peças conectadas quando submetidas a esforços na interface. Essa diferença de resposta mecânica pode ser observada na Figura 9, que

compara a rigidez das ligações coladas com a capacidade de escorregamento dos pinos e anéis metálicos.

Figura 9 – Diagrama força × deslocamento para ligações em madeira: (a) colada; (b) com anel metálico; e (c) com pino metálico.



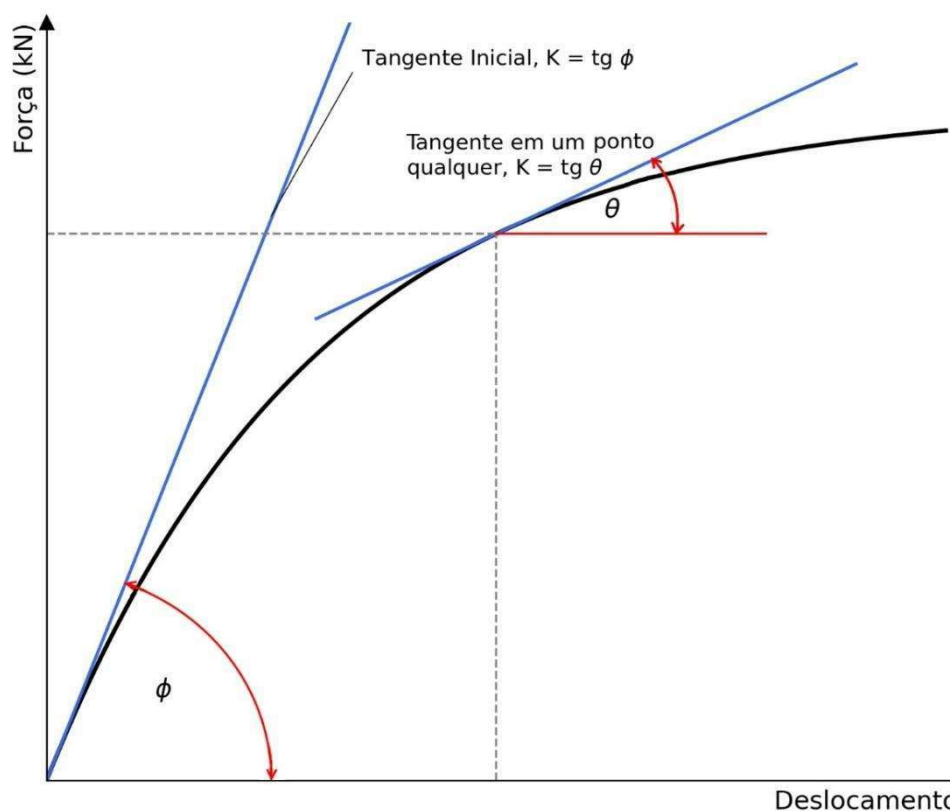
Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2017).

Na análise isolada de uma ligação por pino metálico sob cisalhamento, a relação entre a força aplicada e o deslizamento não é linear em toda a sua extensão. Para quantificar a rigidez dessa união, utiliza-se o conceito de módulo de deslizamento (K), que representa matematicamente a razão entre a força aplicada e o deslocamento relativo gerado, correspondendo geometricamente à tangente da curva de resposta.

Conforme ilustrado na Figura 10, é possível destacar duas abordagens para esse módulo durante o carregamento: o módulo de deslizamento inicial, definido pela inclinação do trecho elástico no início da curva ($K = \tan \phi$), frequentemente adotado como o módulo em serviço (K_{ser}); e o módulo de deslizamento em um ponto qualquer, avaliado pela tangente à curva em um nível de carga específico na fase não linear ($K = \tan \theta$). Após a fase elástica, a ligação adentra um regime plástico, marcado por deslocamentos crescentes sob

incrementos de carga progressivamente menores, até que ocorra a ruptura da união.

Figura 10 – Curva típica de força versus deslocamento para ligações com pinos metálicos.



Fonte: Goés (2022).

Mecanicamente, o módulo de deslizamento (K_{ser}) traduz a taxa de incremento de carga necessária para produzir uma unidade de deslizamento relativo na fase linear. Na ausência de dados experimentais diretos de ensaios físicos, o valor do Método Gama a adotar depende do estado limite em análise.

Para a verificação dos deslocamentos globais da estrutura (Estados Limites de Serviço - ELS), assume-se o módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}). De acordo com as diretrizes da Tabela 17 da ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022), para ligações mecânicas efetuadas por meio de pinos, parafusos (com porca e arruela ou autoatarraxantes) e pregos com pré-furação, este módulo é determinado através da expressão empírica apresentada na Equação 3.5:

$$K_{ser} = \rho_{med}^{1,5} \cdot \frac{d}{23} \quad 2.3$$

Em que ρ é a densidade média da classe de resistência e d corresponde ao diâmetro do conector.

Esse comportamento semirrígido das ligações atua como o principal parâmetro de entrada na aplicação de modelos analíticos de interação parcial. O módulo de deslizamento dita a eficiência mecânica da união, influenciando diretamente a formulação de propriedades efetivas das vigas compostas.

Além das abordagens teóricas clássicas, os métodos analíticos baseados em teorias físicas são amplamente utilizados na estimativa dessas propriedades estruturais, como a rigidez à flexão, as deformações e a distribuição de tensões. A análise de elementos compostos de madeira, como a madeira lamelada colada (MLC) e perfis formados por peças serradas, requer modelos que considerem tanto as características do material quanto sua geometria e configuração construtiva (Steiger; Gehri, 2011).

Esses métodos são amplamente empregados no dimensionamento de vigas e painéis compostos, especialmente quando se busca uma comparação direta e rápida com resultados obtidos por simulações numéricas. Além disso, permitem avaliar a influência de variáveis como o tipo de conexão entre camadas, a orientação das fibras e os efeitos do cisalhamento transversal.

Dentre os modelos disponíveis na literatura, destacam-se aqueles de maior aplicação e relevância: o Método Gama, a Teoria de Vigas Compostas, a Analogia de Cisalhamento, a Teoria de Vigas de Timoshenko e o Método K. Cada abordagem apresenta particularidades quanto à formulação e ao nível de precisão, sendo aplicada tanto no dimensionamento estrutural quanto na validação de modelos numéricos e experimentais.

2.6.2 Método Gama para análise de vigas compostas

O Método Gama fundamenta-se na teoria de vigas compostas com interação parcial proposta por Möhler (1956), que analisou o comportamento de

elementos formados por camadas conectadas por ligações com rigidez finita. Posteriormente, Blass e Görlacher em 2003 sistematizaram essa abordagem, originando a formulação simplificada conhecida como Método Gama (Christovasilis et al., 2016; Popoviski et al., 2019).

O método foi incorporado ao Eurocode 5 (CEN, 2004) e, mais recentemente, à ABNT NBR 7190-1:2022, sendo amplamente utilizado para a determinação da rigidez efetiva à flexão (EI_{ef}) e vigas compostas com conectores distribuídos ao longo do comprimento e caracterizados por sua rigidez ao deslizamento (K_i). No modelo, cada componente longitudinal é tratado como uma viga individual, sendo a interação entre elas representada por conectores deformáveis. O deslizamento relativo entre as partes reduz a rigidez global em relação à condição monolítica, sendo esse efeito considerado por meio do coeficiente de eficiência da ligação γ .

O coeficiente γ varia entre 0 e 1, refletindo o grau de interação entre os elementos conectados. Quando $\gamma = 0$, não há transferência de esforços entre as partes, e o comportamento da viga corresponde ao de elementos independentes.

Por outro lado, quando $\gamma = 1$, ocorre interação total, típica de ligações rígidas, em que a rigidez global considera tanto as contribuições individuais dos materiais quanto o efeito da composição da seção.

Na prática, as ligações apresentam valores intermediários de γ , caracterizando a interação parcial entre os componentes (Müller, 2020). Para sua determinação em seções compostas, são considerados parâmetros como a geometria dos elementos, a rigidez ao cisalhamento da conexão (K), o módulo de elasticidade dos materiais e o vão efetivo da viga (L_{ef}) e o espaçamento entre conectores (s_i).

2.6.3 Métodos alternativos de análise

A teoria de vigas compostas é aplicada à análise de elementos formados por partes unidas mecanicamente, considerando a interação parcial entre as camadas. A eficiência dessa interação depende da rigidez da ligação, podendo

a seção atuar de forma monolítica ou apresentar deslizamento relativo. Quando a ligação é suficientemente rígida, admite-se comportamento próximo à interação total, permitindo a aplicação do método da seção transformada para a determinação da rigidez equivalente (Pfeil; Pfeil, 2017; ABNT, 2022).

Entre os métodos alternativos ao Método Gama, destaca-se a analogia de cisalhamento, proposta por Kreuzinger em 1999, que considera explicitamente os efeitos do cisalhamento na estimativa da rigidez efetiva. A teoria de vigas de Timoshenko, por sua vez, estende a formulação clássica de Euler-Bernoulli ao incluir as deformações por cisalhamento transversal.

Dessa forma, torna-se mais adequada para vigas de madeira maciça com baixa esbeltez ou seções elevadas, nas quais os efeitos de cisalhamento não podem ser desprezados, especialmente em elementos com relação comprimento/altura (L/h) reduzida (Christovasilis *et al.*, 2016; Popovski *et al.*, 2019).

O uso de seções compostas em aplicações estruturais tem se intensificado, especialmente em sistemas que buscam maior eficiência estrutural e otimização do material. Essas soluções permitem melhor aproveitamento das propriedades mecânicas da madeira, possibilitando o desenvolvimento de elementos mais esbeltos e com maior capacidade resistente.

Os conceitos apresentados neste capítulo consolidam o embasamento teórico necessário para a interpretação do comportamento estrutural de vigas de madeira maciça e compostas. A compreensão das propriedades do material, dos mecanismos resistentes e da influência das ligações na rigidez global constitui a base para as análises desenvolvidas nos capítulos seguintes.

2.6.4 Síntese da revisão e implicações para o estudo

Os estudos apresentados evidenciam que o comportamento de vigas compostas de madeira é fortemente influenciado pela rigidez das ligações e pelo nível de interação entre os elementos. Nesse contexto, a consideração da interação parcial torna-se essencial para a adequada representação do comportamento estrutural. Modelos analíticos, como o Método Gama, a analogia

de cisalhamento e a teoria de vigas de Timoshenko, têm sido empregados na estimativa da rigidez à flexão, das deformações e da distribuição de tensões, apresentando diferentes níveis de complexidade e precisão.

Estudos experimentais, como o de Góes (2002), demonstram que, em vigas compostas formadas por peças de madeira serrada unidas por conectores mecânicos, como pregos, o deslizamento relativo entre os elementos reduz a rigidez efetiva em relação a uma seção plenamente solidarizada. Esse comportamento reforça a importância da adequada consideração da deformação das ligações nos modelos de análise.

Observa-se, no entanto, que parte significativa dos estudos disponíveis na literatura concentra-se em sistemas com maior grau de rigidez ou no uso de materiais engenheirados, como madeira lamelada colada (MLC) e vigas com alma em painéis estruturais. Em contrapartida, ainda são limitadas as

investigações que avaliam, de forma comparativa, a precisão de modelos analíticos na estimativa da rigidez e das tensões em vigas compostas formadas por madeira serrada e conectores mecânicos, especialmente quando analisadas em conjunto com modelos numéricos mais refinados.

Dessa forma, identifica-se uma lacuna relacionada à avaliação do desempenho de modelos simplificados, como o Método Gama, na representação do comportamento estrutural de vigas compostas com interação parcial. Nesse sentido, o presente trabalho propõe avaliar a capacidade do Método Gama na estimativa da rigidez à flexão e das componentes de tensão em vigas de madeira composta de seção T, por meio da comparação com resultados obtidos a partir de modelagem numérica em elementos finitos, propondo uma correção por meio de uma equação ajustada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido com base em análises paramétricas realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software Abaqus/CAE, versão 2019. A investigação concentrou-se na avaliação do comportamento estrutural de vigas compostas madeira–madeira com seção transversal em perfil T, considerando a influência dos parâmetros geométricos da seção e das características dos conectores mecânicos.

Inicialmente, foi adotado um estudo experimental de referência, utilizado como base para a definição das propriedades mecânicas dos materiais, das características dos conectores e das configurações geométricas empregadas nos modelos numéricos. Em seguida, realizou-se a calibração do modelo numérico a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura, com o objetivo de verificar sua capacidade de representar adequadamente o comportamento estrutural da viga analisada.

Após a calibração, foi desenvolvido um estudo paramétrico envolvendo diferentes combinações de variáveis geométricas da seção transversal e dos conectores mecânicos, totalizando 512 configurações analisadas. Por fim, foram aplicados procedimentos de análise e interpretação dos resultados, incluindo o Método Gama para estimativa da rigidez à flexão e das tensões normais, bem como a avaliação estatística da concordância entre os métodos analisados e o uso de regressão simbólica para identificação de relações funcionais entre as variáveis investigadas.

3.1 MATERIAIS

3.2.1 Estudo experimental de referência

A validação do modelo numérico desenvolvido nesta pesquisa fundamenta-se nos dados experimentais obtidos por Giongo *et al.* (2012), cujo trabalho teve como objetivo central a análise de técnicas de recuperação e reforço de pavimentos de madeira antigos através de sistemas mistos madeira–madeira. No referido estudo,

foram investigadas quatro configurações distintas de conexão entre as vigas e os painéis de reforço, variando a inclinação e a disposição dos parafusos.

Para fins de calibração do modelo numérico proposto nesta dissertação, adotou-se como referência a configuração experimental em que os conectores foram posicionados verticalmente, formando ângulo de 90° com a superfície da viga. Essa escolha permitiu estabelecer uma condição de referência compatível com o modelo analisado, preservando as características geométricas, materiais e construtivas apresentadas no estudo experimental.

Figura 11 – Ensaio de flexão modelo de referência.



Fonte: Giongo *et al* (2012).

3.1.2 Geometria da viga de referência

A viga analisada apresenta seção transversal em T, composta por uma mesa e uma alma conectadas mecanicamente, conforme ilustrado na Figura 12. Essa geometria e os parâmetros de ensaio foram extraídos do estudo desenvolvido por Giongo *et al.* (2012), cujo objetivo central foi investigar técnicas de reforço mecânico a seco, ou seja, sem a utilização de concreto ou processos úmidos, para a reabilitação de pavimentos em edifícios históricos. O foco nessa metodologia permite uma intervenção reversível e de baixo impacto, preservando a integridade das estruturas de madeira existentes ao evitar o acréscimo de umidade e sobrecargas excessivas decorrentes das tradicionais capas de concreto.

A geometria adotada reproduz a realidade dessas estruturas: a alma, com seção de 150 × 200 mm, representa a viga de madeira antiga preexistente. Cabe ressaltar que, no estudo experimental de referência (Giongo *et al.*, 2012), esta alma era constituída por Madeira Lamelada Colada (MLC) da classe de resistência GL24h.

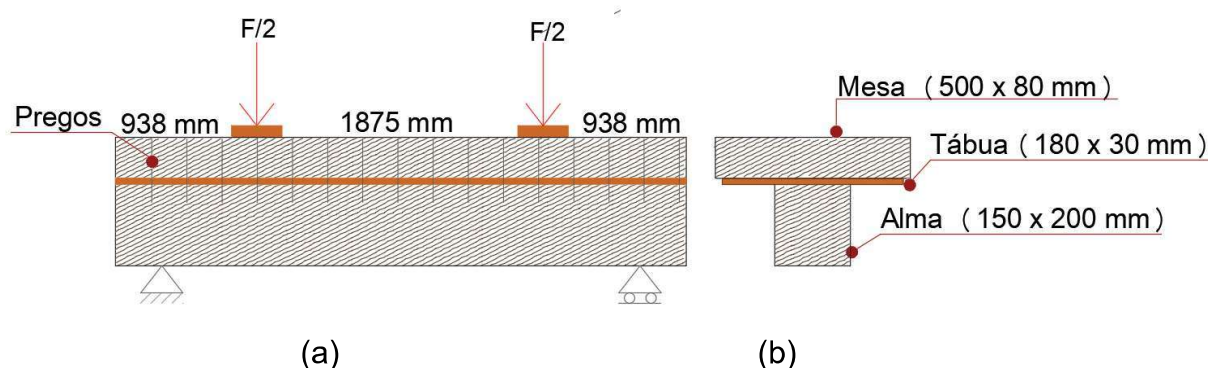
Embora o presente trabalho tenha como foco exclusivo o uso da madeira serrada, a adoção deste ensaio justificou-se unicamente para a etapa de validação do modelo numérico, devido à robustez e disponibilidade dos dados experimentais. Uma vez atestada a consistência e a validação do modelo em elementos finitos, as propriedades constitutivas do material foram devidamente substituídas nas simulações subsequentes (estudo paramétrico) pelos parâmetros referentes à madeira serrada, adequando-se assim ao escopo central desta pesquisa.

Já a mesa superior, com largura de 500 mm e altura de 80 mm, atua como o novo elemento de reforço estrutural. Entre esses dois componentes principais, conforme detalhado por Giongo *et al.* (2012), considera-se a existência de uma tábua intermediária com dimensões de 180 × 30 mm em madeira de abeto (*spruce*).

Esta madeira pertence ao gênero *Picea*, uma conífera amplamente empregada em estruturas na Europa devido à sua trabalhabilidade e propriedades mecânicas favoráveis a esse tipo de intervenção de restauro. Essa camada assume importância fundamental no ensaio experimental, pois representa o assoalho original (*floorboard*) do edifício que permanece preservado entre a viga antiga e o novo reforço. A presença dessa tábua influencia diretamente o contato entre as peças e a rigidez global (k) da seção composta, uma vez que altera o braço de alavanca e a transferência de esforços nos conectores.

A viga possuía comprimento total de 4.000 mm e foi ensaiada à flexão em quatro pontos, com aplicação de duas cargas iguais, correspondentes a $F/2$, posicionadas simetricamente em relação ao centro do vão. A ligação entre os elementos de madeira foi realizada com parafusos de 190 mm de comprimento e 6,3 mm de diâmetro, distribuídos em duas fileiras longitudinais. O esquema estrutural do ensaio é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Modelo analisado: vista longitudinal (a) e transversal (b).



Fonte: Adaptado de Giongo *et al* (2012).

3.1.3 Propriedades Mecânicas dos materiais

As propriedades mecânicas da madeira e do aço dos conectores foram adotadas em conformidade com o estudo experimental de Giongo *et al.* (2012). Para a caracterização da madeira, utilizou-se um modelo de comportamento ortotrópico com a definição de parâmetros nas direções longitudinal, radial e tangencial. Os coeficientes de Poisson foram definidos com base em Khelifa *et al.* (2014).

Devido à ausência do valor específico para o módulo de cisalhamento no plano radial-tangencial (G_{23}), no trabalho de Giongo *et al.* (2012), recorreu-se à literatura de Bodig e Jayne (1982), que reporta o valor de 50 MPa. Esta adoção é consolidada e compatível com as diretrizes da norma europeia EN 14080 (CEN, 2013).

Em relação aos conectores metálicos, as propriedades refletem o comportamento isotrópico do aço, com módulo de elasticidade de 210.000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,30. As propriedades elásticas detalhadas da madeira e do aço encontram-se resumidas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Propriedades elásticas da madeira.

Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo de Cisalhamento (MPa)	Coefficiente de Poisson
$E_1 = 11600$	$G_{12} = 690$	$\nu_{12} = 0,29$
$E_2 = 390$	$G_{13} = 690$	$\nu_{13} = 0,29$
$E_3 = 390$	$G_{23} = 50$	$\nu_{23} = 0,02$

Fonte: Giongo *et al.* (2012); Khelifa *et al.* (2014); Bodig e Jayne (1982).

Tabela 7 - Propriedades elásticas do Aço dos conectores.

Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
E	n
210000	0,3

Fonte: Giongo *et al.* (2012).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Calibração do Modelo

O modelo numérico foi desenvolvido por meio de uma abordagem tridimensional em elementos finitos, com o objetivo de representar o comportamento estrutural da viga composta descrita na seção anterior. A madeira foi caracterizada como material ortotrópico linear elástico, assumindo-se um comportamento praticamente isotrópico no plano transversal (plano 23), enquanto os conectores metálicos foram modelados com comportamento isotrópico linear elástico.

A discretização do modelo foi realizada com elementos sólidos tridimensionais, tanto para os componentes de madeira quanto para os conectores. A adoção desse tipo de modelagem permitiu representar de maneira detalhada as regiões de contato, a transferência de esforços de cisalhamento e a interação parcial entre a alma e a mesa da viga composta.

Com o objetivo de reduzir o custo computacional, foi adotada a modelagem de meia viga, considerando as condições de simetria geométrica e de carregamento no plano longitudinal central. Essa estratégia manteve a consistência com o arranjo experimental, preservando a resposta estrutural global e reduzindo o número de graus de liberdade do modelo. A calibração do modelo consistiu no ajuste dos parâmetros de contato entre os componentes de madeira e da rigidez atribuída aos conectores metálicos, de modo a representar o deslizamento relativo entre a mesa e a alma. Esse refinamento foi necessário para reproduzir adequadamente os efeitos da flexão dos parafusos, do esmagamento localizado da madeira e da transferência parcial de esforços entre os elementos conectados.

A calibração foi conduzida pela comparação entre as curvas força–deslocamento obtidas numericamente e os resultados experimentais apresentados

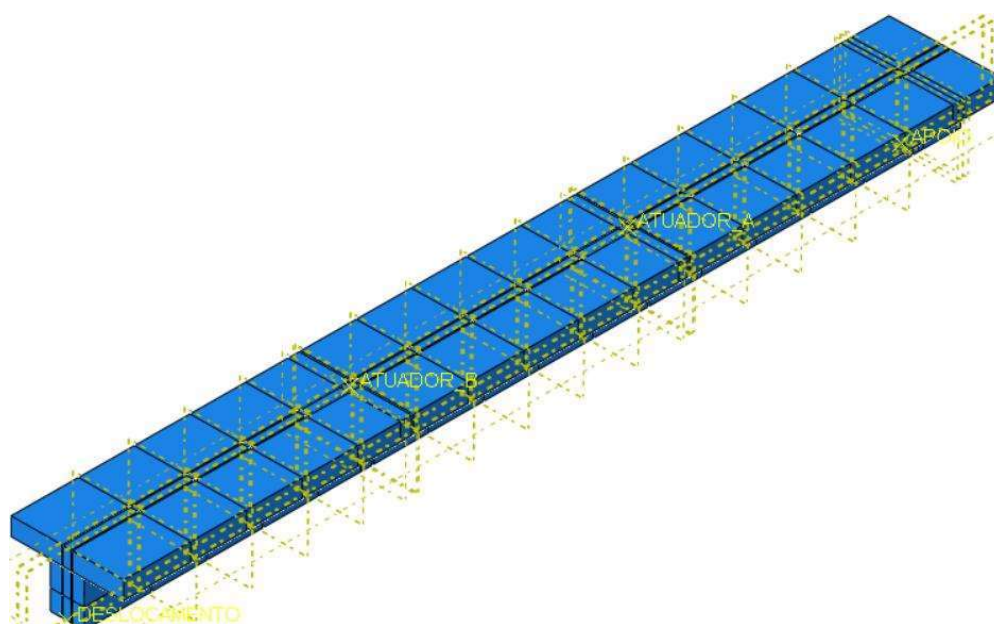
por Giongo et al. (2012). A convergência satisfatória entre essas respostas foi utilizada como critério para validação da estratégia de modelagem adotada, permitindo sua aplicação nas análises paramétricas subsequentes.

3.2.2 Construção geométrica no Abaqus

A geometria da viga composta foi construída no ambiente Abaqus/CAE por meio de sólidos tridimensionais independentes, correspondentes à alma, à mesa e aos conectores metálicos. Essa estratégia possibilitou a definição individual das propriedades dos materiais, das interações de contato e das condições de ligação entre os componentes.

A alma e a mesa foram modeladas como sólidos prismáticos, com dimensões previamente definidas de acordo com a configuração experimental de referência e com as variações estabelecidas no estudo paramétrico. Os conectores metálicos foram representados por sólidos cilíndricos, com comprimento e diâmetro equivalentes aos parafusos considerados na modelagem. A configuração final do modelo, incluindo a disposição dos conectores e as regiões de aplicação de carga e de apoio, é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Configuração do modelo numérico da viga composta.

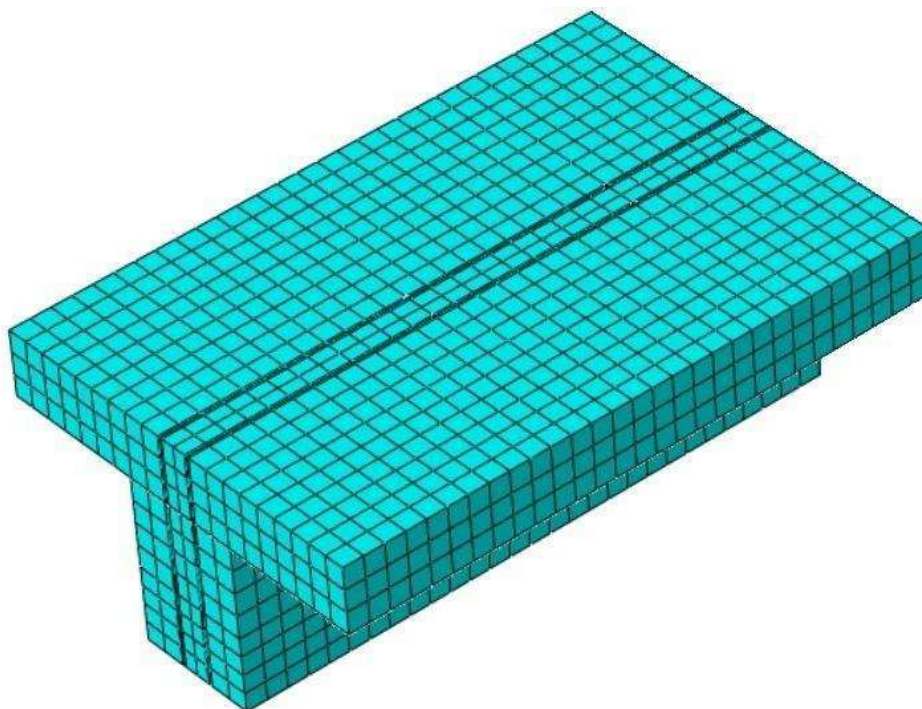


3.2.3 Elemento finito e malha

Foi adotado o elemento sólido C3D8R, pertencente à família de elementos tridimensionais do Abaqus/CAE. Trata-se de um elemento hexaédrico de oito nós, com três graus de liberdade translacionais por nó e integração reduzida. Esse tipo de elemento foi escolhido por apresentar boa capacidade de representação do comportamento tridimensional da viga composta, associado a menor custo computacional quando comparado a elementos com integração completa. Para definição da malha, foi realizado um estudo de convergência considerando tamanhos médios de elemento de 15 mm e 25 mm. As respostas força–deslocamento obtidas para ambas as discretizações apresentaram diferenças pouco significativas no regime elástico, não sendo observada alteração relevante na rigidez global do modelo.

Diante da convergência observada e buscando um equilíbrio entre precisão numérica e custo computacional, adotou-se o tamanho médio de elemento de 25 mm nas simulações finais. A malha tridimensional empregada no modelo numérico da viga é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Malha tridimensional com elementos C3D8R adotada no modelo numérico da viga.



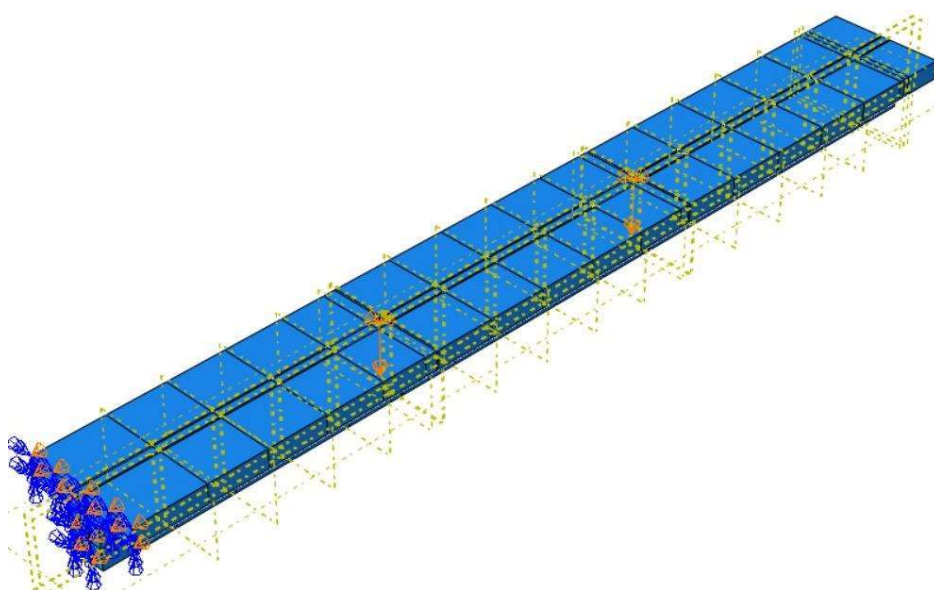
3.2.4 Interações e Condições de Contorno

A interação entre os conectores metálicos e as superfícies da mesa e da alma foi modelada por meio de contato superfície–superfície. Para o comportamento normal, adotou-se a formulação *hard contact*, impedindo a penetração entre as superfícies em contato. Para o comportamento tangencial, utilizou-se a formulação *penalty*, considerando coeficiente de atrito igual a 0,20.

O carregamento foi aplicado por meio de pontos de referência, representando os atuadores do ensaio de flexão. A aplicação das cargas foi realizada de forma compatível com o arranjo experimental, por meio da imposição de deslocamento vertical prescrito nos pontos correspondentes às regiões de carregamento.

As restrições de apoio foram definidas com o objetivo de reproduzir as condições experimentais do ensaio de flexão. Além disso, a simetria geométrica e de carregamento foi considerada por meio da condição de contorno ZSYMM, aplicada ao plano longitudinal central da viga, permitindo a modelagem de apenas metade da estrutura. A configuração adotada para as condições de contorno, apoios e carregamentos é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Modelo numérico da viga composta e respectivas condições de contorno.



Fonte: Própria autora (2025).

3.2.5 Geração Automatizada via código Python

Os modelos numéricos foram gerados automaticamente por meio de scripts desenvolvidos em linguagem Python e executados no ambiente Abaqus/CAE. Essa estratégia permitiu a criação sistemática das diferentes configurações paramétricas, com variação controlada das dimensões da viga composta e das características dos conectores mecânicos.

Foram parametrizadas as dimensões geométricas da alma e da mesa, o comprimento efetivo da viga, bem como o diâmetro e o espaçamento dos conectores. Cada configuração foi identificada por uma nomenclatura associada às variáveis adotadas, sendo automaticamente gerado o respectivo arquivo de análise para processamento no solver.

Ao todo, foram avaliadas 512 configurações distintas, resultantes da combinação sistemática dos parâmetros considerados. A automação do processo permitiu reduzir erros operacionais, padronizar a construção dos modelos e viabilizar a análise comparativa entre as diferentes configurações investigadas.

3.3 ESTUDO PARAMÉTRICO

O estudo paramétrico foi estruturado a partir da variação sistemática dos parâmetros geométricos e construtivos da viga composta. As configurações foram organizadas em combinações representativas, permitindo a análise isolada e combinada da influência das variáveis consideradas sobre o comportamento estrutural à flexão.

As variáveis analisadas incluíram as dimensões da seção transversal, o comprimento efetivo da viga, o diâmetro dos conectores e o espaçamento entre eles. Essa organização possibilitou a comparação consistente das respostas estruturais, favorecendo a identificação da influência individual e conjunta das variáveis sobre a rigidez efetiva da viga composta.

3.3.1 Organização dos conjuntos e grupos

Os modelos foram organizados em dois níveis: conjuntos e grupos. Os conjuntos foram definidos pela altura total da viga (H_t), enquanto os blocos foram definidos pelas dimensões da base da alma (B_{alma}) e da base da mesa (B_{mesa}). A altura

total da viga (H_t) é dada pela soma da altura da alma (H_{alma}) e da altura da mesa (H_{mesa}). A variação dessas dimensões resultou em quatro grupos, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Definição dos conjuntos em função da altura da viga			
Grupo	H_{alma} (mm)	H_{mesa} (mm)	H_t (mm)
1	200	40	240
2	200	60	260
3	300	40	340
4	300	60	360

Fonte: Própria autora (2025).

Dentro de cada grupo, os modelos foram subdivididos em quatro conjuntos, definidos pelas dimensões da base da alma (B_{alma}) e da base da mesa (B_{mesa}). Esses conjuntos representam diferentes geometrias da seção transversal e foram considerados em todos os grupos analisados, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões dos blocos considerados		
Conjunto	B_{alma} (mm)	B_{mesa} (mm)
C1	50	200
C2	60	200
C3	50	300
C4	60	300

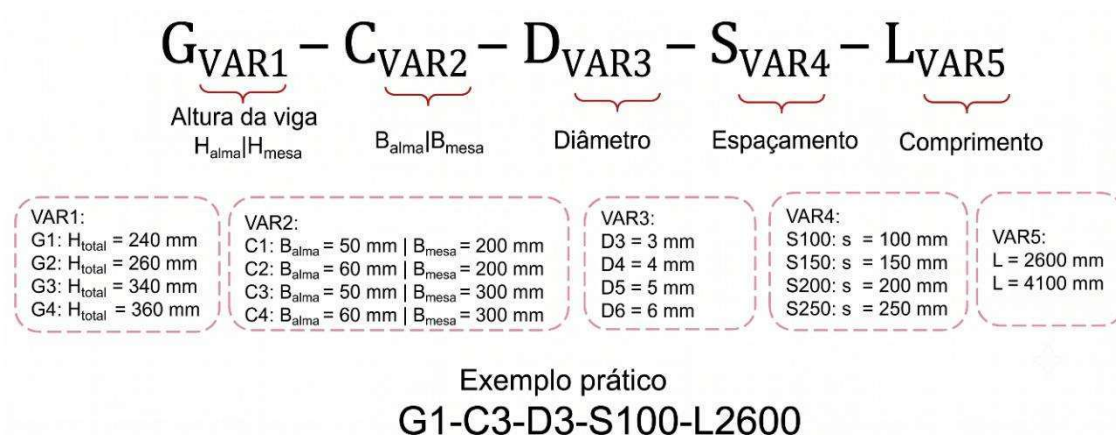
Fonte: Própria autora (2025).

Cada grupo é composto por 32 modelos distintos. Dentro de cada conjunto, foram variadas as características dos conectores (diâmetro e espaçamento), bem como o comprimento da viga. A combinação entre os quatro grupos e os quatro conjuntos resulta em 16 configurações geométricas distintas.

Para cada uma dessas configurações, foram consideradas diferentes combinações de comprimento efetivo da viga ($L = 2600$ e 4100 mm), diâmetro dos conectores ($D = 3, 4, 5$ e 6 mm) e espaçamento entre conectores ($S = 100, 150, 200$ e 250 mm), totalizando 32 variações por configuração. Ao todo, foram analisados 512

modelos numéricos. A nomenclatura adotada para identificação dos modelos foi organizada de forma a representar, sequencialmente, o grupo, o conjunto geométrico, o diâmetro do conector, o espaçamento entre conectores e o comprimento efetivo da viga, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Esquema de nomenclatura adotado para identificação dos modelos numéricos



Fonte: Própria autora (2026).

3.3.2 Variáveis consideradas e níveis adotados

As variáveis geométricas e construtivas consideradas no estudo paramétrico, bem como os valores adotados para cada uma delas (níveis), são apresentados na Tabela 10. Esses níveis correspondem aos diferentes valores utilizados para representar as combinações analisadas.

Tabela 10 – Variáveis e níveis adotados no estudo paramétrico

Variável	Níveis
H _{alma} (mm)	200; 300
B _{alma} (mm)	50; 60
H _{mesa} (mm)	40; 60
B _{mesa} (mm)	200; 300
L _{ef} (mm)	2600; 4100
D (mm)	3; 4; 5; 6
S (mm)	100; 150; 200; 250

Fonte: Própria autora (2025).

3.3.3 Procedimento de simulação numérica e determinação da rigidez à flexão

Para cada um dos 512 modelos, foi realizada simulação numérica sob carregamento compatível com ELS. A partir da curva força versus deslocamento de cada análise, determinou-se a rigidez à flexão (EI) da viga composta por duas abordagens complementares: a estimativa analítica pelo Método Gama, representada por EI_γ , e a rigidez equivalente numérica obtida pelo modelo em elementos finitos, representada por EI_{MEF} .

A comparação entre EI_γ e EI_{MEF} permitiu avaliar a concordância entre o modelo teórico e a resposta numérica, além da influência das variáveis geométricas e dos parâmetros de ligação no comportamento global da estrutura. Os resultados obtidos serviram de base para as análises posteriores, incluindo a avaliação estatística e a proposição de uma equação corretiva para o Método Gama.

3.4 MÉTODO GAMA

O Método Gama fornece uma abordagem analítica para a determinação da rigidez efetiva à flexão (EI_{ef}) de elementos compostos de madeira, considerando a interação parcial entre as camadas por meio de ligações mecânicas. A formulação adotada está em conformidade com a ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022) e com o Eurocode 5. A rigidez efetiva, apresentada na Equação 3.1, é dada por:

$$EI_{ef,método-\gamma} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad 3.1$$

Em que E_i representa o módulo de elasticidade longitudinal da i -ésima camada; A_i é a área da seção; I_i corresponde ao momento de inércia; a_i é a distância entre o centroide da i -ésima camada e o eixo neutro da seção composta e γ_i são o coeficiente associado à eficiência da ligação. O coeficiente γ_i depende do espaçamento dos conectores e da rigidez ao deslizamento da ligação, sendo determinado pela Equação 3.1:

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot s_i}{K_i \cdot L_{ef}^2} \right]} \quad 3.2$$

para $i = 1$ e 3 (assumindo-se $\gamma_2 = 1$ para a camada intermediária),

em que s_i é o espaçamento entre conectores; K_i é o módulo de deslizamento da ligação; e L_{ef} é o vão efetivo da viga. onde h_i é a altura da i -ésima camada; b_i é a largura correspondente.

O módulo de deslizamento (K_{ser}) caracteriza a rigidez da interface de conexão, relacionando a força atuante ao deslizamento relativo entre os elementos conectados. Diferentemente das propriedades elásticas dos materiais, o (K_{ser}) é uma propriedade do sistema de ligação, sendo influenciado pela geometria do conector e pela resistência ao embutimento da madeira (ABNT, 2022). Ressalta-se que o K_{ser} é empregado para avaliações no Estado Limite de Serviço (ELS), enquanto para o Estado Limite Último (ELU) adota-se o módulo de deslizamento último (K_u).

Neste estudo, o (K_{ser}) foi determinado conforme as diretrizes da ABNT NBR 7190-3 (2022), considerando a classe de resistência D40 para a madeira serrada. Essa classe foi adotada por apresentar módulo de elasticidade compatível com o valor utilizado no estudo experimental de referência de Giongo *et al.* (2012), além de ser representativa de espécies folhosas. Os valores característicos de resistência e rigidez dessa classe, estabelecidos na Tabela 11 da referida norma, são apresentados a seguir.

Tabela 11 – Valores característicos adotados para as classes de resistência da madeira.

Classes	f_{c0k}	$f_{v0,k}$	$E_{c0,med}$	Densidade a 12%
	MPa	MPa	MPa	Kg/m³
D40	40	6	14 500	750

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

A distância a_2 foi determinada inicialmente, enquanto a_1 foi obtida em função da relação geométrica entre as camadas, conforme as Equações 3.3 e 3.4.

$$a_1 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} - a_2 \quad 3.3$$

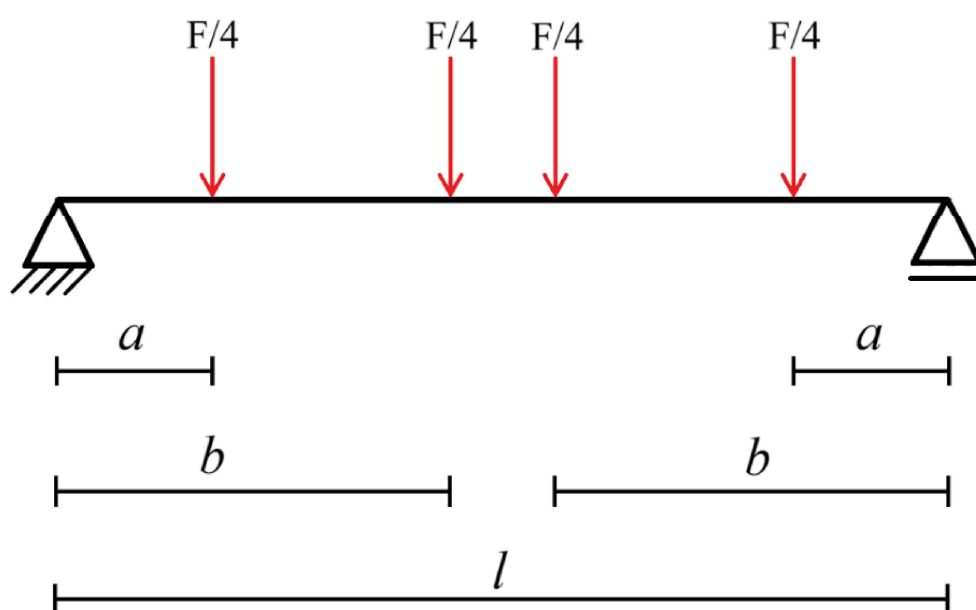
$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot E_i \cdot A_i} \quad 3.4$$

3.5 DESLOCAMENTO MÁXIMO

Além da estimativa da rigidez efetiva por meio do Método Gama, também foi determinada a resposta em deslocamento da viga submetida ao carregamento de flexão. Para isso, considerou-se uma viga biapoiada submetida a carregamento simétrico em quatro pontos, compatível com o esquema experimental.

A determinação do deslocamento máximo foi realizada com base no princípio da superposição, considerando que o deslocamento total no meio do vão resulta da soma das parcelas associadas a cada carga aplicada. O esquema estrutural adotado é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema estrutural da viga submetida a carregamento em quatro pontos.



Fonte: Própria autora (2025).

O deslocamento máximo no meio do vão é dado por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{(F/4) \cdot a(3l^2 - 4a^2)}{24EI_{ef}} + \frac{(F/4) \cdot b(3l^2 - 4b^2)}{24EI_{ef}} \quad 3.5$$

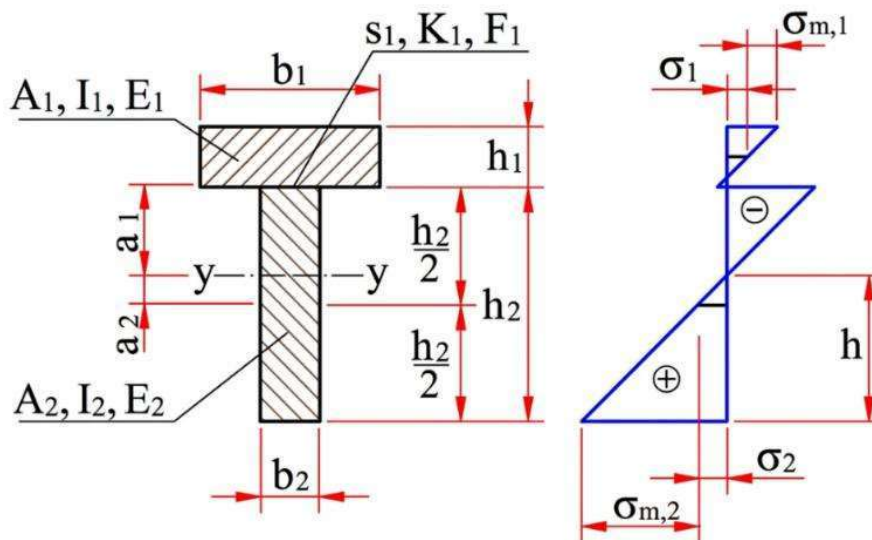
Em que F é a força aplicada; l é o vão da viga; a é a distância do apoio ao ponto de aplicação da carga; e $\delta_{m\acute{a}x}$ é o deslocamento máximo no meio do vão. Essa formulação permitiu determinar a rigidez equivalente a partir dos resultados numéricos, possibilitando a comparação direta com os valores estimados pelo Método Gama.

3.6 ANÁLISE DE TENSÕES PELO MÉTODO GAMA

Com base nos parâmetros previamente definidos, foram calculadas as tensões normais na seção transversal da viga composta, conforme as recomendações da ABNT NBR 7190-1 (ABNT, 2022). A análise foi realizada considerando a seção em perfil T e a distribuição linear das tensões ao longo da altura, de acordo com a posição do eixo neutro e com a contribuição de cada camada para a rigidez global da seção.

A Figura 18 apresenta a seção transversal em perfil T e a distribuição das tensões normais consideradas no Método Gama, destacando os parâmetros geométricos e mecânicos empregados no cálculo.

Figura 18 - Seções transversais e distribuição de tensões



As tensões normais associadas à flexão nas extremidades da seção são obtidas a partir do momento fletor M , conforme as equações 3.6, 3.7 e 3.8:

$$\sigma_i = \gamma_i E_i a_i \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad 3.6$$

$$\sigma_{m,i} = 0,5 E_i h \frac{M}{(EI)_{ef}} \quad 3.7$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_i + \sigma_{m,i} \quad 3.8$$

Em que M representa o momento fletor atuante; σ_i corresponde à tensão normal no centroide do elemento i ; $\sigma_{m,i}$ refere-se à parcela da tensão na extremidade do elemento; e $\sigma_{m\acute{a}x}$ indica a tensão normal máxima.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA E REGRESSÃO SIMBÓLICA

3.7.1 Definição da variável resposta

Para avaliar a precisão do Método Gama na estimativa da rigidez efetiva à flexão de vigas compostas, adotou-se como variável resposta o coeficiente corretivo α , definido como a razão entre a rigidez obtida numericamente por meio do Método dos Elementos Finitos e a rigidez estimada analiticamente pelo Método Gama:

$$\alpha = \frac{EI_{MEF}}{EI_{\gamma}} \quad 3.9$$

O coeficiente α representa o fator de ajuste necessário para compatibilizar a estimativa analítica com o comportamento estrutural obtido nas simulações numéricas. Valores de α próximos de 1 indicam que as estimativas obtidas pelo Método Gama apresentam boa concordância com os resultados numéricos.

3.7.2 Regressão simbólica

A regressão simbólica é um método baseado em algoritmos evolutivos que busca determinar, simultaneamente, a estrutura da equação e seus coeficientes, equilibrando precisão e simplicidade. Diferentemente das regressões tradicionais, cuja forma funcional é previamente definida, essa abordagem constrói o modelo ao explorar combinações matemáticas entre as variáveis (Abdusalamov *et al.*, 2023; Angelis *et al.*, 2023; Cranmer, 2023).

Uma das principais vantagens dessa abordagem é a transparência dos resultados. Ao contrário de modelos baseados em redes neurais, frequentemente tratados como “caixas-pretas”, a regressão simbólica fornece expressões analíticas explícitas, favorecendo a interpretação física das relações entre as variáveis (Angelis *et al.*, 2023).

O processo inicia-se com a definição das variáveis independentes, da variável resposta e dos operadores matemáticos permitidos. Em seguida, é gerada uma população inicial de modelos aleatórios, que evoluem por meio de operadores como mutação, cruzamento e ajuste de constantes, buscando melhorar o desempenho das equações até o atendimento de um critério de parada (Silva, 2025; Cranmer, 2023).

No presente estudo, as variáveis independentes correspondem aos principais parâmetros geométricos e construtivos da viga composta: altura e base da alma, altura e base da mesa, comprimento efetivo da viga (L), diâmetro dos conectores (D) e espaçamento entre conectores (S). A variável resposta adotada foi o coeficiente α .

Os dados das 512 simulações foram divididos aleatoriamente em dois subconjuntos: 80% para treinamento e 20% para validação, permitindo avaliar a capacidade preditiva do modelo e reduzir o risco de superajuste.

Os parâmetros do algoritmo foram definidos de modo a equilibrar capacidade de busca e viabilidade computacional, incluindo limites para número de iterações, tamanho das expressões, operadores permitidos e critério de seleção. As configurações adotadas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12- Parâmetros do algoritmo e variáveis utilizadas na regressão simbólica.

Parâmetros	Valores
<i>iterations</i>	50.000
<i>maxsize</i>	30
<i>Binary operators</i>	+, *, -, /
<i>Unary operators</i>	<i>cube, square</i>
<i>Populations</i>	24
<i>Population size</i>	27
<i>Model selection</i>	<i>accuracy</i>
Variáveis de entrada	H_alma, B_alma, H_mesa, B_mesa, H_total, L, D, S
Variável de resposta	α

Fonte: Própria autora (2025).

3.7.3 Métricas de avaliação do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo proposto, foram adotadas métricas amplamente utilizadas em modelos preditivos: Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), Coeficiente de Variação (CV) e Coeficiente de Determinação (R^2). O MAPE é utilizado para expressar, em termos percentuais, o erro médio entre os valores estimados e os valores de referência, permitindo avaliar o grau de aproximação entre eles. O CV, por sua vez, é empregado como medida da variabilidade relativa dos erros, sendo obtido a partir da razão entre o erro quadrático médio e a média dos valores de referência. Já o coeficiente de determinação (R^2) indica a capacidade do modelo em representar a variabilidade dos dados, de modo que valores mais próximos de 1 representam melhor ajuste.

A aplicação conjunta dessas métricas permite uma avaliação consistente do modelo, considerando tanto a precisão das estimativas quanto a sua capacidade de representar adequadamente o comportamento observado. Dessa forma, torna-se possível analisar a confiabilidade da equação proposta para a estimativa do coeficiente α . As expressões matemáticas correspondentes às métricas adotadas são apresentadas a seguir, nas Equações 3.10 a 3.12.

$$MAPE(\%) = 100 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{calculado,i} - y_{refer\hat{e}ncia,i}}{y_{refer\hat{e}ncia,i}} \right| \quad 3.10$$

$$CV(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_{calculado,i} - y_{refer\hat{e}ncia,i})^2}{n}}}{\bar{y}_{refer\hat{e}ncia}} \quad 3.11$$

$$R^2(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{calculado,i} - y_{refer\hat{e}ncia,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{refer\hat{e}ncia,i} - \bar{y}_{refer\hat{e}ncia})^2} \right) \quad 3.12$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas para as vigas compostas analisadas, bem como sua comparação com os valores estimados pelo Método Gama. A partir dessa análise, buscou-se avaliar o nível de concordância entre os métodos e compreender a influência dos parâmetros adotados no comportamento estrutural das vigas.

Para facilitar a interpretação dos resultados, os modelos foram organizados em quatro grupos, definidos em função da altura total da viga (H_t). Em cada grupo, a geometria da seção transversal foi mantida constante, enquanto foram variados os parâmetros relacionados à ligação entre os elementos, como o diâmetro (D) e o espaçamento dos conectores (s), além do comprimento da viga (L). Essa organização permitiu analisar, de forma mais clara, a influência individual desses parâmetros.

Inicialmente, foi realizada a comparação entre os valores de rigidez à flexão obtidos pelo Método Gama (EI_γ) e aqueles determinados pelo modelo numérico em elementos finitos (EI_{MEF}). Para cada modelo, calculou-se o erro relativo, possibilitando avaliar o grau de aproximação entre os métodos e identificar tendências associadas às variáveis analisadas.

Na sequência, foram analisadas as tensões normais nas vigas (σ), com base nos resultados do modelo numérico e nas estimativas obtidas pelo Método Gama. Essa etapa permitiu verificar a capacidade do modelo do Método Gama em representar a distribuição de tensões na seção.

Por fim, foram apresentados os modelos obtidos por regressão simbólica, desenvolvidos a partir dos resultados das simulações, com o objetivo de identificar expressões capazes de representar, de forma simplificada e consistente, o comportamento estrutural das vigas compostas.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

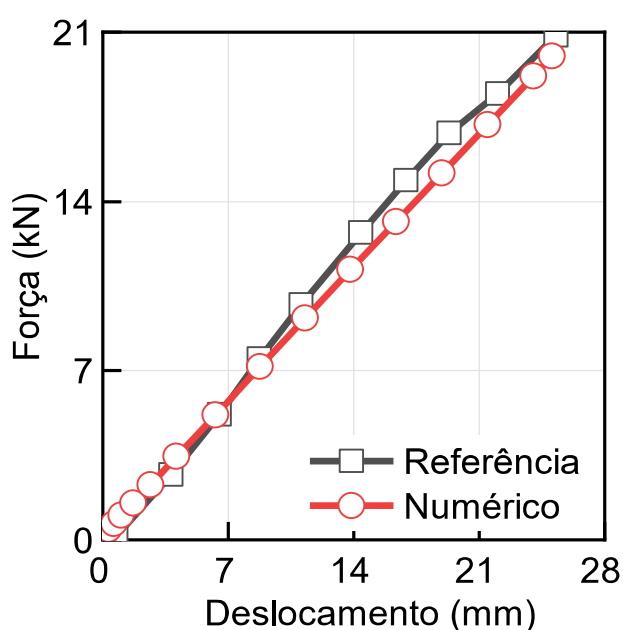
A validação do modelo numérico foi realizada por meio da comparação entre os resultados obtidos nas simulações e dados experimentais disponíveis na literatura. Como referência, adotou-se o estudo de Giongo et al. (2012), no qual foram avaliadas

quatro configurações de ligações em vigas compostas de madeira. Dentre elas, selecionou-se a configuração com conectores dispostos a 90° em duas fileiras, por apresentar maior compatibilidade com o sistema estrutural analisado neste trabalho.

O modelo experimental de referência era constituído por elementos de madeira lamelada colada (Glulam), classe GL24h, conectados por parafusos. A partir dessa configuração, foram calibrados os parâmetros de contato e de rigidez empregados na modelagem numérica, visando reproduzir adequadamente o comportamento observado experimentalmente.

Após a verificação da estratégia de modelagem, o modelo numérico foi adaptado para a configuração adotada nas análises paramétricas desta pesquisa, composta por peças de madeira serrada e ligações executadas com pregos. A Figura 19 apresenta a comparação entre as curvas força versus deslocamento obtidas numericamente e os resultados experimentais reportados na literatura.

Figura 19 – Curva força versus deslocamento do modelo de validação



Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se boa concordância entre as curvas numérica e de referência (experimental) ao longo do comportamento analisado, especialmente no regime elástico, indicando que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente a rigidez inicial do sistema. Pequenas diferenças podem ser observadas nos níveis

mais elevados de carregamento, o que pode estar associado às simplificações adotadas na modelagem, particularmente no que se refere à representação da ligação entre os elementos. O erro, calculado conforme a Equação (4.1) a partir da comparação entre os valores de referência e numéricos, foi de 4,21% para a força máxima correspondente ao deslocamento de 20 mm.

$$Erro(\%) = \left| \frac{V_{referência} - V_{numérico}}{V_{referência}} \right| \cdot 100 \quad 4.1$$

A rigidez global da viga (k) foi obtida a partir da inclinação da curva força *versus* deslocamento no regime elástico, considerando a relação entre a força aplicada (F) e o deslocamento vertical correspondente (δ), conforme apresentado na Equação (4.2). Os valores obtidos foram de 0,83 kN/mm para o modelo experimental e 0,80 kN/mm para o modelo numérico.

$$F = k \cdot \delta \rightarrow k = \frac{F}{\delta} \quad 4.2$$

O erro relativo associado à rigidez global (k) do sistema foi de 3,40%, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação da força máxima (F) e da rigidez global (k) dos modelos experimental e numérico

	Referência	Numérico	Erro (%)
F (kN)	20,88	20	4,21
k (kN/mm)	0,83	0,80	3,40

Fonte: Própria autora (2026).

Os resultados evidenciam boa concordância entre os valores obtidos nos dois modelos, tanto em termos de força (F) quanto de rigidez global (k). A proximidade entre os resultados indica que a modelagem numérica adotada é capaz de representar de forma consistente o comportamento de viga composta, mesmo considerando as diferenças construtivas em relação ao modelo experimental de referência.

Esse comportamento está em consonância com Bedon e Fragiacomio (2019), que observaram boa concordância entre modelos em elementos finitos e resultados experimentais na análise de sistemas compostos de madeira. De forma complementar, Christoforo *et al.* (2016) também verificaram proximidade entre respostas numéricas e experimentais em elementos estruturais de madeira, reforçando a aplicabilidade da modelagem numérica na representação do comportamento mecânico desses sistemas.

Dessa forma, os resultados obtidos validam a estratégia de modelagem adotada neste trabalho, indicando que o modelo numérico desenvolvido constitui uma base confiável para as análises paramétricas apresentadas nas seções subsequentes.

4.2 RIGIDEZ À FLEXÃO DAS VIGAS COMPOSTAS

A rigidez à flexão, definida pelo produto entre o módulo de elasticidade longitudinal da madeira (E) e o momento de inércia da seção transversal (I) em relação ao centro de gravidade, está diretamente relacionada à deformabilidade de um elemento estrutural quando submetido à ação de momentos fletores. Representada pelo parâmetro de rigidez efetiva (EI), esta propriedade é o objeto de análise desta seção, que confronta os resultados obtidos via modelagem numérica em elementos finitos (EI_{MEF}) com as estimativas analíticas fornecidas pelo Método Gama (EI_{γ}).

O objetivo central desta etapa é avaliar a precisão do Método Gama diante variações geométricas e de ligação nas vigas compostas. A análise comparativa revela um comportamento global predominante: o Método Gama apresenta uma baixa capacidade de predição da rigidez efetiva (EI) para vigas com almas de maior altura. Os resultados por meio do Método Gama podem ser constatados diretamente ao confrontar os dados da Tabela 14 (almas de 200 mm) com os da Tabela 15 (almas de 300 mm). Enquanto modelos com almas de 200 mm mantêm um erro relativo médio da rigidez efetiva ($\bar{E}_{EI}$) em patamares moderados, situando-se na faixa de 15% a 47%, a transição para almas de 300 mm resulta em discrepâncias acentuadas, atingindo valores superiores a 230% em determinados cenários.

Esse expressivo aumento da imprecisão analítica indica que as hipóteses simplificadoras adotadas pelo Método Gama se tornam menos adequadas para representar o comportamento estrutural de vigas T com maior altura de alma. Em especial, a formulação baseada na teoria clássica de flexão de Euler-Bernoulli, que desconsidera os efeitos da deformação por cisalhamento transversal. À medida que a altura da seção aumenta, os efeitos associados ao cisalhamento tornam-se mais relevantes, influenciando a distribuição de tensões, os deslocamentos e, consequentemente, a rigidez efetiva do sistema composto.

Diante dessa constatação, a discussão dos resultados é organizada em duas frentes principais. Inicialmente, analisa-se a influência da altura da alma sobre o erro do modelo analítico, buscando compreender de que forma essa variável geométrica afeta a discrepância entre o Método Gama e a modelagem numérica. Na sequência, avalia-se o comportamento das vigas em função dos parâmetros de ligação, com ênfase no diâmetro e no espaçamento dos pregos, verificando como a rigidez à flexão (EI) da conexão modula a resposta global das vigas compostas.

Tabela 14: Comparativo de rigidez média ($\overline{EI}$) e erro relativo médio $\overline{Erro}$ entre o Método Gama e o MEF.

H_alma (mm)	B_alma (mm)	H_mesa (mm)	B_mesa (mm)	H_total (mm)	$\overline{EI}_{MEF}$ (10^{11} mm^2)	$\overline{EI}_{GAMA}$ (10^{11} mm^2)	$\overline{Erro}$ (%)
200	50	40	200	240	5,35	6,08	15,39
200	60	40	200	240	5,48	6,91	26,97
200	50	40	300	240	10,30	6,27	39,03
200	60	40	300	240	10,90	7,10	33,48
200	50	60	200	260	8,85	6,89	20,38
200	60	60	200	260	9,05	7,73	15,39
200	50	60	300	260	14,20	7,21	47,50
200	60	60	300	260	14,30	8,06	41,70

Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 15: Comparativo de rigidez média ($\overline{EI}$) e erro relativo médio $\overline{Erro}$ entre o Método Gama e o MEF.

H_alma (mm)	B_alma (mm)	H_mesa (mm)	B_mesa (mm)	H_total (mm)	$\overline{EI}_{MEF}$ (10^{11} mm^2)	$\overline{EI}_{GAMA}$ (10^{11} mm^2)	$\overline{Erro}$ (%)
300	50	40	200	340	6,13	17,6	189,46
300	60	40	200	340	6,19	20,30	231,06
300	50	40	300	340	12,00	17,90	50,28
300	60	40	300	340	11,70	20,60	77,20
300	50	60	200	360	9,96	18,70	95,52
300	60	60	200	360	10,10	21,40	121,69
300	50	60	300	360	14,80	19,20	42,75
300	60	60	300	360	16,40	21,90	38,96

Fonte: Própria autora (2026).

4.2.1 Análise do Grupo 1

O Grupo 1 é constituído por quatro conjuntos de modelos paramétricos, definidos a partir da variação das dimensões da alma e da mesa da seção transversal. Em cada conjunto, foram consideradas combinações entre o vão da viga (L), o diâmetro dos conectores (D) e o espaçamento entre conectores (s), totalizando 128 simulações numéricas (32 modelos por conjunto). A Tabela 16 apresenta a síntese dos parâmetros geométricos adotados para os modelos pertencentes ao Grupo 1

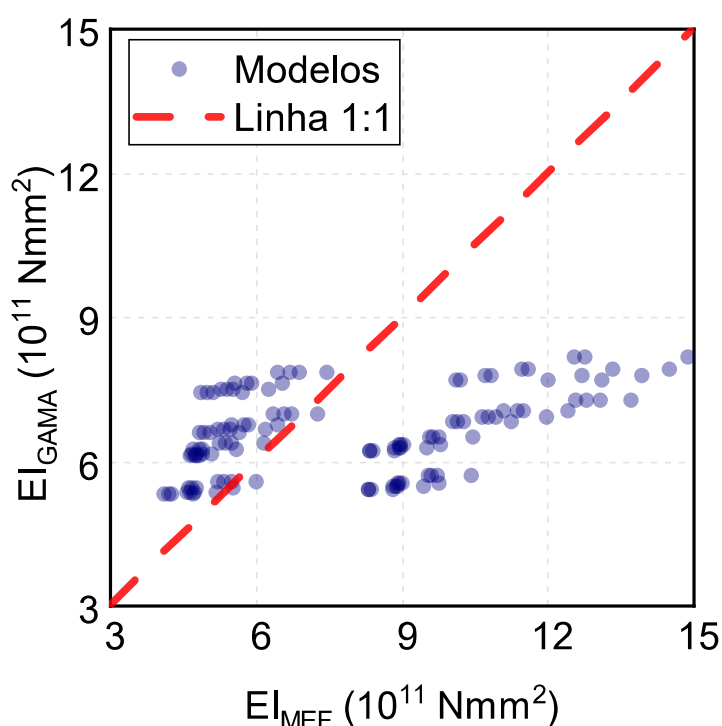
Tabela 16: Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 1

G1	H _{alma} (mm)	B _{alma} (mm)	H _{mesa} (mm)	B _{mesa} (mm)	L (mm)	d (mm)	s (mm)
Conj. 1	200	50	40	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 2	200	60	40	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 3	200	50	40	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 4	200	60	40	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250

Fonte: Própria autora (2026).

Na sequência, para avaliar globalmente a capacidade de predição do modelo normativo baseado no Método Gama neste primeiro cenário, a Figura 20 apresenta o gráfico de dispersão correlacionando a rigidez à flexão efetiva obtida numericamente pelo MEF (EI_{MEF}) e a rigidez analítica obtida pelo Método Gama (EI_{γ}) em relação à linha de igualdade (1:1).

Figura 20 - Correlação entre a rigidez à flexão pelo MEF (EI_{MEF}) e pelo Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 1, com altura total de 240 mm, em relação à linha de igualdade 1:1.



Fonte: Própria autora (2026).

A análise da nuvem de pontos apresentada na Figura 20 revela um comportamento distinto em função da rigidez à flexão (EI). Na região de menor rigidez, com valores de EI_{MEF} situados aproximadamente entre 4×10^{11} e $7 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$, observa-se maior proximidade dos pontos em relação à linha de igualdade. Esse comportamento ocorre, sobretudo, nos conjuntos 1 e 2, nos quais a base da mesa é de 200 mm.

Nesses casos, o Método Gama apresenta boa aderência aos resultados numéricos, indicando que a formulação analítica é capaz de representar adequadamente o comportamento de seções transversais menos robustas. Os

valores individuais de rigidez obtidos para todos os modelos paramétricos do Grupo 1 são apresentados no Apêndice B.

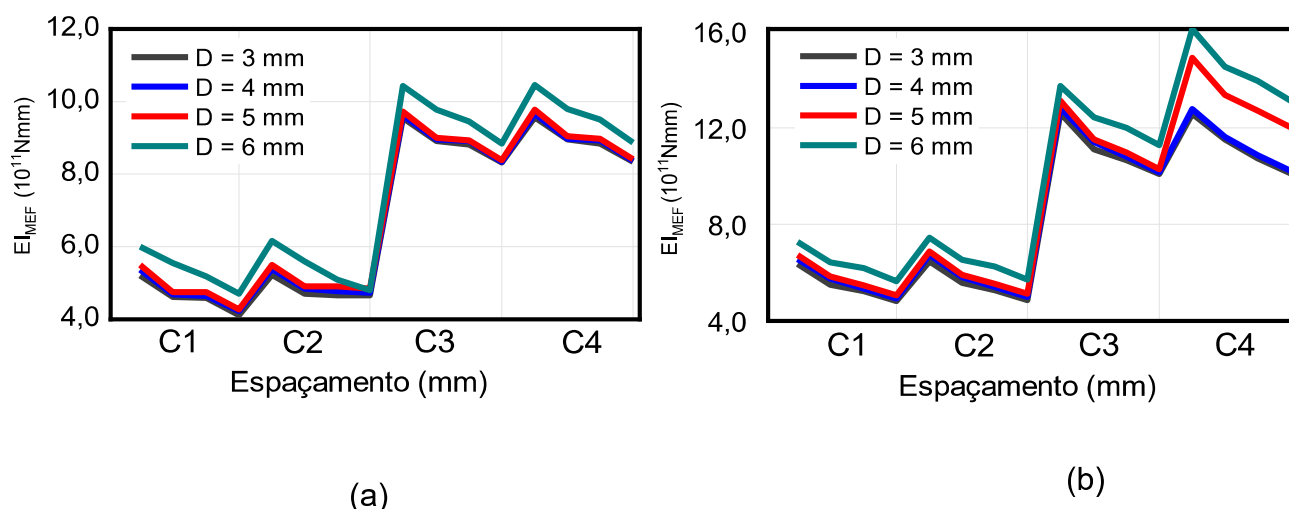
Esse resultado demonstra que, para combinações com menor rigidez geométrica, o modelo do Método Gama fornece estimativas satisfatórias, operando com uma margem de erro relativamente reduzida e a favor da segurança. Desse modo, para as vigas com mesa de menor largura, a simplificação adotada pelo Método Gama mostra-se adequada para estimar a rigidez efetiva à flexão.

Contudo, o afastamento sistemático entre os resultados numéricos e do Método Gama torna-se evidente a partir dos conjuntos 3 e 4. O aumento da base da mesa de 200 mm para 300 mm promove uma elevação expressiva da rigidez obtida por meio da modelagem numérica, deslocando os valores de (EI_{MEF}) para patamares superiores, em alguns casos acima de $9 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$. Em contrapartida, as estimativas fornecidas pelo Método Gama (EI_γ) apresentam variação limitada, permanecendo em uma faixa aproximadamente constante e inferior àquela obtida numericamente (EI_{MEF}) .

Esse comportamento evidencia que a formulação analítica tende a subestimar o ganho real de rigidez proporcionado pelo aumento da largura da mesa. Como consequência, à medida que a seção transversal se torna mais robusta, a discrepância entre (EI_{MEF}) e (EI_γ) aumenta, indicando uma limitação do Método Gama em captar integralmente a contribuição da mesa ampliada para a rigidez global da viga composta.

Para compreender quais variáveis promovem o distanciamento entre os métodos e influenciam o comportamento do modelo do Método Gama, as Figuras 20 e 21 detalham, respectivamente, a rigidez efetiva obtida pela modelagem numérica e a rigidez estimada pelo Método Gama. A Figura 20 apresenta os valores de (EI_{MEF}) para os vãos de 2600 mm e 4100 mm, enquanto a Figura 21 apresenta os valores correspondentes de (EI_γ) para as mesmas configurações.

Figura 21 - Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 1 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

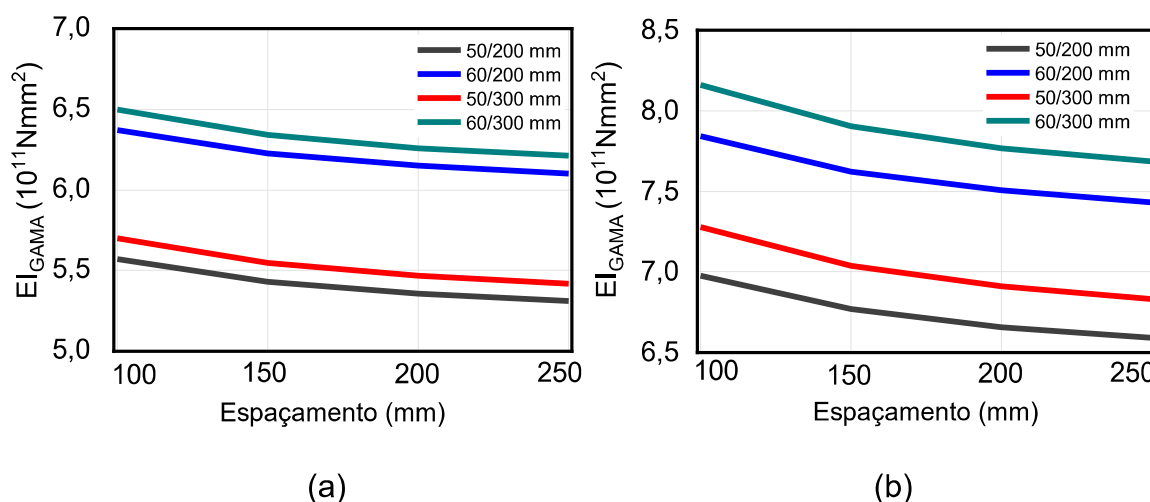
Observa-se, na Figura 21, que a rigidez efetiva obtida numericamente pelo MEF apresenta variações associadas tanto ao espaçamento quanto ao diâmetro dos conectores. Em geral, dentro de cada conjunto (C1, C2, C3 e C4), os maiores valores de rigidez ocorrem para os menores espaçamentos, enquanto o aumento do espaçamento entre conectores promove a redução gradual da rigidez efetiva.

Esse comportamento indica que a redução do espaçamento entre conectores melhora a solidarização entre a alma e a mesa, aumentando o grau de interação da seção composta e, conseqüentemente, sua rigidez efetiva à flexão (EI). Verifica-se que o aumento do diâmetro dos conectores também contribui para a elevação da rigidez, embora sua influência seja menos acentuada quando comparada ao efeito do espaçamento. Essa tendência é mais evidente nos resultados numéricos, uma vez que o modelo via MEF permite representar de forma mais sensível os efeitos locais associados à ligação entre os elementos da seção.

Do ponto de vista analítico, essa resposta físico-mecânica confirma que as alterações na eficiência da ligação exercem influência direta na rigidez global da viga composta. Tanto a redução do espaçamento quanto o incremento do diâmetro dos conectores elevam os módulos de deslizamento (K_{ser} ou K_u), o que corrobora a alta sensibilidade do modelo numérico frente a esses parâmetros de projeto.

Na sequência, a Figura 22 apresenta os valores de rigidez efetiva à flexão estimados pelo Método Gama para os mesmos modelos do Grupo 1, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm. Essa representação permite comparar o Método Gama com os resultados numéricos apresentados anteriormente na Figura 22.

Figura 22 – Rigidez efetiva à flexão estimada pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 nos vãos de 2600 mm e 4100 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 22, um comportamento mais uniforme entre as curvas obtidas pelo Método Gama. Diferentemente dos resultados numéricos, o Método Gama apresenta menor sensibilidade direta à variação do diâmetro dos conectores, uma vez que esse parâmetro é considerado de forma indireta por meio da rigidez da ligação (K). Dessa forma, para configurações com mesma seção transversal e mesmo espaçamento, os valores de (EI_γ) tendem a se repetir ou apresentar variações pouco expressivas.

As Tabelas 17 e 18 apresentam uma amostra representativa dos resultados obtidos para o Grupo 1, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm, respectivamente. Nessas tabelas são apresentados os valores de rigidez efetiva à flexão obtidos numericamente pelo MEF (EI_{MEF}), os valores estimados pelo Método Gama (EI_γ) e o erro percentual entre os métodos. Os resultados completos referentes a todos os modelos analisados encontram-se no Apêndice A.

Tabela 17 - Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão (EI) por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 com vão de 2600 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_{\gamma} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G1-C1-D3-S100-C2600	5,21	5,57	6,91
G1-C1-D3-S150-C2600	4,60	5,43	17,93
G1-C1-D3-S200-C2600	4,59	5,36	16,57
G1-C1-D3-S250-C2600	4,12	5,31	28,88
G1-C1-D6-S100-C2600	5,99	5,57	7,10
G1-C1-D6-S150-C2600	5,53	5,43	1,96
G1-C1-D6-S200-C2600	5,17	5,36	3,44
G1-C1-D6-S250-C2600	4,69	5,31	13,15

Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 18 - Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão (EI) por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 1 com vão de 4100 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_{\gamma} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G1-C1-D3-S100-C4100	6,35	6,98	9,84
G1-C1-D3-S150-C4100	5,51	6,77	22,73
G1-C1-D3-S200-C4100	5,23	6,66	27,28
G1-C1-D3-S250-C4100	4,83	6,59	36,39
G1-C1-D6-S100-C4100	7,26	6,98	4,00
G1-C1-D6-S150-C4100	6,43	6,77	5,17
G1-C1-D6-S200-C4100	6,20	6,66	7,45
G1-C1-D6-S250-C4100	5,65	6,59	16,54

Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, a partir das Figuras 21 e 22 e dos valores apresentados nas Tabelas 17 e 18, que o aumento do espaçamento entre conectores reduz a rigidez efetiva à flexão (EI), tanto nos resultados por MEF quanto nos resultados do Método Gama. Entretanto, essa redução é mais pronunciada no modelo via MEF, que também apresenta maior sensibilidade à variação do diâmetro dos conectores e à largura da mesa. As configurações com mesa de 300 mm e conectores de maior diâmetro

apresentaram os maiores valores de rigidez, indicando maior contribuição da geometria da seção e da ligação na resposta da viga composta.

Por outro lado, o Método Gama apresentou comportamento mais uniforme, com menor variação dos valores de EI_{γ} em função do diâmetro dos conectores. Essa característica, também evidenciada nas Tabelas 17 e 18, indica que o Método Gama representa adequadamente as tendências gerais de comportamento, mas com menor sensibilidade aos efeitos locais da ligação. Como consequência, o método apresentou melhor aproximação para os modelos de menor rigidez, especialmente aqueles com mesa de 200 mm, enquanto nos modelos com mesa de 300 mm e conectores mais rígidos houve maior tendência de subestimação da rigidez efetiva à flexão.

Assim, para o Grupo 1, verifica-se que o Método Gama é adequado para representar qualitativamente a influência do espaçamento e da geometria da seção, porém apresenta limitações quantitativas nas configurações em que há maior contribuição conjunta da largura da mesa e da rigidez da ligação.

4.2.2 Análise do Grupo 2

O Grupo 2 é constituído por quatro conjuntos de modelos paramétricos, totalizando 128 simulações numéricas (32 modelos por conjunto). O parâmetro geométrico invariante entre esses modelos é a altura total da viga ($h = 260$ mm), definida pela composição de uma alma com 200 mm de altura e uma mesa com 60 mm de espessura.

As demais combinações paramétricas referentes à largura da alma, à largura da mesa, ao vão, ao diâmetro e ao espaçamento dos conectores foram mantidas em relação ao Grupo 1. Essa configuração permite avaliar a influência do aumento da altura total da seção transversal sobre a rigidez efetiva à flexão e sobre a precisão do Método Gama.

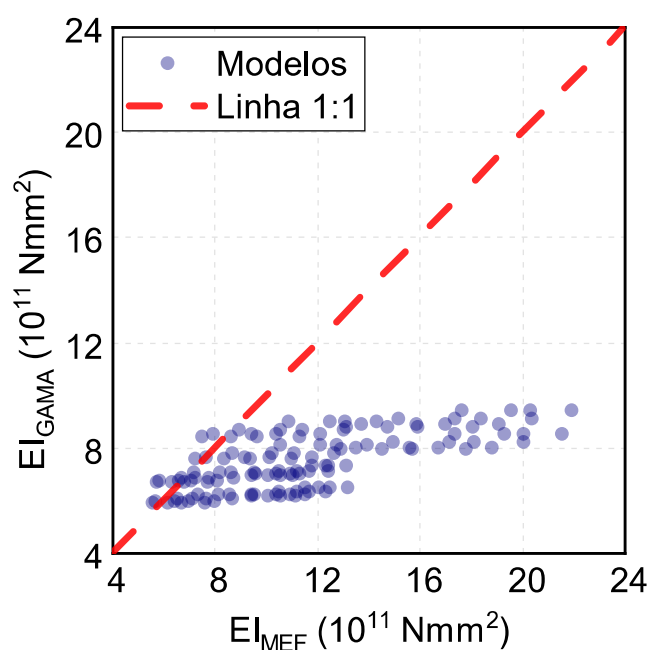
Tabela 19 - Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 2

G2	H _{alma} (mm)	B _{alma} (mm)	H _{mesa} (mm)	B _{mesa} (mm)	L (mm)	d (mm)	s (mm)
Conj. 1	200	50	60	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 2	200	60	60	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 3	200	50	60	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 4	200	60	60	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250

Fonte: Própria autora (2026).

Para avaliar globalmente a capacidade de predição do modelo normativo baseado no Método Gama para o Grupo 2, a Figura 23 apresenta o gráfico de dispersão correlacionando a rigidez efetiva à flexão obtida numericamente pelo MEF (EI_{MEF}) e a rigidez efetiva à flexão estimada pelo Método Gama (EI_{γ}), em relação à linha de igualdade (1:1).

Figura 23 - Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e por Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 2 ($h = 260$ mm) em relação à linha de referência 1:1.



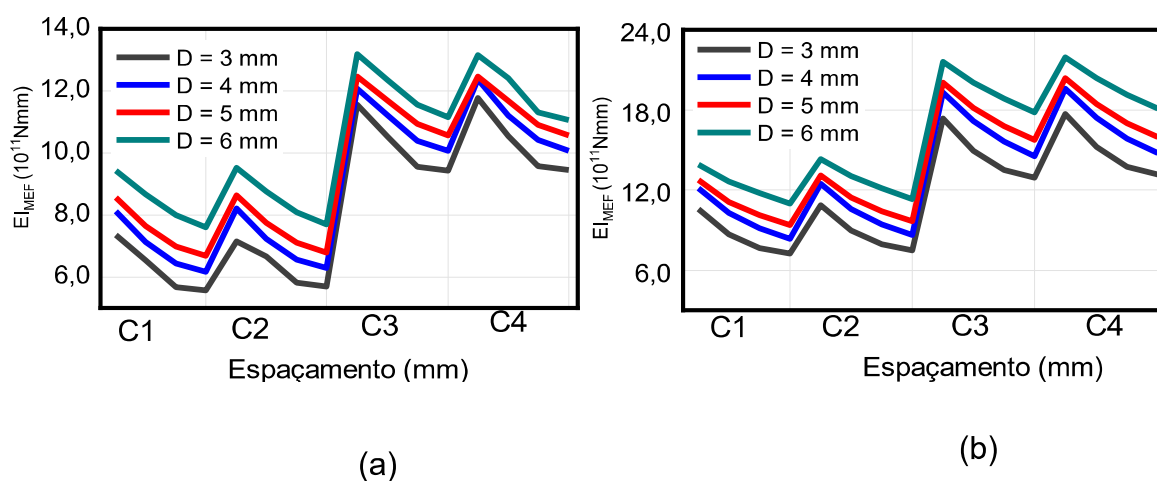
Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 23, que os modelos de menor rigidez efetiva à flexão apresentam maior proximidade em relação à linha de igualdade, indicando melhor concordância entre os valores obtidos pelo MEF e pelo Método Gama. Entretanto, à medida que os valores de EI_{MEF} aumentam, os pontos se afastam progressivamente da linha 1:1, mostrando maior diferença entre os métodos nas configurações mais rígidas. Esse comportamento indica que, no Grupo 2, o Método Gama apresenta melhor desempenho para os modelos com menor rigidez efetiva à flexão. Nas configurações de maior rigidez, especialmente associadas à maior largura da mesa e aos conectores de maior diâmetro, o modelo numérico capta incrementos mais expressivos de rigidez, enquanto os valores do Método Gama permanecem concentrados em uma faixa mais limitada.

Assim, para o Grupo 2, verifica-se que o Método Gama representa adequadamente a tendência geral dos modelos menos rígidos, mas apresenta menor capacidade de acompanhar o aumento da rigidez efetiva à flexão observado nas simulações numéricas. Essa diferença explica o maior afastamento dos pontos em relação à linha de igualdade nas regiões de maior EI_{MEF} .

A Figura 24 apresenta a rigidez à flexão efetiva obtida pelo MEF para as vigas do Grupo 2, considerando os vãos de 2.600 mm, na Figura 24(a), e de 4.100 mm, na Figura 24(b), em função do espaçamento entre conectores e do diâmetro dos parafusos.

Figura 24 - Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 2 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.

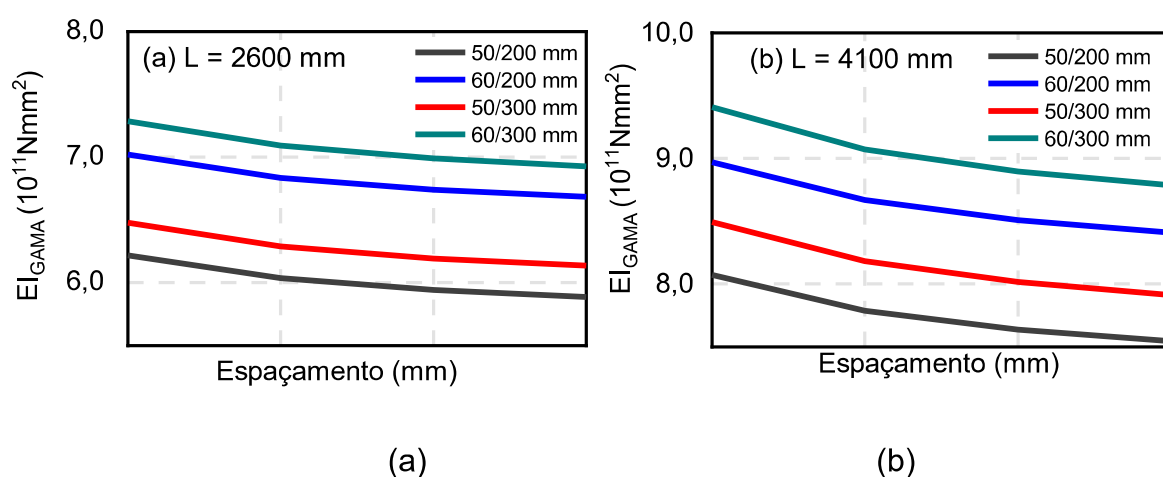


Fonte: Própria autora (2026).

A Figura 24 confirma essa tendência ao apresentar a rigidez efetiva obtida numericamente para os vãos de 2600 mm e 4100 mm. As curvas do MEF mostram variações acentuadas em função da geometria da seção e dos parâmetros de ligação, com saltos de rigidez associados à transição da mesa de 200 mm para 300 mm. Além disso, observa-se maior afastamento entre as curvas à medida que o diâmetro dos pregos aumenta, indicando que o modelo numérico capta a contribuição mecânica dos conectores para o aumento da rigidez global da viga composta.

A Figura 25 apresenta a variação da rigidez efetiva à flexão estimada pelo Método Gama em função do espaçamento entre conectores, para os modelos do Grupo 2 nos vãos de 2600 mm e 4100 mm.

Figura 25 - Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 2 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 25, que as curvas estimadas pelo Método Gama apresentam comportamento mais uniforme, com redução gradual da rigidez efetiva à flexão à medida que o espaçamento entre conectores aumenta. Essa tendência indica que o método representa qualitativamente a influência do espaçamento, porém com variações menos acentuadas quando comparadas aos resultados numéricos.

Verifica-se também que as configurações com maior largura de mesa apresentam maiores valores de (EI_y) , indicando que o Método Gama diferencia a influência geométrica da seção transversal. No entanto, as curvas permanecem próximas entre si, evidenciando menor sensibilidade do Método Gama às variações associadas ao diâmetro dos conectores.

Nas tabelas 20 e 21, observa-se que o aumento do espaçamento entre conectores reduz a rigidez efetiva à flexão obtida pelo MEF em ambos os vãos analisados. Além disso, os valores estimados pelo Método Gama permanecem, em geral, inferiores aos resultados numéricos, indicando tendência de subestimação da rigidez efetiva à flexão. Os resultados completos referentes a todos os modelos analisados encontram-se no Apêndice B.

Tabela 20 - Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 2 com vão de 2600 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_r (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G2-C1-D3-S100-C2600	7,34	6,22	15,29
G2-C1-D3-S150-C2600	6,53	6,04	7,539
G2-C1-D3-S200-C2600	5,67	5,94	4,92
G2-C1-D3-S250-C2600	5,56	5,89	5,91
G2-C1-D6-S100-C2600	9,43	6,22	34,04
G2-C1-D6-S150-C2600	8,66	6,04	30,28
G2-C1-D6-S200-C2600	7,98	5,95	25,50
G2-C1-D6-S250-C2600	7,59	5,89	22,46

Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 21 - Amostra comparativa entre a rigidez efetiva à flexão por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 2 com vão de 4100 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_r (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G2-C1-D3-S100-C4100	10,60	8,07	23,59
G2-C1-D3-S150-C4100	8,67	7,79	10,14
G2-C1-D3-S200-C4100	7,66	7,64	0,25
G2-C1-D3-S250-C4100	7,22	7,55	4,49
G2-C1-D6-S100-C4100	13,90	8,07	42,04
G2-C1-D6-S150-C4100	12,70	7,79	38,48
G2-C1-D6-S200-C4100	11,81	7,64	35,17
G2-C1-D6-S250-C4100	11,10	7,55	31,35

Fonte: Própria autora (2026).

De forma geral, os resultados do Grupo 2 reforçam o comportamento observado no Grupo 1. O Método Gama apresenta melhor aproximação nas configurações de menor rigidez efetiva à flexão, enquanto o afastamento em relação ao MEF aumenta nas configurações mais rígidas. Esse efeito é mais evidente nos modelos com conectores de maior diâmetro, nos quais o modelo numérico capta incrementos mais expressivos de rigidez.

Assim, para o Grupo 2, o Método Gama representa adequadamente as tendências gerais de comportamento, especialmente quanto ao efeito do espaçamento entre conectores. Entretanto, sua resposta quantitativa mostra-se mais limitada nas configurações de maior rigidez, indicando tendência de subestimação em relação aos resultados obtidos pelo MEF.

4.2.3 Análise do Grupo 3

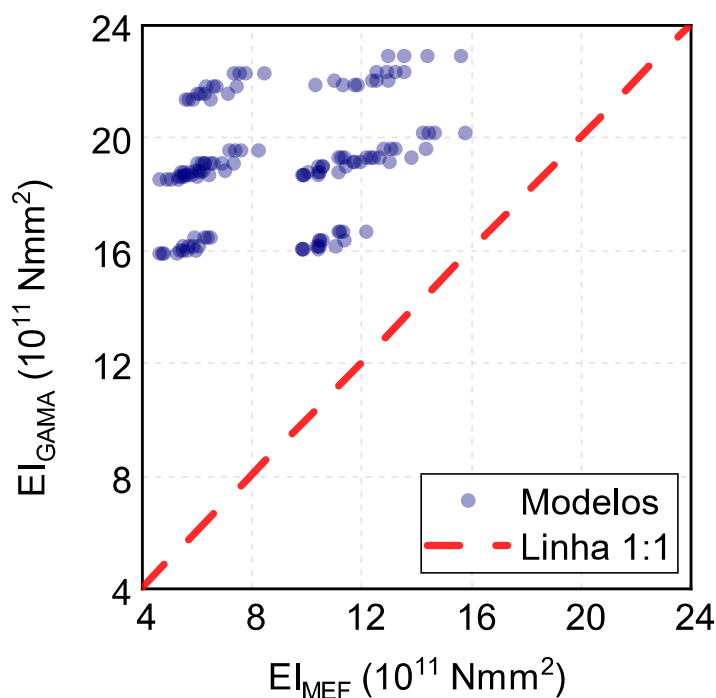
O Grupo 3 é constituído por quatro conjuntos de modelos paramétricos, totalizando 128 simulações numéricas. A altura total da viga é de 340 mm, composta por uma alma de 300 mm e uma mesa com 40 mm de espessura. Em relação aos grupos anteriores, esse grupo permite avaliar o efeito do aumento da altura da alma sobre a rigidez efetiva à flexão e sobre a precisão do Método Gama. A Tabela 22 apresenta os parâmetros geométricos adotados para os modelos do Grupo 3.

Tabela 22 - Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 3							
G3	H_{alma} (mm)	B_{alma} (mm)	H_{mesa} (mm)	B_{mesa} (mm)	L (mm)	d (mm)	s (mm)
Conj. 1	300	50	40	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 2	300	60	40	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 3	300	50	40	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 4	300	60	40	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250

Fonte: Própria autora (2026).

Para o Grupo 3, a Figura 26 apresenta a correlação entre a rigidez efetiva à flexão obtida numericamente pelo MEF (EI_{MEF}) e a rigidez estimada pelo Método Gama (EI_{γ}), em relação à linha de igualdade 1:1.

Figura 26 - Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e por Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 3 ($h = 340$ mm) em relação à linha de referência 1:1.



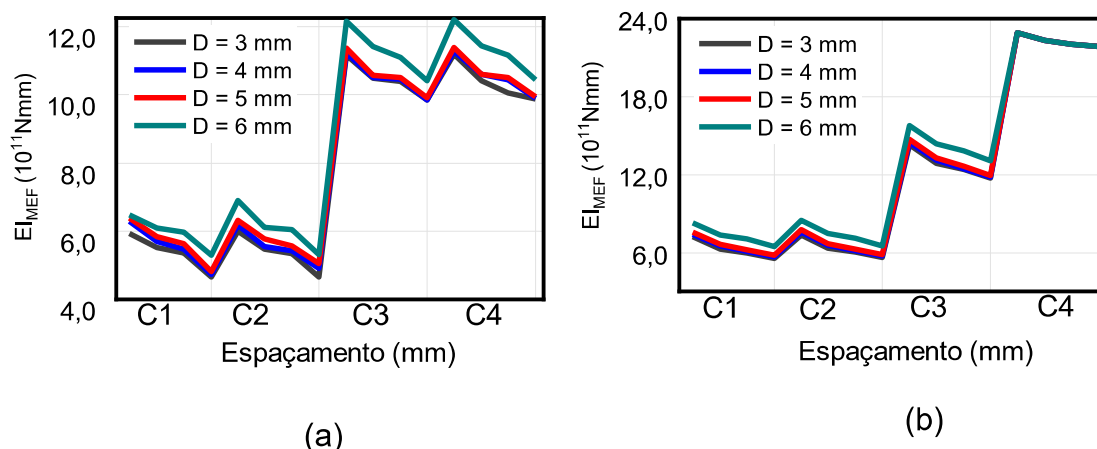
Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 26, que os pontos se encontram acima da linha de igualdade, indicando que os valores estimados pelo Método Gama são superiores aos obtidos numericamente pelo MEF. Esse comportamento evidencia uma tendência de superestimação da rigidez efetiva à flexão para os modelos do Grupo 3.

Além disso, o afastamento em relação à linha 1:1 ocorre em praticamente toda a faixa analisada, indicando que a diferença entre os métodos não se restringe a configurações isoladas. Esse resultado sugere que o aumento da altura da alma altera de forma significativa a relação entre os resultados numéricos e do Método Gama.

A Figura 27 apresenta a variação da rigidez à flexão efetiva obtida pelo MEF para o Grupo 3, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm.

Figura 27 - Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 3 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.

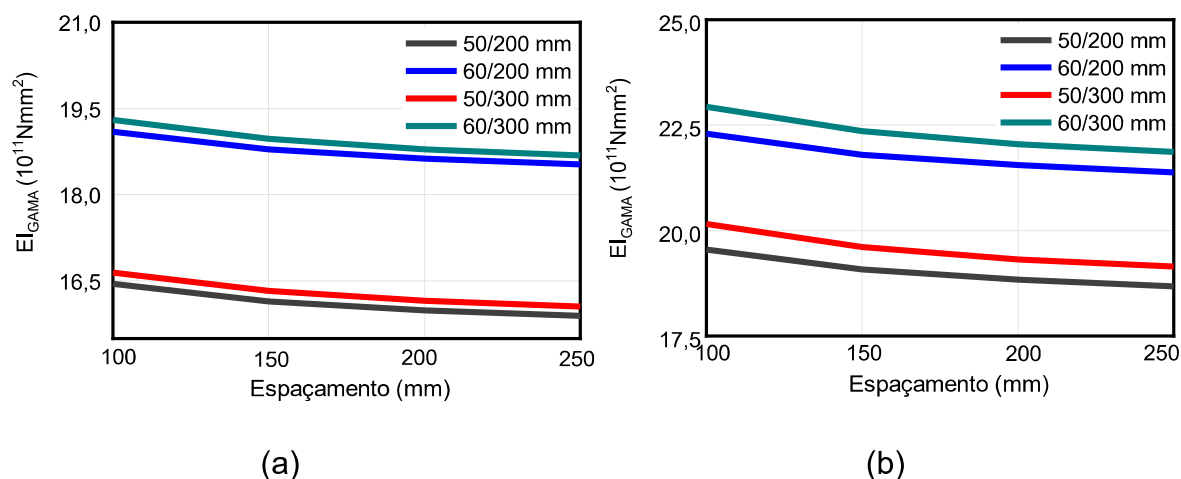


Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 27, que os resultados por MEF apresentam variações associadas ao espaçamento, ao diâmetro dos conectores e à largura da mesa. De modo geral, a rigidez efetiva à flexão é maior nas configurações com mesa de 300 mm e conectores de maior diâmetro. Também se verifica que o aumento do espaçamento entre conectores reduz a rigidez à flexão efetiva dentro de cada conjunto. Esse comportamento ocorre nos dois vãos analisados, embora com amplitudes distintas.

A Figura 28 apresenta os valores de rigidez à flexão efetiva estimados pelo Método Gama para o Grupo 3, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm.

Figura 28 - Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 3 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 28, que as curvas estimadas pelo Método Gama apresentam comportamento mais uniforme, com redução gradual da rigidez efetiva à flexão à medida que o espaçamento entre conectores aumenta. No entanto, essa variação é menos acentuada do que aquela observada nos resultados numéricos.

As curvas também indicam que o método diferencia as configurações geométricas, atribuindo maiores valores às seções com mesa de 300 mm. Entretanto, a influência do diâmetro dos conectores é pouco expressiva, reforçando a menor sensibilidade do Método Gama a esse parâmetro.

As Tabelas 23 e 24 apresentam uma amostra comparativa dos valores de rigidez à flexão efetiva obtidos pelo MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 3, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm, respectivamente. Os resultados completos são apresentados no Apêndice C.

Tabela 23 - Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 3 com vão de 2600 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_r (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G3-C1-D3-S100-C2600	5,94	16,50	177,11
G3-C1-D3-S150-C2600	5,51	16,10	193,20
G3-C1-D3-S200-C2600	5,37	16,00	197,82
G3-C1-D3-S250-C2600	4,65	15,90	241,74
G3-C1-D6-S100-C2600	6,48	16,50	153,99
G3-C1-D6-S150-C2600	6,09	16,10	165,39
G3-C1-D6-S200-C2600	5,98	16,00	167,42
G3-C1-D6-S250-C2600	5,29	15,90	200,29

Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 24 - Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e por Método Gama para os modelos do Grupo 3 com vão de 4100 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_{\gamma} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G3-C1-D3-S100-C4100	7,20	19,50	171,35
G3-C1-D3-S150-C4100	6,29	19,10	203,29
G3-C1-D3-S200-C4100	5,98	18,83	214,77
G3-C1-D3-S250-C4100	5,55	18,67	236,30
G3-C1-D6-S100-C4100	8,27	19,50	136,36
G3-C1-D6-S150-C4100	7,33	19,10	160,41
G3-C1-D6-S200-C4100	7,05	18,83	167,11
G3-C1-D6-S250-C4100	6,46	18,67	189,05

Fonte: Própria autora (2026).

A partir das Tabelas 23 e 24, confirma-se que os valores estimados pelo Método Gama são superiores aos valores obtidos pelo MEF para os modelos apresentados. Os erros percentuais elevados indicam que, para o Grupo 3, o Método Gama passa a superestimar a rigidez à flexão efetiva (EI). De forma geral, os resultados do Grupo 3 indicam uma mudança importante em relação aos Grupos 1 e 2. Enquanto nos grupos anteriores o Método Gama tendia a subestimar a rigidez nas configurações mais rígidas, neste grupo ocorre superestimação sistemática. Esse comportamento está associado ao aumento da altura da alma, que intensifica a diferença entre a resposta numérica e o cálculo por Método Gama.

Assim, para o Grupo 3, o Método Gama representa qualitativamente algumas tendências gerais, como a influência do espaçamento e da geometria da seção. No entanto, apresenta limitação quantitativa significativa, com estimativas superiores às obtidas pelo MEF e erros percentuais elevados.

4.2.4 Análise do Grupo 4

O Grupo 4 é constituído por modelos com altura total de 360 mm, obtida pela associação de uma alma de 300 mm e uma mesa com 60 mm de espessura. Trata-se da configuração com maior altura total entre os grupos avaliados, permitindo

verificar o comportamento dos métodos em uma seção transversal mais robusta. A Figura 28 apresenta o gráfico de dispersão entre a rigidez à flexão efetiva obtida numericamente (EI_{MEF}) e a rigidez estimada pelo Método Gama (EI_{γ}).

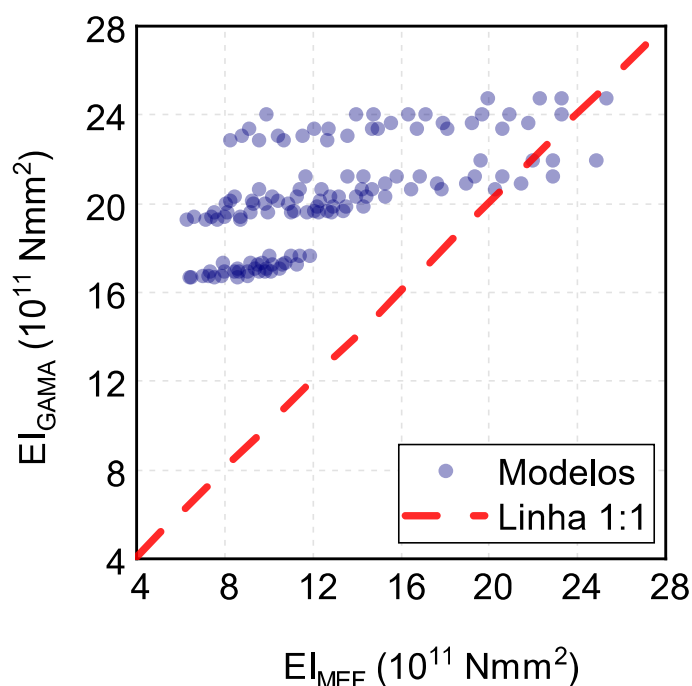
Tabela 25 - Parâmetros geométricos dos conjuntos de modelos paramétricos do Grupo 4

G4	H_{alma} (mm)	B_{alma} (mm)	H_{mesa} (mm)	B_{mesa} (mm)	L (mm)	d (mm)	s (mm)
Conj. 1	300	50	60	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 2	300	60	60	200	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 3	300	50	60	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250
Conj. 4	300	60	60	300	2600, 4100	3, 4, 5, 6	100, 150 200, 250

Fonte: Própria autora (2026).

Para o Grupo 4, a Figura 29 apresenta a correlação entre a rigidez efetiva à flexão obtida numericamente pelo MEF (EI_{MEF}) e a rigidez estimada pelo Método Gama (EI_{γ}), em relação à linha de igualdade 1:1.

Figura 29 — Correlação entre a rigidez à flexão efetiva por MEF (EI_{MEF}) e pelo Método Gama (EI_{γ}) para os modelos do Grupo 4 ($h = 360$ mm) em relação à linha de referência 1:1.

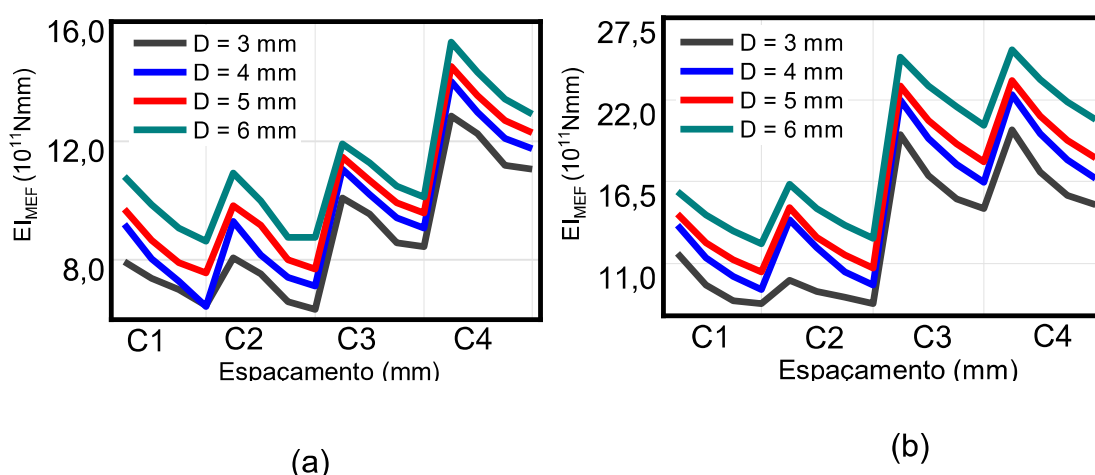


Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 29, que a maior parte dos pontos se posiciona acima da linha de igualdade, indicando que o Método Gama tende a estimar valores superiores aos obtidos numericamente pelo MEF. Esse comportamento confirma a tendência já observada no Grupo 3, porém em uma seção com maior altura total.

Verifica-se que os pontos se distribuem em faixas de rigidez mais elevadas, evidenciando o efeito combinado do aumento da altura da alma e da espessura da mesa. Ainda assim, a proximidade de alguns pontos em relação à linha 1:1 indica que a diferença entre os métodos varia conforme a configuração geométrica e os parâmetros de ligação. A Figura 30 apresenta a rigidez à flexão efetiva obtida pelo MEF para o Grupo 4, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm.

Figura 30 — Rigidez à flexão efetiva obtida via MEF para o Grupo 4 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.



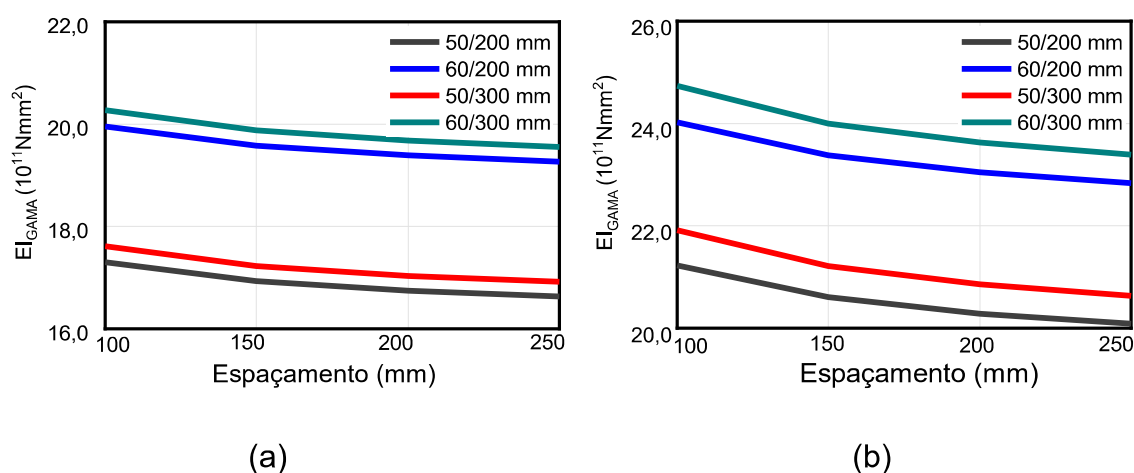
Fonte: Própria autora (2026).

Observa-se, na Figura 30, que os resultados numéricos apresentam variações expressivas em função do espaçamento, do diâmetro dos conectores e da geometria da seção. Dentro de cada conjunto, a rigidez à flexão efetiva tende a diminuir com o aumento do espaçamento entre conectores.

Também se verifica que as configurações com mesa de 300 mm e conectores de maior diâmetro apresentam os maiores valores de EI_{MEF} . Esse comportamento indica que o modelo numérico capta de forma sensível os ganhos de rigidez associados à geometria da seção e aos parâmetros da ligação.

A Figura 31 apresenta os valores de rigidez à flexão efetiva estimados pelo Método Gama para o Grupo 4, considerando os mesmos vãos.

Figura 31 - Rigidez à flexão efetiva estimada pelo Método Gama para o Grupo 4 nos vãos de (a) 2600 mm e (b) 4100 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

Quanto ao Método Gama, a Figura 31 mostra que as curvas obtidas apresentam comportamento mais uniforme, com redução gradual da rigidez à flexão efetiva à medida que o espaçamento entre conectores aumenta. No entanto, essa variação é menos intensa do que a observada nos resultados numéricos.

Os resultados obtidos pelo Método Gama permanecem em faixas elevadas de rigidez, sobretudo nas configurações com maior largura de mesa. Esse comportamento indica que o referido método reconhece a influência da geometria da seção, mas mantém menor sensibilidade às variações associadas ao diâmetro dos conectores.

As Tabelas 26 e 27 apresentam uma amostra comparativa dos valores de rigidez à flexão efetiva obtidos pelo MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 4, considerando os vãos de 2600 mm e 4100 mm, respectivamente. Os resultados completos são apresentados no Apêndice D.

Tabela 26 - Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 4 com vão de 2600 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_{\gamma} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G4-C1-D3-S100-C2600	7,93	17,30	118,14
G4-C1-D3-S150-C2600	7,38	16,93	129,46
G4-C1-D3-S200-C2600	7,00	16,74	139,22
G4-C1-D3-S250-C2600	6,49	16,63	156,41
G4-C1-D6-S100-C2600	1,08	17,30	60,17
G4-C1-D6-S150-C2600	9,86	16,63	71,78
G4-C1-D6-S200-C2600	9,06	16,74	84,78
G4-C1-D6-S250-C2600	8,63	16,63	92,75

Fonte: Própria autora (2026).

Tabela 27 - Amostra comparativa entre a rigidez à flexão efetiva por MEF e pelo Método Gama para os modelos do Grupo 4 com vão de 4100 mm.

MODELO	$EI_{MEF} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	$EI_{\gamma} (10^{11} \text{ Nmm}^2)$	ERRO (%)
G4-C1-D3-S100-C4100	11,72	21,23	81,09
G4-C1-D3-S150-C4100	9,59	20,61	114,89
G4-C1-D3-S200-C4100	8,50	20,29	138,97
G4-C1-D3-S250-C4100	8,28	20,09	142,47
G4-C1-D6-S100-C4100	15,85	21,23	33,91
G4-C1-D6-S150-C4100	14,29	20,61	44,29
G4-C1-D6-S200-C4100	13,24	20,29	53,27
G4-C1-D6-S250-C4100	12,33	20,09	62,94

Fonte: Própria autora (2026).

A partir das Figuras 30 a 31 e dos valores apresentados nas Tabelas 26 e 27, observa-se que o Método Gama tende a superestimar a rigidez à flexão efetiva para o Grupo 4. Os erros percentuais elevados indicam que a diferença entre os métodos se intensifica nas configurações de maior altura total.

De forma geral, os resultados do Grupo 4 reforçam o comportamento observado no Grupo 3. Para seções mais altas e robustas, o Método Gama fornece estimativas superiores às obtidas pelo MEF, demonstrando limitação quantitativa para representar a rigidez à flexão efetiva dessas configurações. Assim, embora o método reproduza qualitativamente algumas tendências, como a influência do espaçamento e da geometria da seção, sua resposta analítica mostra-se menos adequada para os modelos com maior altura total.

4.2.5 Síntese paramétrica e análise comparativa entre os métodos

A síntese dos resultados paramétricos evidência que o espaçamento entre conectores exerceu influência direta sobre a rigidez à flexão efetiva das vigas compostas. De modo geral, menores espaçamentos favoreceram a interação entre mesa e alma, resultando em maiores valores de rigidez. O aumento do diâmetro dos conectores também contribuiu para esse comportamento, embora sua influência tenha se mostrado associada às demais variáveis geométricas avaliadas.

Em relação à geometria da seção transversal, verificou-se que o aumento da altura total da viga promoveu acréscimos expressivos de rigidez, principalmente em função da maior contribuição da seção à flexão. Nesse contexto, o Grupo 4 apresentou os maiores valores absolutos de rigidez efetiva, por corresponder à configuração mais robusta, com altura total de 360 mm.

A análise comparativa dos gráficos de dispersão indica que a precisão do Método Gama foi condicionada pelas proporções geométricas da seção. Nos Grupos 1 e 2, caracterizados por almas de menor altura, o método apresentou melhor aproximação nas configurações menos rígidas, embora tenha demonstrado tendência de subestimação da rigidez em parte dos modelos, especialmente naqueles em que o MEF captou maiores ganhos decorrentes da largura da mesa e dos parâmetros de ligação.

Nos Grupos 3 e 4, com alma de 300 mm, essa tendência se modificou. Nesses casos, os pontos passaram a se concentrar predominantemente acima da linha de igualdade 1:1, indicando que o Método Gama passou a superestimar a rigidez à flexão efetiva em relação aos resultados numéricos. Esse comportamento foi mais evidente no Grupo 4, no qual a maior robustez geométrica intensificou o afastamento entre os métodos.

Essa diferença pode ser atribuída às hipóteses simplificadoras do Método Gama, que representa a interação entre os componentes da viga de forma global e uniformizada. Em contrapartida, o modelo em elementos finitos permite representar com maior detalhamento os efeitos locais da ligação e as variações decorrentes da geometria da seção e dos conectores. Desta forma, enquanto o Método Gama fornece uma resposta média da interação parcial, o MEF apresenta maior sensibilidade às variações paramétricas impostas às vigas compostas.

Silva et al. (2024) destacam que modelos simplificados baseados no Método Gama podem apresentar limitações na representação do comportamento espacial de sistemas compostos, sobretudo quando comparados a modelos numéricos mais refinados. De maneira semelhante, Huber e Deix (2021) identificaram desvios relevantes entre o Método Gama e modelos discretos em sistemas compostos de madeira, especialmente em situações associadas a ligações mais deformáveis. Souza (2025) também verificou tendência de superestimação da rigidez pelo Método Gama em seções transversais mais altas, ressaltando a influência da flexibilidade da ligação sobre a resposta estrutural global.

Portanto, os resultados da presente pesquisa evidenciam que o desempenho estrutural das vigas compostas de madeira com interação parcial depende diretamente da eficiência da ligação e das proporções geométricas da seção transversal. O Método Gama fornece estimativas coerentes para verificações globais e para o pré-dimensionamento de configurações convencionais; entretanto, apresenta perda de precisão nas transições geométricas avaliadas. A formulação por Método

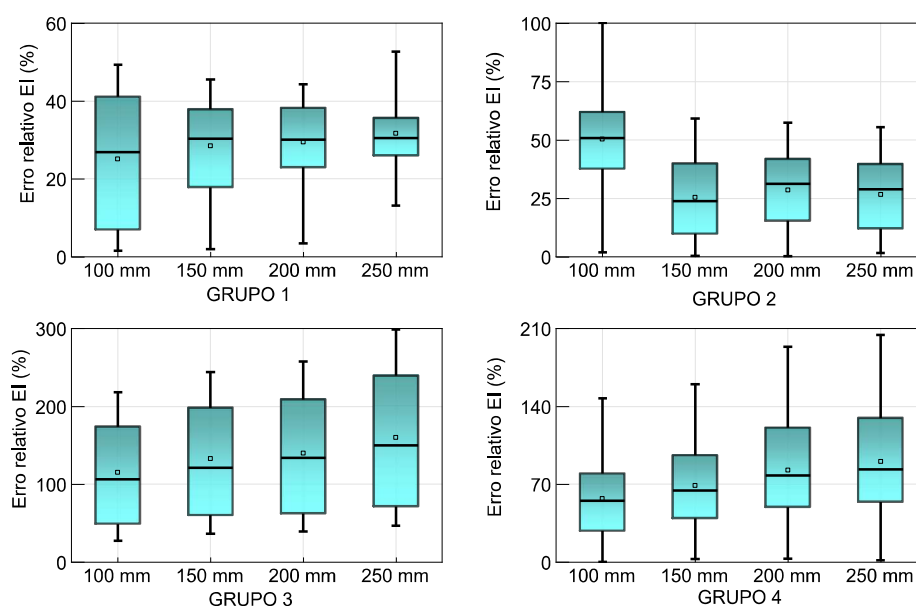
Gama passa de uma condição conservadora, observada nos grupos com menor altura de alma, para uma condição de superestimação da rigidez nas seções mais altas. Esse comportamento exige cautela na aplicação do método, especialmente em vigas com maior altura total e maior robustez geométrica.

4.3 INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE CONECTORES

Com o objetivo de avaliar a influência do espaçamento entre conectores na precisão do Método Gama, analisou-se a distribuição dos erros relativos associados à rigidez à flexão para os diferentes grupos estudados. Os erros foram obtidos a partir da comparação entre os valores estimados pelo Método Gama (EI_{γ}) e os valores

calculados numericamente pelo modelo em elementos finitos (EI_{MEF}). A Figura 32 apresenta a distribuição desses resultados para os diferentes espaçamentos entre conectores.

Figura 32 – Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes espaçamentos entre conectores.



Fonte: Própria autora (2026).

De modo geral, observa-se que o espaçamento entre conectores não apresenta uma tendência isolada e uniforme sobre o erro relativo. Nos Grupos 1 e 2, com alturas totais de 240 mm e 260 mm, respectivamente, os erros são menores e apresentam menor variabilidade, indicando maior concordância entre o Método Gama e o modelo numérico. Já nos Grupos 3 e 4, com alturas totais de 340 mm e 360 mm, os erros relativos são mais elevados, evidenciando que a altura da seção exerce influência mais marcante sobre a diferença entre os métodos.

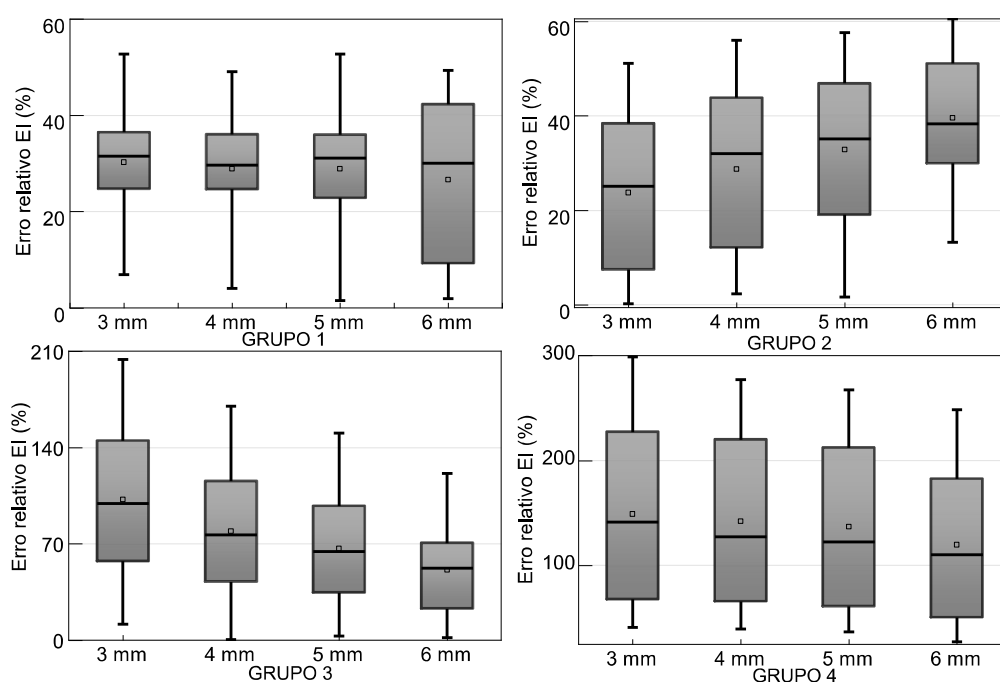
No Grupo 1, os erros permanecem em faixas mais reduzidas, embora ainda exista dispersão entre os resultados. No Grupo 2, observa-se comportamento semelhante, com variações moderadas entre os espaçamentos analisados. Nos Grupos 3 e 4, os erros aumentam de forma expressiva, principalmente em função da maior altura da viga, e não apenas do espaçamento adotado.

Assim, os resultados indicam que o efeito do espaçamento entre conectores depende da interação com os demais parâmetros geométricos, especialmente a altura total da viga. Portanto, embora o espaçamento influencie a rigidez da ligação, a diferença entre o Método Gama e o MEF mostrou-se mais sensível às alterações geométricas da seção transversal.

4.4 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DOS CONECTORES

A influência do diâmetro dos conectores foi avaliada por meio da distribuição do erro relativo de EI para os diferentes grupos analisados. A Figura 33 apresenta a variação dos erros em função dos diâmetros de 3 mm, 4 mm, 5 mm e 6 mm.

Figura 33 – Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes diâmetros dos conectores.



Fonte: Própria autora (2026).

Nos Grupos 1 e 2, com alturas totais de 240 mm e 260 mm, os erros relativos permanecem em níveis mais baixos quando comparados aos grupos de maior altura. Observa-se, nesses casos, que a variação do diâmetro dos conectores altera a dispersão dos resultados, mas sem modificar de forma acentuada o padrão geral de concordância entre os métodos.

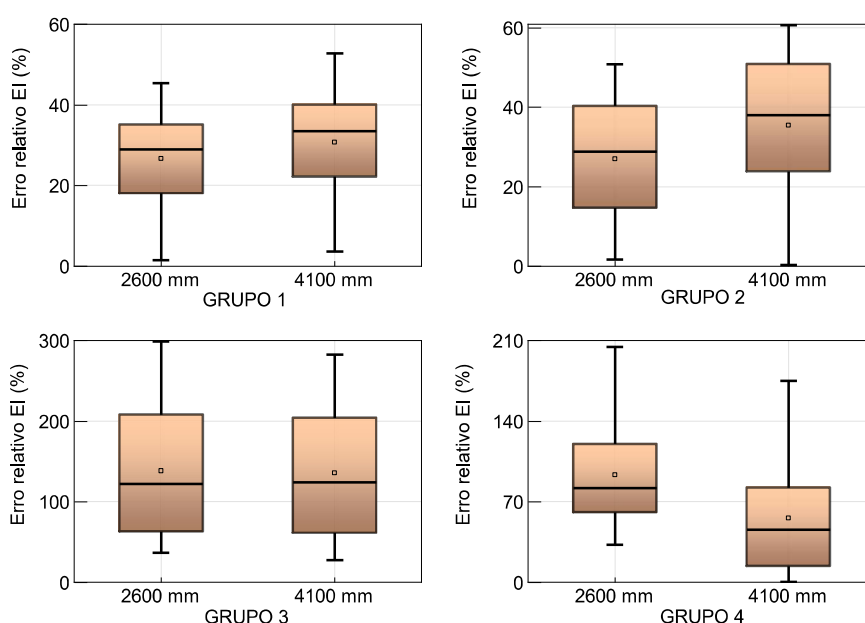
No Grupo 3, com altura total de 340 mm, os erros são significativamente mais elevados. A distribuição indica redução gradual do erro com o aumento do diâmetro dos conectores, sugerindo que ligações mais rígidas contribuem para aproximar parcialmente os resultados do Método Gama e numéricos. No Grupo 4, com altura total de 360 mm, os erros permanecem elevados e apresentam maior dispersão, indicando que o aumento do diâmetro não é suficiente para eliminar as diferenças entre os métodos.

De modo geral, o aumento do diâmetro dos conectores tende a melhorar a rigidez da ligação e favorecer a transferência de esforços entre os elementos da seção composta. No entanto, essa influência não ocorre de forma isolada. Os resultados mostram que a precisão do Método Gama depende também da altura da viga e da configuração geométrica da seção transversal.

4.5 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA VIGA

A influência do comprimento da viga foi avaliada a partir da distribuição do erro relativo de EI para os vãos de 2600 mm e 4100 mm. A Figura 34 apresenta a comparação dos erros para os quatro grupos analisados.

Figura 34 – Distribuição do erro relativo de EI para os diferentes comprimentos de viga.



Fonte: Própria autora (2026).

Nos Grupos 1 e 2, com alturas totais de 240 mm e 260 mm, observa-se que o aumento do vão tende a elevar a dispersão dos erros, embora os valores ainda permaneçam em faixas mais moderadas. Esse comportamento indica que, para vigas de menor altura, o Método Gama mantém melhor concordância com o modelo numérico, mesmo com a alteração do comprimento da viga.

No Grupo 3, com altura total de 340 mm, os erros relativos são mais elevados em ambos os vãos, evidenciando que a maior altura da seção transversal intensifica as diferenças entre os métodos. Já no Grupo 4, com altura total de 360 mm, observa-se redução dos erros para o vão de 4100 mm em relação ao vão de 2600 mm, embora ainda exista dispersão significativa dos resultados.

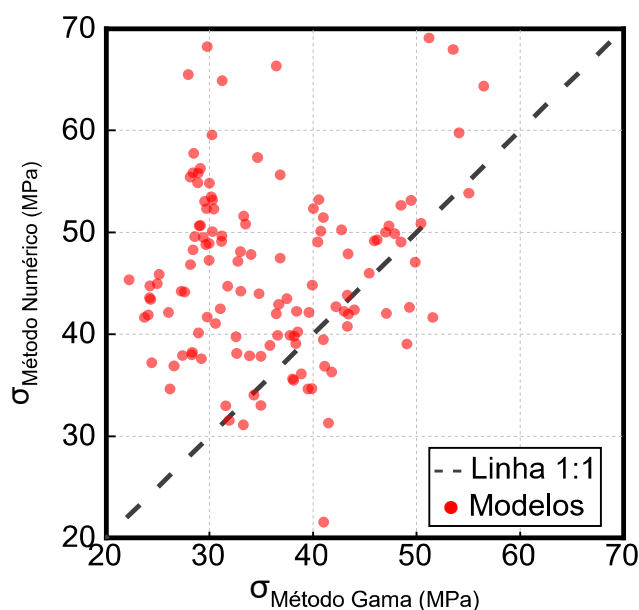
Dessa forma, os resultados indicam que o comprimento da viga influencia a distribuição dos erros, mas seu efeito também depende da geometria da seção transversal. A altura total da viga mostrou-se um fator determinante na precisão do Método Gama, uma vez que os maiores erros ocorreram nos grupos com seções mais altas.

4.6 ANÁLISE DAS TENSÕES NORMAIS

Nesta seção, são comparadas as tensões normais obtidas pelo Método Gama e pelo modelo numérico em elementos finitos, com o objetivo de avaliar a capacidade do procedimento do Método Gama em representar a distribuição de tensões na seção composta. As tensões normais foram determinadas com base nas equações apresentadas na Seção 3.7.

Para esta análise, foram selecionados quatro grupos representativos, considerando diferentes alturas totais de viga: 240 mm, 260 mm, 340 mm e 360 mm. Essa escolha permitiu avaliar o comportamento das tensões em seções com distintas proporções geométricas, mantendo coerência com os grupos analisados anteriormente para a rigidez à flexão. A Figura 35 apresenta a comparação entre as tensões normais obtidas pelo Método Gama e pelo MEF. A linha de igualdade 1:1 representa a concordância perfeita entre os dois métodos, permitindo avaliar o grau de aproximação dos resultados."

Figura 35 – Relação entre as tensões normais obtidas pelo Método Gama e pelo MEF em elementos finitos, com linha de igualdade 1:1.



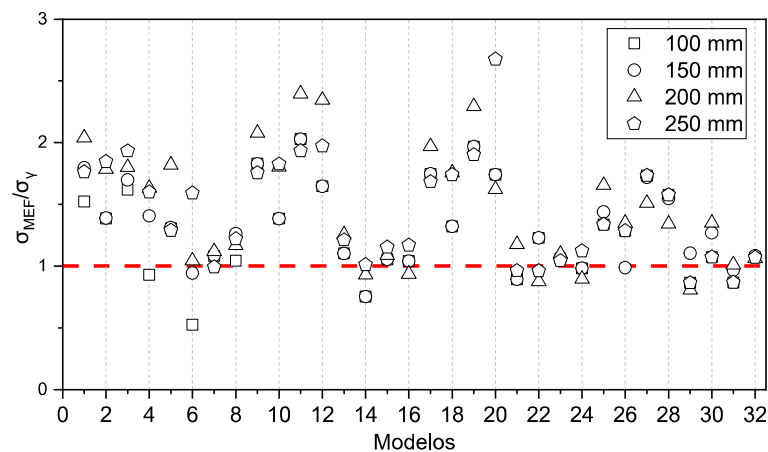
Fonte: Própria autora (2026).

A Figura 35 mostra elevada dispersão dos pontos em relação à linha de igualdade 1:1, indicando diferenças significativas entre as tensões normais calculadas pelos dois métodos. De modo geral, o Método Gama não reproduz com precisão a distribuição de tensões obtida pelo modelo com elementos finitos, especialmente em configurações em que a geometria da seção e a rigidez da ligação influenciam de forma mais acentuada a resposta estrutural.

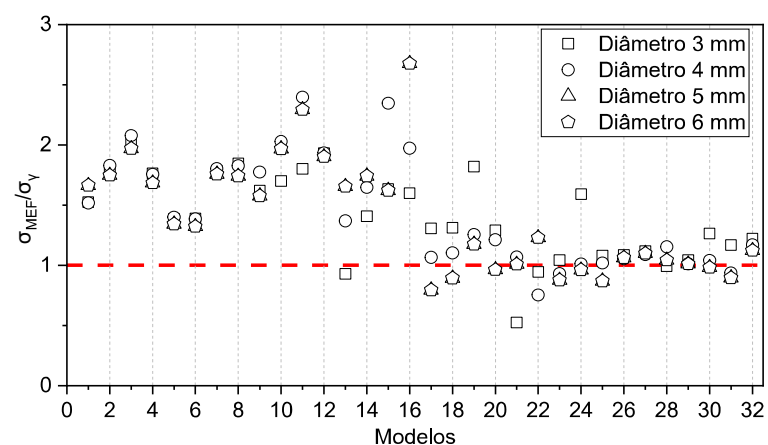
Esse comportamento está associado às simplificações do Método Gama, que considera a interação entre os elementos da seção composta de forma mais global e uniformizada. Já o modelo numérico representa de maneira mais detalhada a ligação discreta entre mesa e alma, permitindo capturar efeitos locais, concentrações de tensões e variações mais sensíveis ao longo da seção.

Para complementar essa avaliação, analisou-se a razão entre as tensões obtidas pelo MEF e pelo Método Gama, considerando diferentes parâmetros geométricos e de ligação. A Figura 36 apresenta essa relação em função do espaçamento entre conectores, do diâmetro dos conectores e do comprimento da viga.

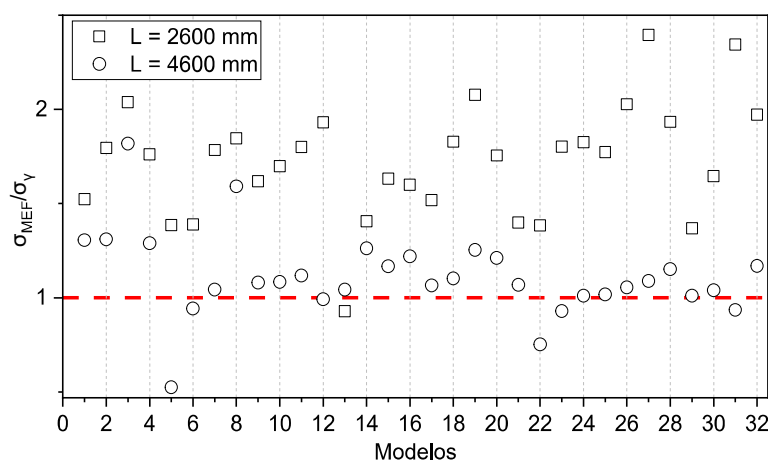
Figura 36 – Relação entre as tensões normais σ_{MEF}/σ_Y em função dos parâmetros analisados: (A) espaçamento entre conectores; (B) diâmetro dos conectores; (C) comprimento da viga.



A) Espaçamento entre conectores (s)



B) Diâmetro dos conectores (D)



C) Comprimento da viga (L)

Observa-se que os valores se distribuem em torno da linha de referência $\sigma_{MEF}/\sigma_y = 1$, porém com dispersão significativa. Valores superiores a 1 indicam que o MEF fornece tensões maiores que o Método Gama, enquanto valores inferiores a 1 indicam o comportamento oposto. Essa variação confirma que a concordância entre os métodos depende da combinação entre os parâmetros geométricos e de ligação.

De modo geral, verifica-se maior aproximação entre os métodos nos modelos com maior diâmetro dos conectores e menor espaçamento entre eles, condições associadas à maior rigidez da ligação e menor deslizamento relativo entre os elementos da seção composta. Por outro lado, nas configurações com menor eficiência de ligação, as diferenças tornam-se mais evidentes, reforçando as limitações do Método Gama na representação das tensões locais.

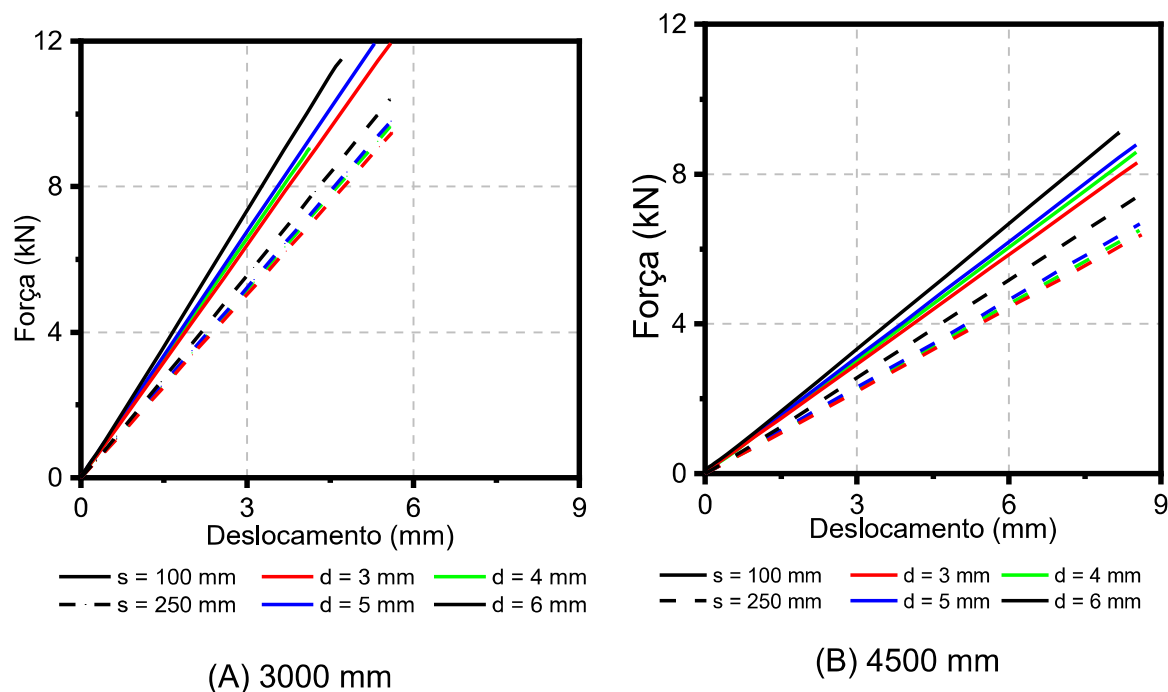
Portanto, embora o Método Gama apresente resultados úteis para estimativas globais, sua capacidade de representar a distribuição local de tensões é limitada. O modelo por MEF mostrou-se mais adequado para essa análise, principalmente em sistemas com interação parcial, nos quais o comportamento da ligação exerce influência direta sobre a resposta estrutural.

4.7 ANÁLISE DA CURVA FORÇA versus DESLOCAMENTO

Esta seção apresenta as curvas força $\times$ deslocamento dos modelos selecionados na análise das tensões normais, com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros geométricos e de ligação na rigidez global das vigas compostas. A inclinação das curvas permite interpretar a rigidez dos modelos, bem como os efeitos do espaçamento entre conectores, do diâmetro dos conectores e do comprimento da viga.

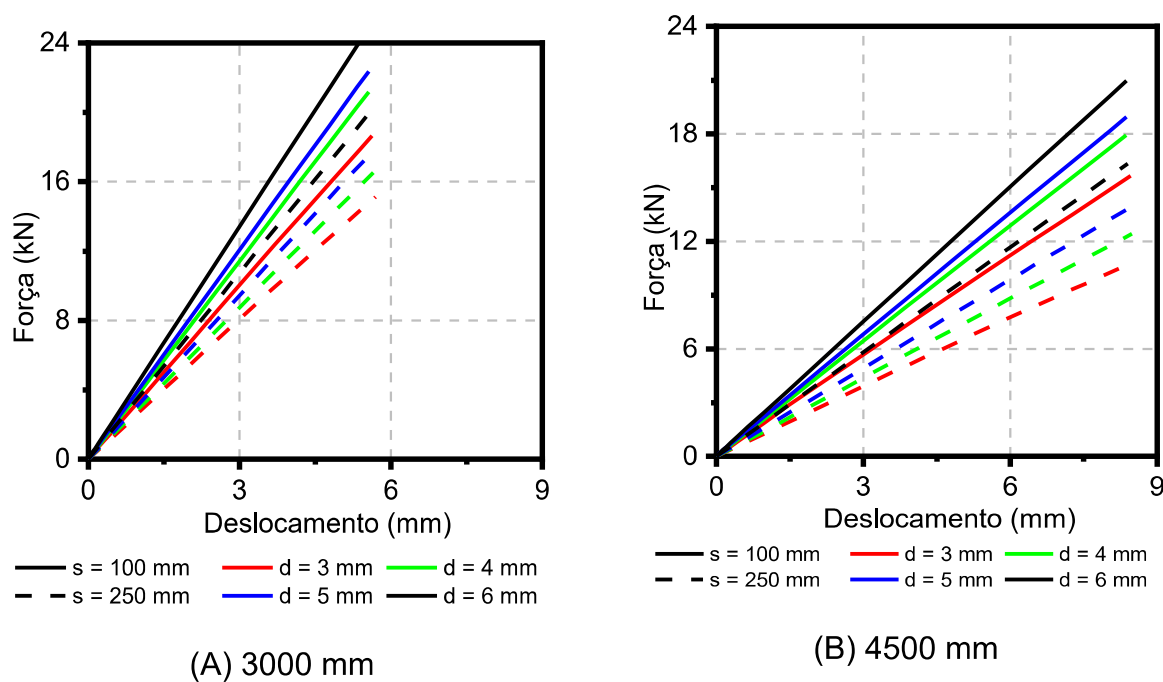
As Figuras 37 a 40 apresentam as curvas força versus deslocamento para os grupos analisados, contemplando diferentes alturas totais de viga. De modo geral, observa-se que as curvas com menor espaçamento entre conectores apresentam maior inclinação, indicando maior rigidez global do sistema. Esse comportamento ocorre porque a redução do espaçamento favorece a transferência de esforços entre mesa e alma, reduzindo o deslizamento relativo na interface.

Figura 37 – Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 240 mm.



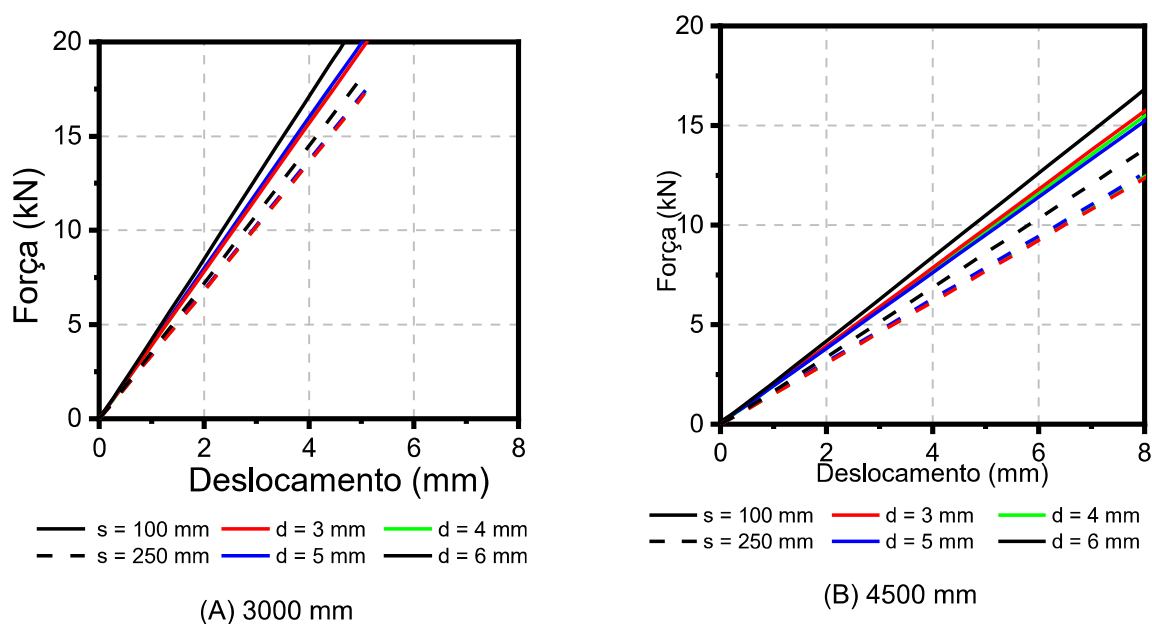
Fonte: Própria autora (2026).

Figura 38 – Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 260 mm.



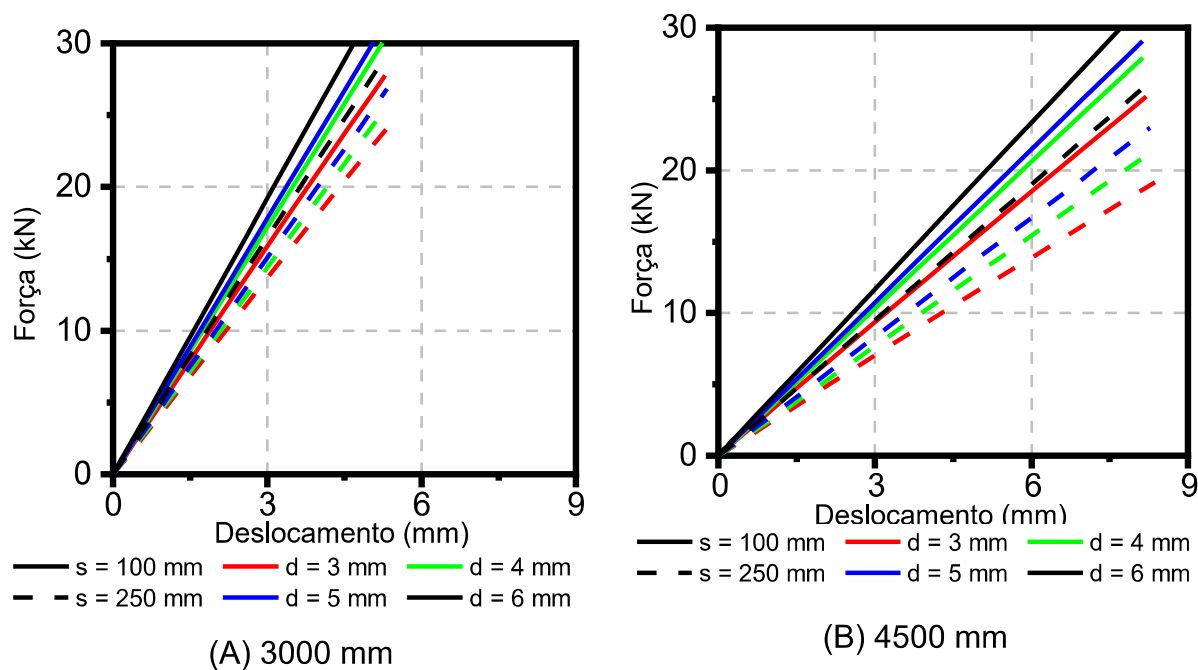
Fonte: Própria autora (2026).

Figura 39 – Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 340 mm.



Fonte: Autora (2026).

Figura 40 – Curvas força versus deslocamento para os modelos com altura total de 360 mm.



Fonte: Própria autora (2026).

Além do espaçamento, o diâmetro dos conectores também influencia a rigidez das vigas. O aumento do diâmetro tende a elevar a inclinação das curvas, indicando maior rigidez da ligação e melhor transferência de esforços entre os elementos da seção composta. No entanto, esse efeito é menos pronunciado quando comparado ao efeito do espaçamento entre conectores.

Comparando os grupos analisados, verifica-se que o aumento da altura total da seção resulta em maiores níveis de rigidez e capacidade resistente. Esse comportamento é observado pela maior inclinação das curvas e pelos maiores valores de força obtidos para um mesmo nível de deslocamento. Assim, as seções mais altas apresentam resposta estrutural mais rígida, especialmente quando associadas a menores espaçamentos e maiores diâmetros de conectores.

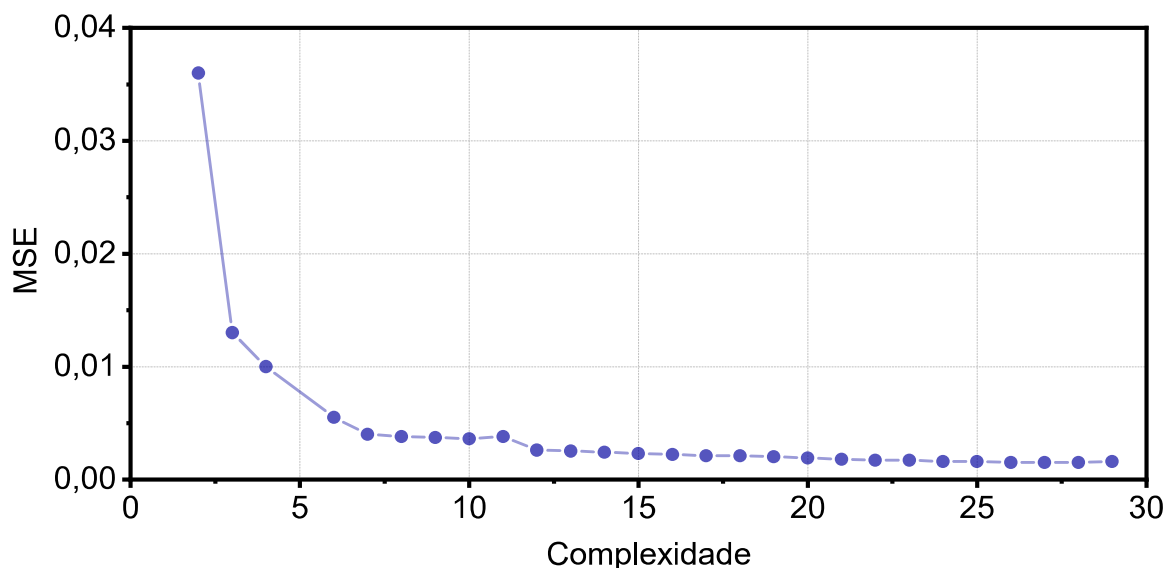
De modo geral, os resultados das curvas de força versus deslocamento confirmam as tendências observadas nas análises anteriores. A rigidez global das vigas compostas é influenciada pela geometria da seção transversal e pela eficiência da ligação, sendo o espaçamento entre conectores um dos parâmetros mais relevantes para o controle do deslizamento relativo entre mesa e alma.

4.8 REGRESSÃO SIMBÓLICA

Com o objetivo de obter uma expressão analítica capaz de representar a influência dos parâmetros geométricos e de ligação na resposta estrutural das vigas compostas, aplicou-se o algoritmo de regressão simbólica. Essa abordagem empírica permitiu condensar o comportamento estrutural analisado em uma formulação analítica direta, buscando o equilíbrio entre a precisão preditiva e a simplicidade matemática.

A Figura 41 apresenta a relação entre a complexidade das expressões geradas e o erro quadrático médio (MSE). Observa-se redução progressiva do MSE com o aumento da complexidade, indicando melhoria da capacidade preditiva dos modelos. Entretanto, a partir da complexidade 23, os valores passam a apresentar pouca variação, evidenciando estabilização do desempenho.

Figura 41 – Complexidade versus MSE



Fonte: Própria autora (2026).

Dessa forma, considerando o objetivo de obter uma equação simultaneamente precisa e simplificada, o modelo com complexidade igual a 23 (4.3) foi selecionada como a melhor opção.

$$\alpha = L \cdot \left(1,024 \cdot 10^{-5} - \frac{2,394 \cdot 10^{-5}}{D} \right) \cdot (t_f - 45,285) + b_f \cdot (-0,000249) + 0,814 - \frac{0,120}{D - 6,652} \quad (4.3)$$

Em que:

L é o comprimento da viga (mm);

D é o diâmetro do conector (mm);

t_f é a espessura da mesa (mm);

b_f é a largura da mesa (mm).

Observa-se que o processo evolutivo selecionou apenas quatro variáveis relevantes (L , D , t_f e b_f), indicando que esses parâmetros exercem maior influência na resposta estrutural analisada. A validação do modelo foi conduzida por meio da análise de métricas estatísticas globais e da inspeção dos resultados obtidos, assegurando consistência preditiva. As métricas apresentadas na Tabela 28 indicam desempenho consistente nos conjuntos de treinamento, validação e total, com

coeficiente de determinação superior a 95%, MAPE próximo de 3% e baixos valores de MSE e RMSE. Esses resultados evidenciam a robustez e a aplicabilidade da equação para estimativas no escopo investigado.

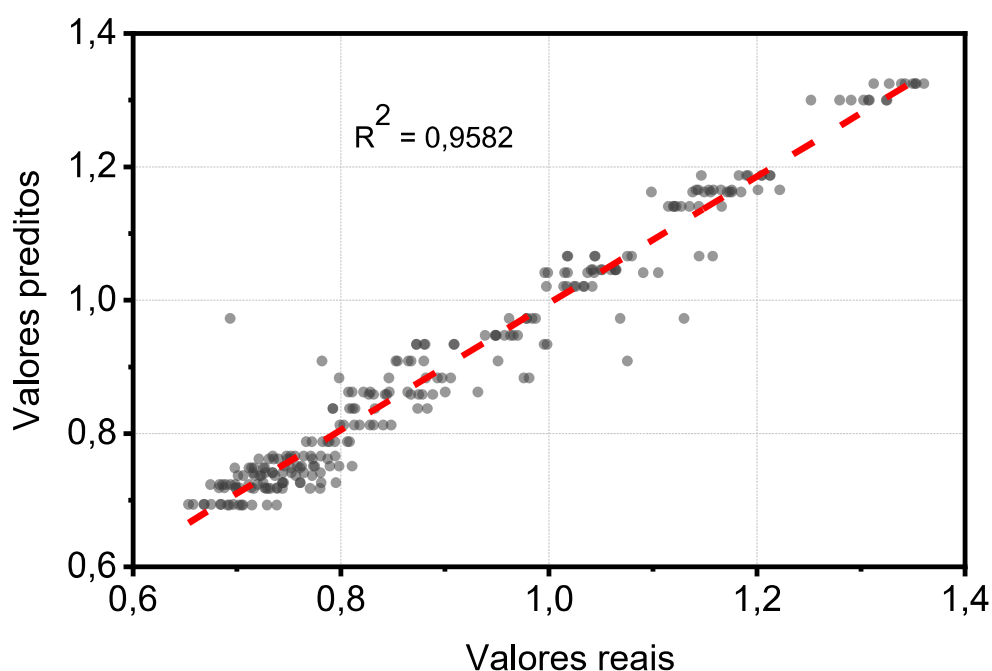
Tabela 28 – Métricas do modelo - treinamento

Conjunto	R ² (%)	MAPE (%)	MSE	RMSE	Desvio padrão
Treinamento	95,543	2,998	0,00152	0,0390	0,181
Validação	96,67859	3,247	0,001423	0,0377	0,197
Total	95,818	3,048	0,001504	0,0390	0,184

Fonte: Própria autora (2026).

A Figura 42 apresenta a comparação entre os valores reais e estimados para o conjunto total de dados. A proximidade dos pontos em relação à linha de tendência indica elevada concordância entre os resultados, evidenciando a capacidade do modelo em representar adequadamente o comportamento dos dados ao longo do domínio analisado.

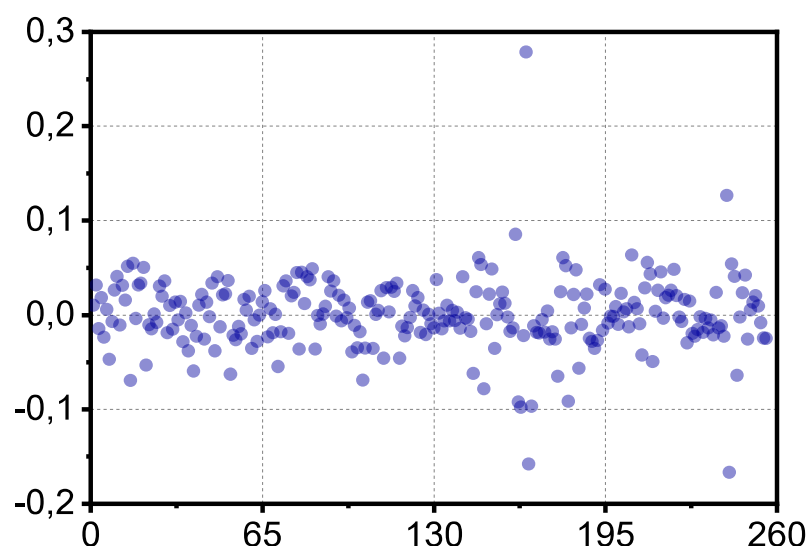
Figura 42 – Valor real versus valor predito no conjunto completo de dados – conjunto total



Fonte: Própria autora (2026).

Em relação aos resíduos, observa-se que aproximadamente 79% dos dados apresentaram desvios inferiores a 0,025, enquanto 95% permaneceram abaixo de 0,05. A análise apresentada na Figura 43 indica distribuição aproximadamente aleatória dos resíduos em torno de zero, sem tendência definida, indicando ausência de viés sistemático relevante e reforçando a adequação do modelo ajustado.

Figura 43 – Valor real versus valor predito no conjunto completo de dados – conjunto total



Fonte: Própria autora (2026).

De modo geral, os resultados demonstram que a regressão simbólica foi capaz de representar adequadamente a relação dos parâmetros geométricos e de ligação com resposta estrutural analisada, produzindo uma expressão analítica com elevada capacidade preditiva e baixa complexidade relativa.

4.9 SÍNTESE GERAL DOS RESULTADOS

A análise dos resultados permitiu identificar que a resposta estrutural das vigas compostas variou de forma significativa em função da geometria da seção transversal e dos parâmetros de ligação. Entre os grupos avaliados, observou-se que o aumento

da altura total da viga promoveu elevação da rigidez à flexão e modificou o padrão de concordância entre o Método Gama e o modelo numérico baseado em elementos finitos.

Nos Grupos 1 e 2, com alturas totais de 240 mm e 260 mm, respectivamente, os resultados apresentaram maior proximidade entre os métodos, principalmente nas configurações de menor rigidez global. Nessas condições, o Método Gama demonstrou melhor aderência aos valores obtidos numericamente. Entretanto, com o aumento da altura da seção nos Grupos 3 e 4, correspondentes às alturas totais de 340 mm e 360 mm, verificou-se maior dispersão entre os resultados do Método Gama e por MEF, com tendência de superestimação da rigidez à flexão efetiva pelo Método Gama.

A avaliação paramétrica indicou que o espaçamento entre conectores influenciou a rigidez global das vigas, uma vez que menores espaçamentos favoreceram a transferência de esforços entre mesa e alma. O diâmetro dos conectores também contribuiu para o aumento da rigidez da ligação, embora seu efeito tenha ocorrido de forma associada às demais variáveis geométricas. O comprimento da viga, por sua vez, alterou a distribuição dos erros relativos, mas a altura da seção transversal mostrou-se mais determinante na diferença entre os métodos.

Na análise das tensões normais, verificou-se dispersão significativa entre os valores obtidos pelo Método Gama e pelo MEF. Esse comportamento indicou que o Método Gama apresentou maior limitação na representação da distribuição local de tensões, enquanto o modelo em elementos finitos mostrou com maior sensibilidade os efeitos associados à ligação discreta e à interação parcial entre os elementos da seção composta.

As curvas força versus deslocamento confirmaram as tendências observadas nas análises de rigidez. Os modelos com menor espaçamento entre conectores e maiores diâmetros apresentaram maior inclinação das curvas, indicando aumento da rigidez global. Semelhantemente, os grupos com maiores alturas totais apresentaram níveis superiores de força para um mesmo intervalo de deslocamento, evidenciando a influência da geometria da seção na resposta estrutural.

Por fim, a regressão simbólica apresentou bom ajuste aos dados analisados, indicando que os parâmetros geométricos e de ligação selecionados foram relevantes para representar a resposta estrutural das vigas compostas. A equação obtida mostrou capacidade de reproduzir a tendência geral dos resultados, funcionando como uma representação complementar das relações observadas nas análises realizadas.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa atingiu seus objetivos ao avaliar a aplicação do Método Gama na estimativa da rigidez à flexão e das tensões normais em vigas compostas de madeira com seção em T, confrontando os resultados analíticos com a modelagem numérica em elementos finitos. Com base no desenvolvimento do estudo, conclui-se que:

- **Validação e Eficiência do Método Gama:** O Método Gama consolidou-se como uma ferramenta analítica adequada e eficiente para estimativas preliminares da rigidez efetiva à flexão, apresentando forte aderência frente aos modelos numéricos, sobretudo nas configurações de menor altura e rigidez global.
- **Limitações do Método Analítico:** Identificou-se que o método simplificado apresenta restrições na representação fiel dos efeitos locais de interação parcial e na distribuição de tensões normais. Nesses aspectos, a modelagem em elementos finitos demonstrou superioridade ao capturar com maior sensibilidade o comportamento discreto da ligação mecânica e a distribuição real de tensões.
- **Influência Paramétrica:** A avaliação paramétrica comprovou que o espaçamento entre os conectores é o parâmetro de maior impacto na rigidez efetiva da viga composta, seguido pelo diâmetro dos conectores e pela geometria da seção transversal (altura e largura da mesa).
- **Modelos por Regressão Simbólica:** O algoritmo de regressão simbólica cumpriu com êxito o propósito de gerar expressões analíticas simplificadas de alta precisão ($R^2 > 95\%$), fornecendo uma ferramenta matemática prática, robusta e confiável para o projeto preliminar e análises paramétricas de vigas compostas de madeira.

REFERÊNCIAS

ABDUSALAMOV, R. *et al.* Automatic generation of interpretable hyperelastic material models by symbolic regression. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 124, n. 9, p. 2093-2104, 2023.

AMORIM, S. T. A. *et al.* A madeira laminada cruzada: Aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. **Revista Materia**, v. 22, 2017.

ANGELIS, D. *et al.* Artificial intelligence in physical sciences: Symbolic Regression trends and perspectives. **Springer**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 3845-3865, 2023.

AQUINO, V. B. de M. *et al.* Evaluation of moisture content variation on strength and stiffness properties of Cedrella sp. wood specie. **International Engineering Journal**, v. 75, n. 2, p. 111-116, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira**. Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

AUCLAIR, S. C. Design guide for timber-concrete composite floors in Canada. [S. l.]: FPIInnovations, 2020.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015. v. 2.

BEDON, C.; FRAGIACOMO, M. Numerical analysis of timber-to-timber joints and composite beams with inclined self-tapping screws. **Composite Structures**, v. 207, p. 13-28, 2019.

BELL, P. W. R. Wooden Structures by G. G. Karlsen and the Derevyagin beam. In: History of Construction Cultures - Proceedings of the 7th International Congress on Construction History (7ICCH 2021), v. 1, p. 734-740, 2022.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York, 1982.

BRANCO, L. A. M. N. *et al.* Influence of moisture content in some mechanical properties of two brazilian tropical wood species. **Advanced Materials Research**, v. 1025-1026, p. 42-45, 2014.

CALIL JÚNIOR, C. *et al.* Estruturas de Madeira: projetos, dimensionamento e exemplos de cálculo. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

CHRISTOFORO, A. L. *et al.* Avaliação numérica do módulo de elasticidade em vigas roliças de madeira da espécie *Pinus elliottii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 4, p. 1271-1279, out./dez. 2016.

CHRISTOVASILIS, I. P. *et al.* Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 202-213, 2016.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. A estrutura anatômica da madeira e princípios para sua identificação. Brasília: IBAMA, 2002.

CRANMER, M. Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression.jl. **arXiv**, [s. l.], 2023.

DE ARAUJO, V. A. *et al.* Can timber houses be productively faster to build than other buildings? **Revista Árvore**, v. 46, 2022a.

DE ARAUJO, V. A. *et al.* Costs of timber houses in different standards and productions in Brazil. **Ingeniería**, Bogotá, v. 28, n. 1, e18228, 2022b.

DE ARAUJO, V. A.; GARCIA, J. N. Redes de conhecimento como estratégia de desenvolvimento de subsetores fabris: participação dos produtores brasileiros de casas de madeira em eventos técnicos e científicos. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 61, n. 2, p.299–313, 2024

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 65, p. 102-113, 2004.

DINWOODIE, J. M. **Timber: its nature and behaviour**. 2. ed. London: E & FN Spon, 2004.

ESPÍNDOLA, Luciana da Rosa. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. 2017. 331 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1** – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1995-1-2** – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-2:2005** — Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design. Brussels: CEN, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 338: Structural timber – Strength classes**. Brussels, 2009.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 408** – Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. Brussels: CEN, 2012.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p. (General Technical Report FPL-GTR-190).

GILLIS, P. P. Orthotropic elastic constants of wood. **Wood Science and Technology**, v. 6, n. 2, p. 138-156, 1972.

GIONGO, J. S.; PIAZZA, M.; TOMASI, R. Out of plane refurbishment techniques of existing timber floors by means of timber to timber composite structures. In: **WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING – WCTE 2012**, 2012, Auckland. *Proceedings...* Auckland: WCTE, 2012.

GÓES, J. L. N. **Análise de vigas de madeira pregadas com seção composta I**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GÓES, J. L. N.; DIAS, A. A. Vigas pregadas de madeira com seção composta I. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 24, p. 35-48, dez. 2003.

HUBER, C.; DEIX, K. Comparison of calculation methods of elastic bonding: Limits of the gamma method using an example of a wood–concrete composite floor with single loads. **Materials**, v. 14, n. 23, 2021.

KARACABEYLI, E.; GAGNON, S. **Canadian CLT Handbook: 2019 edition**. Vancouver: FPInnovations, 2019.

KHELIFA, M. *et al.* Analysis of CFRP-strengthened timber beams. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2014.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology. Volume 1: Solid wood**. New York: Springer-Verlag, 1968.

MASCIA, N. T.; LAHR, F. A. R. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 301-310, 2006.

MEGHLAT, E. M. *et al.* A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 263-269, 2013.

MENDES, Paulo M. F. de Castro. Ligações em estruturas de madeira tecnologia e dimensionamento de acordo com o eurocódigo 5. Dissertação (Mestrado

em Construções de Edifícios) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.

MÖHLER, K. Zum tragverhalten von trägern und stützen aus verbundprofilen mit nachgiebigen verbindungen. Karlsruhe: Technische Universität Karlsruhe, 1956.

OLSSON *et al.* Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, p. 319–333, 2013. DOI: 10.1007/s00107-013-0684-5.

OZELTON, E. C.; BAIRD, J. A. **Timber designer's manual**. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science, 2006.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

PREVATT, D. O. *et al.* In situ nail withdrawal strengths in wood roof structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 140, n. 5, p. 1-8, 2014.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

REN, H. *et al.* Proposing new adhesive-free timber edge connections for cross-laminated timber panels: a step toward sustainable construction. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, 2024.

SANTOS, I. dos; MIOTTO, J. L. Análise de tensões normais e de cisalhamento, e deslocamentos verticais em painéis de madeira laminada colada cruzada via teorias de placas, métodos numéricos e simplificados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e128046, 2024.

SILVA, G. dos S. **Estimativa de carga limite de serviço em placas CLT: desenvolvimento de equação e software**. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

SILVA, G. dos S. *et al.* Correção do método gama: estimativa da rigidez de placas CLT sob carga concentrada. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 25, e138153, 2025.

SOUZA, M. S. G. **Avaliação de pisos mistos de seção Pi formados por vigas de madeira laminada colada e concreto**. 2025. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

STEIGER, R.; GEHRI, E. Interaction of shear stresses and stresses perpendicular to the grain. **CIB-W18**, n. 44-6-2, 2011.

ZHANG, L. *et al.* Bending stiffness prediction to mass timber panel-concrete composite floors with notched connections. **Engineering Structures**, v. 262, p. 1-14, 2022

APÊNDICE A - Parâmetros geométricos, rigidez à flexão efetiva teórica (EI_y) e numérica (EI_{MEF}) dos modelos pertencentes ao Grupo 1.

MODELOS	H _{alma}	B _{alma}	H _{mesa}	B _{mesa}	H _{total}	L (mm)	D	S	EI_y	EI_{MEF}	Erro
G1-C1-D3-S100-C2600	200	50	40	200	240	2600	3	100	5,57E+11	5,21E+11	6,91
G1-C1-D3-S150-C2600	200	50	40	200	240	2600	3	150	5,43E+11	4,60E+11	17,93
G1-C1-D3-S200-C2600	200	50	40	200	240	2600	3	200	5,36E+11	4,60E+11	16,57
G1-C1-D3-S250-C2600	200	50	40	200	240	2600	3	250	5,31E+11	4,12E+11	28,89
G1-C1-D4-S100-C2600	200	50	40	200	240	2600	4	100	5,57E+11	5,36E+11	4,04
G1-C1-D4-S150-C2600	200	50	40	200	240	2600	4	150	5,43E+11	4,69E+11	15,74
G1-C1-D4-S200-C2600	200	50	40	200	240	2600	4	200	5,36E+11	4,64E+11	15,43
G1-C1-D4-S250-C2600	200	50	40	200	240	2600	4	250	5,31E+11	4,22E+11	25,93
G1-C1-D5-S100-C2600	200	50	40	200	240	2600	5	100	5,57E+11	5,49E+11	1,50
G1-C1-D5-S150-C2600	200	50	40	200	240	2600	5	150	5,43E+11	4,76E+11	14,07
G1-C1-D5-S200-C2600	200	50	40	200	240	2600	5	200	5,36E+11	4,75E+11	12,89
G1-C1-D5-S250-C2600	200	50	40	200	240	2600	5	250	5,31E+11	4,28E+11	24,23
G1-C1-D6-S100-C2600	200	50	40	200	240	2600	6	100	5,57E+11	6,00E+11	7,11
G1-C1-D6-S150-C2600	200	50	40	200	240	2600	6	150	5,43E+11	5,54E+11	1,96
G1-C1-D6-S200-C2600	200	50	40	200	240	2600	6	200	5,36E+11	5,18E+11	3,45
G1-C1-D6-S250-C2600	200	50	40	200	240	2600	6	250	5,31E+11	4,69E+11	13,16
G1-C1-D3-S100-C4100	200	50	40	200	240	4100	3	100	6,98E+11	6,35E+11	9,84
G1-C1-D3-S150-C4100	200	50	40	200	240	4100	3	150	6,77E+11	5,52E+11	22,73
G1-C1-D3-S200-C4100	200	50	40	200	240	4100	3	200	6,66E+11	5,23E+11	27,28
G1-C1-D3-S250-C4100	200	50	40	200	240	4100	3	250	6,59E+11	4,83E+11	36,39
G1-C1-D4-S100-C4100	200	50	40	200	240	4100	4	100	6,98E+11	6,57E+11	6,14
G1-C1-D4-S150-C4100	200	50	40	200	240	4100	4	150	6,77E+11	5,75E+11	17,83
G1-C1-D4-S200-C4100	200	50	40	200	240	4100	4	200	6,66E+11	5,35E+11	24,56

G1-C1-D4-S250-C4100	200	50	40	200	240	4100	4	250	6,59E+11	4,94E+11	33,43
G1-C1-D5-S100-C4100	200	50	40	200	240	4100	5	100	6,98E+11	6,74E+11	3,59
G1-C1-D5-S150-C4100	200	50	40	200	240	4100	5	150	6,77E+11	5,84E+11	16,02
G1-C1-D5-S200-C4100	200	50	40	200	240	4100	5	200	6,66E+11	5,48E+11	21,51
G1-C1-D5-S250-C4100	200	50	40	200	240	4100	5	250	6,59E+11	5,07E+11	29,99
G1-C1-D6-S100-C4100	200	50	40	200	240	4100	6	100	6,98E+11	7,27E+11	4,00
G1-C1-D6-S150-C4100	200	50	40	200	240	4100	6	150	6,77E+11	6,44E+11	5,17
G1-C1-D6-S200-C4100	200	50	40	200	240	4100	6	200	6,66E+11	6,20E+11	7,46
G1-C1-D6-S250-C4100	200	50	40	200	240	4100	6	250	6,59E+11	5,65E+11	16,54
G1-C2-D3-S100-C2600	200	60	40	200	240	2600	3	100	6,37E+11	5,24E+11	21,64
G1-C2-D3-S150-C2600	200	60	40	200	240	2600	3	150	6,22E+11	4,70E+11	32,36
G1-C2-D3-S200-C2600	200	60	40	200	240	2600	3	200	6,15E+11	4,67E+11	31,70
G1-C2-D3-S250-C2600	200	60	40	200	240	2600	3	250	6,10E+11	4,66E+11	30,92
G1-C2-D4-S100-C2600	200	60	40	200	240	2600	4	100	6,37E+11	5,39E+11	18,27
G1-C2-D4-S150-C2600	200	60	40	200	240	2600	4	150	6,22E+11	4,84E+11	28,66
G1-C2-D4-S200-C2600	200	60	40	200	240	2600	4	200	6,15E+11	4,77E+11	28,92
G1-C2-D4-S250-C2600	200	60	40	200	240	2600	4	250	6,10E+11	4,73E+11	28,90
G1-C2-D5-S100-C2600	200	60	40	200	240	2600	5	100	6,37E+11	5,50E+11	15,81
G1-C2-D5-S150-C2600	200	60	40	200	240	2600	5	150	6,22E+11	4,90E+11	27,08
G1-C2-D5-S200-C2600	200	60	40	200	240	2600	5	200	6,15E+11	4,91E+11	25,22
G1-C2-D5-S250-C2600	200	60	40	200	240	2600	5	250	6,10E+11	4,84E+11	26,12
G1-C2-D6-S100-C2600	200	60	40	200	240	2600	6	100	6,37E+11	6,16E+11	3,49
G1-C2-D6-S150-C2600	200	60	40	200	240	2600	6	150	6,22E+11	5,60E+11	11,16
G1-C2-D6-S200-C2600	200	60	40	200	240	2600	6	200	6,15E+11	5,10E+11	20,55
G1-C2-D6-S250-C2600	200	60	40	200	240	2600	6	250	6,10E+11	4,78E+11	27,56
G1-C2-D3-S100-C4100	200	60	40	200	240	4100	3	100	7,84E+11	6,47E+11	21,28
G1-C2-D3-S150-C4100	200	60	40	200	240	4100	3	150	7,62E+11	5,57E+11	36,77
G1-C2-D3-S200-C4100	200	60	40	200	240	4100	3	200	7,51E+11	5,27E+11	42,45
G1-C2-D3-S250-C4100	200	60	40	200	240	4100	3	250	7,43E+11	4,87E+11	52,74

G1-C2-D4-S100-C4100	200	60	40	200	240	4100	4	100	7,84E+11	6,72E+11	16,75
G1-C2-D4-S150-C4100	200	60	40	200	240	4100	4	150	7,62E+11	5,83E+11	30,86
G1-C2-D4-S200-C4100	200	60	40	200	240	4100	4	200	7,51E+11	5,41E+11	38,81
G1-C2-D4-S250-C4100	200	60	40	200	240	4100	4	250	7,43E+11	4,99E+11	49,02
G1-C2-D5-S100-C4100	200	60	40	200	240	4100	5	100	7,84E+11	6,88E+11	13,96
G1-C2-D5-S150-C4100	200	60	40	200	240	4100	5	150	7,62E+11	5,91E+11	29,02
G1-C2-D5-S200-C4100	200	60	40	200	240	4100	5	200	7,51E+11	5,53E+11	35,65
G1-C2-D5-S250-C4100	200	60	40	200	240	4100	5	250	7,43E+11	5,11E+11	45,39
G1-C2-D6-S100-C4100	200	60	40	200	240	4100	6	100	7,84E+11	7,45E+11	5,25
G1-C2-D6-S150-C4100	200	60	40	200	240	4100	6	150	7,62E+11	6,54E+11	16,57
G1-C2-D6-S200-C4100	200	60	40	200	240	4100	6	200	7,51E+11	6,26E+11	19,92
G1-C2-D6-S250-C4100	200	60	40	200	240	4100	6	250	7,43E+11	5,71E+11	30,18
G1-C3-D3-S100-C2600	200	50	40	300	240	2600	3	100	5,70E+11	9,55E+11	40,33
G1-C3-D3-S150-C2600	200	50	40	300	240	2600	3	150	5,55E+11	8,91E+11	37,75
G1-C3-D3-S200-C2600	200	50	40	300	240	2600	3	200	5,47E+11	8,81E+11	37,96
G1-C3-D3-S250-C2600	200	50	40	300	240	2600	3	250	5,42E+11	8,32E+11	34,85
G1-C3-D4-S100-C2600	200	50	40	300	240	2600	4	100	5,70E+11	9,62E+11	40,74
G1-C3-D4-S150-C2600	200	50	40	300	240	2600	4	150	5,55E+11	8,95E+11	38,03
G1-C3-D4-S200-C2600	200	50	40	300	240	2600	4	200	5,47E+11	8,90E+11	38,57
G1-C3-D4-S250-C2600	200	50	40	300	240	2600	4	250	5,42E+11	8,33E+11	34,95
G1-C3-D5-S100-C2600	200	50	40	300	240	2600	5	100	5,70E+11	9,74E+11	41,46
G1-C3-D5-S150-C2600	200	50	40	300	240	2600	5	150	5,55E+11	9,01E+11	38,43
G1-C3-D5-S200-C2600	200	50	40	300	240	2600	5	200	5,47E+11	8,93E+11	38,78
G1-C3-D5-S250-C2600	200	50	40	300	240	2600	5	250	5,42E+11	8,38E+11	35,35
G1-C3-D6-S100-C2600	200	50	40	300	240	2600	6	100	5,70E+11	1,04E+12	45,36
G1-C3-D6-S150-C2600	200	50	40	300	240	2600	6	150	5,55E+11	9,77E+11	43,21
G1-C3-D6-S200-C2600	200	50	40	300	240	2600	6	200	5,47E+11	9,44E+11	42,11
G1-C3-D6-S250-C2600	200	50	40	300	240	2600	6	250	5,42E+11	8,84E+11	38,70
G1-C3-D3-S100-C4100	200	50	40	300	240	4100	3	100	7,28E+11	1,26E+12	42,23

G1-C3-D3-S150-C4100	200	50	40	300	240	4100	3	150	7,04E+11	1,11E+12	36,67
G1-C3-D3-S200-C4100	200	50	40	300	240	4100	3	200	6,91E+11	1,07E+12	35,26
G1-C3-D3-S250-C4100	200	50	40	300	240	4100	3	250	6,83E+11	1,01E+12	32,11
G1-C3-D4-S100-C4100	200	50	40	300	240	4100	4	100	7,28E+11	1,28E+12	43,24
G1-C3-D4-S150-C4100	200	50	40	300	240	4100	4	150	7,04E+11	1,14E+12	38,22
G1-C3-D4-S200-C4100	200	50	40	300	240	4100	4	200	6,91E+11	1,08E+12	35,92
G1-C3-D4-S250-C4100	200	50	40	300	240	4100	4	250	6,83E+11	1,01E+12	32,65
G1-C3-D5-S100-C4100	200	50	40	300	240	4100	5	100	7,28E+11	1,31E+12	44,46
G1-C3-D5-S150-C4100	200	50	40	300	240	4100	5	150	7,04E+11	1,15E+12	38,88
G1-C3-D5-S200-C4100	200	50	40	300	240	4100	5	200	6,91E+11	1,10E+12	36,90
G1-C3-D5-S250-C4100	200	50	40	300	240	4100	5	250	6,83E+11	1,03E+12	33,62
G1-C3-D6-S100-C4100	200	50	40	300	240	4100	6	100	7,28E+11	1,37E+12	46,93
G1-C3-D6-S150-C4100	200	50	40	300	240	4100	6	150	7,04E+11	1,24E+12	43,42
G1-C3-D6-S200-C4100	200	50	40	300	240	4100	6	200	6,91E+11	1,20E+12	42,45
G1-C3-D6-S250-C4100	200	50	40	300	240	4100	6	250	6,83E+11	1,13E+12	39,33
G1-C4-D3-S100-C2600	200	60	40	300	240	2600	3	100	6,50E+11	9,57E+11	32,09
G1-C4-D3-S150-C2600	200	60	40	300	240	2600	3	150	6,34E+11	8,95E+11	29,10
G1-C4-D3-S200-C2600	200	60	40	300	240	2600	3	200	6,26E+11	8,85E+11	29,23
G1-C4-D3-S250-C2600	200	60	40	300	240	2600	3	250	6,21E+11	8,34E+11	25,50
G1-C4-D4-S100-C2600	200	60	40	300	240	2600	4	100	6,50E+11	9,65E+11	32,67
G1-C4-D4-S150-C2600	200	60	40	300	240	2600	4	150	6,34E+11	8,97E+11	29,34
G1-C4-D4-S200-C2600	200	60	40	300	240	2600	4	200	6,26E+11	8,94E+11	29,98
G1-C4-D4-S250-C2600	200	60	40	300	240	2600	4	250	6,21E+11	8,36E+11	25,68
G1-C4-D5-S100-C2600	200	60	40	300	240	2600	5	100	6,50E+11	9,76E+11	33,43
G1-C4-D5-S150-C2600	200	60	40	300	240	2600	5	150	6,34E+11	9,03E+11	29,80
G1-C4-D5-S200-C2600	200	60	40	300	240	2600	5	200	6,26E+11	8,97E+11	30,19
G1-C4-D5-S250-C2600	200	60	40	300	240	2600	5	250	6,21E+11	8,40E+11	26,09
G1-C4-D6-S100-C2600	200	60	40	300	240	2600	6	100	6,50E+11	1,05E+12	37,88
G1-C4-D6-S150-C2600	200	60	40	300	240	2600	6	150	6,34E+11	9,79E+11	35,25

G1-C4-D6-S200-C2600	200	60	40	300	240	2600	6	200	6,26E+11	9,51E+11	34,17
G1-C4-D6-S250-C2600	200	60	40	300	240	2600	6	250	6,21E+11	8,86E+11	29,93
G1-C4-D3-S100-C4100	200	60	40	300	240	4100	3	100	8,16E+11	1,26E+12	35,06
G1-C4-D3-S150-C4100	200	60	40	300	240	4100	3	150	7,90E+11	1,15E+12	31,27
G1-C4-D3-S200-C4100	200	60	40	300	240	4100	3	200	7,77E+11	1,07E+12	27,56
G1-C4-D3-S250-C4100	200	60	40	300	240	4100	3	250	7,68E+11	1,01E+12	24,05
G1-C4-D4-S100-C4100	200	60	40	300	240	4100	4	100	8,16E+11	1,28E+12	36,13
G1-C4-D4-S150-C4100	200	60	40	300	240	4100	4	150	7,90E+11	1,16E+12	31,90
G1-C4-D4-S200-C4100	200	60	40	300	240	4100	4	200	7,77E+11	1,09E+12	28,51
G1-C4-D4-S250-C4100	200	60	40	300	240	4100	4	250	7,68E+11	1,02E+12	24,72
G1-C4-D5-S100-C4100	200	60	40	300	240	4100	5	100	8,16E+11	1,49E+12	45,24
G1-C4-D5-S150-C4100	200	60	40	300	240	4100	5	150	7,90E+11	1,34E+12	40,86
G1-C4-D5-S200-C4100	200	60	40	300	240	4100	5	200	7,77E+11	1,27E+12	38,96
G1-C4-D5-S250-C4100	200	60	40	300	240	4100	5	250	7,68E+11	1,20E+12	36,03
G1-C4-D6-S100-C4100	200	60	40	300	240	4100	6	100	8,16E+11	1,61E+12	49,30
G1-C4-D6-S150-C4100	200	60	40	300	240	4100	6	150	7,90E+11	1,45E+12	45,54
G1-C4-D6-S200-C4100	200	60	40	300	240	4100	6	200	7,77E+11	1,40E+12	44,32
G1-C4-D6-S250-C4100	200	60	40	300	240	4100	6	250	7,68E+11	1,31E+12	41,47

APÊNDICE B - Parâmetros geométricos, rigidez à flexão efetiva teórica (EI_γ) e numérica (EI_{MEF}) dos modelos pertencentes ao Grupo 2.

MODELOS	H _{alma}	B _{alma}	H _{mesa}	B _{mesa}	H _{total}	L (mm)	D	S	EI_γ	EI_{MEF}	Erro
G2-C1-D3-S100-C2600	200	50	60	200	260	2600	3	100	6,22E+11	7,34E+11	15,29
G2-C1-D3-S150-C2600	200	50	60	200	260	2600	3	150	6,04E+11	6,53E+11	7,53
G2-C1-D3-S200-C2600	200	50	60	200	260	2600	3	200	5,94E+11	5,67E+11	4,92
G2-C1-D3-S250-C2600	200	50	60	200	260	2600	3	250	5,89E+11	5,56E+11	5,90
G2-C1-D4-S100-C2600	200	50	60	200	260	2600	4	100	6,22E+11	8,12E+11	23,40
G2-C1-D4-S150-C2600	200	50	60	200	260	2600	4	150	6,04E+11	7,12E+11	15,21
G2-C1-D4-S200-C2600	200	50	60	200	260	2600	4	200	5,94E+11	6,44E+11	7,71
G2-C1-D4-S250-C2600	200	50	60	200	260	2600	4	250	5,89E+11	6,17E+11	4,58
G2-C1-D5-S100-C2600	200	50	60	200	260	2600	5	100	6,22E+11	8,55E+11	27,32
G2-C1-D5-S150-C2600	200	50	60	200	260	2600	5	150	6,04E+11	7,65E+11	21,08
G2-C1-D5-S200-C2600	200	50	60	200	260	2600	5	200	5,94E+11	6,98E+11	14,85
G2-C1-D5-S250-C2600	200	50	60	200	260	2600	5	250	5,89E+11	6,68E+11	11,86
G2-C1-D6-S100-C2600	200	50	60	200	260	2600	6	100	6,22E+11	9,43E+11	34,04
G2-C1-D6-S150-C2600	200	50	60	200	260	2600	6	150	6,04E+11	8,66E+11	30,28
G2-C1-D6-S200-C2600	200	50	60	200	260	2600	6	200	5,94E+11	7,98E+11	25,50
G2-C1-D6-S250-C2600	200	50	60	200	260	2600	6	250	5,89E+11	7,59E+11	22,47
G2-C1-D3-S100-C4100	200	50	60	200	260	4100	3	100	8,07E+11	1,06E+12	23,59
G2-C1-D3-S150-C4100	200	50	60	200	260	4100	3	150	7,79E+11	8,67E+11	10,15
G2-C1-D3-S200-C4100	200	50	60	200	260	4100	3	200	7,64E+11	7,66E+11	0,25
G2-C1-D3-S250-C4100	200	50	60	200	260	4100	3	250	7,55E+11	7,22E+11	4,48
G2-C1-D4-S100-C4100	200	50	60	200	260	4100	4	100	8,07E+11	1,21E+12	33,52
G2-C1-D4-S150-C4100	200	50	60	200	260	4100	4	150	7,79E+11	1,03E+12	24,07
G2-C1-D4-S200-C4100	200	50	60	200	260	4100	4	200	7,64E+11	9,16E+11	16,63
G2-C1-D4-S250-C4100	200	50	60	200	260	4100	4	250	7,55E+11	8,35E+11	9,65

G2-C1-D5-S100-C4100	200	50	60	200	260	4100	5	100	8,07E+11	1,27E+12	36,67
G2-C1-D5-S150-C4100	200	50	60	200	260	4100	5	150	7,79E+11	1,11E+12	29,92
G2-C1-D5-S200-C4100	200	50	60	200	260	4100	5	200	7,64E+11	1,01E+12	24,57
G2-C1-D5-S250-C4100	200	50	60	200	260	4100	5	250	7,55E+11	9,37E+11	19,47
G2-C1-D6-S100-C4100	200	50	60	200	260	4100	6	100	8,07E+11	1,39E+12	42,04
G2-C1-D6-S150-C4100	200	50	60	200	260	4100	6	150	7,79E+11	1,27E+12	38,47
G2-C1-D6-S200-C4100	200	50	60	200	260	4100	6	200	7,64E+11	1,18E+12	35,18
G2-C1-D6-S250-C4100	200	50	60	200	260	4100	6	250	7,55E+11	1,10E+12	31,34
G2-C2-D3-S100-C2600	200	60	60	200	260	2600	3	100	7,02E+11	7,16E+11	1,94
G2-C2-D3-S150-C2600	200	60	60	200	260	2600	3	150	6,84E+11	6,66E+11	2,59
G2-C2-D3-S200-C2600	200	60	60	200	260	2600	3	200	6,74E+11	5,81E+11	16,00
G2-C2-D3-S250-C2600	200	60	60	200	260	2600	3	250	6,68E+11	5,70E+11	17,24
G2-C2-D4-S100-C2600	200	60	60	200	260	2600	4	100	7,02E+11	8,22E+11	14,52
G2-C2-D4-S150-C2600	200	60	60	200	260	2600	4	150	6,84E+11	7,23E+11	5,42
G2-C2-D4-S200-C2600	200	60	60	200	260	2600	4	200	6,74E+11	6,56E+11	2,74
G2-C2-D4-S250-C2600	200	60	60	200	260	2600	4	250	6,68E+11	6,29E+11	6,20
G2-C2-D5-S100-C2600	200	60	60	200	260	2600	5	100	7,02E+11	8,64E+11	18,74
G2-C2-D5-S150-C2600	200	60	60	200	260	2600	5	150	6,84E+11	7,75E+11	11,76
G2-C2-D5-S200-C2600	200	60	60	200	260	2600	5	200	6,74E+11	7,09E+11	4,90
G2-C2-D5-S250-C2600	200	60	60	200	260	2600	5	250	6,68E+11	6,79E+11	1,60
G2-C2-D6-S100-C2600	200	60	60	200	260	2600	6	100	7,02E+11	9,52E+11	26,22
G2-C2-D6-S150-C2600	200	60	60	200	260	2600	6	150	6,84E+11	8,75E+11	21,89
G2-C2-D6-S200-C2600	200	60	60	200	260	2600	6	200	6,74E+11	8,08E+11	16,55
G2-C2-D6-S250-C2600	200	60	60	200	260	2600	6	250	6,68E+11	7,70E+11	13,20
G2-C2-D3-S100-C4100	200	60	60	200	260	4100	3	100	8,97E+11	1,09E+12	17,55
G2-C2-D3-S150-C4100	200	60	60	200	260	4100	3	150	8,67E+11	8,95E+11	3,08
G2-C2-D3-S200-C4100	200	60	60	200	260	4100	3	200	8,51E+11	7,92E+11	7,40
G2-C2-D3-S250-C4100	200	60	60	200	260	4100	3	250	8,41E+11	7,48E+11	12,47
G2-C2-D4-S100-C4100	200	60	60	200	260	4100	4	100	8,97E+11	1,25E+12	28,11

G2-C2-D4-S150-C4100	200	60	60	200	260	4100	4	150	8,67E+11	1,05E+12	17,79
G2-C2-D4-S200-C4100	200	60	60	200	260	4100	4	200	8,51E+11	9,43E+11	9,76
G2-C2-D4-S250-C4100	200	60	60	200	260	4100	4	250	8,41E+11	8,61E+11	2,31
G2-C2-D5-S100-C4100	200	60	60	200	260	4100	5	100	8,97E+11	1,31E+12	31,48
G2-C2-D5-S150-C4100	200	60	60	200	260	4100	5	150	8,67E+11	1,14E+12	24,05
G2-C2-D5-S200-C4100	200	60	60	200	260	4100	5	200	8,51E+11	1,04E+12	18,19
G2-C2-D5-S250-C4100	200	60	60	200	260	4100	5	250	8,41E+11	9,64E+11	12,74
G2-C2-D6-S100-C4100	200	60	60	200	260	4100	6	100	8,97E+11	1,43E+12	37,38
G2-C2-D6-S150-C4100	200	60	60	200	260	4100	6	150	8,67E+11	1,30E+12	33,37
G2-C2-D6-S200-C4100	200	60	60	200	260	4100	6	200	8,51E+11	1,21E+12	29,68
G2-C2-D6-S250-C4100	200	60	60	200	260	4100	6	250	8,41E+11	1,13E+12	25,58
G2-C3-D3-S100-C2600	200	50	60	300	260	2600	3	100	6,48E+11	1,16E+12	43,91
G2-C3-D3-S150-C2600	200	50	60	300	260	2600	3	150	6,29E+11	1,05E+12	40,16
G2-C3-D3-S200-C2600	200	50	60	300	260	2600	3	200	6,19E+11	9,54E+11	35,10
G2-C3-D3-S250-C2600	200	50	60	300	260	2600	3	250	6,13E+11	9,42E+11	34,86
G2-C3-D4-S100-C2600	200	50	60	300	260	2600	4	100	6,48E+11	1,21E+12	46,30
G2-C3-D4-S150-C2600	200	50	60	300	260	2600	4	150	6,29E+11	1,12E+12	43,84
G2-C3-D4-S200-C2600	200	50	60	300	260	2600	4	200	6,19E+11	1,04E+12	40,43
G2-C3-D4-S250-C2600	200	50	60	300	260	2600	4	250	6,13E+11	1,01E+12	39,06
G2-C3-D5-S100-C2600	200	50	60	300	260	2600	5	100	6,48E+11	1,25E+12	48,06
G2-C3-D5-S150-C2600	200	50	60	300	260	2600	5	150	6,29E+11	1,17E+12	46,17
G2-C3-D5-S200-C2600	200	50	60	300	260	2600	5	200	6,19E+11	1,09E+12	43,29
G2-C3-D5-S250-C2600	200	50	60	300	260	2600	5	250	6,13E+11	1,06E+12	41,92
G2-C3-D6-S100-C2600	200	50	60	300	260	2600	6	100	6,48E+11	1,32E+12	50,84
G2-C3-D6-S150-C2600	200	50	60	300	260	2600	6	150	6,29E+11	1,23E+12	49,06
G2-C3-D6-S200-C2600	200	50	60	300	260	2600	6	200	6,19E+11	1,15E+12	46,33
G2-C3-D6-S250-C2600	200	50	60	300	260	2600	6	250	6,13E+11	1,12E+12	45,03
G2-C3-D3-S100-C4100	200	50	60	300	260	4100	3	100	8,50E+11	1,74E+12	51,09
G2-C3-D3-S150-C4100	200	50	60	300	260	4100	3	150	8,18E+11	1,49E+12	45,26

G2-C3-D3-S200-C4100	200	50	60	300	260	4100	3	200	8,02E+11	1,35E+12	40,61
G2-C3-D3-S250-C4100	200	50	60	300	260	4100	3	250	7,91E+11	1,29E+12	38,70
G2-C3-D4-S100-C4100	200	50	60	300	260	4100	4	100	8,50E+11	1,93E+12	56,01
G2-C3-D4-S150-C4100	200	50	60	300	260	4100	4	150	8,18E+11	1,71E+12	52,29
G2-C3-D4-S200-C4100	200	50	60	300	260	4100	4	200	8,02E+11	1,56E+12	48,70
G2-C3-D4-S250-C4100	200	50	60	300	260	4100	4	250	7,91E+11	1,45E+12	45,53
G2-C3-D5-S100-C4100	200	50	60	300	260	4100	5	100	8,50E+11	2,01E+12	57,65
G2-C3-D5-S150-C4100	200	50	60	300	260	4100	5	150	8,18E+11	1,82E+12	54,93
G2-C3-D5-S200-C4100	200	50	60	300	260	4100	5	200	8,02E+11	1,68E+12	52,20
G2-C3-D5-S250-C4100	200	50	60	300	260	4100	5	250	7,91E+11	1,57E+12	49,69
G2-C3-D6-S100-C4100	200	50	60	300	260	4100	6	100	8,50E+11	2,16E+12	60,62
G2-C3-D6-S150-C4100	200	50	60	300	260	4100	6	150	8,18E+11	2,01E+12	59,20
G2-C3-D6-S200-C4100	200	50	60	300	260	4100	6	200	8,02E+11	1,89E+12	57,49
G2-C3-D6-S250-C4100	200	50	60	300	260	4100	6	250	7,91E+11	1,78E+12	55,58
G2-C4-D3-S100-C2600	200	60	60	300	260	2600	3	100	7,29E+11	1,18E+12	38,11
G2-C4-D3-S150-C2600	200	60	60	300	260	2600	3	150	7,09E+11	1,05E+12	32,66
G2-C4-D3-S200-C2600	200	60	60	300	260	2600	3	200	6,99E+11	9,58E+11	27,00
G2-C4-D3-S250-C2600	200	60	60	300	260	2600	3	250	6,93E+11	9,45E+11	26,64
G2-C4-D4-S100-C2600	200	60	60	300	260	2600	4	100	7,29E+11	1,24E+12	41,02
G2-C4-D4-S150-C2600	200	60	60	300	260	2600	4	150	7,09E+11	1,12E+12	36,66
G2-C4-D4-S200-C2600	200	60	60	300	260	2600	4	200	6,99E+11	1,04E+12	32,80
G2-C4-D4-S250-C2600	200	60	60	300	260	2600	4	250	6,93E+11	1,01E+12	31,21
G2-C4-D5-S100-C2600	200	60	60	300	260	2600	5	100	7,29E+11	1,25E+12	41,50
G2-C4-D5-S150-C2600	200	60	60	300	260	2600	5	150	7,09E+11	1,17E+12	39,23
G2-C4-D5-S200-C2600	200	60	60	300	260	2600	5	200	6,99E+11	1,09E+12	35,95
G2-C4-D5-S250-C2600	200	60	60	300	260	2600	5	250	6,93E+11	1,06E+12	34,36
G2-C4-D6-S100-C2600	200	60	60	300	260	2600	6	100	7,29E+11	1,32E+12	44,63
G2-C4-D6-S150-C2600	200	60	60	300	260	2600	6	150	7,09E+11	1,24E+12	42,90
G2-C4-D6-S200-C2600	200	60	60	300	260	2600	6	200	6,99E+11	1,13E+12	38,18

G2-C4-D6-S250-C2600	200	60	60	300	260	2600	6	250	6,93E+11	1,10E+12	37,27
G2-C4-D3-S100-C4100	200	60	60	300	260	4100	3	100	9,41E+11	1,77E+12	46,73
G2-C4-D3-S150-C4100	200	60	60	300	260	4100	3	150	9,07E+11	1,52E+12	40,27
G2-C4-D3-S200-C4100	200	60	60	300	260	4100	3	200	8,90E+11	1,37E+12	35,21
G2-C4-D3-S250-C4100	200	60	60	300	260	4100	3	250	8,79E+11	1,31E+12	33,13
G2-C4-D4-S100-C4100	200	60	60	300	260	4100	4	100	9,41E+11	1,96E+12	52,01
G2-C4-D4-S150-C4100	200	60	60	300	260	4100	4	150	9,07E+11	1,74E+12	47,87
G2-C4-D4-S200-C4100	200	60	60	300	260	4100	4	200	8,90E+11	1,59E+12	43,88
G2-C4-D4-S250-C4100	200	60	60	300	260	4100	4	250	8,79E+11	1,48E+12	40,42
G2-C4-D5-S100-C4100	200	60	60	300	260	4100	5	100	9,41E+11	2,04E+12	53,79
G2-C4-D5-S150-C4100	200	60	60	300	260	4100	5	150	9,07E+11	1,84E+12	50,75
G2-C4-D5-S200-C4100	200	60	60	300	260	4100	5	200	8,90E+11	1,70E+12	47,67
G2-C4-D5-S250-C4100	200	60	60	300	260	4100	5	250	8,79E+11	1,60E+12	44,93
G2-C4-D6-S100-C4100	200	60	60	300	260	4100	6	100	9,41E+11	2,19E+12	57,11
G2-C4-D6-S150-C4100	200	60	60	300	260	4100	6	150	9,07E+11	2,04E+12	55,46
G2-C4-D6-S200-C4100	200	60	60	300	260	4100	6	200	8,90E+11	1,91E+12	53,50
G2-C4-D6-S250-C4100	200	60	60	300	260	4100	6	250	8,79E+11	1,81E+12	51,43

APÊNDICE C - Parâmetros geométricos, rigidez à flexão efetiva teórica (EI_y) e numérica (EI_{MEF}) dos modelos pertencentes ao Grupo 3.

MODELOS	H _{alma}	B _{alma}	H _{mesa}	B _{mesa}	H _{total}	L (mm)	D	S	EI_y	EI_{MEF}	Erro (%)
G3-C1-D3-S100-C2600	300	50	40	200	340	2600	3	100	1,65E+12	5,94E+11	177,11
G3-C1-D3-S150-C2600	300	50	40	200	340	2600	3	150	1,61E+12	5,51E+11	193,20
G3-C1-D3-S200-C2600	300	50	40	200	340	2600	3	200	1,60E+12	5,37E+11	197,82
G3-C1-D3-S250-C2600	300	50	40	200	340	2600	3	250	1,59E+12	4,65E+11	241,74
G3-C1-D4-S100-C2600	300	50	40	200	340	2600	4	100	1,65E+12	6,28E+11	161,93
G3-C1-D4-S150-C2600	300	50	40	200	340	2600	4	150	1,61E+12	5,70E+11	183,22
G3-C1-D4-S200-C2600	300	50	40	200	340	2600	4	200	1,60E+12	5,48E+11	191,97
G3-C1-D4-S250-C2600	300	50	40	200	340	2600	4	250	1,59E+12	4,72E+11	236,59
G3-C1-D5-S100-C2600	300	50	40	200	340	2600	5	100	1,65E+12	6,38E+11	157,84
G3-C1-D5-S150-C2600	300	50	40	200	340	2600	5	150	1,61E+12	5,84E+11	176,38
G3-C1-D5-S200-C2600	300	50	40	200	340	2600	5	200	1,60E+12	5,63E+11	184,05
G3-C1-D5-S250-C2600	300	50	40	200	340	2600	5	250	1,59E+12	4,82E+11	229,67
G3-C1-D6-S100-C2600	300	50	40	200	340	2600	6	100	1,65E+12	6,48E+11	153,99
G3-C1-D6-S150-C2600	300	50	40	200	340	2600	6	150	1,61E+12	6,09E+11	165,39
G3-C1-D6-S200-C2600	300	50	40	200	340	2600	6	200	1,60E+12	5,98E+11	167,42
G3-C1-D6-S250-C2600	300	50	40	200	340	2600	6	250	1,59E+12	5,29E+11	200,28
G3-C1-D3-S100-C4100	300	50	40	200	340	4100	3	100	1,95E+12	7,20E+11	171,35
G3-C1-D3-S150-C4100	300	50	40	200	340	4100	3	150	1,91E+12	6,29E+11	203,29
G3-C1-D3-S200-C4100	300	50	40	200	340	4100	3	200	1,88E+12	5,98E+11	214,76
G3-C1-D3-S250-C4100	300	50	40	200	340	4100	3	250	1,87E+12	5,55E+11	236,30
G3-C1-D4-S100-C4100	300	50	40	200	340	4100	4	100	1,95E+12	7,42E+11	163,48
G3-C1-D4-S150-C4100	300	50	40	200	340	4100	4	150	1,91E+12	6,51E+11	192,96
G3-C1-D4-S200-C4100	300	50	40	200	340	4100	4	200	1,88E+12	6,08E+11	209,49
G3-C1-D4-S250-C4100	300	50	40	200	340	4100	4	250	1,87E+12	5,66E+11	230,15

G3-C1-D5-S100-C4100	300	50	40	200	340	4100	5	100	1,95E+12	7,61E+11	156,94
G3-C1-D5-S150-C4100	300	50	40	200	340	4100	5	150	1,91E+12	6,62E+11	188,27
G3-C1-D5-S200-C4100	300	50	40	200	340	4100	5	200	1,88E+12	6,24E+11	202,00
G3-C1-D5-S250-C4100	300	50	40	200	340	4100	5	250	1,87E+12	5,80E+11	222,07
G3-C1-D6-S100-C4100	300	50	40	200	340	4100	6	100	1,95E+12	8,27E+11	136,36
G3-C1-D6-S150-C4100	300	50	40	200	340	4100	6	150	1,91E+12	7,33E+11	160,41
G3-C1-D6-S200-C4100	300	50	40	200	340	4100	6	200	1,88E+12	7,05E+11	167,11
G3-C1-D6-S250-C4100	300	50	40	200	340	4100	6	250	1,87E+12	6,46E+11	189,05
G3-C2-D3-S100-C2600	300	60	40	200	340	2600	3	100	1,91E+12	6,00E+11	218,11
G3-C2-D3-S150-C2600	300	60	40	200	340	2600	3	150	1,88E+12	5,46E+11	243,98
G3-C2-D3-S200-C2600	300	60	40	200	340	2600	3	200	1,86E+12	5,34E+11	248,61
G3-C2-D3-S250-C2600	300	60	40	200	340	2600	3	250	1,85E+12	4,65E+11	298,62
G3-C2-D4-S100-C2600	300	60	40	200	340	2600	4	100	1,91E+12	6,17E+11	209,47
G3-C2-D4-S150-C2600	300	60	40	200	340	2600	4	150	1,88E+12	5,54E+11	239,46
G3-C2-D4-S200-C2600	300	60	40	200	340	2600	4	200	1,86E+12	5,43E+11	243,33
G3-C2-D4-S250-C2600	300	60	40	200	340	2600	4	250	1,85E+12	4,92E+11	276,96
G3-C2-D5-S100-C2600	300	60	40	200	340	2600	5	100	1,91E+12	6,31E+11	202,56
G3-C2-D5-S150-C2600	300	60	40	200	340	2600	5	150	1,88E+12	5,76E+11	226,04
G3-C2-D5-S200-C2600	300	60	40	200	340	2600	5	200	1,86E+12	5,57E+11	234,59
G3-C2-D5-S250-C2600	300	60	40	200	340	2600	5	250	1,85E+12	5,04E+11	267,40
G3-C2-D6-S100-C2600	300	60	40	200	340	2600	6	100	1,91E+12	6,91E+11	176,48
G3-C2-D6-S150-C2600	300	60	40	200	340	2600	6	150	1,88E+12	6,11E+11	207,30
G3-C2-D6-S200-C2600	300	60	40	200	340	2600	6	200	1,86E+12	6,04E+11	208,52
G3-C2-D6-S250-C2600	300	60	40	200	340	2600	6	250	1,85E+12	5,32E+11	248,52
G3-C2-D3-S100-C4100	300	60	40	200	340	4100	3	100	2,23E+12	7,33E+11	204,18
G3-C2-D3-S150-C4100	300	60	40	200	340	4100	3	150	2,18E+12	6,36E+11	243,11
G3-C2-D3-S200-C4100	300	60	40	200	340	4100	3	200	2,15E+12	6,02E+11	257,65
G3-C2-D3-S250-C4100	300	60	40	200	340	4100	3	250	2,14E+12	5,59E+11	282,31
G3-C2-D4-S100-C4100	300	60	40	200	340	4100	4	100	2,23E+12	7,58E+11	194,33

G3-C2-D4-S150-C4100	300	60	40	200	340	4100	4	150	2,18E+12	6,60E+11	230,47
G3-C2-D4-S200-C4100	300	60	40	200	340	4100	4	200	2,15E+12	6,15E+11	250,39
G3-C2-D4-S250-C4100	300	60	40	200	340	4100	4	250	2,14E+12	5,71E+11	274,55
G3-C2-D5-S100-C4100	300	60	40	200	340	4100	5	100	2,23E+12	7,77E+11	186,96
G3-C2-D5-S150-C4100	300	60	40	200	340	4100	5	150	2,18E+12	6,70E+11	225,48
G3-C2-D5-S200-C4100	300	60	40	200	340	4100	5	200	2,15E+12	6,29E+11	242,45
G3-C2-D5-S250-C4100	300	60	40	200	340	4100	5	250	2,14E+12	5,85E+11	265,77
G3-C2-D6-S100-C4100	300	60	40	200	340	4100	6	100	2,23E+12	8,48E+11	162,83
G3-C2-D6-S150-C4100	300	60	40	200	340	4100	6	150	2,18E+12	7,44E+11	192,97
G3-C2-D6-S200-C4100	300	60	40	200	340	4100	6	200	2,15E+12	7,12E+11	202,73
G3-C2-D6-S250-C4100	300	60	40	200	340	4100	6	250	2,14E+12	6,52E+11	227,93
G3-C3-D3-S100-C2600	300	50	40	300	340	2600	3	100	1,67E+12	1,12E+12	49,22
G3-C3-D3-S150-C2600	300	50	40	300	340	2600	3	150	1,63E+12	1,05E+12	55,85
G3-C3-D3-S200-C2600	300	50	40	300	340	2600	3	200	1,62E+12	1,04E+12	55,63
G3-C3-D3-S250-C2600	300	50	40	300	340	2600	3	250	1,61E+12	9,85E+11	63,03
G3-C3-D4-S100-C2600	300	50	40	300	340	2600	4	100	1,67E+12	1,12E+12	48,30
G3-C3-D4-S150-C2600	300	50	40	300	340	2600	4	150	1,63E+12	1,05E+12	55,25
G3-C3-D4-S200-C2600	300	50	40	300	340	2600	4	200	1,62E+12	1,05E+12	54,52
G3-C3-D4-S250-C2600	300	50	40	300	340	2600	4	250	1,61E+12	9,85E+11	62,94
G3-C3-D5-S100-C2600	300	50	40	300	340	2600	5	100	1,67E+12	1,14E+12	46,63
G3-C3-D5-S150-C2600	300	50	40	300	340	2600	5	150	1,63E+12	1,06E+12	54,45
G3-C3-D5-S200-C2600	300	50	40	300	340	2600	5	200	1,62E+12	1,05E+12	53,96
G3-C3-D5-S250-C2600	300	50	40	300	340	2600	5	250	1,61E+12	9,91E+11	62,06
G3-C3-D6-S100-C2600	300	50	40	300	340	2600	6	100	1,67E+12	1,22E+12	36,84
G3-C3-D6-S150-C2600	300	50	40	300	340	2600	6	150	1,63E+12	1,14E+12	43,11
G3-C3-D6-S200-C2600	300	50	40	300	340	2600	6	200	1,62E+12	1,11E+12	45,78
G3-C3-D6-S250-C2600	300	50	40	300	340	2600	6	250	1,61E+12	1,04E+12	54,16
G3-C3-D3-S100-C4100	300	50	40	300	340	4100	3	100	2,02E+12	1,43E+12	41,13
G3-C3-D3-S150-C4100	300	50	40	300	340	4100	3	150	1,96E+12	1,28E+12	52,63

G3-C3-D3-S200-C4100	300	50	40	300	340	4100	3	200	1,93E+12	1,24E+12	56,14
G3-C3-D3-S250-C4100	300	50	40	300	340	4100	3	250	1,91E+12	1,17E+12	63,38
G3-C3-D4-S100-C4100	300	50	40	300	340	4100	4	100	2,02E+12	1,45E+12	39,48
G3-C3-D4-S150-C4100	300	50	40	300	340	4100	4	150	1,96E+12	1,31E+12	49,46
G3-C3-D4-S200-C4100	300	50	40	300	340	4100	4	200	1,93E+12	1,25E+12	54,99
G3-C3-D4-S250-C4100	300	50	40	300	340	4100	4	250	1,91E+12	1,18E+12	62,36
G3-C3-D5-S100-C4100	300	50	40	300	340	4100	5	100	2,02E+12	1,47E+12	36,98
G3-C3-D5-S150-C4100	300	50	40	300	340	4100	5	150	1,96E+12	1,33E+12	47,81
G3-C3-D5-S200-C4100	300	50	40	300	340	4100	5	200	1,93E+12	1,27E+12	52,65
G3-C3-D5-S250-C4100	300	50	40	300	340	4100	5	250	1,91E+12	1,20E+12	60,14
G3-C3-D6-S100-C4100	300	50	40	300	340	4100	6	100	2,02E+12	1,58E+12	27,48
G3-C3-D6-S150-C4100	300	50	40	300	340	4100	6	150	1,96E+12	1,44E+12	36,54
G3-C3-D6-S200-C4100	300	50	40	300	340	4100	6	200	1,93E+12	1,39E+12	39,44
G3-C3-D6-S250-C4100	300	50	40	300	340	4100	6	250	1,91E+12	1,30E+12	46,78
G3-C4-D3-S100-C2600	300	60	40	300	340	2600	3	100	1,93E+12	1,12E+12	72,61
G3-C4-D3-S150-C2600	300	60	40	300	340	2600	3	150	1,90E+12	1,04E+12	82,06
G3-C4-D3-S200-C2600	300	60	40	300	340	2600	3	200	1,88E+12	1,00E+12	87,20
G3-C4-D3-S250-C2600	300	60	40	300	340	2600	3	250	1,87E+12	9,87E+11	89,41
G3-C4-D4-S100-C2600	300	60	40	300	340	2600	4	100	1,93E+12	1,13E+12	71,25
G3-C4-D4-S150-C2600	300	60	40	300	340	2600	4	150	1,90E+12	1,06E+12	78,97
G3-C4-D4-S200-C2600	300	60	40	300	340	2600	4	200	1,88E+12	1,04E+12	80,16
G3-C4-D4-S250-C2600	300	60	40	300	340	2600	4	250	1,87E+12	9,88E+11	89,16
G3-C4-D5-S100-C2600	300	60	40	300	340	2600	5	100	1,93E+12	1,14E+12	69,50
G3-C4-D5-S150-C2600	300	60	40	300	340	2600	5	150	1,90E+12	1,06E+12	78,98
G3-C4-D5-S200-C2600	300	60	40	300	340	2600	5	200	1,88E+12	1,05E+12	78,83
G3-C4-D5-S250-C2600	300	60	40	300	340	2600	5	250	1,87E+12	9,93E+11	88,24
G3-C4-D6-S100-C2600	300	60	40	300	340	2600	6	100	1,93E+12	1,22E+12	58,12
G3-C4-D6-S150-C2600	300	60	40	300	340	2600	6	150	1,90E+12	1,14E+12	65,79
G3-C4-D6-S200-C2600	300	60	40	300	340	2600	6	200	1,88E+12	1,12E+12	68,43

G3-C4-D6-S250-C2600	300	60	40	300	340	2600	6	250	1,87E+12	1,04E+12	79,04
G3-C4-D3-S100-C4100	300	60	40	300	340	4100	3	100	2,29E+12	1,30E+12	76,45
G3-C4-D3-S150-C4100	300	60	40	300	340	4100	3	150	2,24E+12	1,26E+12	77,68
G3-C4-D3-S200-C4100	300	60	40	300	340	4100	3	200	2,21E+12	1,10E+12	100,16
G3-C4-D3-S250-C4100	300	60	40	300	340	4100	3	250	2,19E+12	1,03E+12	111,38
G3-C4-D4-S100-C4100	300	60	40	300	340	4100	4	100	2,29E+12	1,36E+12	68,99
G3-C4-D4-S150-C4100	300	60	40	300	340	4100	4	150	2,24E+12	1,29E+12	72,93
G3-C4-D4-S200-C4100	300	60	40	300	340	4100	4	200	2,21E+12	1,24E+12	77,46
G3-C4-D4-S250-C4100	300	60	40	300	340	4100	4	250	2,19E+12	1,13E+12	92,78
G3-C4-D5-S100-C4100	300	60	40	300	340	4100	5	100	2,29E+12	1,44E+12	58,73
G3-C4-D5-S150-C4100	300	60	40	300	340	4100	5	150	2,24E+12	1,32E+12	68,96
G3-C4-D5-S200-C4100	300	60	40	300	340	4100	5	200	2,21E+12	1,26E+12	75,71
G3-C4-D5-S250-C4100	300	60	40	300	340	4100	5	250	2,19E+12	1,18E+12	85,67
G3-C4-D6-S100-C4100	300	60	40	300	340	4100	6	100	2,29E+12	1,56E+12	46,60
G3-C4-D6-S150-C4100	300	60	40	300	340	4100	6	150	2,24E+12	1,36E+12	64,93
G3-C4-D6-S200-C4100	300	60	40	300	340	4100	6	200	2,21E+12	1,30E+12	69,71
G3-C4-D6-S250-C4100	300	60	40	300	340	4100	6	250	2,19E+12	1,19E+12	84,39

APÊNDICE D - Parâmetros geométricos, rigidez à flexão efetiva teórica (EI_y) e numérica (EI_{MEF}) dos modelos pertencentes ao Grupo 4.

MODELOS	H _{alma}	B _{alma}	H _{mesa}	B _{mesa}	H _{total}	L (mm)	D	S	EI_y	EI_{MEF}	Erro
G4-C1-D3-S100-C2600	300	50	60	200	360	2600	3	100	1,73E+12	7,93E+11	118,14
G4-C1-D3-S150-C2600	300	50	60	200	360	2600	3	150	1,69E+12	7,38E+11	129,46
G4-C1-D3-S200-C2600	300	50	60	200	360	2600	3	200	1,67E+12	7,00E+11	139,22
G4-C1-D3-S250-C2600	300	50	60	200	360	2600	3	250	1,66E+12	6,49E+11	156,41
G4-C1-D4-S100-C2600	300	50	60	200	360	2600	4	100	1,73E+12	9,18E+11	88,35
G4-C1-D4-S150-C2600	300	50	60	200	360	2600	4	150	1,69E+12	8,04E+11	110,65
G4-C1-D4-S200-C2600	300	50	60	200	360	2600	4	200	1,67E+12	7,29E+11	129,74
G4-C1-D4-S250-C2600	300	50	60	200	360	2600	4	250	1,66E+12	6,44E+11	158,17
G4-C1-D5-S100-C2600	300	50	60	200	360	2600	5	100	1,73E+12	9,71E+11	78,07
G4-C1-D5-S150-C2600	300	50	60	200	360	2600	5	150	1,69E+12	8,65E+11	95,65
G4-C1-D5-S200-C2600	300	50	60	200	360	2600	5	200	1,67E+12	7,90E+11	112,00
G4-C1-D5-S250-C2600	300	50	60	200	360	2600	5	250	1,66E+12	7,57E+11	119,76
G4-C1-D6-S100-C2600	300	50	60	200	360	2600	6	100	1,73E+12	1,08E+12	60,17
G4-C1-D6-S150-C2600	300	50	60	200	360	2600	6	150	1,69E+12	9,86E+11	71,78
G4-C1-D6-S200-C2600	300	50	60	200	360	2600	6	200	1,67E+12	9,06E+11	84,78
G4-C1-D6-S250-C2600	300	50	60	200	360	2600	6	250	1,66E+12	8,63E+11	92,77
G4-C1-D3-S100-C4100	300	50	60	200	360	4100	3	100	2,12E+12	1,17E+12	81,09
G4-C1-D3-S150-C4100	300	50	60	200	360	4100	3	150	2,06E+12	9,59E+11	114,89
G4-C1-D3-S200-C4100	300	50	60	200	360	4100	3	200	2,03E+12	8,49E+11	138,97
G4-C1-D3-S250-C4100	300	50	60	200	360	4100	3	250	2,01E+12	8,28E+11	142,47
G4-C1-D4-S100-C4100	300	50	60	200	360	4100	4	100	2,12E+12	1,36E+12	56,15
G4-C1-D4-S150-C4100	300	50	60	200	360	4100	4	150	2,06E+12	1,14E+12	80,84
G4-C1-D4-S200-C4100	300	50	60	200	360	4100	4	200	2,03E+12	1,02E+12	99,68
G4-C1-D4-S250-C4100	300	50	60	200	360	4100	4	250	2,01E+12	9,28E+11	116,41

G4-C1-D5-S100-C4100	300	50	60	200	360	4100	5	100	2,12E+12	1,44E+12	47,93
G4-C1-D5-S150-C4100	300	50	60	200	360	4100	5	150	2,06E+12	1,24E+12	66,07
G4-C1-D5-S200-C4100	300	50	60	200	360	4100	5	200	2,03E+12	1,13E+12	80,03
G4-C1-D5-S250-C4100	300	50	60	200	360	4100	5	250	2,01E+12	1,04E+12	92,64
G4-C1-D6-S100-C4100	300	50	60	200	360	4100	6	100	2,12E+12	1,59E+12	33,91
G4-C1-D6-S150-C4100	300	50	60	200	360	4100	6	150	2,06E+12	1,43E+12	44,29
G4-C1-D6-S200-C4100	300	50	60	200	360	4100	6	200	2,03E+12	1,32E+12	53,28
G4-C1-D6-S250-C4100	300	50	60	200	360	4100	6	250	2,01E+12	1,23E+12	62,94
G4-C2-D3-S100-C2600	300	60	60	200	360	2600	3	100	2,00E+12	8,08E+11	147,04
G4-C2-D3-S150-C2600	300	60	60	200	360	2600	3	150	1,96E+12	7,53E+11	160,02
G4-C2-D3-S200-C2600	300	60	60	200	360	2600	3	200	1,94E+12	6,60E+11	193,77
G4-C2-D3-S250-C2600	300	60	60	200	360	2600	3	250	1,93E+12	6,33E+11	204,26
G4-C2-D4-S100-C2600	300	60	60	200	360	2600	4	100	2,00E+12	9,30E+11	114,49
G4-C2-D4-S150-C2600	300	60	60	200	360	2600	4	150	1,96E+12	8,16E+11	139,85
G4-C2-D4-S200-C2600	300	60	60	200	360	2600	4	200	1,94E+12	7,42E+11	161,17
G4-C2-D4-S250-C2600	300	60	60	200	360	2600	4	250	1,93E+12	7,13E+11	170,11
G4-C2-D5-S100-C2600	300	60	60	200	360	2600	5	100	2,00E+12	9,82E+11	103,16
G4-C2-D5-S150-C2600	300	60	60	200	360	2600	5	150	1,96E+12	9,18E+11	113,32
G4-C2-D5-S200-C2600	300	60	60	200	360	2600	5	200	1,94E+12	8,02E+11	141,72
G4-C2-D5-S250-C2600	300	60	60	200	360	2600	5	250	1,93E+12	7,69E+11	150,50
G4-C2-D6-S100-C2600	300	60	60	200	360	2600	6	100	2,00E+12	1,09E+12	82,80
G4-C2-D6-S150-C2600	300	60	60	200	360	2600	6	150	1,96E+12	9,97E+11	96,41
G4-C2-D6-S200-C2600	300	60	60	200	360	2600	6	200	1,94E+12	8,77E+11	121,15
G4-C2-D6-S250-C2600	300	60	60	200	360	2600	6	250	1,93E+12	8,75E+11	120,24
G4-C2-D3-S100-C4100	300	60	60	200	360	4100	3	100	2,40E+12	9,89E+11	142,86
G4-C2-D3-S150-C4100	300	60	60	200	360	4100	3	150	2,34E+12	9,15E+11	155,37
G4-C2-D3-S200-C4100	300	60	60	200	360	4100	3	200	2,30E+12	8,77E+11	162,59
G4-C2-D3-S250-C4100	300	60	60	200	360	4100	3	250	2,28E+12	8,30E+11	174,90
G4-C2-D4-S100-C4100	300	60	60	200	360	4100	4	100	2,40E+12	1,40E+12	71,81

G4-C2-D4-S150-C4100	300	60	60	200	360	4100	4	150	2,34E+12	1,21E+12	93,56
G4-C2-D4-S200-C4100	300	60	60	200	360	4100	4	200	2,30E+12	1,05E+12	120,44
G4-C2-D4-S250-C4100	300	60	60	200	360	4100	4	250	2,28E+12	9,56E+11	138,76
G4-C2-D5-S100-C4100	300	60	60	200	360	4100	5	100	2,40E+12	1,48E+12	62,80
G4-C2-D5-S150-C4100	300	60	60	200	360	4100	5	150	2,34E+12	1,28E+12	83,34
G4-C2-D5-S200-C4100	300	60	60	200	360	4100	5	200	2,30E+12	1,16E+12	99,06
G4-C2-D5-S250-C4100	300	60	60	200	360	4100	5	250	2,28E+12	1,07E+12	112,88
G4-C2-D6-S100-C4100	300	60	60	200	360	4100	6	100	2,40E+12	1,63E+12	47,09
G4-C2-D6-S150-C4100	300	60	60	200	360	4100	6	150	2,34E+12	1,47E+12	59,09
G4-C2-D6-S200-C4100	300	60	60	200	360	4100	6	200	2,30E+12	1,36E+12	69,40
G4-C2-D6-S250-C4100	300	60	60	200	360	4100	6	250	2,28E+12	1,27E+12	79,98
G4-C3-D3-S100-C2600	300	50	60	300	360	2600	3	100	1,76E+12	1,01E+12	74,85
G4-C3-D3-S150-C2600	300	50	60	300	360	2600	3	150	1,72E+12	9,53E+11	80,75
G4-C3-D3-S200-C2600	300	50	60	300	360	2600	3	200	1,70E+12	8,58E+11	98,52
G4-C3-D3-S250-C2600	300	50	60	300	360	2600	3	250	1,69E+12	8,45E+11	100,15
G4-C3-D4-S100-C2600	300	50	60	300	360	2600	4	100	1,76E+12	1,11E+12	59,36
G4-C3-D4-S150-C2600	300	50	60	300	360	2600	4	150	1,72E+12	1,02E+12	68,99
G4-C3-D4-S200-C2600	300	50	60	300	360	2600	4	200	1,70E+12	9,40E+11	81,12
G4-C3-D4-S250-C2600	300	50	60	300	360	2600	4	250	1,69E+12	9,08E+11	86,37
G4-C3-D5-S100-C2600	300	50	60	300	360	2600	5	100	1,76E+12	1,15E+12	53,78
G4-C3-D5-S150-C2600	300	50	60	300	360	2600	5	150	1,72E+12	1,07E+12	61,49
G4-C3-D5-S200-C2600	300	50	60	300	360	2600	5	200	1,70E+12	9,92E+11	71,78
G4-C3-D5-S250-C2600	300	50	60	300	360	2600	5	250	1,69E+12	9,56E+11	76,92
G4-C3-D6-S100-C2600	300	50	60	300	360	2600	6	100	1,76E+12	1,19E+12	47,99
G4-C3-D6-S150-C2600	300	50	60	300	360	2600	6	150	1,72E+12	1,13E+12	52,84
G4-C3-D6-S200-C2600	300	50	60	300	360	2600	6	200	1,70E+12	1,05E+12	62,58
G4-C3-D6-S250-C2600	300	50	60	300	360	2600	6	250	1,69E+12	1,01E+12	67,44
G4-C3-D3-S100-C4100	300	50	60	300	360	4100	3	100	2,19E+12	1,97E+12	11,49
G4-C3-D3-S150-C4100	300	50	60	300	360	4100	3	150	2,12E+12	1,69E+12	25,54

G4-C3-D3-S200-C4100	300	50	60	300	360	4100	3	200	2,09E+12	1,53E+12	36,17
G4-C3-D3-S250-C4100	300	50	60	300	360	4100	3	250	2,06E+12	1,47E+12	40,40
G4-C3-D4-S100-C4100	300	50	60	300	360	4100	4	100	2,19E+12	2,20E+12	0,42
G4-C3-D4-S150-C4100	300	50	60	300	360	4100	4	150	2,12E+12	1,94E+12	9,32
G4-C3-D4-S200-C4100	300	50	60	300	360	4100	4	200	2,09E+12	1,77E+12	17,94
G4-C3-D4-S250-C4100	300	50	60	300	360	4100	4	250	2,06E+12	1,65E+12	25,10
G4-C3-D5-S100-C4100	300	50	60	300	360	4100	5	100	2,19E+12	2,29E+12	4,50
G4-C3-D5-S150-C4100	300	50	60	300	360	4100	5	150	2,12E+12	2,06E+12	2,91
G4-C3-D5-S200-C4100	300	50	60	300	360	4100	5	200	2,09E+12	1,90E+12	9,69
G4-C3-D5-S250-C4100	300	50	60	300	360	4100	5	250	2,06E+12	1,79E+12	15,55
G4-C3-D6-S100-C4100	300	50	60	300	360	4100	6	100	2,19E+12	2,49E+12	11,93
G4-C3-D6-S150-C4100	300	50	60	300	360	4100	6	150	2,12E+12	2,29E+12	7,53
G4-C3-D6-S200-C4100	300	50	60	300	360	4100	6	200	2,09E+12	2,15E+12	3,04
G4-C3-D6-S250-C4100	300	50	60	300	360	4100	6	250	2,06E+12	2,03E+12	1,56
G4-C4-D3-S100-C2600	300	60	60	300	360	2600	3	100	2,03E+12	1,28E+12	58,06
G4-C4-D3-S150-C2600	300	60	60	300	360	2600	3	150	1,99E+12	1,22E+12	62,57
G4-C4-D3-S200-C2600	300	60	60	300	360	2600	3	200	1,97E+12	1,12E+12	76,00
G4-C4-D3-S250-C2600	300	60	60	300	360	2600	3	250	1,96E+12	1,10E+12	77,03
G4-C4-D4-S100-C2600	300	60	60	300	360	2600	4	100	2,03E+12	1,40E+12	44,86
G4-C4-D4-S150-C2600	300	60	60	300	360	2600	4	150	1,99E+12	1,30E+12	53,26
G4-C4-D4-S200-C2600	300	60	60	300	360	2600	4	200	1,97E+12	1,21E+12	62,77
G4-C4-D4-S250-C2600	300	60	60	300	360	2600	4	250	1,96E+12	1,17E+12	66,65
G4-C4-D5-S100-C2600	300	60	60	300	360	2600	5	100	2,03E+12	1,45E+12	39,98
G4-C4-D5-S150-C2600	300	60	60	300	360	2600	5	150	1,99E+12	1,35E+12	46,91
G4-C4-D5-S200-C2600	300	60	60	300	360	2600	5	200	1,97E+12	1,27E+12	55,27
G4-C4-D5-S250-C2600	300	60	60	300	360	2600	5	250	1,96E+12	1,23E+12	59,26
G4-C4-D6-S100-C2600	300	60	60	300	360	2600	6	100	2,03E+12	1,53E+12	32,48
G4-C4-D6-S150-C2600	300	60	60	300	360	2600	6	150	1,99E+12	1,43E+12	39,05
G4-C4-D6-S200-C2600	300	60	60	300	360	2600	6	200	1,97E+12	1,34E+12	46,95

G4-C4-D6-S250-C2600	300	60	60	300	360	2600	6	250	1,96E+12	1,29E+12	51,55
G4-C4-D3-S100-C4100	300	60	60	300	360	4100	3	100	2,47E+12	2,00E+12	23,66
G4-C4-D3-S150-C4100	300	60	60	300	360	4100	3	150	2,40E+12	1,72E+12	39,76
G4-C4-D3-S200-C4100	300	60	60	300	360	4100	3	200	2,36E+12	1,56E+12	51,67
G4-C4-D3-S250-C4100	300	60	60	300	360	4100	3	250	2,34E+12	1,50E+12	56,47
G4-C4-D4-S100-C4100	300	60	60	300	360	4100	4	100	2,47E+12	2,24E+12	10,59
G4-C4-D4-S150-C4100	300	60	60	300	360	4100	4	150	2,40E+12	1,97E+12	21,76
G4-C4-D4-S200-C4100	300	60	60	300	360	4100	4	200	2,36E+12	1,79E+12	31,63
G4-C4-D4-S250-C4100	300	60	60	300	360	4100	4	250	2,34E+12	1,67E+12	39,69
G4-C4-D5-S100-C4100	300	60	60	300	360	4100	5	100	2,47E+12	2,33E+12	6,04
G4-C4-D5-S150-C4100	300	60	60	300	360	4100	5	150	2,40E+12	2,09E+12	14,62
G4-C4-D5-S200-C4100	300	60	60	300	360	4100	5	200	2,36E+12	1,93E+12	22,50
G4-C4-D5-S250-C4100	300	60	60	300	360	4100	5	250	2,34E+12	1,81E+12	29,09
G4-C4-D6-S100-C4100	300	60	60	300	360	4100	6	100	2,47E+12	2,53E+12	2,42
G4-C4-D6-S150-C4100	300	60	60	300	360	4100	6	150	2,40E+12	2,33E+12	2,83
G4-C4-D6-S200-C4100	300	60	60	300	360	4100	6	200	2,36E+12	2,18E+12	8,14
G4-C4-D6-S250-C4100	300	60	60	300	360	4100	6	250	2,34E+12	2,07E+12	13,28