

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA JULIA POLITI

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS NA ESTIMATIVA
DO MÓDULO DE DESLIZAMENTO EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS MISTAS
DE MADEIRA E CONCRETO**

SÃO CARLOS

2024

MARIA JULIA POLITI

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS NA ESTIMATIVA
DO MÓDULO DE DESLIZAMENTO EM LIGAÇÕES DE ESTRUTURAS MISTAS
DE MADEIRA E CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Christoforo

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia

SÃO CARLOS
2024

Dedico este trabalho aos meus pais, por proporcionarem tudo em minha vida, me incentivando e sendo meus maiores exemplos.

AGRADECIMENTO

Inicialmente gostaria de agradecer a minha família pelo apoio e amparo incondicional que me estenderam, principalmente por não medirem esforços para garantir que eu tivesse acesso à educação de excelência.

Agradeço a Deus e aos amigos que sempre estiveram por perto durante toda essa jornada.

Igualmente agradeço ao meu orientador André pela paciência, compreensão e partilha do conhecimento necessário para a produção dessa pesquisa acadêmica e do meu crescimento profissional e intelectual.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), que me proporcionaram a estrutura necessária para a realização dessa pesquisa, estendendo o agradecimento a todos os demais professores e colaboradores dessa instituição que direta e indiretamente colaboraram para a conclusão desse ciclo.

“Somos sempre modificados pelo que amamos.”
(JOSEPH BRODSKY)

RESUMO

As estruturas mistas de madeira e concreto surgiram no final da Primeira e Segunda Guerras Mundiais, com intuito de substituir o aço. Esse sistema busca utilizar as vantagens dos dois materiais, a madeira apresenta um bom desempenho a tração e o concreto à compressão, porém, em razão das diferentes propriedades dos materiais há grande dificuldade de se prever o mecanismo de trabalho exato do sistema de ligação, assim como de mensurar o cálculo do módulo de deslizamento. Nesse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os fatores que influenciam no módulo de deslizamento de serviço em uma viga de uma seção T composta pela mesa em concreto e a alma em madeira, unidas por conectores metálicos. Essa análise foi realizada por meio de uma abordagem paramétrica via método dos elementos finitos, de modo que ao final foi possível obter uma equação de regressão a múltiplas variáveis para a estimativa do módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) com coeficiente de determinação $R^2 = 79.07\%$, o que evidencia a boa precisão obtida na estimativa dessa importante variável estrutural.

Palavras-chave: estruturas mistas; madeira-concreto; módulo de deslizamento; elementos finitos; ligações.

ABSTRACT

The composite structures of timber and concrete appeared at the end of the First and Second World Wars, with the intention of replacing steel. This system seeks to use the advantages of both materials, wood presents good performance in tension and concrete in compression, however, due to the different properties of the materials it is difficult to predict the exact working mechanism of the connection system, thus how to measure the calculation of the slip modulus. In this scenario, the present research aimed to evaluate the factors that influence the service slip modulus (K_{ser}) in a T-section beam composed of a concrete table and a wooden core, joined by metallic connectors. This analysis was carried out using a parametric approach via the finite element method, so that in the end it was possible to obtain a multiple variable regression equation to estimate the K_{ser} with coefficient of determination $R^2 = 79.07\%$, which highlights the good precision obtained in estimating this important structural variable.

Key words: *composite; timber-concrete; slip modulus; finite elements; joints.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – CONECTORES DE SISTEMAS MADEIRA-CONCRETO.....	14
FIGURA 2.2 – FATORES DE INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE DESLIZAMENTO	15
FIGURA 2.3 – GRÁFICO FORÇA (N) APLICADA X TEMPO (MINUTOS)	19
FIGURA 2.4 – GRÁFICO FORÇA (N) APLICADA X DESLIZAMENTO (MILÍMETROS)	19
FIGURA 2.5 – RELAÇÃO CONSTITUTIVA PARA O CONCRETO.....	23
FIGURA 2.6 – RELAÇÃO CONSTITUTIVA PARA O AÇO	24
FIGURA 3.1 – MAPA DE PALAVRAS-CHAVES (VOSVIEWER)	26
FIGURA 3.2 – MAPA DE PAÍSES COM PUBLICAÇÕES (VOSVIEWER)	27
FIGURA 3.3 – ANÁLISE DOS ARTIGOS ENCONTRADOS PELA PRIMEIRA <i>STRING</i> PUBLICADOS POR ANO	29
FIGURA 3.4 – ANÁLISE DOS ARTIGOS ENCONTRADOS POR ASSUNTO ABORDADO	29
FIGURA 3.5 – ANÁLISE DOS ARTIGOS ENCONTRADOS PELA QUINTA <i>STRING</i> PUBLICADOS POR ANO	31
FIGURA 3.6 – CURVAS DE FORÇA-DESLIZAMENTO PARA OS TIPOS DE CONEXÃO CONSIDERADOS NO ESTUDO DE DIAS ET AL. (2015B).....	31
FIGURA 3.7 – ENSAIO DE CISLHAMENTO COM PAINÉIS OSB	33
FIGURA 3.8 – MODELO VIRTUAL PARA ENSAIO PUSH-OUT	35
FIGURA 3.9 – SOFTWARES DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	36
FIGURA 4.1 – VIGA MISTA MADEIRA-CONCRETO: VISUALIZAÇÃO 3D.....	39
FIGURA 4.2 – VIGA MISTA MADEIRA-CONCRETO: SEÇÃO LONGITUDINAL E SEÇÃO TRANSVERSAL	39
FIGURA 4.3 – LANÇAMENTO DOS ELEMENTOS NO MÓDULO PART NO SOFTWARE ABAQUS	43
FIGURA 4.4 – MADEIRA UTILIZADAS NO ESTUDO	46
FIGURA 4.5 – MODELO CONSTRUTIVO: MÓDULO ASSEMBLY	48
FIGURA 4.6 – DISPOSIÇÃO DOS PARAFUSOS E DAS ARMADURAS: MÓDULO ASSEMBLY	48
FIGURA 4.7 – POSICIONAMENTO DOS EIXOS DE REFERÊNCIAS X, Y E Z E EIXOS LOCAIS 1, 2 E 3.....	49
FIGURA 4.8 – ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS	51
FIGURA 4.9 – TESTE DE MALHA PARA SUPORTE DE CARGA: MÓDULO MESH	51
FIGURA 4.10 – CONFIGURAÇÃO FINAL: MÓDULO MESH.....	51
FIGURA 4.11 – ENSAIO EXPERIMENTAL: VIGAS MISTAS MADEIRA-CONCRETO	53
FIGURA 4.12 – ENSAIO EXPERIMENTAL: DIMENSÕES E POSICIONAMENTO DE CARREGAMENTOS (MM)	54
FIGURA 4.13 – ENSAIO EXPERIMENTAL: RESULTADOS PARA O MÓDULO DE DESLIZAMENTO	55
FIGURA 5.1 – TENSÕES DE VON MISE: FASE PÓS PROCESSAMENTO	56
FIGURA 5.2 – CURVA FORÇA X DESLOCAMENTO	57
FIGURA 5.3 – TENSÃO ATUANTE NO CONECTOR	58
FIGURA 5.4 – PONTO DE REFERÊNCIA PARA DESLOCAMENTO RELATIVO ENTRE AS PARTES.....	58
FIGURA 5.5 – DESLOCAMENTO VERTICAL APLICADO	59
FIGURA 5.6 – GRÁFICO DE PARETO	63
FIGURA 5.7 – HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ERRO: RESULTADO NUMÉRICO X EUROCODE (SEM AJUSTE DE MULTIPLICAÇÃO).....	64

FIGURA 5.8 – HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ERRO: RESULTADO NUMÉRICO X EUROCODE (COM AJUSTE DE MULTIPLICAÇÃO)	64
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - DIRETRIZES DE BUSCA E <i>STRINGS</i> UTILIZADAS	28
TABELA 4.1 - VARIÁVEIS RESPECTIVOS NÍVEIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO PARAMÉTRICO	40
TABELA 4.2 - CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS NO MÓDULO PROPERTY NO SOFTWARE ABAQUS	42
TABELA 4.3 - PROPRIEDADES DAS MADEIRAS UTILIZADAS NO ESTUDO, RETIRADAS DO CATÁLOGO DE MADEIRAS BRASILEIRAS, 2013.	45
TABELA 4.4 - CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS NO MÓDULO PROPERTY NO SOFTWARE ABAQUS	47
TABELA 4.5 - CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS NO MÓDULO PROPERTY NO SOFTWARE ABAQUS	50
TABELA 4.6 - CONFIGURAÇÃO DOS ELEMENTOS NO MÓDULO MESH NO SOFTWARE ABAQUS	51
TABELA 4.7 - DIMENSÕES DA PEÇA	53
TABELA 4.8 - PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.....	54
TABELA 5.1 - RESULTADOS OBTIDOS PELO ESTUDO PARAMÉTRICO PARA CÁLCULO DO KSER	59

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - VALOR DE K_{SER} EM N/MM PARA CONECTORES E LIGAÇÕES MADEIRA-MADEIRA.....	16
QUADRO 2.2 - VALOR DE K_{SER} EM N/MM PARA CONECTORES E LIGAÇÕES MADEIRA-MADEIRA (NBR 7190:2021)	17

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

h_{alma}	Altura da alma
h_{mesa}	Altura da mesa
ρ_{conc}	Densidade do concreto
ρ_{mad}	Densidade da madeira
L_T	Comprimento total da peça
fck_{conc}	Resistência a compressão do concreto
fck_{mad}	Resistência a compressão da madeira
l_b	Comprimento de embutimento do parafuso
CDP	Concrete Damaged Plasticity
d	Diâmetro do conector
E	Módulo de Elásticidade
F	Força
F_{est}	Força de ruptura
f_u	Tensão de ruptura
f_y	Tensão de escoamento
k_{ser}	Módulo de deslizamento para o Estado Limite de Serviço
k_u	Módulo de deslizamento para o Estado Limite Último
MEF	Método dos elementos Finitos
\emptyset	Diâmetro do conector
ρ	Densidade dos materiais
ρ_m	Densidade média dos materiais
σ_{ij}	Tensão nas direções i e j
s	Espaçamento entre os de conectores

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	Geral	10
1.2.2	Específicos	10
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	ASPECTOS FUNDAMENTAIS	13
2.1	ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA-CONCRETO	13
2.2	SISTEMAS DE CONEXÃO	14
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAÇÕES	15
2.4	MÓDULO DE DESLIZAMENTO	16
2.4.1	Códigos normativos internacionais	17
2.4.2	Análise experimental	19
2.4.3	Análise pelo Método dos Elementos Finitos	21
2.4.3.1	<i>Modelo constitutivo para o concreto</i>	22
2.4.3.2	<i>Modelo constitutivo para o aço</i>	23
2.4.3.3	<i>Modelo constitutivo para a madeira</i>	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	26
3.1	PROCESSO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	27
3.2	MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO K_{SER} E K_U PARA ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO	31
3.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO	34
3.4	CONCLUSÃO DA REVISÃO	36
4	METODOLOGIA DE PESQUISA	38
4.1	MODELO DE ESTUDO	38
4.2	ESTUDO PARAMÉTRICO PROPOSTO	39
4.3	MODELO DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO K_{SER}	41
4.4	MODELAGEM DOS ELEMENTOS	42
4.5	DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	44
4.6	CONSTRUÇÃO DO MODELO	47
4.7	CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS	48

4.8	CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO E CONTORNO	49
4.9	DEFINIÇÃO DA MALHA.....	50
4.10	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	53
5	RESULTADOS.....	56
5.1	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	56
5.2	ESTUDO PARAMÉTRICO	57
5.3	ESTIMATIVA DO MÓDULO DE DESLIZAMENTO	61
6	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas de madeira e concreto visam utilizar as vantagens dos dois materiais. A madeira possui um bom desempenho a tração e a compressão, quando comparada a outros materiais da construção civil. Já o concreto possui um excelente desempenho a compressão e grande versatilidade para se executar formas em diversos formatos (SORIANO; TADEU; II, 2009).

De modo geral, ao analisar estruturas mistas de madeira-concreto observa-se que esse tipo de estrutura composta utiliza, em sua maioria, conectores metálicos para formar seu sistema de ligação; sendo estes dispostos pela superfície de contato, com o escopo de sugerir o modo desse sistema estrutural. No entanto, em razão das propriedades diferentes dos três materiais envolvidos, há grande dificuldade de se prever o mecanismo de trabalho exato do sistema de ligação, assim como mensurar o cálculo para o módulo de deslizamento (DIAS et al., 2015a).

Atualmente, a norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), que aborda projetos e dimensionamento de estruturas de madeira, abrange um cálculo para o módulo de deslizamento de ligações compostas embasada no código internacional *Eurocode 5: Design of timber structures* (EN: 1995). Neste cálculo, o módulo de deslizamento é estimado em função do diâmetro do conector e das densidades dos materiais.

Com base nas equações encontradas nesta norma europeia e nos estudos de pesquisadores contemporâneos como Dias *et al.*, (2015a), Djoubissieia (2018), Molina (2019), Chen (2020a), entre outros, devido ao comportamento não linear da ligação, se obtém diferenças entre a medida realizada dos deslizamentos de forma experimental e de forma teórica. Nesse contexto, se faz necessário a análise da influência de outros parâmetros importantes não abrangidos pelas normas nacionais atuais, que tornem possível a elaboração de uma equação com maior nível de refinamento para o módulo de deslizamento de ligações. Diante disto, a utilização de simulações numéricas traz consigo a possibilidade de se realizar estudos paramétricos com a redução de custos e a facilidade de variar diversos parâmetros que influenciam nesse sistema de ligação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a formulação para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço de ligações compostas por estruturas de madeira-concreto na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), e, nos códigos normativos internacionais, levam em conta apenas dois parâmetros: a densidade dos materiais e os diâmetros dos conectores utilizados. Estudos de pesquisadores contemporâneos, mostram que devido ao comportamento não linear da ligação, se obtém diferenças entre a medida realizada dos deslizamentos de forma experimental e de forma teórica.

Levando em consideração a lacuna na formulação atual para o cálculo do módulo de deslizamento de ligações compostas por estruturas de madeira-concreto, é possível questionar que a inclusão de parâmetros adicionais, além da densidade dos materiais e dos diâmetros dos conectores, pode levar a uma equação mais precisa e refinada. Esses parâmetros adicionais podem incluir características como o tipo e formato dos conectores, a resistência dos materiais, o comprimento de embutimento dos conectores, o espaçamento entre eles, as dimensões das peças, entre outros. Nesse contexto, se faz necessário a análise desses parâmetros para uma melhor compreensão do comportamento e da eficiência do sistema de ligação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Determinar uma expressão de melhor aproximação para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}) para estruturas mistas de madeira e concreto.

1.2.2 Específicos

Entre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Avaliar para uma seção de viga T composta pela alma em madeira e a mesa em concreto, conectadas por conector metálico, à influência dos onze parâmetros no módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}), sendo eles (i) resistência da madeira (ii) resistência do concreto (iii) altura da alma (iv) altura

da mesa (v) comprimento de embutimento do conector (vi) diâmetro do conector (vii) número de conectores (viii) comprimento total da peça (ix) altura da mesa (x) densidade da madeira e (xi) densidade do concreto;

- Realizar um estudo no software *ABAQUS* para calibração e validação de um modelo numérico com base no estudo experimental realizado por Chen *et al.*, (2020b);
- Conduzir um estudo paramétrico utilizando simulação numérica para diversas configurações da peça, com objetivo de obter uma expressão matemática com maior precisão para o k_{ser} .
- Comparar os resultados obtidos com as equações normativas, de modo que se obtenha uma conclusão acerca do estudo comparativo entre o k_{ser} obtido de forma numérica e calculado de forma teórica.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em 6 (seis) capítulos, dos quais estão brevemente descritos abaixo:

No Capítulo 1, é apresentada a introdução, contendo uma síntese da pesquisa, abordando os objetivos principais e as justificativas.

O Capítulo 2, denominado "Aspectos Fundamentais", constitui uma seção introdutória que precede a revisão bibliográfica sistemática. Seu objetivo é explanar conceitos essenciais para a compreensão da pesquisa, como uma breve definição de estruturas mistas, sistemas de ligações, módulos de deslizamento e abordagens normativas.

No Capítulo 3, intitulado "Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)", é realizada uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de condensar as informações sobre o módulo de deslizamento em estruturas mistas de madeira e concreto no cenário internacional.

No Capítulo 4, denominado "Metodologia de Pesquisa", é apresentada a metodologia adotada para conduzir o estudo. Todas as considerações necessárias para a realização das simulações numéricas no software de elementos finitos são detalhadamente descritas.

Por fim, nos Capítulos 5 e 6, são apresentados os resultados e conclusões acerca da validação do modelo numérico e dos estudos paramétricos realizados. Além disso, como contribuição final do presente trabalho, é apresentada uma proposta de equação para o módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}).

2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS

Nesta seção, precedendo a revisão bibliográfica sistemática, estão contidos os aspectos considerados fundamentais para a pesquisa. Serão abordados os conceitos sobre (i) estruturas mistas de madeira e concreto, (ii) conectores, (iii) tipo de ligações, (iv) definições para módulo de deslizamento e (v) aspectos normativos e numéricos de relevância.

2.1 ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA-CONCRETO

De acordo com Yeoh (2011), a utilização e o desenvolvimento de estruturas mistas de madeira e concreto se deram no continente europeu após a Primeira e a Segunda Guerra Mundial, com intuito de ter um método construtivo alternativo ao aço, em função da escassez desse insumo no pós-guerra e devido a necessidade da renovação de edificações e reconstruções de cidades.

Nesse cenário, surgiu, em 1992 patenteado por Muller (1992) o primeiro sistema de conectores metálicos, que tornou possível a execução de vigas compostas. Esse sistema era formado por vigas de madeira na alma e lajes em concreto na mesa, explorando sinergicamente as propriedades de ambos os materiais, sendo o concreto, na maioria dos casos, trabalhando a compressão e a madeira, a tração ligada por conectores de cisalhamento. Posteriormente, em 1939 na Suíça, Schaub (1939), utilizou sistemas de conexão tipo I e tipo Z como proposta para ligar a interface madeira-concreto. Segundo Ceccotti (2002) o marco inicial da utilização das estruturas mistas se deu na aplicação das técnicas para renovação de cidades na Alemanha.

Nos últimos anos, a utilização desse compósito vem sendo aplicada nas áreas de reforço e execução de pontes, pisos e forros de madeira bem como na construção de novas edificações. Dentre as vantagens competitivas, ao se comparar com a utilização de elementos de concreto armado, estão (i) a redução do peso próprio e conseqüentemente do carregamento nas fundações das estruturas; (ii) a facilidade de montagem; e (iii) a redução de emissões de carbono e energia incorporada. Do ponto de vista da madeira pura, ao se utilizar o sistema misto, alguns dos benefícios obtidos

são o aumento da rigidez e desempenho global da estrutura, melhor isolamento acústico, redução na sensibilidade do comportamento às vibrações e a possibilidade de simplificar o contraventamento horizontal (NGUYEN; SORELLI; BRÜHWILER, 2020).

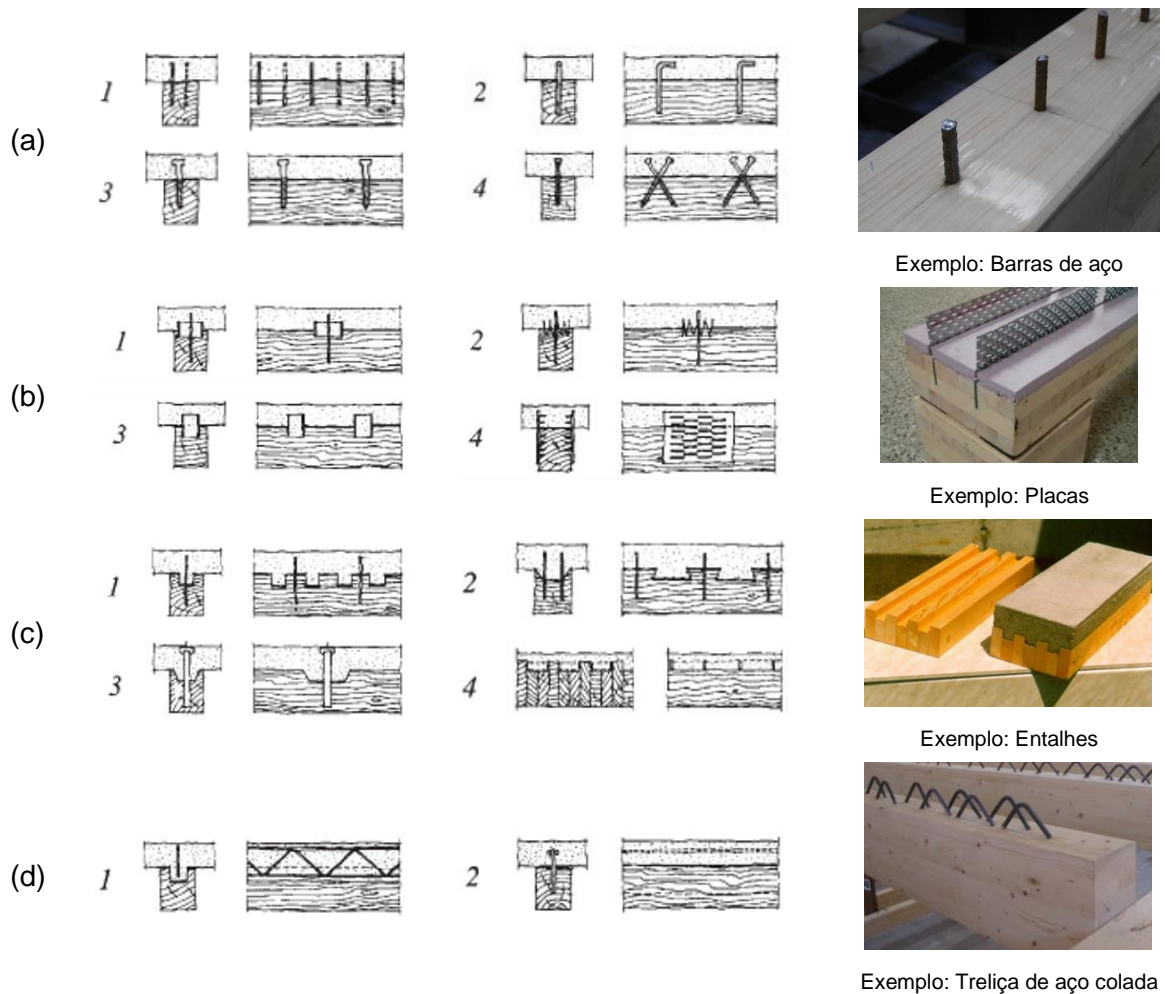
O comportamento do elemento estrutural madeira-concreto depende, em grande parte, das propriedades dos materiais utilizados em conjunto com a rigidez ao cisalhamento do sistema de conexão.

2.2 SISTEMAS DE CONEXÃO

Diversos são os sistemas de conexão existentes no mercado, para fazer a ligação entre a interface das estruturas mistas, do ponto de vista mecânico, esses conectores devem possuir uma rigidez suficiente para transmitir as forças de cisalhamento e impedir que a seção se separe, delimitando o deslizamento no campo de interação dos materiais. Alinhado a este fator, a escolha do conector deve também levar em conta o custo e a viabilidade de execução (MOLINA et al., 2019).

A escolha do sistema de conexão para estruturas mistas está significativamente ligada com o desempenho e o comportamento do sistema estrutural. Ceccotti (2002) reuniu em seu trabalho os métodos mais comumente usados para realizar essa conexão, agrupando-os pela sua rigidez e classificando-os dos valores mais baixos para os mais altos, são eles (a) pregos, barras de aço e parafusos (b) anéis bipartidos, placas e tubos de aço (c) entalhes e chapas de cisalhamento de aço e (d) treliça de aço colada e chapa de aço colada (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Conectores de sistemas madeira-concreto



Fonte: Ceccotti, 2002 (Adaptado).

2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAÇÕES

Nos sistemas estruturais mistos madeira-concreto é necessário que a conexão seja eficiente, ou seja, é indispensável que se dedobre atenção às propriedades mecânicas relevantes, em específico a resistência, rigidez e a ductibilidade, de modo que seja evitado falhas de ligação e distribuição de carga (DIAS; DIETSCH, 2018).

A ductibilidade varia de acordo com o material utilizado na função do conector, trazendo um efeito reflexo imediato que diferencia ligações muito rígidas e de baixa ductibilidade ou muito flexíveis e dúcteis, segundo as lições de Ceccotti (2002).

Dando sequência, a resistência de uma ligação em um sistema misto geralmente é entendida como sendo a carga máxima que uma conexão consegue suportar, no que tange o deslizamento no plano de deformações da interface. E esse ponto é de extrema importância, pois o nível de ação composta vai depender diretamente do nível da deformação da interface.

Indo além, é a propriedade mecânica da rigidez que influencia a verificação de outros pontos importantes da estrutura como os Estados Limites de Utilização e os Estados Limites Últimos, fazendo com que a variabilidade da rigidez em ligações de concreto de madeira possa ser vista como o principal parâmetro de projeto de cada tipo de ligação (CECOTTI, 1995).

2.4 MÓDULO DE DESLIZAMENTO

Em estruturas compostas de madeira e concreto, o comportamento estrutural da ligação entre os dois materiais depende, em grande parte, da resistência ao cisalhamento e da rigidez do conector mecânico, uma vez que os conectores afetam diretamente a distribuição dos esforços internos e as deformações na estrutura.

Nesse contexto, o parâmetro que quantifica a flexibilidade do sistema de conexão é chamado de Módulo de Deslizamento (K), esse módulo de deslizamento pode ser calculado para o Estado Limite de Serviço (K_{ser}) e para o Estado Limite Último (K_u) e pode variar em função de diversos parâmetros que compõe a estrutura. (FIGURA 2.2) (MOLINA, 2008).

Figura 2.2 – Fatores que influenciam o módulo de deslizamento



Fonte: Autora, 2024.

2.4.1 Códigos normativos internacionais

Atualmente, diversos países possuem códigos normativos que abordam o cálculo e dimensionamento de estruturas mistas madeira-concreto. De acordo com Dias *et al.*, (2018), alguns países regulamentam as aplicações estruturais a aprovações técnicas, enquanto outros deixam a critério do engenheiro estrutural. Nesse contexto, será abordado os códigos normativos quanto aos modelos neles contidos para o cálculo do módulo de deslizamento.

2.4.1.1 Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)

O Código normativo *Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)* fornece modelos para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço (K_{ser}) de estruturas de madeira em função da densidade média (ρ_m) das madeiras utilizadas, do tipo de conexão e do diâmetro do conector (d). O Quadro 2.1, logo abaixo, ilustra as equações e considerações utilizadas pela norma europeia.

Para ligações compostas madeira-concreto, o código não possui modelos, apenas a indicação de considerar a densidade média da madeira, e multiplicar o resultado pelo coeficiente 2. Desse modo, pode-se assumir que a deformação considerada no elemento de concreto é desprezível.

Quadro 2.1 –Valor de K_{ser} em N/mm para conectores e ligações madeira-madeira

Tipo de conector	K_{ser}
Pinos Parafusos com ou sem folga Parafuso Pregos (com pré furação)	$\rho_m^{1,5} d / 23$
Pregos (sem pré furação)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30$
Grampos	$\rho_m^{1,5} d^{0,8} / 80$
Conectores de anel dividido tipo A conforme a EN 912 Conectores de chapa de cisalhamento tipo B conforme a EN 912	$\rho_m d_c / 2$
Conectores de Placa Dentada: - Conectores tipo C1 a C9 de acordo com a EN912 - Conectores tipo C10 a C11 de acordo com a EN912	$1,5\rho_m d_c / 4$ $\rho_m d_c / 2$
A folga deve ser adicionada separadamente à deformação	

Fonte: *Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)* (Modificado)

O Código ainda estabelece uma relação entre o módulo de deslizamento em serviço (K_{ser}) e o módulo de deslizamento último (K_u), expressa pela Equação 1.

$$K_u = \frac{2}{3} \times K_{ser} \quad (1)$$

2.4.1.2 NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira

A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), que trata do projeto de estruturas de madeira, inclui o cálculo dos módulos de deslizamento com base no Eurocode 5. No Quadro 2.2, são apresentadas as equações retiradas da norma para o cálculo do K_{ser} .

Quadro 2.2 –Valor de K_{ser} em N/mm para conectores e ligações madeira-madeira (NBR 7190:2022)

Conectores	K_{ser}
Pinos Parafusos de porca e arruela com ou sem folga Parafuso Auto atarraxante Pregos (com pré furação)	$\rho_{med}^{1,5} d / 23$
Pregos (sem pré furação)	$\rho_{med}^{1,5} d^{0,8} / 30$
Anel Metálico	$\rho_{med}^{1,5} d_c / 80$
<p>^a A folga pode ser adicionada separadamente da deformação</p> <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> • K_{ser}: É a rigidez de serviço de uma seção de corte de um pino metálico, expresso em Newton por milímetros (N/mm). • ρ_{med} É a densidade específica média em kg/m³, dado pela multiplicação da densidade aparente característica pelo valor 1,20 • d: É o diâmetro efetivo do pino metálico, expresso em milímetros (mm). 	

Fonte: NBR 7190:2022 Projeto de estruturas de madeira (Adaptado)

Em que, ρ_{med} é a densidade média dos elementos de madeira dada por:

$$\rho_{med} = \sqrt{\rho_{1,med} \times \rho_{2,med}} \quad (2)$$

Onde:

- $\rho_{1,med}$ é a densidade do primeiro elemento de madeira;
- $\rho_{2,med}$ é a densidade do segundo elemento de madeira;

Em conclusão, podemos observar que a norma brasileira adotou as equações do código europeu *Eurocode 5*, para os critérios de cálculo de deslizamento. No entanto, não foi abordado um item específico que descrevesse a relação de deslizamento para ligações madeira-concreto.

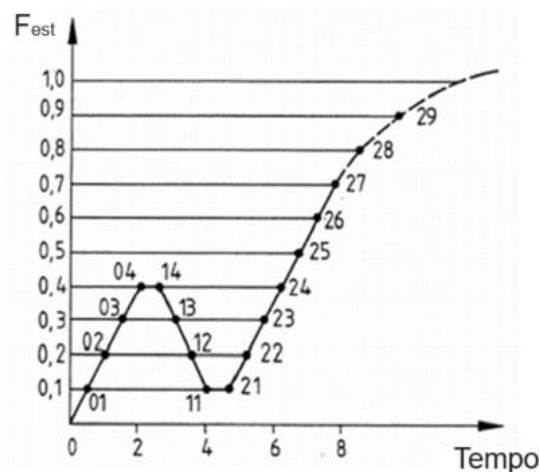
2.4.2 Análise experimental

Experimentalmente, a norma brasileira aborda protocolos para ensaios de determinação dos módulos de deslizamentos baseada no código internacional *BS EN 26891:1991 Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General*

principles for the determination of strength and deformation characteristics, redigido pelo *Comite Europeen de Normalisation*, este documento estabelece princípios para determinações das propriedades para estruturas madeira-madeira, sendo utilizado posteriormente por diversos autores para estruturas mistas.

Nesta norma, inicialmente (i) estima-se a força de ruptura (F_{est}), em sequência, (ii) realiza-se um incremento de carga a 20% de F_{est} por minuto, (iii) ao se atingir 40% de F_{est} mantém-se o carregamento por 30 segundos, em seguida, (iv) realiza-se o descarregamento até atingir 10% de F_{est} e mantém-se nessa posição por mais 30 segundos, por fim, (v) realiza-se o mesmo incremento de 20% F_{est} até atingir 70% de F_{est} e eleva-se o carregamento até a ruptura. A Figura 2.3 ilustra graficamente esse processo de carregamento e descarregamento até se atingir a ruptura.

Figura 2.3 –Gráfico força (N) aplicada x tempo (minutos)

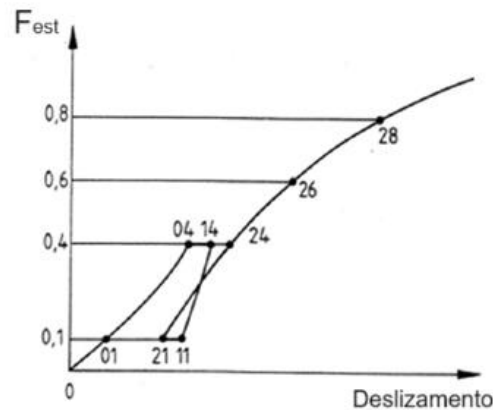


Fonte: *BS EN 26891:1991 Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics* (Modificado)

Durante a realização desse ensaio deve-se registrar os deslizamentos entre as faces da peça composta, tendo-se assim um gráfico do deslizamento em função do carregamento (Figura 2.4). De posse desse gráfico, o cálculo do módulo de deslizamento de serviço é dado em N/mm pela Equação 3 em que o divisor ($V_{04} - V_{01}$) é a diferença dos deslizamentos medidos em milímetros nos pontos em 40% de F_{est} (Ponto 04) e 10% de F_{est} (Ponto 01).

$$K_{ser} = \frac{0,4 \times F_{est}}{(v_{04} - v_{01})} \quad (3)$$

Figura 2.4 –Gráfico força (N) aplicada x deslizamento (milímetros)



Fonte: BS EN 26891:1991 Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics (Modificado)

Mesmo sendo um procedimento experimental datado da década de 90, até a contemporaneidade, pesquisadores utilizam esse protocolo para definição de propriedades das ligações de estruturas compostas.

2.4.3 Análise pelo Método dos Elementos Finitos

Atualmente, além da possibilidade de se realizar pesquisas utilizando Métodos Analíticos e Métodos Experimentais, é possível a realização de estudos numéricos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), sendo esse amplamente utilizado na simulação problemas diversos.

O Método dos Elementos Finitos vem sendo muito utilizado nos últimos anos por engenheiros das áreas de estruturas, e consiste na determinação de soluções para problemas utilizando soluções aproximadas numéricas, e, estabelecendo valores de contorno. O MEF discretiza o modelo analisado em uma malha de pontos, e estabelece soluções de acordo com o refinamento desejado.

Para se realizar pesquisas fazendo uso dessa metodologia, é necessário seguir procedimentos de pesquisa específicos, são eles: (i) definir o problema a ser

estudado, (ii) definir a geométrica do elemento, (iii) definir os materiais, (iv) definir as condições de contorno e interações no modelo (v) definir os critérios de processamento e (vi) validar o modelo em estudo.

Como vantagem, é possível simular muitos protótipos virtuais que representam com proximidade o comportamento de modelos reais, com um custo relativamente baixo e em um intervalo de tempo reduzido, porém, para que isso seja possível é necessário que os valores de entrada nos softwares sejam adequados e com uma sólida formação técnica. (LEE et al., 2020).

Dentre esses valores, é importante caracterizar o comportamento mecânico dos materiais. Para isto, foi utilizado o Modelo Constitutivo de Dano com Plasticidade (*Concrete Damaged Plasticity*) para o Concreto, o Modelo de *Von Mises* para os conectores e barras de aço e o Critério de *Hill* para a Madeira.

2.4.3.1 Modelo constitutivo para o concreto

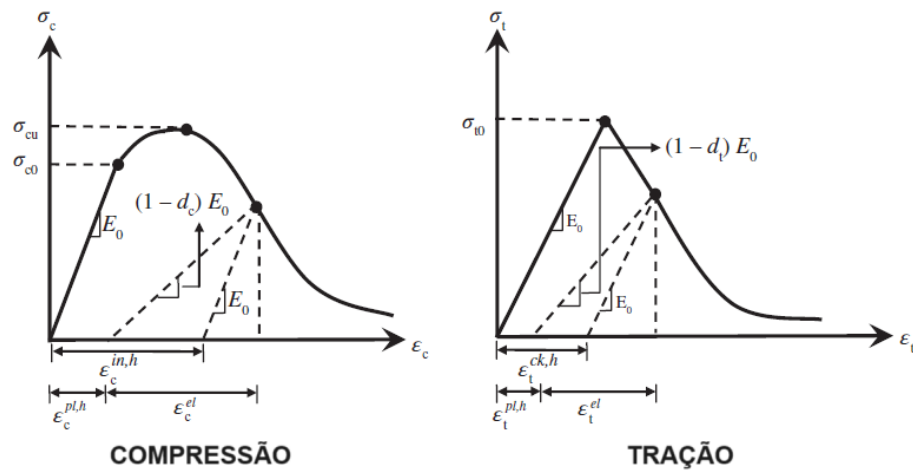
Para o modelo constitutivo do concreto, foi utilizado o Modelo Constitutivo de Dano com Plasticidade (*Concrete Damaged Plasticity ou CDP*). O autor Hafezolghorani *et. al.*, (2017) retrata em seu trabalho duas equações simplificadas para o cálculo das tensões de tração e compressão desse modelo, conforme Equação 4 a compressão e 5 para a tração. Onde (σ) representa a tensão, (d) representa o dano sofrido pelo material, (ϵ^t) a deformação total e (ϵ^{pl}) a deformação plástica.

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \epsilon_t^{pl, h}) \quad (4)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \epsilon_c^{pl, h}) \quad (5)$$

Abaixo, estão representados os gráficos para a condição de carregamento uniaxial desse modelo (FIGURA 2.5).

Figura 2.5 – Relação constitutiva para o concreto

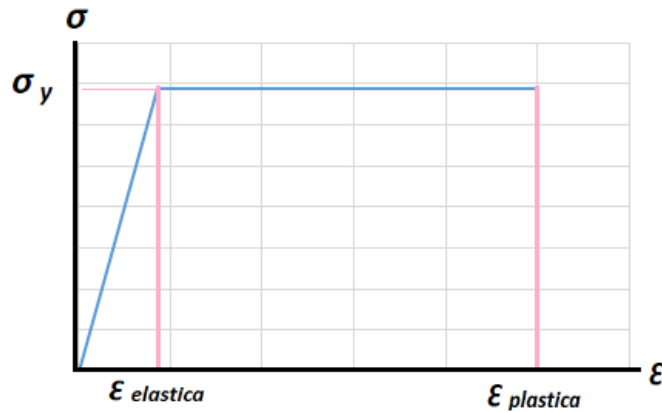


Fonte: Hafezolghorani et. Al., (2017) (Adaptado)

2.4.3.2 Modelo constitutivo para o aço

Para as barras de aço e os conectores, ambos constituídos por materiais dúcteis, foi adotado o critério de Von Mises. O modelo utilizado para representá-los foi o elasto-plástico perfeito (Figura 2.6). O Critério de Von Mises é amplamente utilizado na mecânica dos materiais para avaliar a deformação plástica em materiais que apresentam comportamento dúctil, como metais. Ele postula que a falha em materiais dúcteis ocorre quando a energia de deformação excede um certo limite crítico, independentemente da direção específica do esforço, considerando a combinação das tensões principais para determinar se um material está próximo de atingir o ponto de ruptura plástica.

Figura 2.6 – Relação constitutiva para o aço



Fonte: Autora, 2024.

2.4.3.3 Modelo constitutivo para a madeira

O critério de resistência proposto por Hill (1950) para materiais ortotrópicos baseia-se no critério de Von Mises, assumindo que o modo de falha do material é independente da pressão hidrostática. Ele postula que as tensões de escoamento do material são idênticas na tração e na compressão. O Critério de Hill representa uma ferramenta fundamental na análise do comportamento mecânico da madeira em modelos constitutivos. Especificamente desenvolvido para compreender a resistência da madeira às cargas e deformações, leva em consideração as propriedades ortotrópicas do material, ou seja, suas características mecânicas variam em diferentes direções. Esse critério considera os módulos de elasticidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, juntamente com as resistências máximas à tração e à compressão nessas direções.

Ao utilizar o Critério de Hill em simulações numéricas é possível prever como a madeira responderá a diversos tipos de carregamentos, ele leva em conta a parte da energia de distorção da energia total de deformação que é armazenada devido ao carregamento, porém ele não especifica o tipo ou modo de falha do material. A expressão matemática definida por esse critério está indicada em (6), onde σ_{ij} representa as tensões nas direções principais, F_{ij} são os coeficientes do critério de Hill

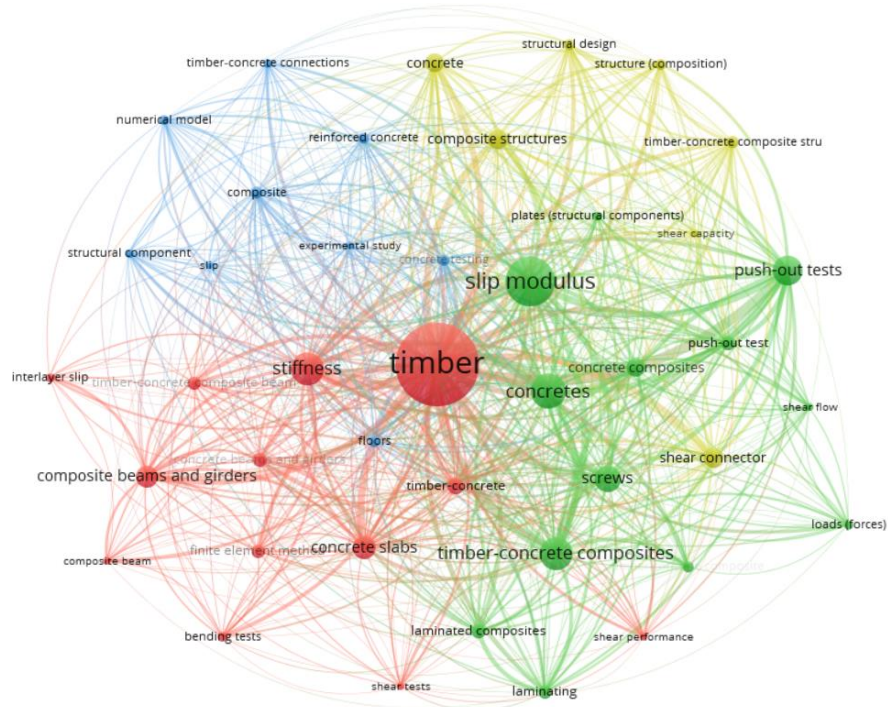
determinados através de ensaios uniaxiais de tração, compressão e cisalhamento e ensaios biaxiais. Para as tensões normais $i, j = 1$ a 3 , para tensões de cisalhamento corresponde aos planos 12, 23 e 31.

$$F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1 \quad (6)$$

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

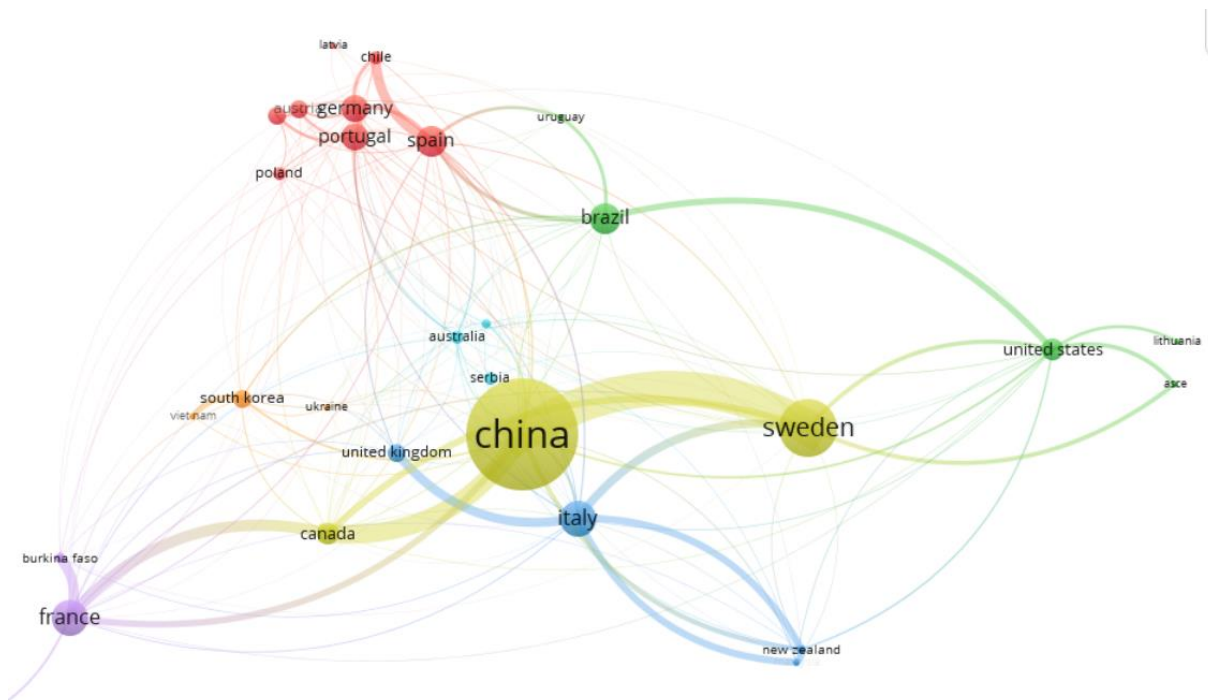
A revisão bibliográfica sistemática (RBS) a ser desenvolvida é realizada com o intuito de obter a síntese do conhecimento sobre as pesquisas consolidadas acerca do módulo de deslizamento em estruturas mistas de madeira e concreto. Para obter um panorama geral sobre o tema, foram realizadas duas análises simples, sem critérios seletivos, para examinar as palavras-chave mais utilizadas e os países que mais publicaram sobre o assunto. Para tal fim, foram utilizados os termos [*concrete AND timber AND ("slip modulus" OR "interlayer slip")*] e obteve-se o mapa com base na rede bibliométrica pelo *software VOSviewer* das palavras-chaves, mostrado na Figura 3.1, onde é possível observar que as palavras mais utilizadas pelos autores são: “*timber*”, “*slip modulus*”, “*concrete*”, “*timber-concrete composites*” e “*push-out tests*”, respectivamente. Ademais, pela Figura 3.2, é possível notar que os três países que mais publicaram acerca do assunto foram China, Suécia e Canadá. Com base nessa análise inicial, deu-se início a Revisão Bibliográfica Sistemática.

Figura 3.1 – Mapa de palavras-chaves (VOSviewer)



Fonte: Autora, 2024.

Figura 3.2 – Mapa de países com publicações (VOSviewer)



Fonte: Autora, 2024.

3.1 PROCESSO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

A revisão bibliográfica sistemática foi dividida em quatro etapas distintas, sendo a primeira busca conduzida com o propósito de obter uma visão abrangente das pesquisas relacionadas às estruturas mistas de madeira e concreto, englobando a investigação do módulo de deslizamento último (k_u) e do módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}). Na segunda busca, foram selecionados exclusivamente estudos experimentais sobre o tema em análise. A terceira busca concentrou-se na filtragem de trabalhos de caráter numérico. Por fim, como objetivo final da revisão bibliográfica sistemática, a quarta busca teve como foco a identificação de trabalhos que apresentassem propostas de estimativas para o cálculo do módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}) e do módulo de deslizamento último (k_u).

Com o intuito de alcançar essa meta, foram utilizadas combinações de *strings* e operadores *booleanos*, seguindo as diretrizes delineadas na Tabela 3.1. Para a

obtenção dos estudos de interesse, optou-se por empregar três bases de dados: *Scopus*, *Web of Science* e *Engineering Village*. Além disso, como critério de seleção, foram considerados apenas os artigos de periódicos que já haviam passado pelo processo de aprovação.

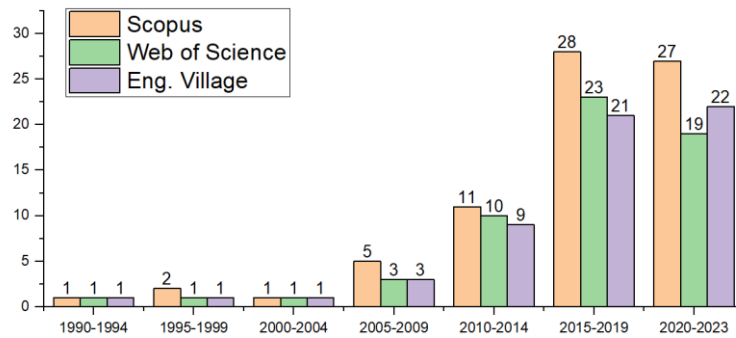
Tabela 3.1 – Diretrizes de busca e *strings* utilizadas

RBS	Palavras-chaves
busca nº 1	concrete AND timber AND ("slip modulus" OR "interlayer slip")
busca nº 2	concrete AND timber AND ("slip modulus" OR "interlayer slip") AND experimental
busca nº 3	concrete AND timber AND ("slip modulus" OR "interlayer slip") AND (fem OR "Finite element method" OR "Finite element" OR Numerical)
busca nº 4	concrete AND timber AND ("slip modulus" OR "interlayer slip") AND ("mathematical model")
busca nº 5	concrete AND timber AND (fem OR "Finite element method" OR "Finite element" OR Numerical)

Fonte: Autora, 2024.

O gráfico representado pela Figura 2.3 representa a quantidade de artigos encontrados por meio da primeira busca. No total, foram identificados 75 documentos de interesse na base de dados *Scopus*, 58 na *Web of Science* e 58 na *Engineering Village*. É interessante destacar que o primeiro estudo encontrado foi conduzido por Girhammar et al. (1991), nele o autor explora o efeito p-delta em pilares e vigas mistas de madeira e concreto. Além deste trabalho, durante a década de 1990, foram encontrados também os estudos de Kliger et al. (1997) e Mungwa et al. (1999), por fim, é relevante observar que, até 2010, o número de pesquisas sobre o tema é reduzido, porém a partir de 2015, nota-se um crescimento significativo, que se mantém em ascensão até o presente ano.

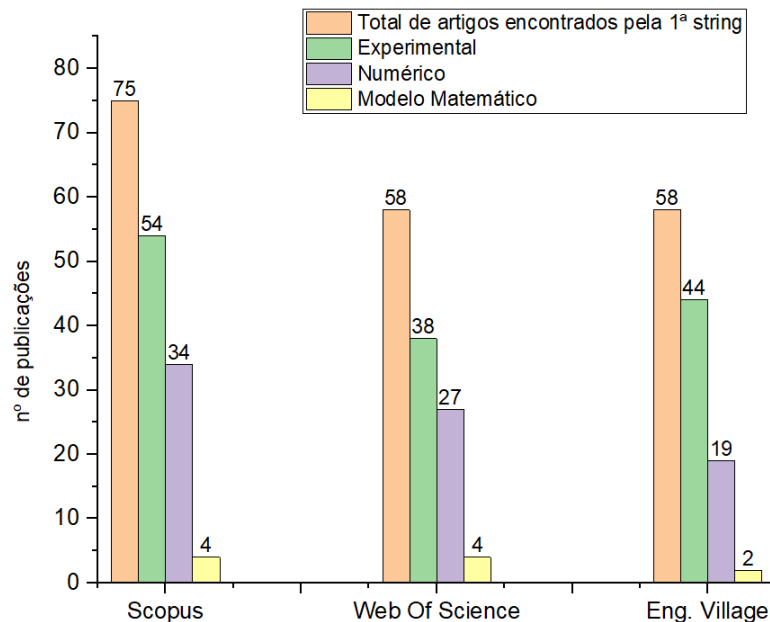
Figura 3.3 – Análise dos artigos encontrados pela primeira *string* publicados por ano



Fonte: Autora, 2024.

Continuando o processo, foram realizadas as buscas de número 2, 3 e 4, com o objetivo de aplicar filtros temáticos e chegar a uma conclusão sobre os artigos encontrados com a utilização da primeira *string*. Como resultado, pode-se inferir que, na base de dados Scopus, dos 75 artigos identificados, 54 abordaram estudos experimentais, 34 realizaram análises numéricas e 4 apresentaram modelos matemáticos para o cálculo do k_{ser} ou k_u . Essa mesma análise foi conduzida nas bases *Web of Science* e *Engineering Village*. A síntese dos resultados obtidos é ilustrada na Figura 3.4.

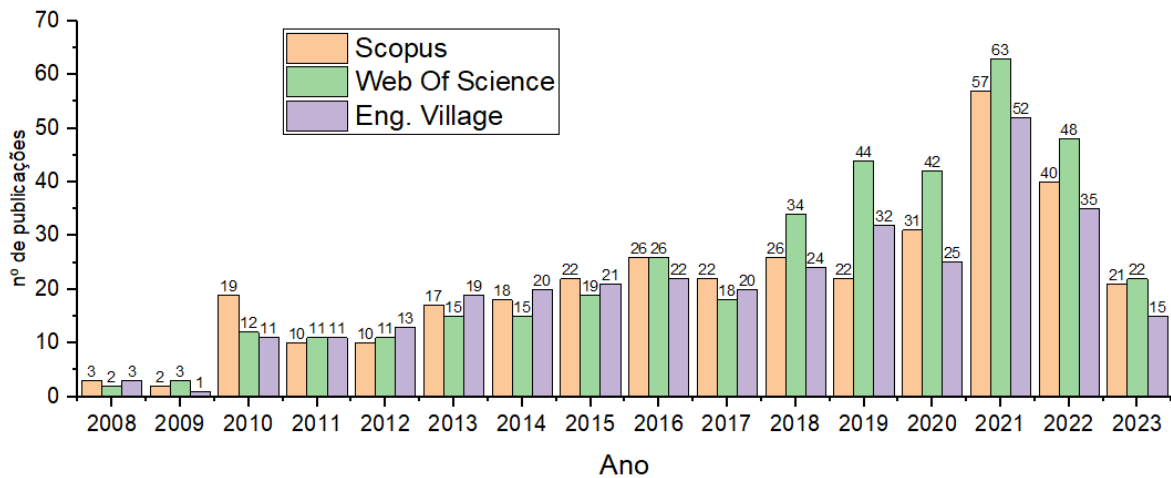
Figura 3.4 – Análise dos artigos encontrados por assunto abordado



Fonte: Autora, 2024.

Por fim, realizou-se a última busca nas bases de dados com objetivo de verificar o panorama geral das pesquisas em simulações numéricas em estruturas mistas de madeira e concreto. Foram encontrados 405 documentos na base de dados *Scopus*, 408 na *Web of Science* e 374 na *Engineering Village*. O gráfico da Figura 3.5 mostra as publicações classificadas por ano de publicação nos últimos 15 anos.

Figura 3.5 – Análise dos artigos encontrado pela quinta *string* publicados por ano



Fonte: Autora, 2024.

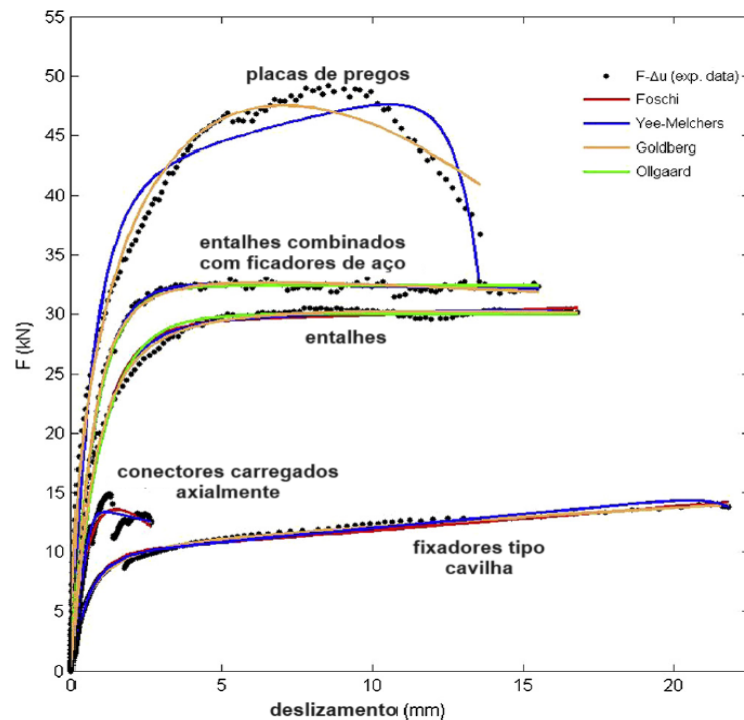
Como primeira conclusão da análise bibliográfica, pode-se afirmar que a maioria dos estudos realizados sobre o tema consiste em pesquisas experimentais. Além disso, é interessante observar, conforme ilustrado na Figura 3.5, que os estudos numéricos têm ganhado relevância nos últimos anos dentro dessa temática. Isso se deve ao fato de que simulações numéricas possibilitam a realização de inúmeros experimentos virtuais em uma parcela de tempo reduzida e sem um custo econômico alto, quando comparado à ensaios experimentais.

A seguir, serão analisados de forma mais aprofundada as pesquisas correlatas a respeito da determinação do k_{ser} e k_u sobre o aspecto numérico e os autores que propuseram modelos matemáticas para estimativa desse coeficiente.

3.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO K_{SER} E K_U PARA ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

Como um dos objetivos da revisão bibliográfica, buscou mapear estudos que abordaram modelos matemáticos para estimativa do k_{ser} e k_u . Dentre eles, Dias *et al* (2015b) realizou uma análise estatística para determinar as distribuições que melhor se ajustam aos valores obtidos experimentalmente de duas propriedades das conexões madeira-concreto: módulo de deslizamento e capacidade de carga. A Figura 3.6 mostra as relações de força-deslizamento consideradas pelos autores no estudo estatístico.

Figura 3.6 – Curvas de força-deslizamento para os tipos de conexão considerados no estudo de Dias *et al.* (2015b)



Fonte: Dias et al (2015b)

O autor agrupou os resultados em cinco tipologias, correspondendo a diferentes comportamentos mecânicos: fixadores tipo cavilha, fixadores carregados axialmente, entalhes, entalhes combinados com fixadores de aço e placas de pregos. Foi realizado um teste de aderência qui-quadrado usando um nível de significância de 5% para selecionar distribuições consistentes com os dados escolhendo a distribuição

normal. Para o módulo de deslizamento, foram selecionadas distribuições normais para fixadores tipo cavilha e fixadores carregados axialmente, uma distribuição gama para entalhes e placas de pregos, e uma distribuição normal para entalhes combinados com fixadores de aço. Com relação à capacidade de carga, a distribuição normal foi selecionada pelo autor para quase todos os tipos de conexões, com exceção dos fixadores tipo cavilha, para os quais foi escolhida uma distribuição logarítmica.

No caso do módulo deslizamento, foram encontrados nesse estudo valores altos do coeficiente de variação, variando entre 25% e 30%, exceto para fixadores carregados axialmente, com um valor de cerca de 14%. Para a capacidade de carga, foram encontrados pelo autor valores menores do coeficiente de variação para os vários tipos de conexão, com um valor médio de cerca de 10%. O autor comparou esses valores aos encontrados no Código de Modelo Probabilístico, e verificou que as conexões madeira-concreto apresentam uma variabilidade mais próxima à das propriedades da madeira do que à de outros materiais, como aço ou concreto.

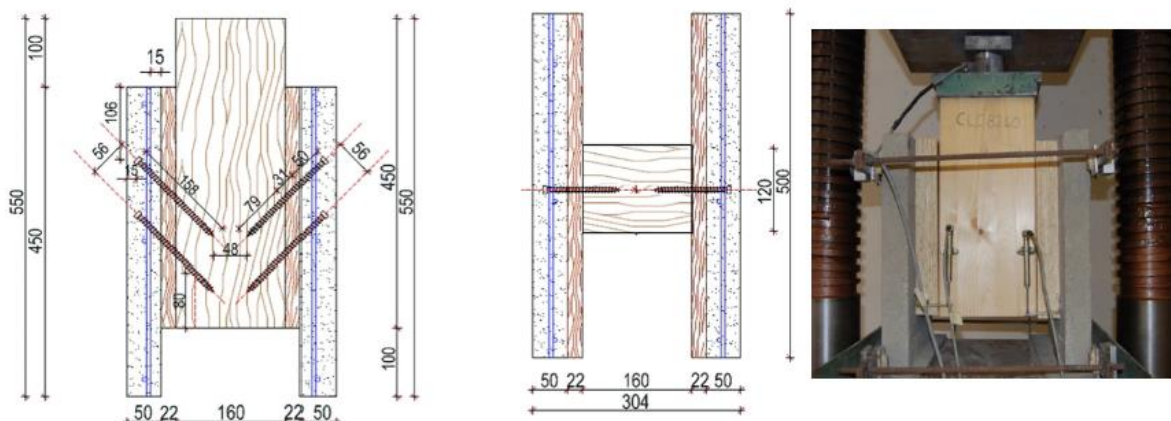
Foi escolhido pelo autor o modelo de Foschi para descrever o comportamento de deslizamento de carga das conexões de estruturas mistas de madeira-concreto. Pelo fato de que à análise de confiabilidade das estruturas madeira-concreto utilizando um menor número de variáveis reduz a complexidade do problema e, em métodos totalmente probabilísticos (nível de confiabilidade III), aumenta a taxa de convergência.

Cas *et al.* (2018) apresentou em seu estudo a derivação de um novo modelo matemático e uma solução analítica para analisar o comportamento de vigas compostas lineares 3D de duas camadas sujeitas a deslizamentos intercamadas. A partir das considerações teóricas realizadas e dos resultados analíticos obtidos, algumas conclusões foram inferidas pelos autores. Inicialmente, obtiveram uma solução analítica para o comportamento mecânico dessas vigas em sua configuração inicial. Onde foi teoricamente indicado e numericamente demonstrado que, em vigas com deslizamentos intercamadas, as deformações nos planos transversais e laterais são independentes entre si.

Em síntese, de acordo com os autores, o modelo matemático proposto neste estudo oferece uma base sólida que pode ser utilizada como referência para análises numéricas e experimentais do comportamento mecânico dessas vigas compostas. Apesar da extensão e complexidade da solução analítica obtida pelos autores, é importante notar que as expressões em forma fechada não foram fornecidas no artigo. Isso foi explicado pelo fato de que os autores obtiveram dificuldade em expressar essas soluções de maneira simplificada, dada a natureza intrínseca do problema abordado.

Nino *et al.* (2020) realizou um estudo para propor uma formulação matemática para o módulo de deslizamento para ligações inclinadas (45°), destacando que em grande parte dos casos o valor desse parâmetro só é obtido efetivamente através de ensaios experimentais, devido a fraqueza dos modelos analíticos. Os autores realizaram experimentos de cisalhamento direto (Figura 3.7) para corpos de provas feitos internamente de madeira, conectados a duas lajes de concreto externas por meio de quatro parafusos inclinados, foi utilizado ainda painéis OSB interpostos entre a madeira e o concreto.

Figura 3.7 – Ensaio de cisalhamento com painéis OSB



Fonte: Nino *et al.* (2020)

Os autores realizaram uma análise paramétrica mantendo a inclinação do parafuso constante em 45° . Interpolações não lineares dos resultados obtidos foram realizadas e uma relação simplificada, capaz de prever com boa aproximação (para a maioria das combinações de parâmetros) o módulo de deslizamento de conexões

madeira-concreto com parafuso inclinado a 45° e camada intermediária, foi obtida. Tal fórmula, atualmente não disponível na literatura, de acordo com os autores, pode ser proposta para estudo de inclusão em códigos normativos. Abaixo estão as equações propostas pelos autores do módulo de deslizamento para o ângulo de inclinação do conector de 45°.

$$K_{45} = \frac{1}{q} \cdot K_{45,0} \cdot \alpha (ts) \quad (7)$$

Onde:

$$K_{45,0} = 1.54d^{1.44} \cdot l^{0.446} \cdot Kp \quad (8)$$

$$K_{45,0} = 0.01d^{1.44} \cdot l^{0.446} \cdot Ep \quad (9)$$

$$\alpha (ts) = (1 - 0.054ts^{0.55}) \quad (10)$$

Nos quais:

- $K_{45,0}$: módulo de deslizamento da estrutura mista sem painel OSB (N/mm);
- K_{45} : módulo de deslizamento da estrutura mista com painel OSB (N/mm);
- ts : espessura do painel OSB (mm);
- q : fator de correção;
- d : diâmetro do conector (mm);
- l : comprimento do conector (mm);
- Kp : módulo de deslizamento da madeira (N/mm);
- Ep : módulo de elasticidade da madeira (N/mm²).

Como conclusão, de modo geral, poucos são os estudos sobre propostas de formulações para o módulo de deslizamento, em sua maioria, as pesquisas buscam avaliar os parâmetros de forma experimental, realizando posteriormente experimentos virtuais.

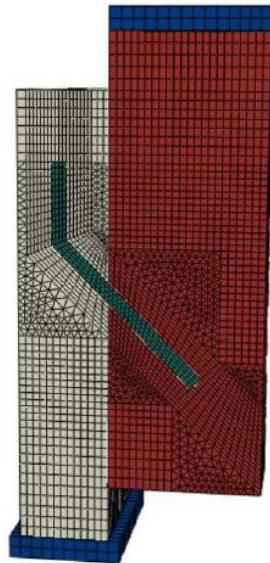
3.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM ESTRUTURAS MISTAS DE MADEIRA E CONCRETO

As simulações numéricas e os experimentos virtuais vêm crescendo ao longo dos anos devido a possibilidade de variar inúmeros parâmetros com um custo relativamente baixo em um período de tempo reduzido. Dois são os softwares mais

utilizados para a realização dessas simulações fazendo uso dos elementos finitos: ABAQUS e ANSYS.

Dentre as pesquisas realizadas na temática das estruturas mistas, destacam-se na contemporaneidade Fernandes *et al.* (2023) , em que os autores utilizaram os dados do ensaio push-out realizado com estrutura mista de madeira e concreto, unidas por conector metálico inclinado, para desenvolver um modelo numérico no software ABAQUS (FIGURA 3.8). Como critério de malha, foi utilizado o elemento finito C3D8 para os sólidos madeira e concreto, e o elemento T3D2 para os conectores. Ao final, como conclusão da pesquisa, o modelo numérico respondeu de modo satisfatório ao experimento. A utilização desse elemento finito para construção da malha também foi observada nos estudos de Gan *et al.* (2023), Chen *et al.* (2022) e Ling *et al.*(2022).

Figura 3.8 – Modelo virtual para ensaio push-out

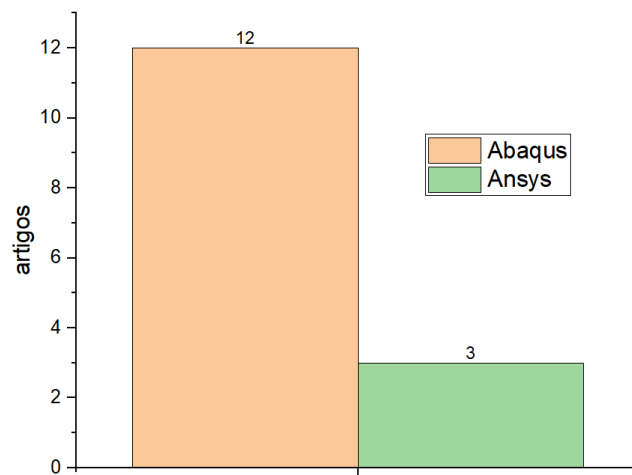


Fonte: Fernandes, 2023.

Outros autores na literatura também criaram protótipos de seus experimentos que responderam de modo muito próximos aos resultados obtidos em laboratório. Dentre eles, tem-se Furtmuller (2023) que realizou um experimento virtual para uma

viga T de madeira e concreto; Khelil et al (2023), Chen *et al.* (2022) e Khelil *et al.* (2019) que realizaram modelos de ensaio push-out, utilizando como critério de dano para os materiais o *concrete damage plasticity* (CDP) para o concreto e o critério de Hill para a madeira. A figura 3.9 ilustra de forma quantitativa outros estudos de simulações que foram encontrados por meio da revisão bibliográfica que utilizaram os softwares *ABAQUS* e *ANSYS*.

Figura 3.9 – Softwares de simulação numérica



Fonte: Autora, 2023.

3.4 CONCLUSÃO DA REVISÃO

A revisão bibliográfica sistemática realizada teve como objetivo sintetizar o conhecimento existente sobre o módulo de deslizamento em estruturas mistas de madeira e concreto. O processo de revisão foi dividido em quatro etapas distintas, abrangendo pesquisas experimentais, estudos numéricos e propostas de modelos matemáticos para estimar o módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}) e o módulo de deslizamento último (k_u).

Utilizando combinações de palavras-chave e operadores booleanos, foram conduzidas buscas nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Engineering*

Village. A análise dos resultados revelou um aumento significativo no número de pesquisas a partir de 2015, especialmente nos estudos numéricos. Isso reflete a relevância das simulações numéricas como uma alternativa mais econômica e eficiente para a realização de experimentos virtuais.

No contexto dos modelos matemáticos, alguns estudos apresentaram propostas para estimar o k_{ser} e k_u , enquanto a grande maioria dos estudos se concentrou em pesquisas experimentais. Em suma, a revisão bibliográfica evidenciou o avanço do conhecimento e das pesquisas sobre módulo de deslizamento em estruturas mistas, entretanto pode-se observar que ainda existe uma lacuna no modo de estimar esse coeficiente no aspecto normativo e analisando as literaturas correlatas encontradas.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

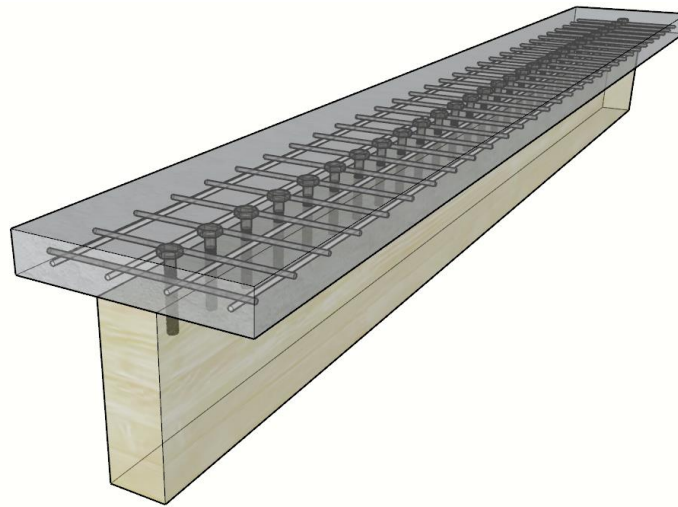
Esse capítulo é composto pela proposta do estudo paramétrico via o método dos elementos finitos (MEF), pela equação de regressão a múltiplas variáveis (gerada com base nos resultados das simulações do estudo paramétrico) estabelecida na estimativa do módulo de deslizamento (K_{ser}) determinado na condição de estado limite de utilização (deslocamento vertical máximo limitado a $L/250$, sendo L a distância entre os suportes) e sobre um dos apoios (maior valor do esforço cortante e maior nível do deslocamento horizontal ou do deslizamento entre a madeira e o concreto) das vigas mistas de madeira e de concreto e também pela validação da modelagem (calibração dos modelos para o desenvolvimento do estudo paramétrico), validação esse que teve por base os resultados experimentais (curva força x deslocamento) de em um trabalho experimental de vigas mistas de madeira e concreto da literatura correlata realizado por Chen *et al.*, (2020b).

Cabe destacar que a calibração da viga mista de referência da literatura supracitada foi feita até a falha (reprodução completa da curva força x deslocamento), o que implica em uma análise não linear física (material) e geométrica (contato entre partes), o mesmo ocorreu para com as simulações do estudo paramétrico, entretanto, o deslocamento máximo (estado limite de utilização) aplicado (controle de deslocamento) foi limitado a $L/250$ (L - distância entre apoios), que consiste em uma medida de pequenos deslocamentos (análise de primeira ordem) estabelecida pela norma brasileira ABNT NBR 7190 (2022).

4.1 MODELO DE ESTUDO

O modelo de estudo será uma viga de seção T, composta pela alma em madeira e a mesa em concreto, conectadas por parafusos. Ainda, na mesa de concreto será considerado uma armadura longitudinal e transversal, as Figura 4.1 e 4.2 representam visualizações do modelo a ser estudado e em sequência, será descrito os métodos e considerações utilizadas para realização do modelo virtual.

Figura 4.1 – Viga mista madeira-concreto: Visualização 3D



Fonte: Autora, 2023.

Figura 4.2 – Viga mista madeira-concreto: Seção longitudinal e seção transversal



Fonte: Autora, 2023.

4.2 ESTUDO PARAMÉTRICO PROPOSTO

Os fatores (parâmetros ou variáveis independentes) e os respectivos níveis consistiram no valor característico de resistência a compressão do concreto ($f_{ck,conc}$) [30 MPa e 50 MPa], no valor característico da resistência a compressão na direção paralela às fibras ($f_{c0, mad}$) [52.3 MPa (Angelim) e 82.2 MPa (Jatobá)] das madeiras, na densidade das madeiras (ρ_{mad}) [710 kg/m³ (Angelim) e 960 kg/m³ (Jatobá)], na altura

da mesa do perfil de concreto (h_{mesa}) [70 mm e 100 mm], na altura da alma do perfil de madeira (h_{alma}) [300 mm e 400 mm], no diâmetro dos parafusos (\emptyset) [16mm e 20 mm] e no espaçamento entre os parafusos (s) [10 mm e 20 mm], cabendo destacar que a densidade do concreto ($\rho_{\text{conc}} = 2400 \text{ kg/m}^3$), o comprimento de embutimento do parafuso ($l_b = 800$) e o comprimento total da peça ($L_T = 3000 \text{ mm}$) foram mantidos constantes. Objetivou-se trabalhar com a escolha de materiais disponíveis e comumente utilizados para aplicação em estruturas de pisos e pontes, visto que o modelo trabalhado possui essa aplicação. Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis e os respectivos níveis considerados no estudo paramétrico, o que resultou em 32 modelos a serem simulados.

Tabela 4.1 – Variáveis respectivos níveis para o desenvolvimento do estudo paramétrico.

Mod.	$f_{ck,conc}$ (MPa)	$f_{c0, mad}$ (MPa)	ρ_{mad} (kg/m ³)	h_{mesa} (mm)	h_{alma} (mm)	\emptyset (mm)	s (mm)
1	30	52.3	710	70	300	16	10
2	30	82.2	960	70	300	16	10
3	50	52.3	710	70	300	16	10
4	50	82.2	960	70	300	16	10
5	30	52.3	710	70	300	20	10
6	30	82.2	960	70	300	20	10
7	50	52.3	710	70	300	20	10
8	50	82.2	960	70	300	20	10
9	30	52.3	710	70	300	16	20
10	30	82.2	960	70	300	16	20
11	50	52.3	710	70	300	16	20
12	50	82.2	960	70	300	16	20
13	30	52.3	710	70	300	20	20
14	30	82.2	960	70	300	20	20
15	50	52.3	710	70	300	20	20
16	50	82.2	960	70	300	20	20
17	30	52.3	710	100	400	16	10
18	30	82.2	960	100	400	16	10
19	50	52.3	710	100	400	16	10
20	50	82.2	960	100	400	16	10
21	30	52.3	710	100	400	20	10
22	30	82.2	960	100	400	20	10
23	50	52.3	710	100	400	20	10
24	50	82.2	960	100	400	20	10
25	30	52.3	710	100	400	16	20
26	30	82.2	960	100	400	16	20
27	50	52.3	710	100	400	16	20
28	50	82.2	960	100	400	16	20

29	30	52.3	710	100	400	20	20
30	30	82.2	960	100	400	20	20
31	50	52.3	710	100	400	20	20
32	50	82.2	960	100	400	20	20

Fonte: Autora, 2024.

4.3 MODELO DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO K_{SER}

O modelo de regressão proposto para a estimativa do módulo de deslizamento K_{ser} é apresentado na Equação 11, em que α_i consiste nos coeficientes a serem ajustados pelo método dos mínimos quadrados e ε é o erro aleatório, cabendo destacar que o K_{ser} tem a unidade de N/mm.

$$K_{ser}(N/mm) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{f_{ck, mad}}{f_{ck, conc}} + \alpha_2 \cdot \frac{h_{alma}}{h_{mesa}} + \alpha_3 \cdot \frac{l_b}{\phi} + \alpha_4 \cdot n + \alpha_5 \cdot \frac{\rho_{conc}}{\rho_{mad}} + \varepsilon \quad (11)$$

A análise de variância (ANOVA – 5% de significância) do modelo de regressão foi utilizada de maneira a avaliar a influência e a ordem de influência das variáveis da Equação 7 (análise de sensibilidade), possibilitando identificar a existência de termos considerados nesse modelo que pouco explicam variações no módulo de deslizamento. O gráfico de Pareto foi utilizado de maneira a sintetizar os resultados da ANOVA.

Além do cálculo do coeficiente de determinação (R^2 – Equação 12), que se apresenta como um índice de qualidade de ajuste da equação, o erro percentual absoluto médio (MAPE – Equação 13) também foi obtido. Nessas equações, \tilde{Y}_i , Y_i e \bar{Y} , consistem no valor estimado do módulo de deslizamento, no valor do K_{ser} obtido de cada simulação e no valor médio do módulo de deslizamento obtido das 32 simulações, respectivamente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\tilde{Y}_i - \bar{Y})^2} \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{\tilde{Y}_i - Y_i}{Y_i} \right| \cdot 100 \quad (13)$$

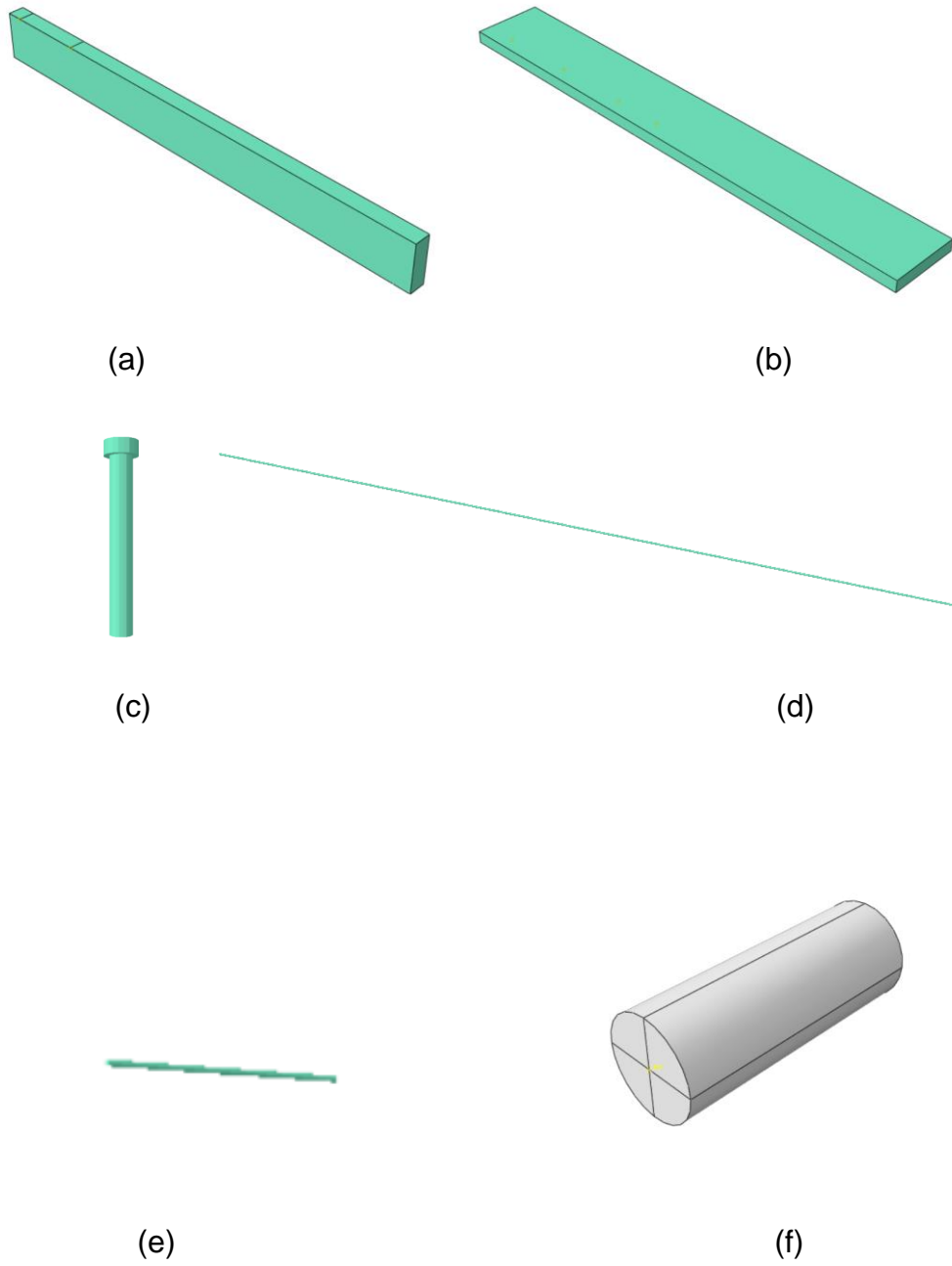
4.4 MODELAGEM DOS ELEMENTOS

Para iniciar a simulação, a primeira etapa consiste em realizar o lançamento dos elementos que compõem a peça estrutural no *software ABAQUS*. Para isto, cada peça é modelada individualmente no programa no módulo denominado *Part*, a Tabela 4.2 e a Figura 4.3 ilustram as configurações dos elementos lançados. Utilizou-se o suporte de carga como elemento rígido para distribuir os esforços, visando evitar picos de tensão nos elementos da malha decorrentes da aplicação direta da carga.

Tabela 4.2 – Configuração dos elementos no módulo *Part* no *software ABAQUS*

Elemento	Modelo	Tipo	Formato	Lançamento	Figura
Alma	3D	<i>Deformable</i>	<i>Solid</i>	<i>Extrusion</i>	(a)
Mesa	3D	<i>Deformable</i>	<i>Solid</i>	<i>Extrusion</i>	(b)
Conector	3D	<i>Deformable</i>	<i>Wire</i>	<i>Planar</i>	(c)
Armadura longitudinal da mesa	3D	<i>Deformable</i>	<i>Wire</i>	<i>Planar</i>	(d)
Armadura transversal da mesa	3D	<i>Deformable</i>	<i>Wire</i>	<i>Planar</i>	(e)
Suporte de Carga	3D	<i>Discrete rigid</i>	<i>Solid</i>	<i>Extrusion</i>	(f)

Fonte: Autora, 2024.

Figura 4.3 – Lançamento dos elementos no módulo *Part* no software *ABAQUS*

Fonte: Autora, 2024.

4.5 DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Na sequência, o segundo passo consiste na definição das propriedades dos materiais utilizados no módulo *Property*, abrangendo o concreto, a madeira e o aço. As teorias utilizadas para possibilitar a análise não-linear via simulação numérica será para o elemento de concreto a análise utilizando o *Concrete Damage Plasticity*, que estabelece a evolução do dano do material após atingir a tensão máxima. E, para a madeira, material anisotrópico será utilizado o critério *Hill (1947)*. Dessa forma, será possível modelar a análise numérica de forma que o comportamento dos materiais da simulação seja próximo aos resultados experimentais.

Para a identificação das espécies de madeira pertinentes ao estudo paramétrico, foram consultadas as informações disponibilizadas no Catálogo de Madeiras Brasileiras para a Construção Civil, concebido no âmbito do projeto "Desenvolvimento de catálogo de madeiras de uso comercial e estudos básicos para introdução de novas espécies no mercado" elaborado e conduzido pelo Centro de Tecnologia de Recursos Florestais – CT-Floresta/IPT.

No escopo desta pesquisa, foram selecionadas as espécies Jatobá (*Hymenaea courbaril*) e Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum Ducke*), mostradas na Figura 4.4, em razão de sua utilização na construção civil, especialmente na área de elementos estruturais, devido às suas propriedades apresentadas na Tabela 4.3.

Propriedades	Espécie de Madeiras	
	Jatobá (<i>Hymenaea courbaril</i>)	Angelim-pedra (<i>Hymenolobium petraeum Ducke</i>)
Densidade aparente (kg/m ³)	960	710
Resistência a flexão (Mpa)	151,8	109,3
Módulo de elasticidade (Mpa)	14837	11572
Resistência a compressão paralela as fibras (Mpa)	82,2	52,3
Resistência a compressão perpendicular as fibras (Mpa)	-	6,4
Cisalhamento (Mpa)	17,5	12,3
Tração normal as fibras (Mpa)	13,1	4,2
Fendilhamento (Mpa)	1,5	1,1
Ocorrência	Brasil - Amazônia, Mata Atlântica, Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Rio Grande do Sul, Rondônia, São Paulo.	Brasil - Amazônia, Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia.

Fonte: Autora, 2024

Figura 4.4 – Madeiras utilizadas no estudo.



Fonte: Catálogo de Madeiras Brasileiras, 2013.

Para o concreto, foi utilizado duas categorias de resistência a compressão, o f_{ck} de 30 MPa, com módulo de elasticidade de 30588.56 MPa. E com resistência de 50 MPa com módulo de elasticidade de 35654.44.

Para o aço das barras foi utilizado o aço CA50, com tensão de escoamento f_y de 500 MPa, tensão última de ruptura de $f_u = 540$ MPa e (E) de 210000 MPa, conforme especificações da NBR 8800/2008.

Para os conectores, foi utilizado parafusos ASTM A325, com tensão de escoamento (f_y) de 635 MPa, tensão última de ruptura de (f_u) = 825 MPa e módulo de elasticidade (E) de 210000 MPa, conforme especificações da NBR 8800/2008.

Após a criação dos materiais no *software ABAQUS*, as seções de cada peça são definidas na aba *Create Section*, localizada no módulo *Property*. Em seguida, para cada elemento criado, conforme descrito no item 4.2, é atribuído uma seção com as propriedades dos materiais adotados. A Tabela 4.4 resume as configurações utilizada para cada elemento. É importante ressaltar, que para os elementos da categoria *Beam* e *Truss* é nesse momento que se define as suas respectivas seções transversais.

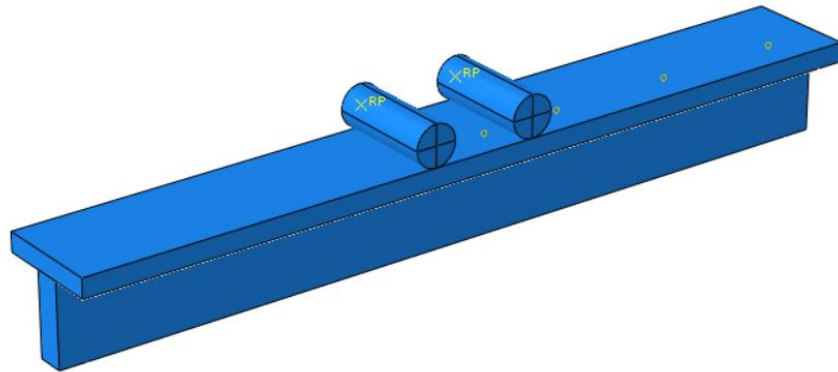
Tabela 4.4 – Configuração dos elementos no módulo *Property* no software *ABAQUS*

Elemento	Seção atribuída	Categoria	Tipo	Material
Alma	Viga de madeira	<i>Solid</i>	<i>Homogeneous</i>	Madeira
Mesa	Mesa de Concreto	<i>Solid</i>	<i>Homogeneous</i>	Concreto
Conector	Parafuso Corpo	<i>Beam</i>	<i>Truss</i>	Aço Tipo 1
	Parafuso Cabeça	<i>Beam</i>	<i>Truss</i>	Aço Tipo 1
Armadura longitudinal da mesa	Barras	<i>Beam</i>	<i>Truss</i>	Aço Tipo 2
Armadura transversal da mesa	Barras	<i>Beam</i>	<i>Truss</i>	Aço Tipo 2
Suporte de Carga	Por se tratar de um elemento rígido, não são definidas propriedades para o suporte de carga			

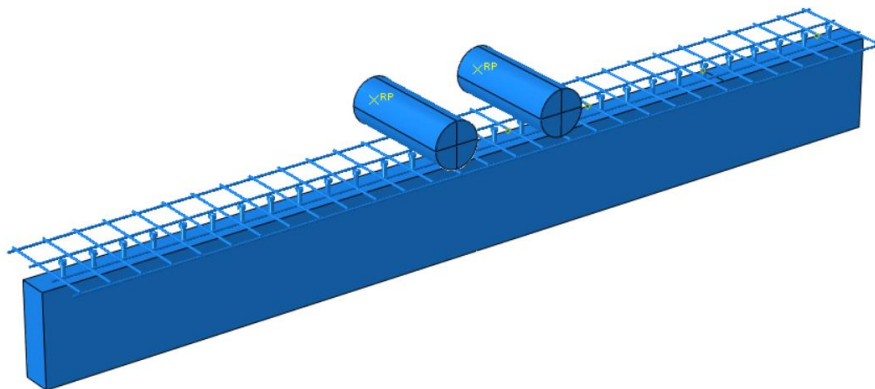
Fonte: Autora, 2024.

4.6 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A quarta etapa compreende a montagem do modelo no módulo *Assembly* do software, onde as partes criadas no item 4.1 são organizadas de acordo com a análise desejada. Nessa fase, o modelo numérico será discretizado de modo a reproduzir a geometria dos elementos que compõe a peça. A mesa de concreto será acoplada na parte superior da viga de madeira, a viga de madeira por sua vez, será bi-apoiada, os parafusos serão inseridos conectando as duas peças. As Figuras 4.5 e 4.6 representam o modelo da peça que será utilizada para estudo.

Figura 4.5 – Modelo construtivo: Módulo *Assembly*

Fonte: Autora, 2024.

Figura 4.6 – Disposição dos parafusos e das armaduras: Módulo *Assembly*

Fonte: Autora, 2024.

4.7 CONTATO ENTRE OS ELEMENTOS

As condições de contato e interações a serem utilizadas entre as partes que compõe o modelo numérico será realizada com as opções disponíveis no software *Abaqus*. Para interação entre as armaduras de distribuição e a seção de concreto, será utilizada o contato tipo “*embedded region*”, essa consideração representa para o software que o elemento das armaduras se encontra mergulhado na região de concreto. Para os parafusos esse mesmo tipo de contato será utilizado, tanto para a seção de madeira quanto para a de concreto. Para o contato entre as seções de

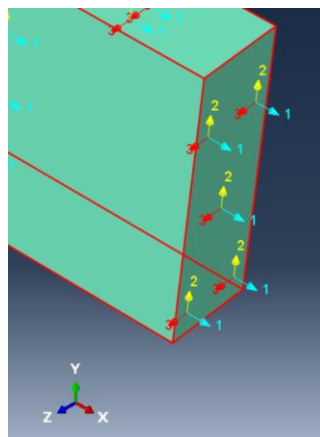
madeira e concreto, será utilizado “*surface-to-surface contact*”, para que se obtenha uma interação que permita o deslizamento entre as seções dos dois materiais. Por fim, para o suporte de carga e a mesa de concreto, será considerado o contato do tipo “*tie*”, para que desse modo o suporte não possua interações de deslocamentos com a seção de concreto.

4.8 CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO E CONTORNO

As condições de carregamento a serem utilizadas será realizada no módulo *Load* do *software*. Para o carregamento, ao invés da força, será inserido um deslocamento no suporte de carga. Esta escolha baseou-se na intenção de obter o módulo de deslizamento em serviço, o qual será determinado pela aplicação da flecha de serviço. Além disso, a escolha de utilizar deslocamento em vez de força é justificada pela incerteza quanto à magnitude da força de ruptura. Dessa forma, aplicar um deslocamento e calcular posteriormente a reação da força permite obter com maior facilidade a magnitude do esforço suportado pela peça. Ao final, feita estas considerações, irá se obter as reações de apoio que o deslocamento provocou.

Nesta etapa também são definidas as condições de contorno da peça na aba *Create Boundary Condition*, para este ensaio virtual será considerado uma viga bi-apoiada. A Tabela 4.5 resume os parâmetros que serão adotados no programa, os eixos U1, U2 e U3 correspondem respectivamente aos eixos X, Y, e Z (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Posicionamento dos eixos de referências X,Y e Z e eixos locais 1,2 e 3



Fonte: Autora, 2024.

Tabela 4.5 – Configuração dos elementos no módulo *Property* no software ABAQUS

Elemento	Category	Type	Tipo
Apoio fixo	Mechanical	<i>Displacement/Rotation</i>	<i>Não permite deslocamento nos eixos U1, U2 e U3 Permite rotação nos eixos UR1, UR2 e UR3</i>
Apoio móvel	Mechanical	<i>Displacement/Rotation</i>	<i>Não permite deslocamento no eixo U2 Permite deslocamento nos eixos U1 e U3 Permite rotação nos eixos UR1, UR2 e UR3</i>

Fonte: Autora, 2024.

4.9 DEFINIÇÃO DA MALHA

A definição da malha dos elementos é importante para se obter os resultados de maneira mais precisa, pois quão maior o refinamento, mais próximo do ensaio experimental resultados tenderão a ser. Para esta etapa, os elementos serão tratados individualmente de acordo com a configuração mais adequada. A Tabela 4.6 resume as configurações adotadas no módulo *Mesh* para cada elemento que compõe a peça.

Tabela 4.6 – Configuração dos elementos no módulo *Mesh* no software *ABAQUS*

Elemento	Tamanho da malha (mm)	Família utilizada	Tipo de elemento finito
Alma	20	<i>3D Stress</i>	<i>C3D8R</i>
Mesa	20	<i>3D Stress</i>	<i>C3D8R</i>
Conector	10	<i>Truss</i>	<i>T3D2</i>
Armadura longitudinal da mesa	10	<i>Truss</i>	<i>T3D2</i>
Armadura transversal da mesa	10	<i>Truss</i>	<i>T3D2</i>
Suporte de Carga	10	<i>Discrete Rigid Elemente</i>	<i>R3D3</i>

Fonte: Autora, 202

Abaixo, tem-se na Figura 4.8 a representação dos elementos finitos utilizados, para o elemento C3D8 utilizou-se integração reduzida, representada pela letra R ao lado do elemento.

Figura 4.8 – Elementos finitos utilizados

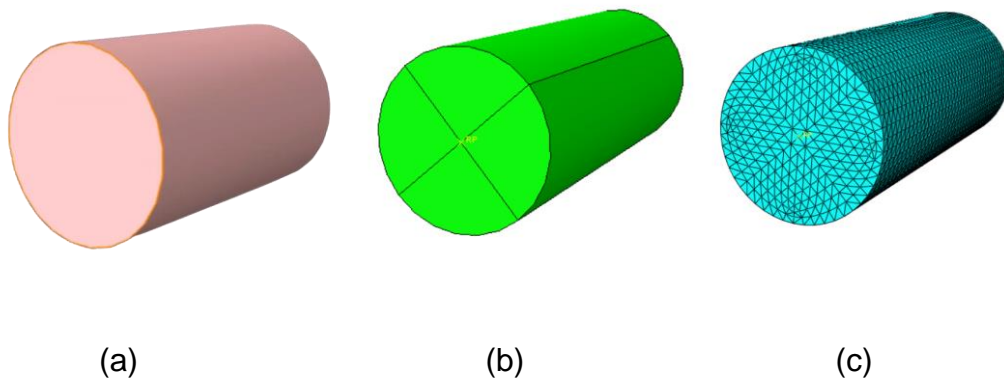


Fonte: ABAQUS, 2010

O software Abaqus permite ainda a realização de testes de malhas. A Figura 4.9 ilustra a sequência de etapas para a geração da malha do suporte de carga. No item (a), o elemento com a coloração rosa indica que a malha poderá apresentar

problemas de refinamento, para corrigir esta questão, no item (b), divide-se a peça em subpartes, para que desse modo o software aplique a malha com maior precisão, item (c).

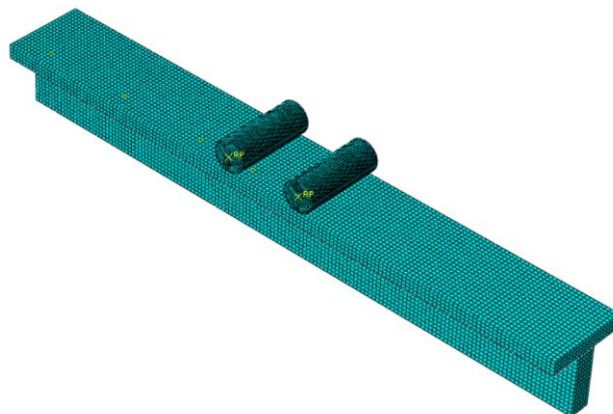
Figura 4.9 – Teste de malha para suporte de carga: Módulo *Mesh*



Fonte: Autora, 2024.

Após aplicação das malhas indicadas na Tabela 4.5, tem-se na Figura 4.10 a configuração final da peça. Por fim, realizada todas as configurações, o processamento do modelo virtual é realizado no módulo *Job* e tem-se os resultados para análise da simulação.

Figura 4.10 – Configuração final: Módulo *Mesh*



Fonte: Autora, 2024.

4.10 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A calibração do modelo numérico será embasada no experimento realizado por Chen *et al.*, (2020b). Nesse experimento, os autores ensaiaram vigas mistas, composta pela mesa em concreto e a alma em madeira, conectados por ligações parafusadas e com armaduras de distribuição na mesa, conforme Figura 4.11.

Figura 4.11 – Ensaio experimental: Vigas mistas madeira-concreto



Fonte: Chen, 2020.

Foram ensaiados 5 modelos de vigas, as Tabelas 4.7, 4.8 e a Figura 4.11 mostram as dimensões, propriedades dos materiais e configurações dos ensaios das vigas. Para validação do modelo numérico foi utilizado as configurações da viga VMC 1.

Tabela 4.7 – Dimensões das peças ensaiadas

Elemento	Viga $b_v \times h_v$ (mm)	Mesa $b_m \times h_m$ (mm)	Parafuso ($\emptyset \times L_p$)	Espaçamento dos conectores (mm)	Diâmetro da Armadura da mesa (mm)
VMC1	100x300	400x70	16x120	100	8
VMC2	100x300	400x70	16x120	140	8
VMC3	100x300	400x70	16x120	200	8
VMC4	100x300	400x70	16x120	280	8
VMC5	100x300	400x70	16x120	290	8

Fonte: Chen, 2020. (Modificado)

Onde:

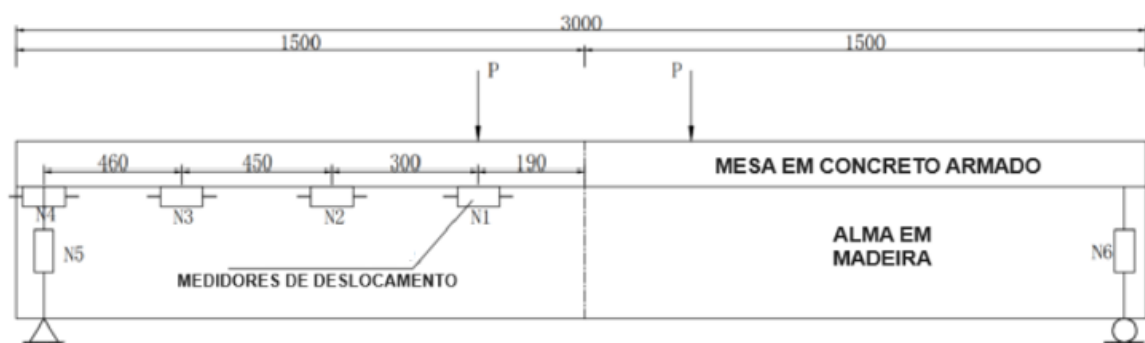
- b_v : Largura da alma;
- h_v : Altura da alma;
- b_m : Largura da mesa;
- h_m : Altura da mesa;
- \varnothing : Diâmetro do conector;
- L_p : Comprimento do conector.

Tabela 4.8 – Propriedades dos materiais utilizados na simulação

Elemento	E (GPa)	G (GPa)	Resistência (MPa)	Densidade (kg/m ³)	Coef. De Poisson (ν)	Área da seção (mm ²)
Concreto (C30)	30	-	31,78	2385	0,2	-
Parafuso	210	-	1200	7850	0,3	201,06
Madeira	$E_1 = 13,8$	$G_{12} = 0,69$	$f_{t0} = 115,90$ $f_{c0} = 48,20$	552,0	$\nu_{12} = 0,013$	-
	$E_2 = 1,38$	$G_{13} = 0,69$			$\nu_{13} = 0,013$	
	$E_3 = 1,38$	$G_{23} = 0,69$			$\nu_{23} = 0,23$	
Aço (mesa)	210	-	330	7850	0,3	50,26

Fonte: Chen, 2020. (Modificado)

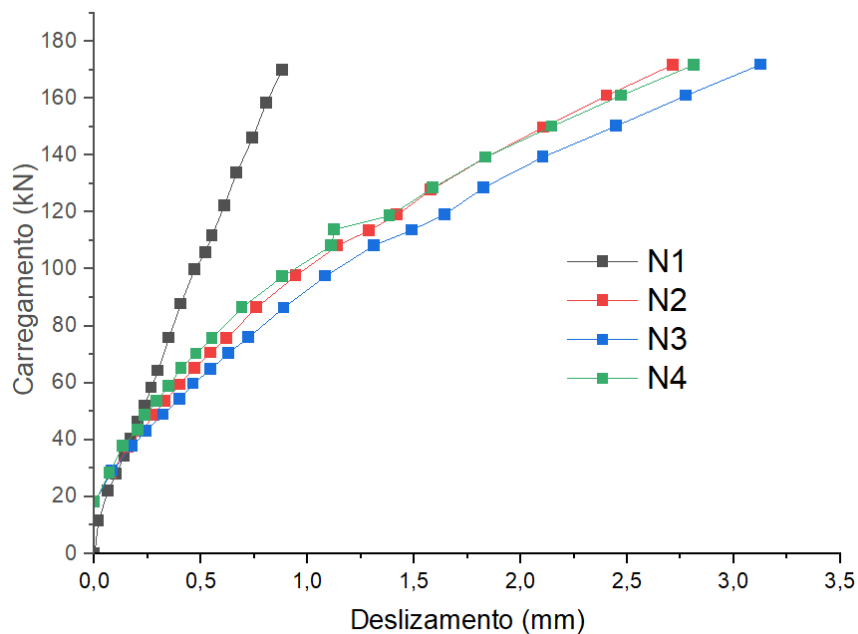
Figura 4.11 – Ensaio experimental: Dimensões e posicionamento de carregamentos (mm)



Fonte: Chen, 2020. (Modificado)

Como resultado, os autores obtiveram a relação da força de carregamento pela medida do deslizamento dos cinco modelos. Nesse cenário, para realizar a validação do modelo numérico, o experimento será reproduzido para a viga VMC1 no *software Abaqus*, de modo que os resultados encontrados sejam próximos ao modelo físico, estabelecendo a validação do modelo numérico e possibilitando a realização do estudo paramétrico. O gráfico da Figura 4.12 mostra a curva força x deslizamento obtida por Chen *et al.*, (2020b) para o ensaio experimental, pode ser observado que o ponto N4 localizado no apoio da peça possui maior deslizamento, enquanto o ponto N1 localizado no meio da peça possui menor deslizamento entre as duas seções.

Figura 4.12 – Ensaio experimental: Resultados para o módulo de deslizamento



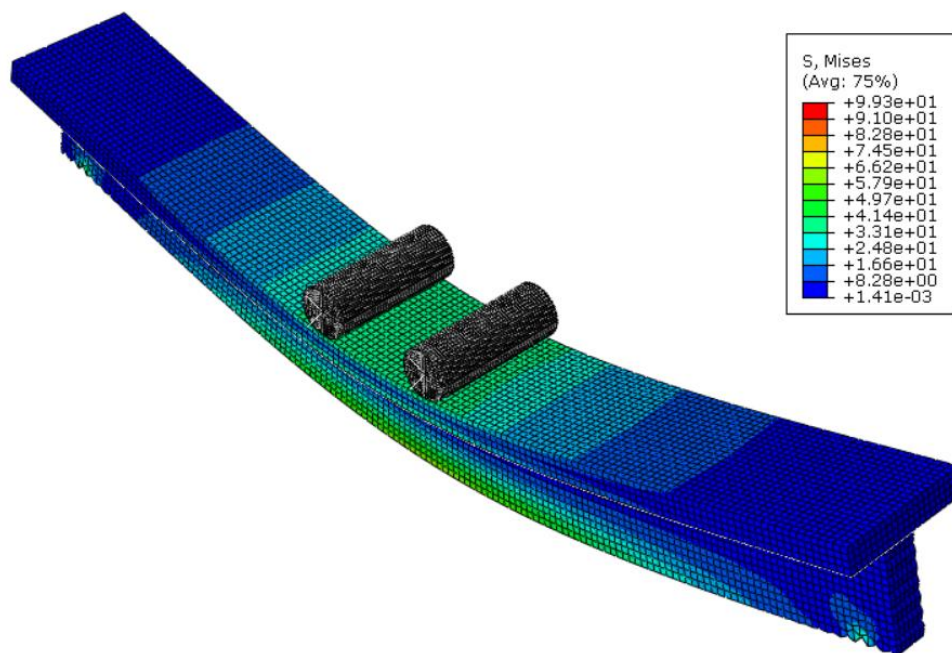
Fonte: Chen, 2020. (Modificado)

5 RESULTADOS

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Os resultados para validação do modelo numérico foram obtidos na fase pós-processamento, a Figura 5.1 mostra as tensões *de Von Mises* e a deformação da peça.

Figura 5.1 – Tensões de Von Mises: Fase pós processamento



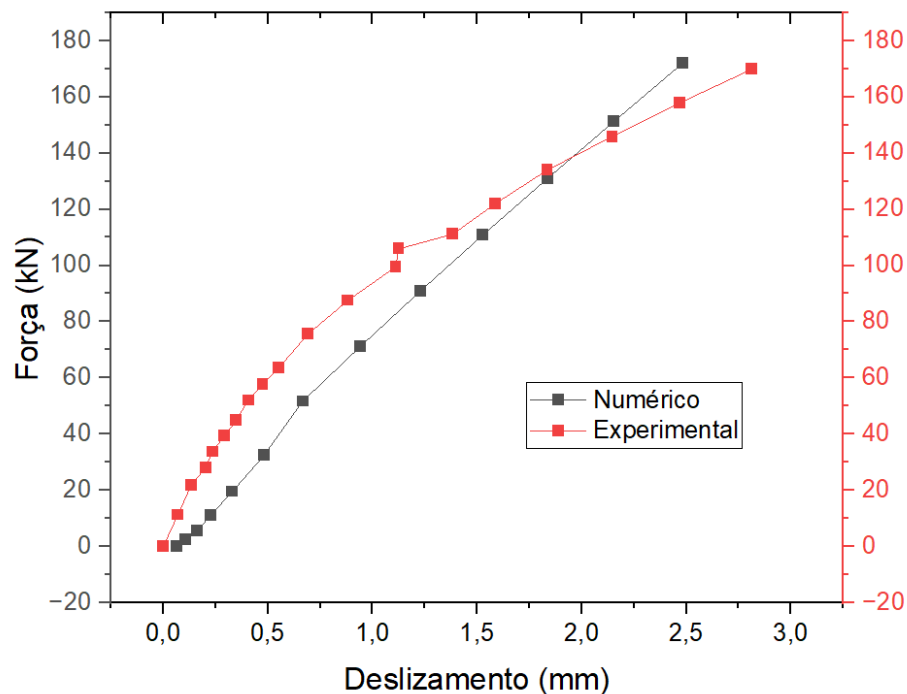
Fonte: Autora, 2024.

Para validação do modelo, foi considerada a curva Força x Deslocamento obtida por Chen et al. (2020b) para a viga VCM 1 no ponto localizado no apoio, onde ocorrem os maiores deslizamentos. Sendo assim, o gráfico da Figura 5.2 mostra os diagramas correspondentes ao ensaio experimental e ao ensaio numérico. Pode-se

observar que os valores são próximos, o que indica a capacidade do modelo numérico de prever as condições experimentais.

De posse dessa constatação, serão realizadas variações deste modelo, de forma a analisar a influência de outros parâmetros no módulo de deslizamento para o Estado Limite de Serviço da estrutura mista.

Figura 5.2 – Curva Força x Deslocamento

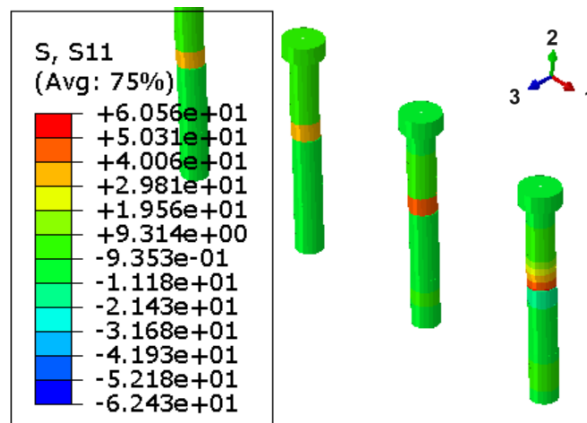


Fonte: Autora, 2024.

5.2 ESTUDO PARAMÉTRICO

Após a conclusão da modelagem dos 32 modelos, conforme detalhado no capítulo 4, foram coletados os dados pertinentes. Inicialmente, a tensão na direção x [σ_x (N/mm²)] foi registrada no conector localizado acima do apoio dos modelos, conforme ilustrado na Figura 5.3 para o Modelo 01.

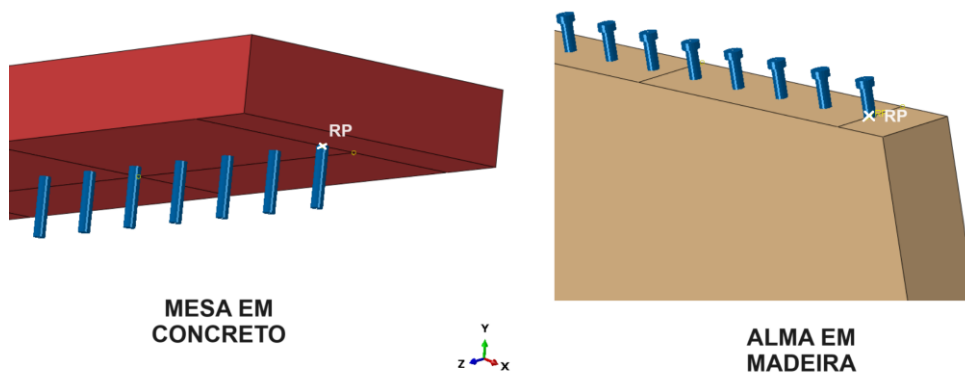
Figura 5.3 – Tensão atuante no conector



Fonte: Autora, 2024.

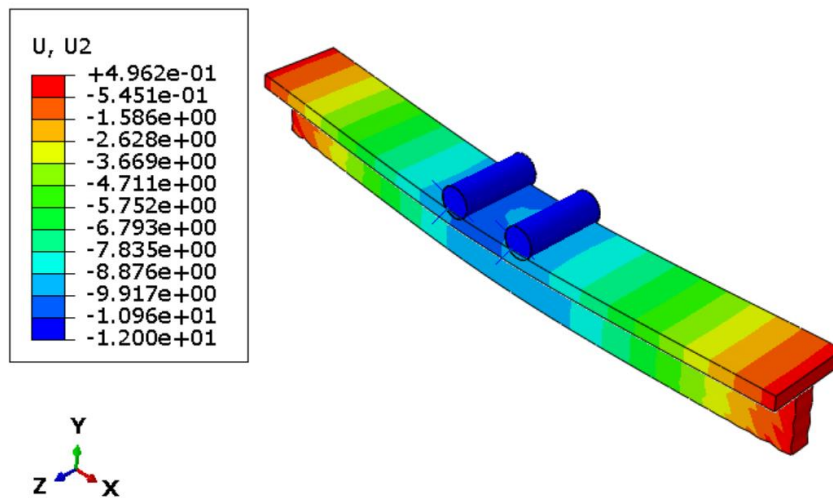
Em seguida, o deslizamento relativo no eixo x (u_x) entre a superfície da mesa de concreto e a viga de madeira no mesmo ponto foi coletado, como demonstrado na Figura 5.4, indicado pelo *Reference Point* (RP). Posteriormente, com o conhecimento da área do conector, foi calculada a força atuante na ligação. Por fim, determinou-se o módulo de deslizamento em serviço do modelo, estabelecido pela aplicação da flecha limite no valor de $L/250$ (FIGURA 5.5). Os valores coletados no software para estudo estão apresentados na Tabela 5.1. Optou-se pelo estudo na ligação localizada no apoio, devido ao esforço cortante máximo atuando na região.

Figura 5.4 – Ponto de referência para deslocamento relativo entre as partes



Fonte: Autora, 2024.

Figura 5.5 – Deslocamento vertical aplicado



Fonte: Autora, 2024.

Os valores coletados no software para estudo estão apresentados na Tabela 5.1. Optou-se pelo estudo na ligação localizada no apoio, devido ao esforço cortante máximo atuando na região. Além do K_{ser} obtido pelo estudo numérico, acrescentou-se também para estudo comparativo o cálculo do K_{ser} pelo *Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)* utilizando a densidade da madeira e o diâmetro do conector, e por fim, o cálculo multiplicando o valor obtido pelo coeficiente 2, conforme observação normativa para estruturas mistas de madeira e concreto.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos pelo estudo paramétrico para cálculo do k_{ser}

Item	Estudo Numérico				Eurocode		
	σ_x (N/mm ²)	u_x (mm)	A_{conec} (mm ²)	F_{conec} (N) ($\sigma_x * A_{conec}$)	K_{ser} numérico (N/mm) (F_{conec}/u_x)	K_{ser} Eurocode (N/mm) ($\rho^{1,5} * d/23$)	K_{ser} Eurocode (N/mm) $2 * (\rho^{1,5}) * d/23$
Modelo 1	60.56	0.59	200.96	12170.14	20627.35	13160.72	26321.44
Modelo 2	93.51	0.48	200.96	18791.77	39149.52	20691.83	41383.67
Modelo 3	61.13	0.56	200.96	12284.68	21936.94	13160.72	26321.44
Modelo 4	94.67	0.48	200.96	19024.88	39635.17	20691.83	41383.67

Modelo 5	39.22	0.55	314	12315.08	22391.05	16450.90	32901.80
Modelo 6	61.24	0.46	314	19229.36	41802.96	25864.79	51729.59
Modelo 7	39.59	0.54	314	12431.26	23020.85	16450.90	32901.80
Modelo 8	62.00	0.47	314	19468.00	41421.28	25864.79	51729.59
Modelo 9	78.94	0.62	200.96	15863.78	25586.75	13160.72	26321.44
Modelo 10	82.40	0.52	200.96	16559.10	31844.43	20691.83	41383.67
Modelo 11	79.87	0.63	200.96	16050.68	25477.26	13160.72	26321.44
Modelo 12	61.20	0.46	200.96	12298.75	26736.42	20691.83	41383.67
Modelo 13	51.12	0.61	314	16051.68	26314.23	16450.90	32901.80
Modelo 14	82.51	0.53	314	25908.14	48883.28	25864.79	51729.59
Modelo 15	51.73	0.62	314	16243.22	26198.74	16450.90	32901.80
Modelo 16	83.56	0.52	314	26237.84	50457.38	25864.79	51729.59
Modelo 17	81.97	0.61	200.96	16472.69	27004.41	13160.72	26321.44
Modelo 18	103.70	0.52	200.96	20839.55	40076.06	20691.83	41383.67
Modelo 19	83.26	0.62	200.96	16731.93	26986.98	13160.72	26321.44
Modelo 20	120.10	0.53	200.96	24135.30	45538.29	20691.83	41383.67
Modelo 21	53.00	0.60	314	16642.00	27736.67	16450.90	32901.80
Modelo 22	47.40	0.42	314	14883.60	35437.14	25864.79	51729.59
Modelo 23	53.50	0.61	314	16799.00	27539.34	16450.90	32901.80
Modelo 24	88.40	0.51	314	27757.60	54426.67	25864.79	51729.59
Modelo 25	97.00	0.68	200.96	19493.12	28666.35	13160.72	26321.44
Modelo 26	125.30	0.59	200.96	25180.29	42678.45	20691.83	41383.67
Modelo 27	110.60	0.67	200.96	22226.18	33173.40	13160.72	26321.44
Modelo 28	149.30	0.59	200.96	30003.33	50853.10	20691.83	41383.67
Modelo 29	70.70	0.66	314	22199.80	33636.06	16450.90	32901.80
Modelo 30	121.00	0.57	314	37994.00	66656.14	25864.79	51729.59

Modelo 31	71.47	0.67	314	22441.58	33494.90	16450.90	32901.80
Modelo 32	124.50	0.58	314	39093.00	67401.72	25864.79	51729.59

Fonte: Autora, 2024.

5.3 ESTIMATIVA DO MÓDULO DE DESLIZAMENTO

Por fim, como objetivo final da pesquisa, após a realização dos estudos paramétricos, foi desenvolvido o modelo de regressão para estimar o módulo de deslizamento de serviço (k_{ser}) representado pela Equação 14.

$$K_{ser} \left(\frac{N}{mm} \right) = 253165 + 5798 \cdot \frac{f_{ck, mad}}{f_{ck, conc}} - 28399 \cdot \frac{h_{alma}}{h_{mesa}} - 6303 \cdot \frac{l_b}{\phi} - 347 \cdot \frac{L_T}{s} - 22650 \cdot \frac{\rho_{conc}}{h_{mad}} \quad (14)$$

Onde:

- $f_{ck_{mad}}$: Resistência a compressão da madeira (Mpa);
- $f_{ck_{conc}}$: Resistência a compressão do concreto (Mpa);
- h_{alma} : Altura da alma (mm);
- h_{mesa} : Altura da mesa (mm);
- l_b : Comprimento de embutimento do parafuso (mm);
- ϕ : Diâmetro do parafuso (mm);
- s : Espaçamento entre os de conectores (mm);
- L_T : Comprimento total da peça (mm);
- ρ_{conc} : Densidade do concreto (kg/m³);
- ρ_{mad} : Densidade da madeira (kg/m³);

Realizando a primeira análise, utilizando essa equação, foi possível calcular o coeficiente de determinação (R^2), que representa um indicador da qualidade de ajuste da equação, resultando em 79,07%. Esse valor reflete que a equação explica cerca de 80% da variação observada nos resultados obtidos com os modelos numéricos, indicando um ajuste satisfatório do modelo aos dados. Este coeficiente é fundamental na avaliação da precisão e da confiabilidade do modelo proposto,

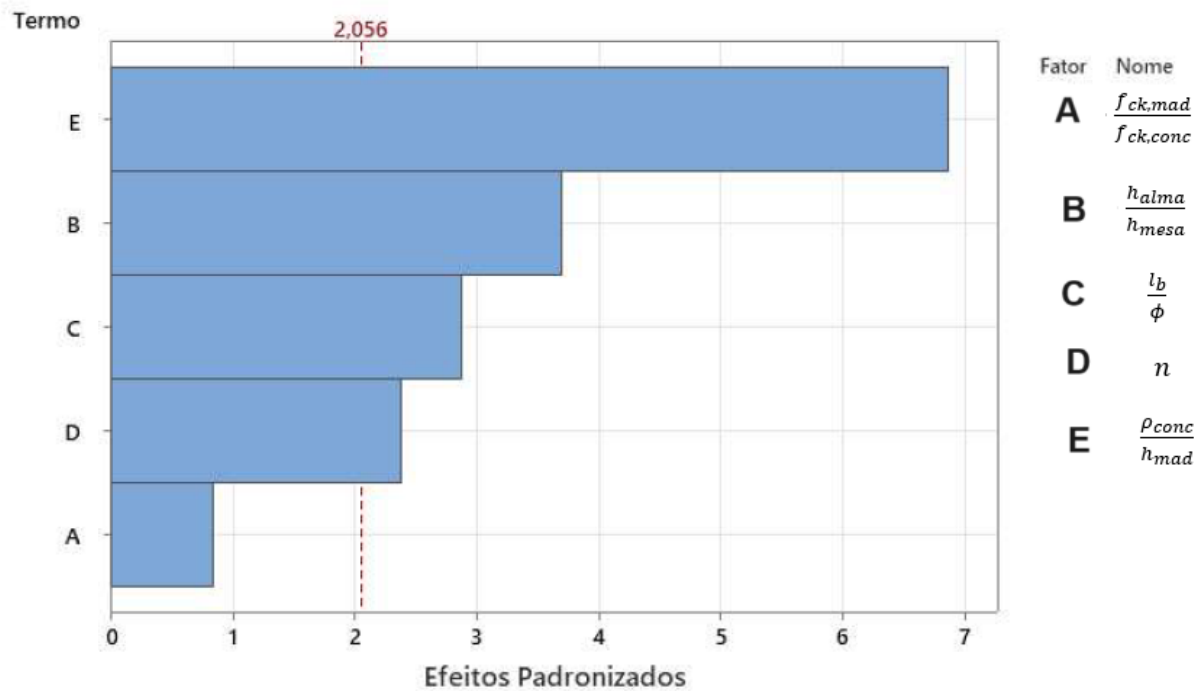
fornecendo uma medida quantitativa da capacidade do mesmo em descrever o comportamento do sistema em estudo.

Além disso, a avaliação do coeficiente de determinação (R^2) desempenha um papel fundamental na validação e interpretação dos resultados. Um valor elevado de R^2 indica que a equação proposta é capaz de explicar a maior parte da variabilidade dos dados, o que aumenta a capacidade do modelo para prever o comportamento do sistema em diversas condições. No entanto, é importante destacar que o R^2 não fornece informações sobre a significância estatística dos coeficientes individuais da equação, sendo necessário complementar essa análise com testes estatísticos apropriados.

A segunda análise realizada em relação ao modelo consistiu na aplicação do gráfico de Pareto (FIGURA 5.6). Através deste gráfico, foi possível identificar os dados que exercem maior influência sobre o resultado do modelo. Observou-se que a relação dos pesos específicos dos materiais ocupou a primeira posição, fato interessante devido a esse parâmetro ser um dos poucos considerados nos códigos normativos. Em seguida, a influência da relação entre as alturas dos elementos estruturais foi observada, seguida pela relação entre o embutimento do parafuso e o diâmetro, que ocupou o terceiro lugar de significância. Além disso, foi evidenciado que o Fator A, que representa a relação das resistências dos materiais, ficou abaixo da linha de Pareto, indicando que sua contribuição para o resultado da equação foi menos significativa em comparação com outros parâmetros considerados.

Considerando essa análise, torna-se claro que certos fatores exercem uma influência mais pronunciada no comportamento do modelo, destacando a importância de priorizar esses parâmetros durante o processo de otimização e ajuste do modelo teórico. Além disso, a identificação de variáveis menos significativas, como o Fator A, permite uma alocação mais eficiente dos recursos de análise e experimentação, direcionando o foco para aspectos mais relevantes em termos de melhoria do desempenho e da precisão do modelo.

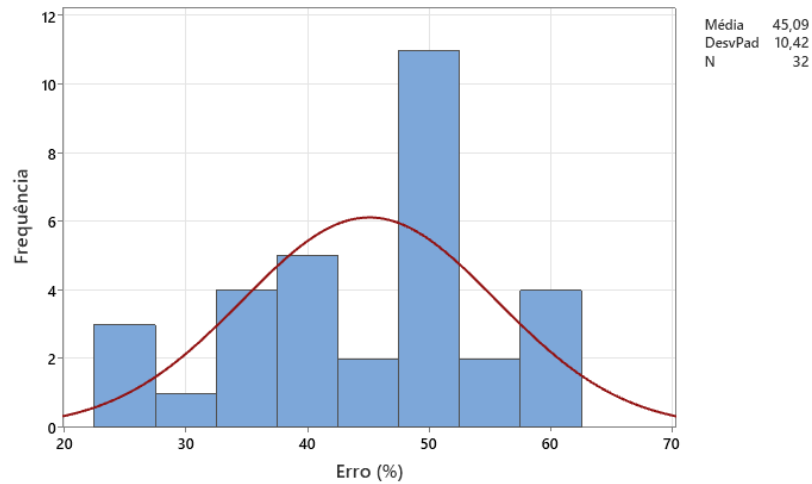
Figura 5.6 – Gráfico de Pareto



Fonte: Autora, 2024.

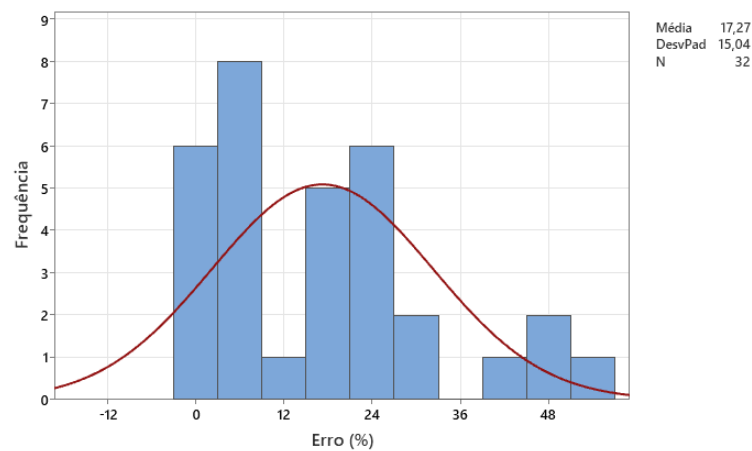
Por fim, realizou-se uma análise adicional por meio de um histograma de distribuição de erros, com o objetivo de comparar a equação da norma europeia *Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)* com a equação derivada dos dados obtidos. No primeiro histograma (FIGURA 5.7), ao considerar exclusivamente a densidade da madeira, observou-se uma ampliação significativa na distribuição de erros entre os resultados numéricos e os prescritos pela norma. Em contraste, ao empregar a equação normativa com um coeficiente de ajuste de 2, constatou-se uma melhoria na distribuição de erros, indicando uma maior concordância entre os resultados obtidos numericamente e aqueles estipulados pela norma (FIGURA 5.8).

Figura 5.7 – Histograma de Distribuição de Erro: Resultado Numérico x EuroCODE
(Sem ajuste de multiplicação 2)



Fonte: Autora, 2024.

Figura 5.8 – Histograma de Distribuição de Erro: Resultado Numérico x EuroCODE
(Com ajuste de multiplicação 2)



Fonte: Autora, 2024.

Essa análise ressalta a importância de considerar ajustes adequados ao aplicar equações normativas para prever o comportamento estrutural. Além disso, ressalta a importância de técnicas estatísticas, como o histograma de distribuição de erros, para avaliar a eficácia e a precisão das equações empregadas na prática de projeto

6 CONCLUSÕES

Pelo conteúdo exposto, pode-se concluir que os modelos analíticos para estimativa do k_{ser} e do k_u são extremamente conservadores e simplistas, pois envolvem poucas variáveis. Além disso, a revisão bibliográfica revelou que a maioria das pesquisas correlatas possui um caráter experimental, enquanto as pesquisas numéricas, em sua maioria, complementam os experimentos realizados pelos autores.

Outro aspecto importante a ser destacado é que, no campo das simulações numéricas, os softwares mais utilizados no âmbito internacional são o ABAQUS e ANSYS. Adicionalmente, quando as considerações adequadas são feitas, os ensaios virtuais apresentam resultados próximos aos ensaios experimentais. Isso oferece a vantagem de realizar modelos com ampla variação de parâmetros em um tempo relativamente curto e com baixo custo, em comparação com os ensaios experimentais.

De posse dos resultados do estudo paramétrico e da proposta de equação para o Módulo de Deslizamento de Serviço, pode-se concluir que a equação proposta respondeu de maneira satisfatória os resultados obtidos por meio do experimento virtual. Esta abordagem considerou diversos parâmetros relevantes para a rigidez da ligação, incluindo as dimensões das peças estruturais e a profundidade de embutimento do parafuso na madeira, fatores não contemplados na equação normativa. Ademais, observou-se que o parâmetro que mais influenciou o resultado do modo de deslizamento foi a relação entre as densidades dos materiais.

Além disso, destaca-se que a equação proposta revelou uma distribuição de erros significativa em comparação com a equação estabelecida pelo *Eurocode 5: Design of timber structures (EN: 1995)*. Entretanto, ao aplicar o coeficiente de multiplicação 2 sugerido por esta norma, observou-se uma redução substancial nesse erro. Importa ressaltar que a equação normativa se embasa no ensaio de cisalhamento direto, enquanto, no âmbito do presente estudo, se examinou a ligação submetida a esforço de flexão, cenário mais frequente nas estruturas projetadas no contexto da construção civil.

Por fim, pode-se concluir que a análise comparativa entre as equações proposta e normativa não apenas ressalta a complexidade do fenômeno estudado, mas também reforça a necessidade de uma abordagem multifacetada na modelagem e análise de estruturas mistas de madeira e concreto. A incorporação de múltiplos parâmetros e ajustes específicos pode contribuir significativamente para a precisão e confiabilidade dos modelos preditivos, culminando em melhores práticas de projeto e construção no campo da engenharia estrutural.

Como sugestões de trabalhos futuros, além dos parâmetros contemplados neste estudo, há uma necessidade premente de examinar outros fatores relevantes, como a variação do comprimento de embutimento dos conectores tanto na madeira quanto no concreto, bem como o impacto da quantidade e inclinação desses conectores. Ademais, é importante destacar que, durante o ensaio de flexão, cada segmento da viga bi-apoiada é submetido a diferentes níveis de esforço, o que influencia diretamente o comportamento do deslizamento. Notadamente, os pontos críticos para os esforços cortantes se concentram nos apoios, onde os esforços são mais pronunciados, enquanto no meio do vão, tais esforços são menos significativos. Portanto, seria de interesse investigar como o módulo de deslizamento se reduz em diferentes seções ao longo da viga, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos mecanismos de deformação e interação entre os materiais.

REFERÊNCIAS

ABAQUS/CAE Standard User's Manual, version 6.10-1, Simulia Corp., USA, 2010.

ABNT NBR 7190:1997, **Projeto de estruturas de madeira**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT NBR 7190:2013, **Projeto de estruturas de madeira – Projeto de Revisão**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

ČAS, B.; PLANINC, I.; SCHNABL, S. Analytical solution of three-dimensional two-layer composite beam with interlayer slips. **Engineering Structures**, v. 173, p. 269–282, 15 out. 2018.

CECCOTTI, A. Composite concrete – timber structures. n. September, p. 264–275, 2002.

CHEN, J. et al. **Theoretical and Experimental Research on Slip and Uplift of the Timber-Concrete Composite Beam.**

CHEN, J. et al. **Theoretical and Experimental Research on Slip and Uplift of the Timber-Concrete Composite Beam.**

CHEN, Z. et al. Numerical investigation of connection performance of timber-concrete composite slabs with inclined self-tapping screws under high temperature. **Journal of Renewable Materials**, v. 10, n. 1, p. 89–104, 2022.

DI NINO, S.; GREGORI, A.; FRAGIACOMO, M. Experimental and numerical investigations on timber-concrete connections with inclined screws. **Engineering Structures**, v. 209, 15 abr. 2020.

DIAS, A.; DIETSCH, P. **Design of timber-concrete composite structures**

DIAS, A. M. P. G. et al. Statistical analysis of timber-concrete connections - Mechanical properties. **Computers and Structures**, v. 155, p. 67–84, 3 jun. 2015a.

DIAS, A. M. P. G. et al. Statistical analysis of timber-concrete connections - Mechanical properties. **Computers and Structures**, v. 155, p. 67–84, 3 jun. 2015b.

DJOUBISSIE, D. D. et al. Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear connections with threaded reinforcing bars. **Engineering Structures**, v. 172, p. 997–1010, 1 out. 2018.

FERNANDES, F.; DIAS, A.; MUNAIR, J. Experimental and numerical analysis on timber-concrete connections with glued reinforcing bars. **Engineering Structures**, 2023.

FURTMÜLLER, T.; ADAM, C. A linear finite element for timber–concrete layered beams with interlayer slip. **Composite Structures**, v. 316, 15 jul. 2023.

GAN, Z. et al. Push-out performance of inclined screw shear connectors used in nail-laminated timber-concrete composite. **Construction and Building Materials**, v. 366, 22 fev. 2023.

GIRHAMMAR, U. A.; GOPU, V. K. A. Analysis of P-triangle effect in composite concrete/timber beam-columns. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 91, n. 1, p. 39–54, 17 jun. 1991.

HAFEZOLGHORANI, M. et al. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete.

KHELIL, A. et al. Development of a New Composite Connector for Timber–Concrete Composite Connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 149, n. 5, maio 2023.

KHELIL, A.; KINIAGI, C.; BOISSIRE, R. **Development of new wood-concrete connectors**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 29 out. 2019.

KLIGER, I. R.; PELLICANE, P. J. Stiffness Evaluation of Stressed-Skin Panels of Mixed Construction. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 8, p. 1046–1053, 1 ago. 1997.

LEE, S. et al. ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. **Journal of Building Engineering**, v. 30, n. August 2019, p. 101273, 2020.

LING, Z. et al. Shear performance of assembled shear connectors for timber–concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 329, 25 abr. 2022.

MOLINA, J. C. Análise Do Comportamento Dinâmico Da Ligação Formada Por. p. 1–15, 2008.

MOLINA, J. C. et al. Analytical , experimental and numerical study of timber-concrete composite beams for bridges. v. 2, p. 103–115, 2019.

MUNGWA, M. S. et al. Experimental study of a composite wood–concrete beam with the INSA–Hilti new flexible shear connector. **Construction and Building Materials**, v. 13, n. 7, p. 371–382, 1 out. 1999.

NGUYEN, T. T.; SORELLI, L.; BRÜHWILER, E. An Analytical Method to Predict the Structural Behavior of Timber-Concrete Structures With Brittle-to-Ductile Shear Connector Laws. **Engineering Structures**, v. 221, 15 out. 2020.

SORIANO, J.; TADEU, N.; II, M. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais Timber-concrete composite structures: a rational technique for bridges of vicinal roads. p. 1260–1269, 2009.

YEOH, D. et al. State of the Art on Timber-Concrete Composite Structures : Literature Review. v. 1944, n. OCTOBER, p. 1085–1095, 2011.

