

LIGAÇÕES CAVILHADAS E SUAS TECNOLOGIAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

DOWELS CONNECTIONS AND THEIR TECHNOLOGIES: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

PENTEADO, Lucas Delosso

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
penteado.lucas@gmail.com

BIOTTO, Clarissa Notariano

Professora no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design (PPGAU+D)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
clarissa.biotto@daud.ufc.br

SERRA, Sheyla Mara Baptista

Professora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
sheylabs@ufscar.br

CHRISTOFORO, André Luis

Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
christoforoal@yahoo.com.br

RESUMO

Este artigo tem como finalidade apresentar uma Revisão Sistemática de Literatura, produzida nos últimos anos, com pesquisas relacionadas as seguintes áreas: ligações cavilhadadas em estruturas de madeira, novas técnicas executivas e novos materiais. As pesquisas por trabalhos nesta temática compreenderam tanto literatura nacional como internacional, considerando os anos de 2010 a 2021. O processo de seleção com o auxílio do software StArt, verificou que grande parte das pesquisas analisam o comportamento mecânico de ligações cavilhadadas. Novos métodos executivos de ligações foram objetivos de pesquisas, pois a exposição das ligações ao meio ambiente e intempéries climáticas podem resultar em perda de resistência. Os estudos de novos materiais usados nas ligações têm o objetivo de encontrar alternativas mais resistentes. Muitos trabalhos enfatizam o método de experimentação, porém nos últimos 5 anos observou o avanço do uso de simulação computacional por métodos de elementos finitos. O surgimento de pesquisas com novos materiais para o uso nas ligações cavilhadadas foca em materiais de reforços, como tecidos de fibra de vidro, fibra de carbono e adesivos. Com o foco em ligações expostas a intempéries pesquisadores desenvolveram novas ligações nas quais, os elementos como os pinos metálicos estão cobertos pela madeira ou tecidos fibrosos, de tal forma que os mesmos não sejam degradados.

Palavras-chave: Estrutura de Madeira. Ligações. Cavilhas.

ABSTRACT

This paper aims at Systematic Review of Literature, produced in recent years concerning the following aspects of the: doweled connections in wooden structures, new executive techniques and new materials. The literature review covered both national and international studies published between 2010 to 2021. At the end of a thorough selection process, we concluded that most of the technical knowledge produced had been directed to understanding the mechanical behavior of dowels connections, new executive methods to produced and new materials. The search for new executive methods is justified by the exposure of links to the environment and weather conditions. Studies of new materials used in connections aim to find more resistant alternatives. Many works emphasize the method of experimentation. However, in the last 5 years, the advance of the use of computational simulation by finite element methods has been observed. The use of simulation offers research a more dynamic characteristic, since a simulation is carried out before the experiment with the intention of checking beforehand the behavior tendency of the connection and the materials used before the execution of the experiment. The research into new materials for use in dowel connections focuses on reinforcing materials such as glass fiber, carbon fiber and adhesives. Focusing on connections exposed to weather, researchers are developing new connections in which elements such as metallic pins are covered by wood elements, in such a way that they are not degraded.

Keywords: Timber Structure. Connection, Dowel.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de madeira apresentam diversos métodos de ligações. Essas ligações são classificadas de acordo com a NBR 7190:1997, conforme os materiais utilizados. As conexões podem ser divididas em: a) pinos metálicos, b) cavilhas, c) conectores metálicos. Os pinos metálicos utilizam se de ligas metálicas em sua fabricação, sendo o prego e o parafuso os mais utilizados. As cavilhas são elementos cilíndricos executados em madeira e são posicionados em um pré-furo que possui um diâmetro ligeiramente menor. Os conectores metálicos são fabricados com chapas metálicas e apresentam dentes estampados. Antigamente o uso de cavilhas de madeira era amplamente utilizada como elementos conectores de estruturas de madeira na construção civil. Porém, com a popularização das ligas metálicas, os pinos de madeira foram substituídos por pinos metálicos devido a facilidade de execução da ligação e o custo do material.

No entanto, a substituição das cavilhas por pregos e parafusos apesar de benéfica em um primeiro momento, expos algumas preocupações quanto a segurança do elemento estrutural, principalmente, quanto ao comportamento mecânico dos conectores metálicos ao longo do tempo de vida útil da estrutura. Esses conectores quando utilizados em ambientes agressivos, como, regiões litorâneas, locais com grande concentração de indústrias químicas e ambientes com grande poluição apresentam um processo de degradação acelerado, de tal modo que a área de seção transversal do mesmo é diminuída, resultando na conseqüente perda de resistência (ANDRADE JUNIOR ET AL. 2014, BRITO, 2014). Tal situação, de perda de seção e de resistência, também é observada em estruturas de concreto armado que utilizam se de barras de aço para resistirem aos esforços de tração, e esses elementos quando expostas à ambientes agressivos também apresentam os mesmos problemas dos pinos metálicos das estruturas de madeira.

Segundo Calil Junior et al (2003), as ligações de estruturas de madeira são consideradas pontos fundamentais para a segurança estrutural, pois a falha de uma conexão poderá provocar o colapso total da estrutura. Deste modo, estudos nos quais são analisados outros tipos de materiais para serem utilizados em conexões de estruturas de madeira tem se popularizado (STAMATO

2002, CARLIL NETO e LAHR 2013). Estudos mais recentes, na área de estruturas de madeira, buscam utilizar tecidos feitos com fibras de vidro e fibras de carbono associados a cavilha para a aumentar sua resistência mecânica, e substituir o uso de pinos metálicos como conectores. No entanto, é de fundamental importância conhecer o comportamento mecânico desse novo elemento composto.

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) com o objetivo de levantar e analisar estudos com temática de ligações cavilhadas, novas técnicas executivas e novos materiais a serem utilizadas nesses tipos de ligações.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O método científico utilizado para elaboração deste artigo foi a Revisão Sistemática de Literatura. De acordo com Fabbri et. al (2016) a RSL é um processo realizado com o objetivo de buscar e evidenciar pesquisas e seus respectivos resultados em áreas de interesse. Nesta RSL utilizou-se o software StArt (State of the Art through Systematic Review), versão 3.4 Beta. Esse software foi idealizado, pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos (LaPES-UFSCar), com o objetivo de dar suporte ao processo de RSL e permitir a análise dos artigos de uma forma mais dinâmica e padronizada.

A realização de uma RSL apresenta protocolos definidos o que permite a replicação a qualquer momento por outros pesquisadores. As etapas desta RSL foram divididas em: i) Protocolo, ii) Busca, iii) Seleção, iv) Análise e vi) Resultados.

2.1 PROTOCOLO

A realização do protocolo de pesquisa é a primeira etapa para se iniciar o processo de RSL. O processo de produção do protocolo elaborado no software StArt é caracterizada a seguir.

Ao acessar o programa são inseridas as seguintes informações: o título da pesquisa e os pesquisadores responsáveis, seguido uma rápida descrição da pesquisa. Prossegue-se com a inserção das informações no protocolo. A elaboração do protocolo é extremamente importante, pois essa etapa permitirá assegurar a existência de um processo pré-definido e tabelado que permite a realização da análise da RSL de maneira padronizada e hierarquizada.

No processo de criação do protocolo são inseridas as seguintes informações, nos respectivos campos obrigatórios: a) Objetivo, b) Questão Principal, c) Palavras-chaves e sinônimos, d) Quais são os critérios para que os trabalhos encontrados sejam relacionados a essa RSL, e) Métodos para a busca na base de dados – String, f) Seleção da base de dados, g) Quais os critérios de inclusão e seleção dos trabalhos encontrados na base de dados, h) Definição dos tipos de estudos a serem selecionados, i) formulários de qualidade, j) extração de dados e k) sumarização dos dados. Os dados inseridos no protocolo de pesquisa dessa RSL são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Preenchimento dos campos obrigatórios na elaboração do protocolo no software StArt para a realização desta RSL.

Campos do Protocolo	Conteúdo
Pesquisadores	Pesquisador 1 e Pesquisador 2
Objetivo	Levantar e analisar estudos com temática de ligações cavilhadas e novas técnicas e/ou novos materiais a serem utilizadas nesses tipos de ligações.
Questões de Pesquisa	Quais são os tipos de cavilhas existentes? / Quais os materiais utilizados na fabricação? / O uso dos novos materiais nessas ligações traz melhorias no comportamento mecânico? / Quão viável é uso desses novos materiais nas ligações de estruturas de madeira?
Base de dados	Scopus e Engineering Village
Palavras Chaves	Carbon fiber Reinforced Polymer (CFRP) / Connection/ Dowel*/ Eurocode 5/ Fiber Reinforced Polymer (FRP)/ Glass Reinforced Polymer (GFRP)/ Joint / NBR7190 / Polymer/ Timber Structure/ Wood* Dowel*/ Wood Structure
Crítérios de Seleção	Os trabalhos devem estar escritos em inglês Os trabalhos devem conter palavras chaves no título, e/ou resumo, e/ou nas palavras chaves Os trabalhos devem abordar o tipo de ligação cavilhadas Os trabalhos devem ter sido publicados em periódicos ou encontros científicos O trabalho deve estar disponível integralmente na internet
Crítérios de Classificação	Abordam a ligação do tipo cavilha Ligações cavilhadas e uso de novos materiais Comportamento mecânico das cavilhas Uso de Experimento Uso de simulação computacional
Idioma	Inglês

Fonte: Autor, 2021.

2.2 BUSCA

Definida as palavras chaves, é escolhido uma ou mais base de dados para realizar a busca por documentos com a referida temática da RSL. Neste primeiro momento, documentos são o conjunto de arquivos obtidos nas bases de dados, formados por: artigos científicos publicados em periódicos, artigos publicados em congresso, normas técnicas, livros e capítulos de livros.

As buscas nessas bases de dados são realizadas a partir de palavras chaves e seus sinônimos que devem estar associadas e responder à questão de pesquisa. A *string* é o resultado da ordenação dessas palavras chaves e seus sinônimos utilizando o conector *OR* e/ou *AND*, conforme o interesse do pesquisador. O conector *OR* é utilizado quando há uma determinada palavra chave e há sinônimos. O conector *AND* é utilizado para associar diferentes termos chaves para ser realizada a busca. Para a realização dessa RSL foi utilizada as *strings* apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – *Strings* utilizadas nas bases de dados para obtenção dos documentos.

Base de dados	String
SCOPUS	(<i>wood*</i> AND <i>dowel*</i>) OR (<i>dowel*</i> AND <i>type</i>) AND (<i>timber</i> AND <i>structure</i>) OR (<i>wood*</i> AND <i>structure*</i>) AND(<i>connection</i> OR <i>joint*</i>)
Engineering Village	(<i>wood*</i> <i>dowel*</i> OR <i>dowel*</i>) AND (<i>wood*</i> <i>structure</i> OR <i>wood*</i> <i>timber</i>) AND (<i>connection</i> OR <i>joint*</i>)

Fonte: Autor, 2021.

O uso do asterisco no final das palavras chaves informa a base de dados para realizar a pesquisa incluindo todas as terminações possíveis existentes daquela palavra. Após a execução da

pesquisa utilizando se as *strings* nas bases de dados, as informações encontradas foram exportadas para o software StArt. A exportação dos dados referente aos documentos é realizada através de um arquivo com extensão BibTeX, obtido na base de dados analisada. Esse arquivo apresenta dados dos referidos aos documentos encontrados através do uso da *string*, como: informações de citação, informações bibliográficas e resumos e palavras chaves.

2.3 SELEÇÃO

Após inserir no programa os arquivos na extensão BibTeX, as informações dos artigos encontrados são apresentadas no software. O programa associa as informações de cada documento com as palavras chaves e sinônimos inseridos na elaboração do protocolo. Cada termo utilizado no protocolo resulta em uma pontuação. Assim ao finalizar o processo de interação do protocolo com o arquivo em BibTeX o software StArt apresenta uma pontuação para cada artigo encontrado. Essa pontuação é baseada na frequência que as palavras chaves e sinônimos inseridas no protocolo aparecem no arquivo.

2.4 ANÁLISE

Após a verificação da pontuação inicia se o processo de análise de dados de cada uma das informações inseridas no software. O processo ocorreu da seguinte maneira: como foi utilizado mais de uma base de dados, verificou se havia artigos duplicados. Após essa etapa, inicia se a análise dos primeiros documentos. Esses documentos são os que possuem maior pontuação. Para cada um dos documentos é realizada a leitura do título, do resumo, e palavras chaves. Após essa etapa inicia se a classificação quanto aos critérios de inclusão, definidos no protocolo. Nesse momento, também é possível verificar o local e o tipo de publicação. Sendo assim, para essa RSL foi utilizado na pesquisa apenas artigos científicos publicados em periódicos ou em anais de eventos. Nesse momento de análise é possível classificar cada artigo como aprovado ou rejeitado, e associar uma importância de leitura. Essa importância de leitura pode ser baixa, intermediária ou alta. Mesmo que o artigo seja rejeitado é possível marcar uma importância de leitura.

2.5 RESULTADOS DA RSL

De todas as informações dos artigos obtidos na base de dados, após a verificação de arquivos duplicados, a aplicação do protocolo, considerando os critérios de aceitação e exclusão, o número final de artigos é reduzido quando comparado com o primeiro momento de pesquisa. Agora inicia se o processo de obtenção de cada um desses artigos para a leitura completa e o desenvolvimento da pesquisa.

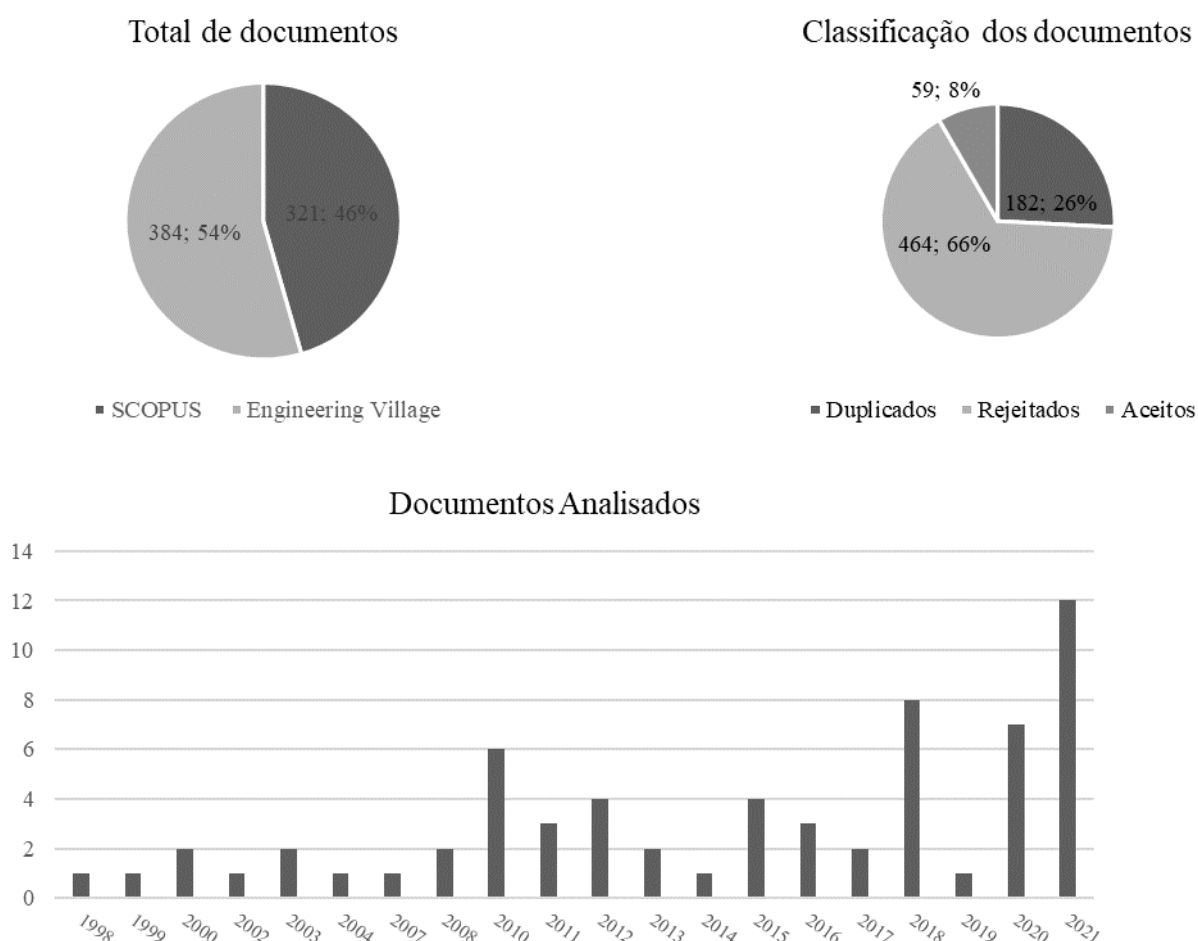
3. RESULTADOS

Os resultados obtidos para a pesquisa foram avaliados após a extração das informações dos arquivos em BibTeX no uso do software StArt. A busca nas plataformas Scopus e Engineering Village totalizaram 705 documentos, sendo que na primeira base de dados foram encontrados um

total de 321 arquivos, e na segunda base foram encontrados 384 documentos. Desse total foram verificados a presença de documentos duplicados, obtendo-se 182 arquivos iguais. Restaram 523 documentos que no processo de análise iniciou-se. Desses 523 documentos, com base no protocolo criado no StArt o programa apresenta uma pontuação, quanto maior essa pontuação mais pertinente é o trabalho tendo como base o protocolo criado. Após essa etapa com base na leitura do título, resumo e palavras-chaves e com as informações inseridas no protocolo criado, dos 523 documentos: 464 documentos foram rejeitados por não estarem abordando integralmente a temática dessa RSL. De todos os documentos analisados, apenas 59 artigos foram selecionados para a leitura completa, esse valor representa 8% dos documentos encontrados nas duas bases de dados.

As informações métricas a respeito dos resultados encontrados, como total de documentos encontrados por base de dados, quantidade de documentos duplicados, rejeitados e aceitos, assim como a distribuição temporal dos documentos aceitos para a análise para a realização dessa RSL são apresentadas na Figura 1.

Figura 1: Apresentação dos resultados obtidos após o processo de busca e seleção.



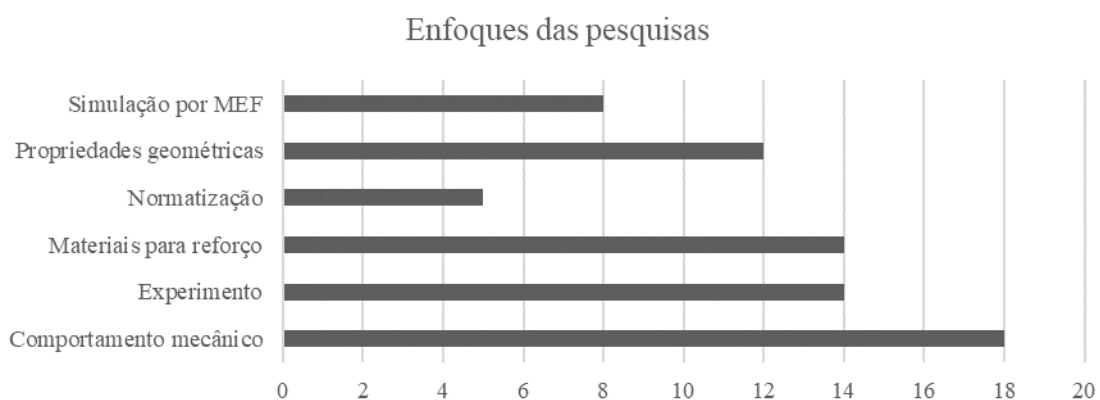
Fonte: Autor, 2021.

Ao analisar a distribuição de documentos aceitos para a análise do arquivo, percebe-se uma maior concentração de trabalhos realizados é nos anos de: 2010 com seis arquivos, 2018 8 arquivos, 2020 com 7 arquivos e 2021 com doze arquivos. A Figura 2 apresenta a distribuição dos trabalhos em relação a temática ao decorrer dos anos. Percebe-se que nos últimos cinco anos há uma tendência de pesquisas abordando o método de experimentação associado ao método de simulação através de um software de elementos finitos.

Dos 59 artigos que foram aceitos pelos pesquisadores durante a aplicação do protocolo criado no software StArt, foram utilizados nessa RSL 29 artigos. As justificativas para a variação do número de documentos aceitos são: 15 artigos não estavam disponíveis para leitura completa, 12 artigos que apresentam o resumo em inglês estavam redigidos em outro idioma, e 3 artigos analisavam as características de ligações cavilhadas na indústria moveleira.

Os artigos utilizados nessa RSL foram divididos em grupos de áreas de abordagem, salienta-se que um mesmo artigo pode tratar de mais de um assunto, por isso o somatório dos valores, presentes no gráfico da Figura 2, é maior do que a quantidade de artigos utilizados nessa RSL.

Figura 2: Apresentação dos resultados obtidos após o processo de busca e seleção



Fonte: Autor, 2021.

Ao analisar os enfoques dos trabalhos utilizados nessa RSL, percebe-se que em 18 deles há o enfoque sobre o comportamento mecânico da ligação e o tipo do conector. Tal situação se mostra necessária pois, a busca por novos materiais para a realização das ligações nas estruturas sempre deve ser analisado os impactos desses novos materiais e métodos de ligação no comportamento da estrutura.

Com o objetivo de estudar novos métodos de ligações Dong et al. (2021) estudaram os comportamentos de cavilhas feitas com pinos de madeira em estruturas, além disso, projetaram um novo tipo de ligação com as seguintes características: vários tipos de conectores podem utilizar conectores metálicos ou feitos de madeira, permitindo assim a escolha do conector a ser utilizado na estrutura considerando a agressividade existente na região da edificação. Em relação ao comportamento mecânico, ao realizarem os ensaios mecânicos nas ligações cavilhadas e na nova ligação e encontraram um comportamento semelhante à de ligações utilizando pinos metálicos e de madeira.

Ainda com a preocupação do impacto de novos métodos e materiais a serem utilizados nas ligações cavilhadas O'ceallaigh et al. (2021) estudaram o comportamento mecânico em peças de madeira laminada colada, idealizando também um novo tipo de ligação em formato prismático de hexágonos. Tal ligação associada a estrutura foi simulada em um software de elemento finitos de tal modo que pudesse ser estimado o comportamento mecânico da ligação. Os resultados obtidos permitiram verificar um comportamento condizente com o normatizado pelo Eurocode 5. Ao realizarem o ensaio experimental verificaram o comportamento total do novo pino idealizado influenciava a resistência da ligação. Os valores obtidos na simulação permitiram aos pesquisadores entender onde poderiam melhorar a ligação antes de realizarem o ensaio experimental.

Pensando no comportamento de estruturas de madeira Podlena et al. (2020) analisaram o comportamento de ligações cavilhadas fabricadas com diferentes espécies de madeira, de tal forma que pudessem estudar a influência do uso de madeiras moles e duras na resistência da ligação. Verificou se que o uso de madeira dura influencia na capacidade de carga da ligação, permitindo esforços com magnitude de 35% maior que comparados em madeiras moles. Os autores verificaram que a espécie de madeira a ser utilizada na estrutura influencia no critério de ligação adotada.

Com o objetivo de entender a influência das ligações cavilhadas usadas em conjunto com adesivos, EI-Houjeyri et al. (2019) realizaram se ensaios de flexão em 3 pontos conforme a norma europeia (Eurocode 5), e os resultados encontrados mostram que pinos de madeira tratados com adesivos possuem capacidade de carga na ordem de 20% quando comparado as cavilhas tradicionais.

Com a preocupação das movimentações das estruturas com o passar dos anos, Mehra et al. (2018) investigaram o comportamento de pinos metálicos e conectores metálicos em estruturas de madeira com o passar dos anos. Verificaram que o uso de tais conectores deve ser substituído por ligações e materiais que não degradam com o passar do tempo, permitindo assim um melhor comportamento estrutural. Indicaram o uso de ligações cavilhas e placas de madeira como substitutos das peças metálicas. Mensuraram o comportamento mecânico das ligações fabricadas com diversas espécies de madeira e verificou que a carga de ruptura para essas ligações é inferior a 20% quando comparadas com as cargas de ruptura das peças metálicas.

Analisando as ligações e como protege-las das intempéries climáticas, Arciszewska-Kedzior et al (2015) investigaram o comportamento da ligação tipo cachecol, na qual o elemento metálico fica protegido pela madeira, a análise incluiu o método experimental e simulação numérica. Esse tipo de conexão é utilizado como forma de restauro da estrutura. Verificaram que quando esse tipo de conexão está posicionado a uma distância do apoio, na ordem de um quinto do comprimento da viga não há alteração de desenvolvimento de tensões nas ligações. Esse processo permite a recuperação da estrutura de madeira, e o elemento metálico fica protegido da ação de intempéries do meio ambiente.

A análise de comportamento mecânico de uma estrutura e sua ligação sempre tem que estar respaldada por normas técnicas. Com esses objetivos Mohammad et al. (2018) realizaram uma RSL em que analisou as características de ligações cavilhadas em países como: os da União Europeia, Canadá, Estados Unidos e Nova Zelândia. Fica evidenciado que o uso de tal tipo de ligação é difundida pelo mundo pela simplicidade de execução e facilidade de obtenção de matérias. É abordado que o uso de cavilhas em regiões sísmicas é vantajoso, pois as ligações cavilhadas não são caracterizadas como uma ligação fixa, permitindo a absorção de esforços oriundos de movimentações sísmicas.

Ainda em entender a normatização, Molina et al. (2017) analisa as características normativas da NBR 7190 e do Eurocode 5 à luz dos elementos de ligação previstos nessas normas. Realizou ensaios experimentais de acordo com as duas normas. Ao analisarem os resultados verificou se que as normas europeias apresentam uma maior concordância entre os resultados experimentais e analíticos quando comparados com a norma brasileira. Os autores evidenciam a importância de uma atualização na norma brasileira de estruturas de madeira, visto que a NBR 7190 nunca foi atualizada, e foi elaborada no ano de 1997.

Outro enfoque que está presente, nas pesquisas desta RSL, é relacionado ao método de pesquisa utilizado. Há uma tendência nos últimos anos de associar simulação numérica e experimento, otimizando assim, o processo da pesquisa. Essa mudança se faz necessária pois ao realizar uma simulação numérica antes do experimento é possível ter uma previsão do comportamento da estrutura. Caso haja algum ponto que necessite de maior atenção é possível analisar, antes da execução do ensaio experimental.

Nesse sentido Bader et al. (2016) verificaram através de análise experimental e por simulação de métodos de elementos finitos o comportamento de ligações cavilhadas e com pinos metálicos. Os resultados encontrados na abordagem por elementos finitos estão de acordo com os valores encontrados experimentalmente. Permite se assim, a possibilidade de ensaiarem as ligações com diferentes espécies de madeiras existentes.

Já no trabalho de Dorn et al (2013) os pesquisadores analisaram as conexões do tipo cavilha de maneira a detalhar o comportamento de carga da conexão, incluindo todas as etapas do carregamento, desde o contato inicial entre o tarugo e a madeira até a carga final e a ruptura. Realizaram testes em 64 conexões do tipo cavilha. Os experimentos confirmaram que as conexões de maior densidade apresentam cargas finais significativamente maiores e evidenciaram claramente que são mais sujeitas a falhas por fragilidade do que as conexões que usam madeira leve. No entanto, em alguns dos experimentos, os valores de projeto superestimaram as resistências reais consideravelmente em conexões de baixa e alta esbeltez. Quanto à rigidez, falta uma diferenciação em função da largura de conexão, o que dá resultados úteis apenas para larguras intermediárias. Além disso, os resultados dos testes constituem dados de referência valiosos para validar ferramentas de simulação numérica, que atualmente são um amplo campo de intenso interesse.

Com o foco de desenvolvimento de novos matérias, pesquisadores tentam entender o comportamento de tipos de ligações tradicionais associados a novos materiais. Esses novos materiais podem ser tecidos para reforços, como fibra de vidro e fibra de carbono. Com esse objetivo, Geiser et al. (2021) analisaram o comportamento de dos materiais utilizados em ligações com pinos metálicos encapados com fibra de vidro. O uso de combinações desses materiais resultou em um comportamento irregular, pois apenas algumas ligações se comportaram em regime plástico, enquanto que a grande maioria das ligações ensaiadas se comportaram abaixo do esperado, mesmo possuindo um pino metálico. Tal comportamento pode ser explicado pois muitas normas analisam apenas o material de fabricação do pino, e não o comportamento global da combinação dos matérias. Os resultados encontrados nesse trabalho ajudarão no desenvolvimento de normas que permitam o uso de matérias distintos no momento da execução da ligação da estrutura.

Além do uso de novos matérias é necessário o estudo dessas novas técnicas considerando o meio ambiente. Desse modo, Vadiannikov e Kashevarova (2018) analisaram o comportamento das ligações cavilhadas associadas ao uso de colas, e ao uso de tecidos fabricados com fibra de vidro, em ambientes corrosivos. Verificou se que o uso de tais matérias em regiões agressivas é permitida, visto que, não há perdas na capacidade resistente da ligação.

Fajman e Mâca (2018) abordam a necessidade de manutenção de estruturas de madeira, principalmente de prédios históricos. Nesse estudo verificaram que o uso de elementos metálicos como substituto das cavilhas não é indicado, pois o tipo de ligação com conectores metálicos

acarreta na redistribuição de tensões na estrutura, permitindo assim os deslocamentos excessivos. Como forma de permitir restaurar a estrutura indicam o uso de cavilhas de madeira associados a reforços como fibra de vidro e fibra de carbono.

O uso de alguns tipos de compósitos tem se tornado foco de pesquisas, como é o caso do desenvolvido por He et al. (2013). Esses pesquisadores estudaram o comportamento mecânico da ligação viga coluna com parafusos associados a compósitos com objetivo de diminuir a área do elemento exposto a degradação das condições ambientais. Tal análise foi desenvolvida por métodos experimentais e simulações computacionais utilizando-se o método dos elementos finitos. O uso dos parafusos associado ao compósito apresentou um bom desempenho quando analisados a rigidez inicial, ductibilidade e dissipação de energia, no entanto a análise de custo de tal compósito inviabiliza o seu uso em larga escala.

Santos et al. (2013) analisaram o uso de fibra de carbono associado a adesivo a base de epóxi para os reforços de pinos de cavilhas. Esse reforço é aplicado ao redor do pino de madeira, mostrou uma técnica simples e de fácil utilização. Quanto ao comportamento mecânico da ligação foram estudadas as seguintes situações: pino de cavilha sem aplicação do material, cavilha revestida com o material na área lateral do pino, e cavilha com a área da base da seção transversal revestida com a fibra. Os resultados verificados mostram que houve um acréscimo de resistência do pino quando envolto com a fibra de carbono na ordem de 35% quando comparado com o pino tradicional, já quando a fibra é posicionada na área da seção transversal do pino o ganho em resistência foi de 18%.

Hassan et al. (2012), Premrov e Dobrilla (2012) estudaram o comportamento mecânico dos pinos de madeira revestidos com fibras de vidros, e compararam com pinos metálicos. Os resultados mostram que o desempenho experimental das juntas de encaixe e encaixe cavilhadas com fibra de vidro sob carga de tração pode fornecer resistência comparável ao juntas perfuradas com aço. O comportamento de falha de ambas as juntas perfuradas foi quase semelhante. No entanto, comportamento diferente foi mostrado nas juntas de madeira com cavilhas, a flexibilidade das cavilhas de madeira estendeu o deslocamento por mais tempo fez com que a carga de rendimento e a carga de arrebato fossem estendidas em comparação com os outros tipos de juntas.

Hassan e Ahmad (2011) testaram as conexões cavilhas associadas a fibras de vidro foram testadas até a falha com o objetivo de observar as capacidades finais e os possíveis modos de falha conforme as variáveis eram alteradas. Os resultados mostram que a capacidade de resistência ao cisalhamento da conexão de encaixe e espiga com pino único de aço, fibra de vidro e madeira não reflete diretamente a capacidade do pino. O limite proporcional, deslocamento de 5% do diâmetro e a resistência máxima da conexão são da ordem de aço, madeira e fibra de vidro, mas os modos de rendimento do passador são da ordem de aço, fibra de vidro e madeira. Os modos de falha das ligações que utilizaram fibras de vidro foram encontrados tão rígidos quanto o aço em comparação com a madeira

As pesquisas de Murty et al. (2011) e Thonson et al. (2010) estudaram as conexões de madeira não metálicas têm a vantagem de aumentar a segurança contra incêndio e a resistência à corrosão em relação às conexões metálicas fixadas mecanicamente. No entanto, as conexões coladas exigem um controle de qualidade rigoroso, o que adiciona despesas e requer pré-fabricação fora do local. Os resultados das pesquisas encontraram uma boa resistência ao

desempenho estrutural de pinos não metálicos e materiais de placa para fornecer conexões fixadas mecanicamente para estruturas de madeira contemporâneas associadas a reforços com fibras de vidro. Isso mostra o ganho de comportamento estrutural quando associado ao material de fibras de vidro.

4. CONCLUSÕES

Considerando o amplo objetivo desta Revisão Sistemática de Literatura, que foi levantar e analisar estudos com temática de ligações cavilhadas e novas técnicas e novos materiais a serem utilizadas nesses tipos de ligações, foi possível perceber os mais diversos enfoques dos trabalhos analisados. Enquanto que o maior enfoque nas pesquisas é dado a verificação de comportamentos mecânicos das ligações, percebeu-se a existência de uma tendência ao método de pesquisa experimental estar associada a simulação numérica. Isso evidencia que o desenvolvimento de pesquisas associadas a experimento e simulação tem grande potencial, visto que otimiza e permite comparar os resultados experimentais com resultados obtidos com base na literatura e uso de softwares de elementos finitos.

Verificou-se também, a necessidade de analisar as características geométricas, como tamanho do pino e formato do prisma das cavilhas com o objetivo de melhorar a distribuição de tensões na ligação. Associado a isso, destacou-se o crescimento nos últimos anos em pesquisas que tentam encontrar novos materiais, ou sistemas de materiais que permitam chegar a características mecânicas próximas aos dos pinos metálicos, utilizando-se reforços com fibras sejam essas de vidro ou de carbono.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: projetos de estruturas de madeiras**. Rio de Janeiro, 1997.

ANDRADE JUNIOR, J. R.; ALMEIDA, D. H. DE; ALMEIDA, T. H. DE; CHRISTOFORO, A. L.; STAMATO, G. C.; LAHR, F. A. R. **Avaliação das estruturas de cobertura em madeira de um galpão de estoque de produtos químicos**. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 75–85, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300006>

ARCISZEWSKA-KEDZIOR, A.; KUNECKÝ, J.; HASNÍKOVÁ, H.; SEBERA, V. **Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: Experimental and numerical analysis**. *Engineering Structures*, v. 94, p. 1–8, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.036>

BADER, T. K.; SCHWEIGLER, M.; SERRANO, E.; et al. **Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL**. *Construction and Building Materials*, v. 107, p. 235–246, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.009>

BRITO, L. D. **Patologias em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. 502 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18122014-090958/publico/2014DO_LeandroDussarratBrito.pdf. Acesso em 21 out. 2021.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. Barueri: Manole, 2003.

CALIL NETO, C.; LAHR, F. A. R. **Ligações em madeira com parafusos auto-tarraxantes sem pré-furação para uso estrutural**. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 15, n.65, p22-28, 2013.

DONG, H.; HE, M.; WANG, X.; et al. **Development of a uniaxial hysteretic model for dowel-type timber joints in OpenSees**. *Construction and Building Materials*, v. 288, p. 123112, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123112>

DORN, M.; DE BORST, K.; EBERHARDSTEINER, J. **Experiments on dowel-type timber connections**. *Engineering Structures*, v. 47, p. 67–80, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>

EL-HOUJEYRI, I.; THI, V. D.; OUDJENE, M.; et al. **Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels**. *Construction and Building Materials*, v. 222, n. 2019, p. 288–299, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163>

FABBRI, S.; SILVA, C.; HERNANDES, E.; et al. **Improvements in the StArt tool to better support the systematic review process**. *ACM International Conference Proceeding Series*, v. 01-03-June-2016, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2915970.2916013>

FAJMAN, P.; MÁCA, J. **Stiffness of scarf joints with dowels**. *Computers and Structures*, v. 207, p. 194–199, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.03.005>

GEISER, M.; BERGMANN, M.; FOLLESA, M. **Influence of steel properties on the ductility of doweled timber connections**. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121152, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121152>

HASSAN, R.; IBRAHIM, A.; AHMAD, Z. **Experimental performance of mortice and tenon joint strengthened with glass fibre reinforced polymer under tensile load**. *ISBEIA 2012 - IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications*, p. 856–860, 2012. IEEE. DOI: [10.1109/ISBEIA.2012.6423013](https://doi.org/10.1109/ISBEIA.2012.6423013)

HASSAN, R.; IBRAHIM, A.; AHMAD, Z. **Performance of mortise and tenon connection fastened with wood and steel dowel**. *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010. Anais... . v. 3*, p.2475–2481, 2010.

HE, M. J.; LIU, H. F. **Comparison of glulam post-to-beam connections reinforced by two different dowel-type fasteners**. *Construction and Building Materials*, v. 99, p. 99–108, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.005>

MEHRA, S.; O'CEALLAIGH, C.; HAMID-LAKZAEIAN, F.; GUAN, Z.; HARTE, A. M. **Evaluation of the structural behaviour of beam-beam connection systems using compressed wood dowels and plates**. *WCTE 2018 - World Conference on Timber Engineering. Anais... , 2018*.

MOHAMMAD, M.; BLASS, H. J.; SALENIKOVICH, A.; et al. **Design approaches for CLT connections**. *Wood and Fiber Science*, v. 50, n. August 2017, p. 27–47, 2018.

MOLINA, J. C.; CESAR, T. K.; ALMEIDA, C. C.; PALLAROLAS, E. A. F. F.. **Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004)**. *Rem: Int. Eng. J.*, v.1, n. 70, p. 9-17, Ouro Preto, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0370-44672016700044>

MURTY, B.; ASIZ, A.; SMITH, I. **Tests and models for engineered wood product connections using small steel tube fasteners**. *Engineering Structures*, v. 33, n. 1, p. 63–68, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.018>

O'CEALLAIGH, C.; CONWAY, M.; MEHRA, S.; HARTE, A. M. **Numerical Investigation of Reinforcement of Timber Elements in Compression Perpendicular to the Grain using Densified Wood Dowels**. *Construction and Building Materials*, v. 288, p. 122990, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122990>

PODLENA, M.; BÖHM, M.; HÝSEK, Š.; PROCHÁZKA, J.; ČERNÝ, R. **Evaluation of parameters influencing the withdrawal strength of oak and beech dowels.** BioResources, v. 15, n. 1, p. 1665–1677, 2020. DOI: [10.15376/biores.15.1.1665-1677](https://doi.org/10.15376/biores.15.1.1665-1677)

PREMROV, M.; DOBRILA, P. **Experimental analysis of timber-concrete composite beam strengthened with carbon fibres.** Construction and Building Materials, v. 37, p. 499–506, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.005>

SANTOS, C. L.; DE JESUS, A. M. P.; MORAIS, J. J. L.; FONTOURA, B. F. C. **An experimental comparison of strengthening solutions for dowel-type wood connections.** Construction and Building Materials, v. 46, p. 114–127, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.021>

STAMATO, G. C. **Ligações em estruturas de madeira compostas por chapas de madeira compensada.** 145f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

VODIANNIKOV, M. A.; KASHEVAROVA, G. G. **Modeling of CFRP and glulam combined action.** Materials Science Forum, v. 928 MSF, p. 283–286, 2018.

