



Ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio: uma revisão sistemática da literatura

Renato Silva Nicoletti*; Alex Sander Clemente de Souza*; Saulo José de Castro Almeida**.

*Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, SP, Brasil.

**Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, SP, Brasil.

*Autor para correspondência e-mail: nicolettisrenato@gmail.com

Palavras-chave

Aço e concreto
Ligações
Incêndio
Análise bibliométrica

Keywords

Steel and concrete
Connections
Fire
Bibliometric analysis

Resumo: As ligações mistas de aço e concreto caracterizam-se pelo fato de a laje de concreto participar da transmissão de esforços de uma viga mista para um pilar ou para outra viga mista no vão adjacente. Apesar de existirem ligações mistas com comportamento já conhecido e consolidado, ainda há dúvidas acerca do mecanismo de funcionamento das ligações mistas em situação de incêndio, nas quais as elevadas temperaturas alteram significativamente a distribuição de resistência e rigidez, tanto nas ligações quanto nos elementos associados a elas. Nesse cenário, há uma escassez de trabalhos, a nível mundial, avaliando o comportamento de ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio. O objetivo deste trabalho foi conduzir uma análise bibliométrica e posterior revisão sistemática da literatura acerca das pesquisas sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio, a fim de delinear o estado da arte sobre o tema e contribuir para o avanço das pesquisas na área a partir da identificação das principais lacunas do conhecimento existentes. Dentre as lacunas identificadas, destacam-se as recomendações para a realização de investigações acerca do comportamento de ligações mistas de aço e concreto considerando sua relação com a estrutura globalmente além do seu comportamento isolado.

Steel and concrete composite connections in fire situations: a systematic literature review

Abstract: Steel-concrete composite connections are characterized by the fact that the concrete slab participates in the transmission of forces from a composite beam to a column or another composite beam in the adjacent span. Although there are composite connections with known and consolidated behavior, there are still doubts about the working mechanism of steel-concrete composite connections in a fire situation, in which high temperatures significantly alter the distribution of resistance and stiffness, both in the connections and in the elements associated with them. In this scenario, there is a shortage of worldwide research evaluating the behavior of steel-concrete composite connections in a fire situation. The objective of this work was to conduct a bibliometric analysis and subsequent systematic literature review about research on steel-concrete composite connections in fire situations, to outline the state of the art on the subject and contribute to the advancement of research in the area from the identification of the main gaps in existing knowledge. Among the identified gaps, the recommendations for conducting investigations on the behavior of steel-concrete composite connections stand out, considering their relationship with the structure globally, in addition to their isolated behavior.

Recebido em: 04/2024

Aprovação final em: 06/2024



Introdução

As estruturas mistas de aço e concreto consistem em elementos estruturais compostos por uma seção de aço e outra de concreto, as quais resistem conjuntamente aos esforços. O uso das estruturas mistas apresenta diversas vantagens, tais como maior racionalização do processo construtivo, maior velocidade de execução, maior capacidade resistente, redução do peso próprio e do volume da estrutura; redução dos custos de fundação; aumento da precisão dimensional da construção; redução do consumo de aço estrutural, e maior tempo de resistência ao fogo em situação de incêndio.

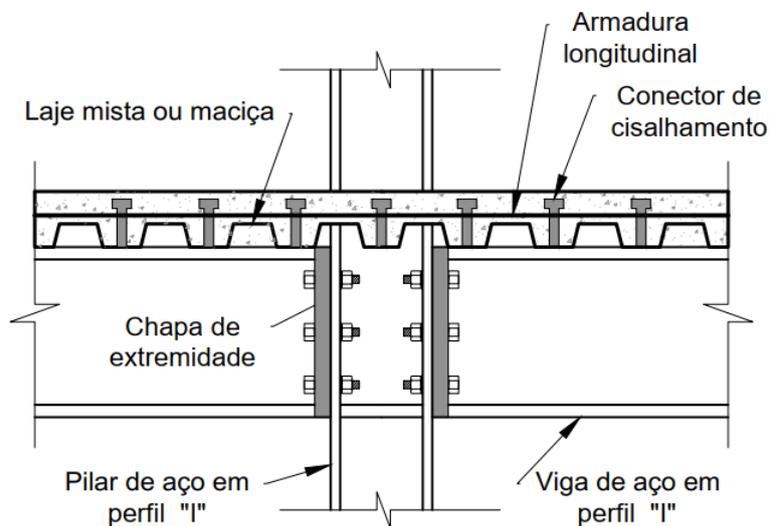
As estruturas, de modo geral, devem ser projetadas com o objetivo de resistirem a todas as ações atuantes durante a sua vida útil, assegurando, concomitantemente, adequados níveis de segurança, desempenho e durabilidade. Nesse contexto, as ligações, também conhecida como “nós”, consistem em todos os detalhes construtivos responsáveis por promoverem a união entre as partes da estrutura ou de uma parte da mesma com um elemento externo. Em outras palavras, as ligações são dispositivos ou meios de conexão responsáveis pela transferência de esforços entre os elementos que constituem a estrutura e entre os seus apoios.

Sendo assim, o correto dimensionamento, fabricação e montagem das ligações possui importância imprescindível no comportamento estrutural, visto que, além de transferir os esforços, elas asseguram que as hipóteses de dimensionamento sejam válidas e, de fato, ocorram na prática.

Nesse contexto, as ligações mistas de aço e concreto são aquelas em que a transferência de esforços entre os elementos estruturais, bem como a rigidez e a resistência são garantidas, simultaneamente, por componentes e elementos em aço e em concreto. Tais ligações podem ser utilizadas nas conexões viga-pilar e viga-viga. A principal vantagem proporcionada pelas ligações mistas é o aumento da resistência e rigidez em comparação à ligação unicamente metálica.

Existem diversas concepções de ligações mistas com comportamento já conhecido e consolidado. Especificamente, há três concepções principais. A primeira delas é a ligação mista com chapa de extremidade de altura total (Figura 1); a segunda consiste numa ligação mista com cantoneiras parafusadas na alma e na mesa inferior da viga apoiada (Figura 2); e a terceira e última trata-se de uma ligação mista com cantoneira parafusada na mesa inferior da viga apoiada (Figura 3). Vale ressaltar que, nas ligações mistas, a laje não precisa, necessariamente, ser maciça, podendo ser mista com fôrma de aço incorporado, alveolar, etc.

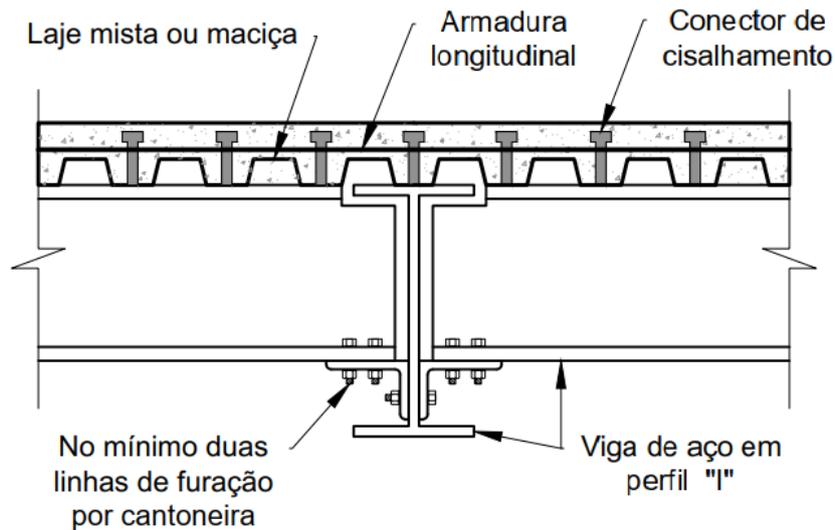
Figura 1 - Ligação mista de aço e concreto com chapa de extremidade de altura total.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

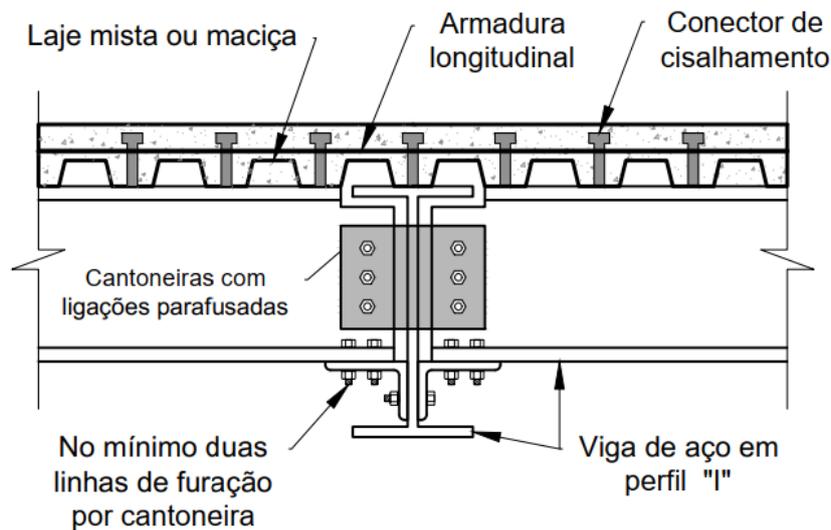


Figura 2 - Ligação mista de aço e concreto com cantoneiras parafusadas na alma e na mesa inferior da viga apoiada.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Figura 3 - Ligação mista de aço e concreto com cantoneira parafusada na mesa inferior da viga apoiada.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

Além da importância das ligações, por si só, vale frisar que a segurança das estruturas em situação de incêndio vem se tornando uma preocupação cada vez mais recente a nível mundial. A análise da segurança das estruturas em situação de incêndio possui dois objetivos principais: resguardar a vida dos usuários da edificação e minimizar perdas patrimoniais.

A segurança contra incêndio é fortemente dependente do conhecimento da dinâmica do fogo, ao passo que a adequada interpretação dos cenários possibilita o projetista desenvolver sistemas que acarretem numa melhor gestão do risco. A dinâmica do incêndio, bem como a análise do comportamento e da segurança de estruturas submetidas à altas temperaturas têm sido fortemente estudada (CHIEW; ZHAO; LEE, 2014; FIRMO; CORREIA; BISBY, 2015; GARDNER; BADDIO, 2006; GERNAY; FRANSSSEN, 2015; KODUR; PHAN, 2007; PIGNATTA E SILVA, 2005; ROMERO *et al.*, 2011; VALENTE; NEVES, 1999), culminando em importantes resultados que confirmam e complementam os principais códigos normativos e documentos técnicos referências do tema no Brasil (ABNT NBR



14432, 2001; ABNT NBR 15200, 2012; ABNT NBR 14323, 2013) e no mundo (ISO 834, 1999; ASTM E119, 2000; EN 1994-1-2, 2004).

Apesar de existirem uma considerável gama de trabalhos abordando o comportamento de ligações mistas de aço e concreto em temperatura ambiente e modelos de cálculo consolidados que reproduzam o comportamento das ligações em temperatura ambiente, as elevadas temperaturas alteram significativamente a resistência e rigidez das ligações e a distribuição dos esforços nos elementos estruturais atrelados a elas. Nesse cenário, há uma escassez de trabalhos, a nível mundial, avaliando o comportamento de ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

O objetivo deste trabalho foi delinear o estado da arte sobre o tema e contribuir para o avanço das pesquisas na área a partir da identificação das principais lacunas do conhecimento existentes. Para tanto, conduziu-se uma análise bibliométrica e posterior revisão sistemática da literatura acerca das pesquisas sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

Metodologia

A análise bibliométrica teve o objetivo de encontrar artigos publicados na literatura internacional que tratassem sobre ligações mistas de aço em situação de incêndio.

Em outubro/2021, foi realizada uma análise bibliométrica dos artigos publicados a partir do ano de 1900 nas bases de dados *Web of Science* (WoS) e *Scopus* com as seguintes *strings* de busca:

- Web of Science: "(steel* AND concrete AND composite*) AND (fire OR temperature) AND (joint* OR connection*) and (beam* OR column*)";

- Scopus: "TITLE-ABS-KEY ("steel*") AND TITLE-ABS-KEY ("concrete") AND TITLE-ABS-KEY ("composite*") AND TITLE-ABS-KEY ("fire" OR "temperature*") AND TITLE-ABS-KEY ("joint*" OR "connection*") AND TITLE-ABS-KEY ("beam*" OR "column*") AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1900".

Vale ressaltar que:

- O operador "AND" significa "e" e determina que os dois termos separados por ele devam constar no título e/ou no resumo e/ou nas palavras-chaves do artigo;

- O operador "OR" significa "ou" e determina que ao menos um dos termos separados por ele devam constar no título e/ou no resumo e/ou nas palavras-chaves do artigo;

- O caractere "*" tem a função de localizar os termos quando estes estão inseridos em um substantivo composto – "aço-concreto", por exemplo.

Em todas as *strings*, os documentos encontrados foram exportados para um arquivo com extensão ".bib" e dois arquivos foram gerados, um para cada base. Na sequência, eles foram importados para o R Studio e combinados, excluindo as repetições, utilizando a ferramenta "mergeDbSources" do pacote Bibliometrix do R (ARIA; CUCCURULLO, 2017).

Inicialmente, a busca resultou em 159 artigos na base *Web of Science* e 147 artigos na Scopus. Destes, 91 eram repetidos e, com isso, no total foram selecionados 215 artigos diferentes.

Na sequência, foi realizado uma triagem dos artigos por meio de sua leitura. Com isso, foram descartados mais 134 artigos. Os principais motivos de rejeição foram:

- Trabalhos versando sobre conectores de cisalhamento que utilizaram o termo "*connection*" para se referir a tais elementos;

- Trabalhos que estudaram outros tipos de materiais compósitos;

- Trabalhos que não são em situação de incêndio;

- Trabalhos que tratam de ações sísmicas e/ou explosões, sem o enfoque na variável "incêndio";

- Trabalhos que estudam ligações unicamente metálicas em situação de incêndio;

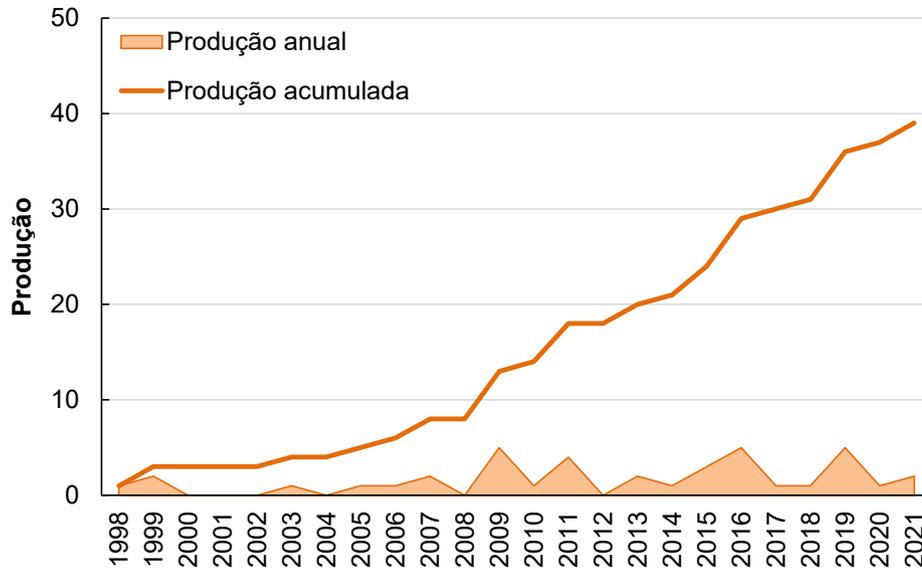
- Trabalhos com apenas o título em inglês e o desenvolvimento nos idiomas chinês, japonês ou alemão.

Após a triagem, restaram apenas 39 artigos com tema alinhado aos objetivos do presente artigo de revisão. A Figura 4 apresenta a produção anual e acumulada de tais pesquisas. Pela Figura 4, nota-se uma taxa de crescimento de publicações de 3,93 % entre 1998 e 2021. Precisamente, do total de 39 artigos, 25 (64%) foram publicados nos últimos 10 anos, isto é, entre 2011 e 2021. Tais fatos constituem indicativos da importância do tema e indicam, sobretudo, a existência de lacunas



do conhecimento.

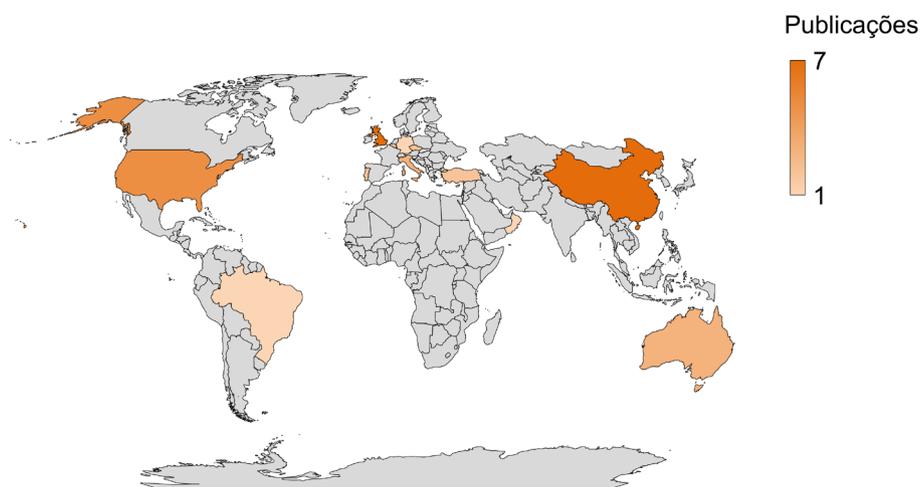
Figura 4 - Produção acumulada e anual dos artigos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A Figura 5 apresenta a distribuição dos países dos autores dos artigos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Pela Figura 5, nota-se que os países com maior número de publicações são a China e a Inglaterra, com 7 artigos cada. Eles são seguidos Estados Unidos da América (5), pela Australia (3) e pela Itália (3).

Figura 5- Distribuição dos países dos autores dos artigos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.



Da plataforma Bing
© Australian Bureau of Statistics, GeoNames, Microsoft, Navinfo, TomTom, Wikipedia

Fonte: elaborado pelos autores, 2024.



O Quadro 1 apresenta a relação de revistas com maior número de manuscritos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio. As revistas não listadas são aquelas que possuem somente um artigo.

Quadro 1 - Revistas com maior número de trabalhos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

REVISTA	NÚMERO DE TRABALHOS
<i>Journal of Constructional Steel Research</i>	11
<i>Fire Safety Journal</i>	9
<i>Journal of Structural Fire Engineering</i>	5
<i>Engineering Structures</i>	4
<i>Journal of Structural Engineering</i>	2

Por fim, a Figura 6 apresenta uma nuvem de palavras considerando as de maior ocorrência no título dos artigos. Dentre as palavras da Figura 6, a principal foi comportamento (*behavior*). Dentre as demais, vale destacar "*tubular column*", "*end-plate connections*" e "*membrane action*", indicando, respectivamente, uma tendência de estudos em ligações envolvendo pilares com seção tubular; investigação do comportamento de ligações com chapa de extremidade; e o estudo do efeito de membrana que ocorre nas lajes durante um incêndio.

Figura 6 - Nuvem de palavras considerando os termos mais frequentes no título.



Fonte: elaborado pelos autores, 2024.

A seção 3 do presente artigo descreve, separadamente, os 47 trabalhos encontrados na análise bibliométrica que tratam sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

Resultados e Discussão

Os artigos encontrados na revisão sistemática de literatura foram divididos e classificados com base na metodologia de trabalho (analítico, experimental, numérico e experimental mais numérico)



e na estrutura alvo do estudo (ligação viga-pilar, ligação viga-viga e análise de pavimento).

Pesquisas analíticas/teóricas de ligações viga-pilar mistas de aço e concreto isoladas

Liu (1998) apresenta o referencial teórico de um modelo matemático tridimensional denominado pelo autor de "FEAST", capaz de simular a resposta de estruturas e ligações metálicas e mistas submetidas a temperaturas elevadas. O método FEAST mostrou-se vantajoso pelo fato de, ao levar em consideração um perfil de temperatura diferencial não linear realista, permitir a interação automática entre os parafusos, pinos de cisalhamento e o reforço - principais componentes que contribuem para a capacidade de momento da ligação mista. O método FEAST foi comparado com diversos ensaios experimentais e mostrou-se eficiente. Além disso, ao comparar o comportamento de conexões mistas de aço e concreto e metálicas com o método, Liu (1998) observou um aumento substancial na temperatura crítica no caso das ligações mistas.

Bailey (1999) desenvolveu um *software* para analisar o comportamento estrutural de vigas de aço assimétricas em situação de incêndio. O *software* mostrou elevada precisão ao ter seus resultados comparados com ensaios experimentais. Ademais, Bailey (1998) notou que a consideração da rigidez rotacional das ligações viga-pilar acarretam em mudanças significativas no tempo de resistência ao fogo, tendo sido possível aumentar tal valor de 60 para 90 minutos, em alguns casos.

Liu (1999) desenvolveu um modelo matemático 3D, fundamentado no método dos elementos finitos, para simular o comportamento estrutural de ligações de aço e mistas de aço e concreto, tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio. O modelo mostrou eficiência ao ser comparado com oito ensaios experimentais sujeitos a diferentes níveis de carregamento. Logo, ele constitui um método preciso para prever a rigidez de ligações.

Fakury *et al.* (2005) desenvolveram um procedimento para análise térmica de elementos finitos de vigas mistas de aço e concreto e o implementaram em um *software*, fundamentado em elementos finitos, possibilitando a simulação de vigas mistas com ligações flexíveis e semicontínuas.

Ranzi e Bradiford (2007) desenvolveram um modelo analítico, fundamentado no princípio dos trabalhos virtuais, para estudar vigas mistas de aço concreto em elevadas temperaturas considerando a rigidez das ligações e de outros elementos estruturais na longitudinal e na transversal. O modelo foi calibrado e um extenso estudo paramétrico foi conduzido. Como principal resultado, o trabalho destaca a importância de contabilizar as ações combinadas (normal e cisalhamento) para avaliar a ligação.

Han, Xu e Tao (2019) elaboraram um artigo de revisão sobre o desempenho de pilares tubulares de aço inoxidável preenchidos com concreto. Dentre tais pesquisas, os autores analisaram trabalhos envolvendo ligações com tal tipo de pilar, tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio. Nesse contexto, especificamente, foi constatada uma escassez de estudos. De modo geral, Han, Xu e Tao (2019) verificaram que pilares tubulares de aço inoxidável preenchidos com concreto possuem melhor ductilidade, maior capacidade de dissipação de energia e desempenho superior ao fogo em comparação com pilares tubulares de aço carbono preenchidos. Quanto às ligações mistas envolvendo tal tipologia de pilar, os pesquisadores verificaram a viabilidade de conectar pilares tubulares de aço inoxidável preenchidos com concreto a vigas de aço carbono por parafusos do tipo *blind bolts* e concluíram que a ligação mista exibiu um desempenho favorável tanto à temperatura ambiente quanto ao fogo. Por fim, Han, Xu e Tao (2019) recomendaram o estudo de ligações com tal tipo de ligação, tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio.

Demonceau e Ciutina (2019) estudaram o comportamento de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto, em situações não contempladas pelos eurocódigos. Especificamente, os autores afirmaram que o principal ponto fraco das regras propostas atualmente é que elas englobam apenas os casos em que as ligações mistas estão sujeitas a forças de cisalhamento e momentos fletores positivos, enquanto, na prática, tais ligações podem ser submetidas a outras condições de carregamento, como momentos de flexão negativos, carregamentos cíclicos, momentos fletores combinados e cargas axiais, temperaturas elevadas, etc. Visto isso, Demonceau e Ciutina (2019) buscam preencher tais lacunas com base em trabalhos conduzidos na Universidade de Liège e



na Universidade Politehnica Timisoara, no qual analisaram ligações mistas de aço e concreto sob momentos negativos, cargas cíclicas e em situação de incêndio.

Pesquisas experimentais de ligações viga-pilar mistas de aço e concreto isoladas

Yuan, Tan e Ting (2011) realizaram ensaios experimentais em ligações angulares de topo e alma, mistas de aço e concreto, em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Este trabalho, em específico, trata sobre seis ensaios em temperaturas ambientais com carregamento monotônico. Os autores justificaram o trabalho afirmando que há uma escassez de trabalhos experimentais em ligações mistas angulares. Por essa razão, Yuan, Tan e Ting (2011) investigaram os seguintes parâmetros: resistência ao cisalhamento longitudinal de lajes, profundidades de vigas de aço e torques de aperto de parafusos. No geral, o programa experimental mostrou que as ligações de ângulo mistas de topo e alma possuem grande rigidez rotacional inicial e valores elevados de momento resistente e capacidade de rotação. Como conclusões, o estudo expõe que: a resistência ao cisalhamento longitudinal da laje pode exercer uma influência significativa na resistência do momento de ligação, visto que ela limita a força de tração na armadura. Ligações mistas com seções de viga de aço maiores geralmente possuem maior rigidez rotacional inicial e maior capacidade de momento; Torques mais altos para apertar os parafusos atrasarão a ocorrência de deslizamentos dos parafusos e melhorarão a rigidez rotacional inicial da ligação.

Haremza, Santiago e Silva (2013) estudaram experimentalmente o comportamento de ligações mistas de aço e concreto, em situação de incêndio, sujeitas a momentos de flexão e forças axiais variáveis. Esse trabalho apresenta os resultados de sete ensaios experimentais realizados na Universidade de Coimbra em uma subestrutura bidimensional viga-pilar de aço-concreto. Haremza, Santiago e Silva (2013) objetivaram observar o efeito do momento fletor combinado com as cargas axiais nas juntas viga-pilar aquecidas de aço-concreto após a falha do pilar. Sete ensaios foram realizados: um teste de referência à temperatura ambiente; cinco testes a 500 °C ou 700 °C, nos quais variou-se a restrição axial à viga; e um teste de demonstração, para o qual a subestrutura foi submetida a um aumento da temperatura até a ruptura da coluna. Os seis primeiros testes representam situações bastante “teóricas”, enquanto o sétimo reflete a “realidade”. A partir dos testes realizados sem restrição axial da viga, observou-se que a capacidade de rotação da ligação, assim como a ductilidade, aumentou com a temperatura, em 6% a 500 °C e 97% a 700 °C, enquanto o momento fletor crítico máximo foi reduzido em 20% a 500 °C e 50% a 700 °C. Por outro lado, os testes com restrição axial total da viga exibiram maior resistência ao momento fletor de flexão sem falha do parafuso. De modo geral, os ensaios mostraram que uma ligação bem projetada, em que o comportamento é controlado por componentes dúcteis, é capaz de se comportar de forma dúctil em condições de incêndio. Especificamente, os autores mostraram que a ligação é capaz de reduzir o momento fletor sem apresentar falha à medida que a força axial aumenta.

Song *et al.* (2017) estudaram o desempenho ao fogo de ligações viga-pilar com parafusos do tipo *blind bolt*, mistas de aço e concreto, entre pilares tubulares com seções circulares e quadradas e vigas com seção tipo “I”. Os pesquisadores conduziram oito ensaios experimentais, cujos parâmetros avaliados foram: se a proteção contra incêndio é aplicada à viga de aço ou não; a relação de carga da viga (0,25 e 0,5); o tipo de aço utilizado na coluna (aço inoxidável ou aço carbono); e a presença ou não de barras de ligação na região de ligação. Com tal metodologia, Song *et al.* (2017) verificaram que: em todos os testes, a falha da ligação foi principalmente dominada pela falha de flexão da viga de aço; as ligações demonstraram um desempenho muito bom em situação de incêndio, e nenhuma fratura da haste do parafuso ou falha de arrancamento do parafuso foi observada em qualquer teste de ligação; a proteção da viga ou redução da carga da viga aumentou significativamente a resistência ao fogo da ligação, enquanto a presença das barras de ligação ou o tipo de tubo de aço demonstram influência moderada na resistência ao fogo.

Ye *et al.* (2019) realizaram ensaios experimentais de ligações mistas de aço e concreto, sujeitas a carregamento cíclico e à elevadas temperaturas. Os autores observaram que a resistência ao fogo das ligações danificadas diminuiu com o aumento do nível de dano, principalmente devido à taxa



de aquecimento mais rápida após o dano cíclico. Contudo, também se observou fissuras induzidas por carregamento cíclico no concreto para mitigar a fragmentação do concreto em temperaturas elevadas. Ademais, Ye *et al.* (2019) fornecem resultados experimentais da relação entre a resistência ao fogo e o grau de dano, os quais podem ser utilizados para embasar parâmetros de projeto de segurança contra incêndio em pesquisas futuras.

Pesquisas numéricas de ligações viga-pilar mistas de aço e concreto isoladas

Al-Jabri *et al.* (2016) conduziram análises numéricas em ligações mistas de aço e concreto viga-pilar com chapas de extremidade, submetidas a temperaturas elevadas. Os autores investigaram dois perfis diferentes para as vigas e dois para os pilares. A modelagem numérica foi feita no *software* Abaqus, considerando elementos tetraédricos de quatro nós, aquecimento linear de 10°C por minuto, simetria biaxial, e as recomendações para modelos constitutivos do EN 1993 1-2 (2005). Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os dados do experimento na faixa elástica, enquanto pequenas superestimações foram observadas na região plástica. Quanto ao comportamento das ligações, observou-se alta concentração de tensões na extremidade superior da placa de ligação, nos parafusos superiores e na parte inferior da alma da viga na região próxima à ligação. Além disso, a base dos conectores de cisalhamento na região perto da ligação estava fortemente tensionada.

Wang *et al.* (2016) analisaram o comportamento térmico de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto, entre vigas com perfis tipo "I" e pilares com seção transversal quadrada, preenchidas com concreto. O trabalho foi realizado numericamente utilizando o *software* Abaqus. Wang *et al.* (2016) avaliaram a ligação descrita para diferentes condições de contorno, estudando o comportamento da laje mista, o tipo de incêndio e a localização da construção. Diversas conclusões interessantes foram aferidas correlacionando a influência do número de faces expostas ao fogo com a evolução de temperatura nos elementos da ligação, evidenciando a importância desse parâmetro.

Haremza *et al.* (2016) estudaram o comportamento de ligações viga-pilar parafusadas, mistas de aço e concreto, submetidas a esforços axiais e de momento fletor, tanto em temperatura ambiente quanto em situação de incêndio. Os autores propuseram um método para prever a resposta mecânica de ligações viga-coluna aparafusadas em elevadas temperaturas sujeitas a cargas axiais e de flexão. O método é validado com base em resultados numéricos no *software* Abaqus e em testes experimentais. No entanto, para aplicar método é necessário realizar previamente uma análise térmica em um *software* fundamentado no método de elementos finitos, a fim de determinar a evolução de temperatura em cada componente da junta. Das análises realizadas, Haremza *et al.* (2016) fizeram as seguintes observações: devido à baixa esbeltez da viga mista (comprimento do vão/altura da seção transversal), as cargas de compressão axial se desenvolvem nas restrições da viga antes de atingirem grandes deslocamentos e deformações; pequenas cargas de compressão possuem um efeito benéfico na resistência da ligação e proporcionam maior resistência e capacidade de rotação; sob cargas de compressão mais altas, a instabilidade da alma do pilar governa a resistência da ligação, sendo a capacidade de rotação dessa última muito menor quando a instabilidade ocorre.

Bahr (2018) estudou o comportamento de pórticos mistos de aço e concreto submetidos a elevadas temperaturas. Nesse estudo, o autor analisou, por meio de análises numéricas, o comportamento de dois tipos de ligações mistas viga-pilar semirrígidas: uma em colunas tubulares de aço preenchidas com concreto e a outra em colunas tubulares duplas preenchidas com concreto. Ambas as ligações consideraram vigas em seção tipo "I". O diferencial do trabalho de Bahr (2018) é o fato dele considerar as etapas e a sequência de construção em estruturas mistas, bem como o histórico de carregamento correspondente na análise das ligações.

Hajjar, Hantouche e Ghor (2019) estudaram o comportamento de ligações mistas de aço e concreto, do tipo guia de cisalhamento, sujeitas a situação de incêndio, e propuseram um modelo de cálculo racional para projeto que permite predizer as forças térmicas axiais desenvolvidas na ligação. Para tanto os autores realizaram análises paramétricas no *software* Abaqus a fim de identificar os principais parâmetros que afetam o comportamento das ligações mistas do tipo



guia de cisalhamento durante o incêndio. Eles foram: comprimento da viga, espessura da aba de cisalhamento, localização da aba de cisalhamento, espessura da laje de concreto, distância de recuo e a interação mista. Com base nos resultados, Hajjar, Hantouche e Ghor (2019) desenvolveram um modelo de cálculo, fundamentado em molas multilíneas, que podem prever a rigidez e resistência de cada componente da ligação com a viga mista, capaz de prever as forças axiais induzidas termicamente durante as fases de aquecimento e resfriamento de um evento de incêndio. Além disso, os pesquisadores verificaram que: forças axiais térmicas significativas são geradas na viga mista de aço e concreto no incêndio. Isso é proeminente quando a mesa inferior da viga entra em contato com a coluna; a falha das soldas governou o comportamento durante a fase de resfriamento na maioria das simulações; forças térmicas são compressivas na fase de aquecimento e depois se transformam em tração na fase de resfriamento; a viga sofre grandes deformações durante o evento de incêndio, fazendo com que ocorra o contato entre a mesa da viga e a mesa do pilar, o que leva a um aumento da força de compressão axial; o aumento da distância de recuo e da espessura da laje pode evitar o contato entre a viga e o pilar; a maioria das análises paramétricas indicou que a ligação tipo guia de cisalhamento resistiu à fase de aquecimento e falhou na fase de resfriamento na ponta da solda; durante a fase de resfriamento, a carga aplicada muda gradualmente de flexural para tração até que a força axial de tração exceda a capacidade de tração da solda, levando-a à fratura.

Martinez e Jeffers (2021) estudaram, via simulação numérica no *software* Abaqus, ligações com restrições axiais em vigas mistas de aço e concreto expostas ao fogo. Os pesquisadores realizaram uma parametrização variando a rigidez da restrição axial, a esbelteza da viga, o nível de carga e a localização da restrição axial. Martinez e Jeffers (2021) observaram que o comprimento da viga influencia fortemente na resposta ao fogo de uma viga mista com restrições. Vigas mistas com vãos curtos mostraram tendência de falhar no estágio de compressão viga-coluna, enquanto vigas mistas com vãos mais longos tendem a falhar no estágio de catenária de tração. Além disso, as condições que são favoráveis para induzir a ação da catenária incluem vãos mais longos da viga, aumento da rigidez de restrição axial, aumento do nível de carga e posicionamento da restrição axial próximo ao topo da viga. Por fim, os resultados mostram que, para uma viga de comprimento L , a ação catenária geralmente se desenvolve após o limite de deflexão $L/20$, demonstrando que se deve ter cuidado ao utilizar este limite de deflexão para avaliar a resistência ao fogo de vigas mistas contidas.

Liu, Huang e Burgess (2021) estudaram o desempenho ao fogo de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto, com ligações mistas axialmente dúcteis. Com esse objetivo, foram realizadas análises numéricas em modelos nos *softwares* Vulcan e Abaqus. No Vulcan, foram realizadas parametrizações variando a espessura da chapa de ligação, o raio da seção semicilíndrica do elemento de ligação e a densidade das barras de armadura longitudinais. Por sua vez, no Abaqus foi investigada a influência dos pinos de cisalhamento no comportamento das ligações mistas dúcteis sob diferentes espaçamentos de pinos. Liu, Hang e Burgess (2021) propuseram quatro equações para calcular a demanda de ductilidade axial da viga mista em quatro posições-chave da seção transversal: a camada de reforço, a superfície superior da conexão, a superfície inferior da conexão e a mesa inferior da viga. Quanto às parametrizações, os autores verificaram que a espessura da placa mais fina e os raios da seção cilíndrica maiores levam a uma maior ductilidade axial, o que reduz significativamente a força axial transportada pela conexão. Números menores de barras de reforço longitudinais tendem a levar a falhas prematuras. A variação dos espaçamentos dos pinos tem pouca influência na deflexão do meio do vão da viga, na rotação da conexão, na força axial da conexão ou nos deslocamentos axiais dos flanges superior e inferior da seção de aço na extremidade da viga. Além disso, verificou-se que vigas mistas com graus menores de interação aço-concreto acarretam em um deslizamento aço-concreto inicialmente positivo à temperatura ambiente, que se torna negativo conforme a temperatura da seção de aço aumenta devido à expansão térmica.

Pesquisas experimentais e numéricas de ligações viga-pilar mistas de aço e concreto isoladas

Demonceau *et al.* (2009) estudaram o comportamento de ligações viga-pilar mistas de aço e



concreto em temperatura ambiente e em caso de incêndio, após um terremoto, considerando lajes mistas. O objetivo dos pesquisadores era desenvolver dados, diretrizes de projeto e ferramentas de cálculo para dois tipos de ligações mistas viga-pilar, capazes de assegurar um comportamento adequado durante um terremoto e seu eventual incêndio subsequente. Foi proposto um procedimento para avaliar a distribuição de temperatura na ligação submetida a elevadas temperaturas, incluindo a parte da conexão viga-pilar embutida no concreto. Os resultados analíticos mostram uma boa concordância com as medidas experimentais embora a ação do terremoto não tenha sido considerada nos cálculos analíticos.

Han, Zheng e Tao (2009) investigaram o desempenho ao fogo de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto. Os autores realizaram dois ensaios experimentais e, posteriormente, calibraram modelos numéricos no *software* Abaqus, os quais apresentaram excelente concordância. A modelagem numérica foi empregada para estudar a influência de parâmetros importantes que determinam o mecanismo das ligações mistas em situação de incêndio, tais como a distribuição de esforços, deslocamentos e deslizamentos e modos de falha. As principais conclusões foram que: a maior relação de rigidez linear viga-pilar pode resultar em menor resistência ao fogo da ligação; quando a ligação mista está sujeita ao fogo, o deslizamento entre a seção de aço e o concreto é maior do que o das armaduras de reforço da laje.

Pucinotti *et al.* (2011) estudaram, numericamente e experimentalmente, a resistência ao fogo de ligações mistas soldadas entre vigas em seção "I" e pilares tubulares preenchidos com concreto. Em especial, Pucinotti *et al.* (2011) visaram analisar o comportamento das ligações frente à incêndios induzidos por ações sísmicas. Por esse motivo, os exemplares foram pré-danificados antes de serem submetidos a cargas de fogo pela imposição de cargas monotônicas equivalentes aos níveis de danos induzidos por cargas sísmicas. Seis ensaios foram conduzidos e forneceram informações importantes acerca do desempenho desse tipo de ligação para o projeto submetido a ações sísmicas e de incêndio. Dentre os principais resultados/conclusões, vale destacar que: as análises térmicas mostraram que as ligações dotadas de lajes pré-fabricadas exibiram melhor comportamento em relação as ligações dotadas de lajes mistas de chapa de aço; não houve diferença perceptível no desempenho ao fogo entre corpos de prova danificados e não danificados, tanto com lajes pré-moldadas quanto com chapas de aço.

Pucinotti, Bursi e Demonceau (2011) é uma continuidade do trabalho de Pucinotti *et al.* (2011), no qual os autores avaliam o desempenho de ligações soldadas viga-coluna, mistas de aço e concreto, sujeitas a ações sísmicas e a um conseqüente incêndio pós-terremoto. Contudo, o foco do trabalho recai sobre as ações sísmicas. Acerca das ligações, os resultados mostraram que o dano induzido por sísmica não influencia a resistência ao fogo das ligações estudadas.

Jána *et al.* (2015) apresentaram resultados experimentais e de análises numéricas (no *software* SAFIR) de ligações, mistas de aço e concreto, do tipo "canal reverso", entre vigas de aço em seções tipo I e pilares tubulares preenchidos com concreto, em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Com base no ensaio experimental, Janá *et al.* (2015) calibraram um modelo numérico e estudaram as temperaturas e as condições termais de contorno na ligação. Nesse contexto, as principais conclusões dos autores foram: nas ligações sem proteção térmica, a temperatura dos parafusos, placa de ligação, canal reverso e soldas podem ser consideradas uniformes e inferiores à temperatura da viga; a distribuição da temperatura na ligação do canal reverso é notadamente afetada pela presença da laje de concreto acima das ligações, assim como a temperatura no perfil tubular da coluna é influenciada pelo concreto em seu interior, o qual retira calor da ligação durante a fase de aquecimento; para prever as temperaturas dos componentes da conexão, o volume do gás de fogo delimitado pelo canal reverso e a superfície da coluna devem ser usados para calcular a emissividade do gás. Este valor (normalmente menor que 0,1) é muito menor do que a emissividade do gás (ϵ_g) recomendada na EN 1991-1-2 (2002). Para simplificar, um valor de $\epsilon_g = 0,1$ pode ser usado. A calibração do modelo numérico implica claramente que o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) na região de conexão deve ser menor do que aqueles recomendados na EN 1991-1-2 (2002), iguais 25 e 35 W/m²·K, respectivamente, para um incêndio padronizado e um real). Os valores



de $h_c = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para uma exposição ao fogo do forno e $h_c = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para uma exposição real do compartimento ao fogo, respectivamente, apresentaram resultados mais precisos. Para simplificar e generalizar, um valor de $h_c = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pode ser usado segundo Janá *et al.* (2015).

Pucinotti (2015) realizaram ensaios experimentais e análises numéricas de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto, entre pilares com seções tubulares e aço de alta resistência e vigas com seção tipo "I". As ligações atingiram valores de rotação plástica de até 45 mrad com redução de resistência e rigidez abaixo de 20%, conforme os requisitos da EN 1998-1 (2004). Na análise por Pucinotti *et al.* (2015), o uso de aço de alta resistência propiciou uma solução 5% mais econômica em relação ao uso de um aço comum para as ligações.

Yang e Fu (2019) estudaram a resistência ao fogo de vigas mistas de aço e concreto conectadas a pilares metálicos preenchidos com seções tubulares quadradas e com lajes maciças de concreto. A ligação viga-pilar era atípica, na qual a viga circunscreve o pilar. Yang e Fu (2019) realizaram investigações experimentais em oito diferentes ligações e, posteriormente, análises numéricas no *software* Abaqus. Os parâmetros estudados foram: a relação de carga das vigas, a rigidez da ligação viga-coluna, diferentes cenários de incêndio e o efeito das restrições axiais e flexurais nas extremidades das vigas. Além disso, os autores verificaram que a flambagem dos pilares com seções colunas quadradas e da mesa das vigas de aço foram principais motivos de falha desse tipo de ligação. Além disso, as temperaturas dos membros estruturais dentro na região da ligação eram mais baixas do que nas outras regiões. Em comparação com outros fatores, a relação de carga das vigas demonstrou uma influência significativa no deslocamento dos membros estruturais e na resistência ao fogo.

Drury, Kordosky e Quiel (2020) avaliaram a resistência ao fogo de vigas mistas de aço e concreto de pisos, parcialmente contidas e parcialmente expostas com restrição de extremidade translacional e rotacional fornecida por ligações de cisalhamento a uma estrutura de suporte. Inicialmente, os autores realizaram dois ensaios experimentais de pisos mistos idênticos, sendo um com proteção térmica e o outro sem. Posteriormente, dois tipos de análises de elementos finitos estruturais foram realizados: uma composta por elementos de casca e outra composta por elementos sólidos. Os resultados de todos os modelos mostraram concordância conservadora com os dados experimentais. Drury, Kordosky e Quiel (2020) utilizaram os resultados numéricos para analisar os conjuntos testados para variações na carga aplicada e diversas espessuras de proteção contra incêndio.

Pesquisas experimentais envolvendo ligações mistas de aço e concreto com análise do pavimento

Wald *et al.* (2006) apresentaram um extenso programa experimental em um compartimento de um edifício de 8 pavimentos, em estrutura mista de aço e concreto. Os pesquisadores buscaram investigar o desenvolvimento da temperatura dentro dos vários elementos estruturais, bem como a distribuição dinâmica das forças internas e o comportamento da laje mista, vigas, pilares e ligações. Com base nos resultados, Wald *et al.* (2006) afirmam que as normas técnicas para dimensionamento estrutural em situação de incêndio fundamentam-se em testes de elementos isolados sujeitos a um incêndio padrão, que não refletem adequadamente o comportamento global de um edifício, visto que a interação entre os elementos não é contemplada. Por essa razão, o desempenho de estruturas reais sujeitas a incêndios reais costuma ser muito melhor do que o previsto em testes padrão devido à continuidade estrutural e à ocorrência de caminhos de carga alternativos.

Dong, Zhu e Prasad (2009) avaliaram, experimentalmente, o comportamento termoestrutural de pórticos mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Especificamente, três estruturas com dois andares e dois compartimentos foram construídas e três ensaios foram conduzidos, nos quais variou-se o número e a localização dos compartimentos que foram aquecidos pelo forno. Além disso, para cada ensaio, os elementos estruturais foram submetidos a uma fase de aquecimento seguida de uma fase de resfriamento. Dong, Zhu e Prasad (2009) forneceram informações acerca das temperaturas nos elementos estruturais, evolução dos deslocamentos, fissuração da laje, ruptura das ligações viga-pilar e de efeitos locais de flambagem. De modo geral, o comportamento da estrutural foi altamente dependente do número e localização dos compartimentos que foram submetidos ao carregamento térmico. Isso indica a importância de considerar o comportamento



global da estrutural nos projetos de incêndio, e não apenas elementos isolados. Além disso, os autores enfatizam que as ligações desempenham um papel na resistência ao fogo e devem ser cuidadosamente dimensionadas.

Dong e Prasad (2009a) é uma continuidade de Dong, Zhu e Prasad (2009), no qual os autores avaliaram, experimentalmente, o comportamento termoestrutural de pórticos mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Dong e Prasad (2009a) variaram os locais com proteção térmica e o tipo de laje, considerando lajes maciças de concreto e pisos mistos de pequena altura. Os principais resultados encontrados foram: em todos os testes, os elementos mais críticos foram os pilares. Isso sugere que em uma estrutura de edifício típica, os pilares devem ser, preferencialmente, protegidos; o desempenho durante a fase de resfriamento pode ser drasticamente diferente da fase de aquecimento. Logo, é importante considerar ambas as fases de incêndio no projeto; os pórticos com laje maciça convencional e os pórticos com pisos mistos de pequena altura apresentaram resistência ao fogo parecida.

Dong e Prasad (2009b) é uma continuidade de Dong e Prasad (2009a). Nesse trabalho, quanto às ligações viga-pilar, os autores observaram que durante a fase de aquecimento, a expansão térmica da viga foi contida e uma força de compressão foi gerada na ligação. No entanto, durante a fase de resfriamento, a temperatura da laje de concreto foi superior à da viga de aço. Dong e Prasad (2009b) relataram que a laje de concreto, ao ser aquecida, se expandiu e empurrou os pilares, enquanto a viga mista se contraiu durante a fase de resfriamento. Isso resultou em forças de tração na conexão e, por fim, levou à formação de uma lacuna entre a placa de ligação e o pilar. Além disso, em todos os testes, Dong e Prasad (2009b) observaram maior concentração de fissuras próximo à ligação viga-pilar.

Pesquisas numéricas de análise de pavimento misto e/ou ligações viga-viga mistas de aço e concreto

Lamont e Usmani (2003) descreveram um mecanismo de “instabilidade de painel” em lajes mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Tal fenômeno caracteriza-se por um rápido aumento na deflexão do piso misto. Nessas condições, Lamont e Usmani (2003) demonstraram que as ligações mistas possuem importância fundamental na ocorrência da instabilidade.

Foster *et al.* (2007) apresentam uma investigação numérica, validada com base em testes de incêndio em um edifício misto de aço e concreto com vários pavimentos, conduzido em 2003, em Cardington, Reino Unido. Modelos térmicos foram simulados no *software* FPRCBC-T, enquanto modelos termoestruturais foram analisados no *software* Vulcan. Foster *et al.* (2007) mostram a influência da proteção térmica nas regiões de ligação das vigas primárias e os efeitos dos diferentes tipos de restrições.

Yu, Zha e Ye (2010) investigaram, via análises numéricas no *software* DYNA, a influência de ligações e lajes mistas para prevenir colapsos progressivos. Os autores propuseram métodos para prevenir o colapso progressivo e concluíram que possíveis soluções são o uso da protensão e de um concreto com menor fissuração próximo às ligações.

Wellman *et al.* (2011) realizaram estudos experimentais de pisos mistos finos de aço e concreto, sujeitos a ações permanentes e provenientes do fogo. Os autores montaram três espécimes e variaram os seguintes parâmetros: tipo de ligação (ligações com guia de cisalhamento e com dupla cantoneira); duas magnitudes de incêndio; e duas condições diferentes de proteção. De modo geral, o artigo concentra-se em analisar o comportamento do piso misto. Quanto às ligações, os autores comentam que, apesar de a variação do tipo de ligação, as quais possuem comportamento rotacional e deformacional diferente, nenhuma delas falhou ou fraturou (incluindo fratura por cisalhamento do parafuso) durante as fases de aquecimento ou resfriamento do teste.

Kodur *et al.* (2013) desenvolveram modelos numéricos tridimensionais, no *software* Abaqus, de ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Diversos tipos de ligações típicas foram estudados, tais como ligações com guia de cisalhamento e com dupla cantoneira. Os modelos numéricos foram validados e aferidos com base em três diferentes ensaios experimentais. A pesquisa da análise mostra claramente que a ação mista entre a viga e a laje aumenta significativamente o desempenho ao fogo da estrutura, transferindo a carga de gravidade das vigas internas enfraquecidas



pelo fogo para as vigas adjacentes. Quanto à variação dos tipos de ligações, nenhuma conclusão muito nítida foi notada, visto que elas não tiveram influência significativa na resistência geral ao fogo dos conjuntos viga-laje. Em todos os testes, nenhuma falha ocorreu na ligação, apesar de ela estar sujeita a temperaturas elevadas e deformações permanentes. Além disso, é importante enfatizar que, comparando as análises numéricas com as experimentais, o modelo numérico pôde simular de forma eficiente a resposta térmica e estrutura da ligação mista em situação de incêndio.

Agarwal, Selden e Varma (2014) analisaram, por meio de análises numéricas no *software* Abaqus, a estabilidade de pisos mistos de aço concreto com ligações constituídas por guias de cisalhamento em situação de incêndio. Os resultados das investigações numéricas indicaram que, em temperaturas elevadas, a viga mista de aço e concreto sofre alongamento, esforços de momento negativo e rotação nas extremidades da viga. Isso resulta em demandas adicionais de rotação e compressão nas conexões nas extremidades. As ligações forneceram significativa resistência ao momento negativo nas extremidades da viga em temperaturas elevadas. A capacidade resistente ao momento negativo nas conexões com guias de cisalhamento aumentou a capacidade de flexão da viga mista redistribuindo efetivamente as demandas de momento devido verticais aplicadas.

Lin, Huang e Fan (2015) investigaram, numericamente no *software* VULCAN, o comportamento de um piso misto de aço e concreto em situação de incêndio, com foco nas vigas e ligações. Especificamente quanto às ligações, os pesquisadores observaram que as cargas elevadas resultam em ruptura por cisalhamento vertical das ligações que conectam as vigas secundárias protegidas aos pilares, o que prejudica significativamente as condições de suporte vertical nos painéis de laje de piso dentro do compartimento de incêndio. Além disso, uma vez que as conexões das vigas protegidas falhem, o suporte vertical para o painel da laje diminuiria. As lajes dentro dos compartimentos de fogo deformariam numa curvatura dupla, causando uma redução significativa da ação da membrana de tração dentro das lajes. Lin, Huang e Fan (2015) finalizam o trabalho enfatizando a importância de projetar adequadamente vigas secundárias e ligações para garantir a segurança estrutural em situação de incêndio.

Selamet e Bolukbas (2016) apresentaram uma investigação numérica sobre o desempenho de um sistema de piso misto de aço e concreto dotado de ligações de cisalhamento viga-viga, em temperaturas elevadas. Os autores também estudaram a influência das vigas secundárias na deflexão vertical do piso, a ação mista e os níveis de tensões na armadura de aço. As principais observações feitas por Selamet e Bolukbas (2016) foram: a conexão de cisalhamento de placa única deforma excessivamente durante as fases iniciais do incêndio; a conexão atinge sua capacidade rotacional e axial durante a fase de resfriamento do fogo, resultando na falha dos parafusos por esforços de cisalhamento e flexão combinados; o mecanismo de ação da membrana de tração da laje é totalmente mobilizado antes do término da fase de aquecimento, quando o reforço na região média do piso começa a se deformar por tensões de tração; a viga interna provoca um desenvolvimento prematuro da ação da membrana de tração; a laje de concreto sobre a ligação desenvolve grandes tensões de tração, mas devido à ductilidade da armadura, nenhuma ruptura é observada; os parafusos da conexão sofrem grande cisalhamento devido à força axial na viga, bem como alguma tensão devido à flambagem fora do plano da placa única. Além disso, os parafusos superiores e inferiores não têm uma capacidade resistente suficiente para resistir aos esforços de tração e flexão suficiente, o que leva à falha; devido à grande rotação na conexão, os parafusos superiores e inferiores falham primeiro. Tendo em vista tais resultados, os autores recomendam que: o material de aço da armadura tenha elevada ductilidade em temperaturas elevadas; as armaduras paralelas às vigas internas deve ter um diâmetro maior (ou seja, área da seção transversal maior) para estabelecer tensões semelhantes em ambas as direções; para minimizar a deformação da placa única, seu comprimento deve ser limitado à profundidade da alma da viga; os parafusos devem ser dimensionados considerando a combinação de cisalhamento e tensão. Parafusos superdimensionados devem ser usados nos orifícios dos parafusos superiores e inferiores na viga.

Selamet e Bolukbas (2016) investigaram o desempenho de ligações com guia de cisalhamento, mistas de aço e concreto, em situação de incêndio. Os pesquisadores avaliaram, via simulação nu-



mérica no *software* Abaqus, um piso misto de aço e concreto com ligações com guia de cisalhamento entre vigas submetido à elevadas temperaturas. Selamet e Bolukbas (2016) observaram que, em todas as análises, as ligações falharam por cisalhamento do parafuso e/ou por flambagem da placa de ligação. Além disso, foi possível notar que: quando a laje está sob carga de gravidade à temperatura ambiente, a adição de vigas de borda e vigas internas reduz significativamente as deflexões da laje; as vigas de borda fornecem restrição rotacional à laje e as vigas internas aumentam a rigidez flexural da laje; quando a laje está em condições de incêndio, as vigas de borda fornecem restrição rotacional significativa à laje e reduzem as deflexões da laje; enquanto as vigas das bordas estiverem protegidas contra fogo, a laje de concreto permanece intacta durante o incêndio. No entanto, a conexão de placa única não oferece resistência suficiente a rotações excessivas; o desempenho da ligação de cisalhamento afeta a força interna e a distribuição do momento na viga secundária, bem como o limite de deflexão do piso misto; quando a laje está em temperaturas máximas, as vigas interiores desprotegidas não contribuem para a capacidade de carga do piso misto com estrutura de aço e as tensões principais na laje de concreto são quase idênticas com ou sem vigas secundárias.

Principais lacunas identificadas no tema

Na revisão bibliográfica dos trabalhos citados, diversas lacunas do conhecimento foram identificadas e/ou propostas para trabalhos futuros. Cronologicamente, tem-se que:

- Wald *et al.* (2006) destacaram que as normas técnicas e seu método de incêndio padrão são fundamentados em elementos isolados, os quais não refletem adequadamente o comportamento global da estrutura. Especificamente, Wald *et al.* (2006) afirmaram que ligações analisadas globalmente apresentam melhor desempenho em situação de incêndio do que as mesmas ligações analisadas isoladamente;
- Ranzi e Bradford (2007) afirmaram que havia uma carência de estudos que caracterizem o comportamento dos conectores de cisalhamento em temperaturas elevadas. Além disso, os autores defenderam a necessidade de novos estudos experimentais para melhor identificar seus modelos constitutivos tanto no sentido longitudinal quanto no transversal;
- Santiago *et al.* (2008) defenderam a necessidade de estudos adicionais sobre ligações mistas de aço e concreto, submetidas a temperaturas elevadas, a fim de otimizar o método das componentes;
- Dong, Zhu e Prasad (2009) avaliaram, experimentalmente, o comportamento termoestrutural de pórticos mistos de aço e concreto em situação de incêndio. Os autores estudaram o número e a localização dos compartimentos que foram aquecidos pelo forno. O comportamento da estrutural foi altamente dependendo do número e localização dos compartimentos que foram submetidos ao carregamento térmico. Isso indica a importância de considerar o comportamento global da estrutural nos projetos de incêndio, e não apenas elementos isolados. Fundamentando-se nesses ensaios, Dong, Zhu e Prasad (2009) citaram que é importante considerar o comportamento global das estruturas, com as devidas interações entre elementos, no projeto em situação de incêndio. Considerar apenas o comportamento de elementos isolados conduz a resultados imprecisos;
- Dong e Prasad (2009) mencionaram que os resultados experimentais apontam claramente a necessidade de modelagem numérica abrangente e análise desses experimentos para obter um melhor entendimento da resposta estrutural induzida pelo fogo dos pórticos. Também é recomendado que mais recursos sejam alocados para realizar experimentos em sistemas estruturais maiores e mais complexos sob carga de fogo para capturar efeitos tridimensionais;
- Pucinotti *et al.* (2011) defenderam que são necessários estudos adicionais para compreender o comportamento de ligações da EN 1993-1-2, seção 4.2.5, em situação de incêndio, sobretudo acerca da influência de ações sísmicas e do tipo de laje;
- Haremza, Santiago e Silva (2013) destacaram e comprovaram experimentalmente a influência de restrições axiais no desempenho de ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio. Os autores ressaltaram a importância da compreensão do efeito do momento fletor combinado com cargas axiais nas ligações, sobretudo durante a fase de resfriamento;
- Agarwal, Selden e Varma (2014) recomendaram o estudo da influência da armadura em ligações mistas em situação de incêndio;



- Pucinotti *et al.* (2015) comentaram sobre a necessidade de investigar a influência da resistência do aço no comportamento de ligações mistas submetidas a elevadas temperaturas;
- Selden, Fischer e Varma (2016) recomendaram uma investigação detalhada sobre o comportamento de ligações mistas de aço e concreto durante a fase de resfriamento de um incêndio;
- Song *et al.* (2017) sugerem a investigação do comportamento de ligações mistas de aço e concreto na fase de resfriamento bem como o estudo das forças catenárias desenvolvidas na laje;
- Han, Xu e Tao (2018) citaram a necessidade de estudo de ligações mistas de aço e concreto envolvendo pilares tubulares de aço inoxidável, preenchidos com concreto, em situação de incêndio;
- Ye *et al.* (2019) afirmaram que há uma lacuna sobre a influência de cargas cíclicas em ligações mistas de aço e concreto, sobretudo os efeitos de tal carregamento em ligações submetidas a elevadas temperaturas;
- Hajjar, Hantouche e Ghor (2019) ressaltaram a necessidade de estudar o efeito da fluência em ligações mistas de aço e concreto do tipo flexíveis;
- Demonceau e Ciutina (2019) sugerem o estudo do efeito de cargas cíclicas em ligações mistas de aço e concreto, além do momento negativo e dos efeitos de temperatura;
- Liu, Hang e Burgess (2021) recomendaram a investigação da influência da estrutura fora do plano da ligação, particularmente de lajes, no desempenho das ligações mistas de aço e concreto, em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Além disso, de modo geral foi possível notar uma escassez de trabalhos com ligações viga-viga, mistas de aço e concreto, em situação de incêndio.

O Quadro 2 apresenta uma síntese das lacunas e dos respectivos trabalhos que as citam.

Quadro 2 - Lacunas identificadas e respectivas referências.

LACUNA	REFERÊNCIAS
Análise global do comportamento das ligações	Wald <i>et al.</i> (2006) Dong, Zhu e Prasad (2009) Dong e Prasad (2009) Song <i>et al.</i> (2017) Liu Hang e Burgess (2021).
Comportamento dos conectores de cisalhamento em situação de incêndio	Ranzi e Bradford (2007)
Otimização do método das componentes para o dimensionamento de ligações mistas de aço e concreto	Santiago <i>et al.</i> (2008)
Comportamento das ligações do EN 1993-1-2 em situação de incêndio	Pucinotti <i>et al.</i> (2011)
Efeito das restrições axiais nas ligações mistas em situação de incêndio	Haremza, Santiago e Silva (2013)
Influência da armadura no comportamento de ligações mistas em situação de incêndio	Agarwal, Selden e Varma (2014)
Influência da resistência do aço no comportamento de ligações mistas em situação de incêndio	Pucinotti <i>et al.</i> (2015)
Comportamento das ligações mistas durante a fase de resfriamento de um incêndio	Selden, Fischer e Varma (2016) Song <i>et al.</i> (2017)
Mecanismo das forças catenárias desenvolvidas na laje durante a fase de resfriamento de um incêndio	Song <i>et al.</i> (2017)
Comportamento de ligações mistas com pilares tubulares	Han, Xu e Tao (2018)
Efeito de cargas cíclicas em ligações mistas durante um incêndio	Ye <i>et al.</i> (2019) Demonceau e Ciutina (2019)
Ação da fluência em ligações mistas flexíveis durante um incêndio	Hajjar, Hantouche e Ghor (2019)
Comportamento de ligações mistas de aço e concreto submetidas a momento negativo em situação de incêndio	Demonceau e Ciutina (2019)

Fonte: elaborado pelos autores, 2024.



Conclusão

O presente trabalho conduziu uma análise bibliométrica e posterior revisão sistemática da literatura acerca dos trabalhos sobre ligações mistas de aço e concreto em situação de incêndio.

Apenas 47 artigos alinhados com o objetivo da análise bibliométrica foram encontrados, demonstrando uma carência de estudos na área. Além disso, nota-se um considerável crescimento das pesquisas nos últimos anos, o qual constitui um indicativo da importância do tema e relevam, sobretudo, a existência de lacunas do conhecimento.

Na revisão sistemática da literatura, diversas sugestões de trabalhos futuros foram encontradas. Dentre eles, destacam-se as recomendações para a realização de investigações acerca do comportamento de ligações mistas de aço e concreto considerando sua relação com a estrutura globalmente, e não analisando a ligação isoladamente. Visto isso, como proposta de trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar análises do comportamento de ligações mistas de aço e concreto considerando a estrutural globalmente, e não elementos isolados;
- Desenvolver um modelo numérico de ligações viga-viga e viga-pilar, mistas de aço e concreto, que representem o comportamento físico real em temperatura ambiente e sob elevadas temperaturas;
- Avaliar a influência dos seguintes parâmetros no comportamento de ligações viga-viga e viga-pilar, mistas de aço e concreto, em temperatura ambiente e à elevadas temperaturas: taxa de armadura da laje; cargas cíclicas; momento negativo; restrições; grau de interação aço-concreto e tipo de laje;
- Investigar o comportamento de ligações viga-viga e viga-pilar, mistas de aço e concreto, durante a fase de resfriamento do incêndio;
- Estudar o comportamento de ligações viga-pilar, mistas de aço e concreto, com pilares em seção tubular, em temperatura ambiente e em elevadas temperaturas;
- Propor um modelo matemático para o dimensionamento de ligações viga-viga e viga-pilar, mistas de aço e concreto, em situação de incêndio.

Declaração de interesses concorrentes

Os autores declaram que não possuem interesses financeiros concorrentes ou relações pessoais que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

Agradecimentos

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

Referências

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E119**: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. Philadelphia, 2000.

International Organization for Standardization (ISO), I. O. for S. Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements. Geneva, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 14323: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações** - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.



- AGARWAL, A.; SELDEN, K.; VARMA, A. Stability Behavior of Steel Building Structures in Fire Conditions: Role of Composite Floor System with Shear-Tab Connections. **Journal of Structural Fire Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 77–96, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1260/2040-2317.5.2.77>
- AL-JABRI, K. S. *et al.* Modeling of composite beam–column flexible endplate joints at elevated temperature. **Composite Structures**, [s. l.], v. 143, p. 180–188, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.069>
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- BAHR, O. On the fire performance of unbraced composite frames. **Journal of Structural Fire Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 300–318, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1108/JSFE-03-2017-0030>
- BAILEY, C. G. The behaviour of asymmetric slim floor steel beams in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 235–257, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00247-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00247-8)
- CHIEW, S. P.; ZHAO, M. S.; LEE, C. K. Mechanical properties of heat-treated high strength steel under fire/post-fire conditions. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], v. 98, p. 12–19, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.003>
- DAI, X. H.; WANG, Y. C.; BAILEY, C. G. Effects of partial fire protection on temperature developments in steel joints protected by intumescent coating. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 376–386, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.08.005>
- DEMONCEAU, J.-F. *et al.* Behaviour of single-sided composite joints at room temperature and in case of fire after an earthquake. **International Journal of Steel Structures**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 329–342, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF03249506>
- DEMONCEAU, Jean-François; CIUTINA, A. Characterisation of Beam-to-column Steel-concrete Composite Joints Beyond Current Eurocode Provisions. **Structures**, [s. l.], v. 21, p. 167–175, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.014>
- DONG, Y. L.; ZHU, E. C.; PRASAD, K. Thermal and structural response of two-storey two-bay composite steel frames under furnace loading. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 439–450, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.09.005>
- DONG, Y.; PRASAD, K. Experimental Study on the Behavior of Full-Scale Composite Steel Frames under Furnace Loading. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 10, p. 1278–1289, 2009a. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2009\)135:10\(1278\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:10(1278))
- DONG, Y.; PRASAD, K. Thermal and structural response of a two-story, two bay composite steel frame under fire loading. **Proceedings of the Combustion Institute**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 2543–2550, 2009b. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.05.007>
- DRURY, M. M.; KORDOSKY, A. N.; QUIEL, S. E. Structural fire resistance of partially restrained, partially composite floor beams, II: Modeling. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 167, p. 105946, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105946>
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1994–2–2: Design of composite steel and concrete structures. **General rules and rules for bridges**. Brussels, Bélgica: [s. n.], 2005.
- FAKURY, R. H. *et al.* Design of semi-continuous composite steel-concrete beams at the fire limit state. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 61, n. 8, p. 1094–1107, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.02.003>
- FIRMO, J. P.; CORREIA, J. R.; BISBY, L. A. Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review. **Composites Part B: Engineering**, v. 80, p. 198–216, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.045>
- FISCHER, E. C.; VARMA, A. H. Fire behavior of composite beams with simple connections: Benchmarking of numerical models. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 111, p. 112–125, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.013>
- FISCHER, E. C.; VARMA, A. H. Fire resilience of composite beams with simple connections: Parametric



studies and design. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 119–135, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.004>

FOSTER, S. *et al.* Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 3, p. 183–199, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.07.002>

GARDNER, L.; BADDOO, N. R. Fire testing and design of stainless steel structures. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 6, p. 532–543, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.09.009>

GERNAY, T.; FRANSSSEN, J.-M. A plastic-damage model for concrete in fire: Applications in structural fire engineering. **Fire Safety Journal**, v. 71, p. 268–278, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.028>

HAJJAR, M. A.; HANTOUCHE, E. G. Predicting the Demand of Shear Tab Connections with Composite Beams in Fire. **International Journal of Steel Structures**, v. 20, n. 3, p. 817–832, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00325-5>

HAJJAR, M.; HANTOUCHE, E.; EL GHOR, A. Shear tab connection with composite beam subjected to transient-state fire temperatures. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 10, n. 4, p. 411–434, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1108/JSFE-11-2018-0037>

HAN, L.-H.; ZHENG, Y.-Q.; TAO, Z. Fire performance of steel-reinforced concrete beam–column joints. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, n. 7, p. 499–518, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1680/macr.2008.61.7.499>

HAN, Lin-Hai; XU, C.-Y.; TAO, Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSSST) columns and joints: Summary of recent research. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 152, p. 117–131, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.02.038>

HAREMZA, C. *et al.* Composite joints under M-N at elevated temperatures. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 124, p. 173–186, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.05.012>

HAREMZA, C.; SANTIAGO, A.; SIMÕES DA SILVA, L. Experimental behaviour of heated composite steel–concrete joints subject to variable bending moments and axial forces. **Engineering Structures**, v. 51, p. 150–165, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.016>

JÁNA, T. *et al.* Temperatures and thermal boundary conditions in reverse channel connections to concrete filled steel sections during standard and natural fire tests. **Fire Safety Journal**, v. 78, p. 55–70, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.08.002>

KELLER, W. J.; PESSIKI, S. Cyclic Load Tests of SFRM-Insulated Steel Gravity Frame Beam–Column Connection Assemblies. **Journal of Structural Engineering**, v. 141, n. 10, p. 04015005, 2015. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001237](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001237)

KODUR, V. K. R. *et al.* Modeling the response of composite beam–slab assemblies exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 80, p. 163–173, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.005>

KODUR, V. K. R.; PHAN, L. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 6–7, p. 482–488, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.10.006>

LAMONT, S.; USMANI, A. . Possible ‘panel instability’ in composite deck floor systems under fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, n. 11, p. 1397–1433, 2003. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00083-X)

LIN, S.; HUANG, Z.; FAN, M. The effects of protected beams and their connections on the fire resistance of composite buildings. **Fire Safety Journal**, v. 78, p. 31–43, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.08.003>

LIU, T. C. . Three-dimensional modelling of steel/concrete composite connection behaviour in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 46, n. 1–3, p. 319–320, 1998. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)80038-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)80038-2)

LIU, T. C. H. Moment-Rotation-Temperature Characteristics of Steel/Composite Connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 125, n. 10, p. 1188–1197, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:10\(1188\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:10(1188))



- LIU, Y.; HUANG, S.-S.; BURGESS, I. Fire performance of axially ductile connections in composite construction. **Fire Safety Journal**, v. 121, p. 103311, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103311>
- LYU, J. *et al.* Fire resistance of integral composite beams with superposed slabs. **Structural Concrete**, v. 21, n. 6, p. 2481–2493, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1002/suco.202000115>
- MARTINEZ, J.; JEFFERS, A. E. Analysis of restrained composite beams exposed to fire. **Engineering Structures**, v. 234, p. 111740, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111740>
- PIGNATTA E SILVA, V. Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. **Engineering Structures**, v. 27, n. 14, p. 2036–2043, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.05.018>
- PUCINOTTI, R. *et al.* Seismic-induced fire resistance of composite welded beam-to-column joints with concrete-filled tubes. **Fire Safety Journal**, v. 46, n. 6, p. 335–347, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.05.003>
- PUCINOTTI, R.; BURSI, O. S.; DEMONCEAU, J. F. Post-earthquake fire and seismic performance of welded steel–concrete composite beam-to-column joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 9, p. 1358–1375, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.006>
- PUCINOTTI, Raffaele *et al.* Tests and model calibration of high-strength steel tubular beam-to-column and column-base composite joints for moment-resisting structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 44, n. 9, p. 1471–1493, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.2547>
- RANZI, G.; BRADFORD, M. A. Composite beams with both longitudinal and transverse partial interaction subjected to elevated temperatures. **Engineering Structures**, v. 29, n. 10, p. 2737–2750, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.022>
- ROMERO, M. L. *et al.* Fire behavior of axially loaded slender high strength concrete-filled tubular columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 12, p. 1953–1965, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.06.012>
- SANTIAGO, A. *et al.* Experimental investigation of the behaviour of a steel sub-frame under a natural fire. **Steel and Composite Structures**, v. 8, n. 3, p. 243–264, 2008. Available at: <https://doi.org/10.12989/scs.2008.8.3.243>
- SELAMET, S.; BOLUKBAS, C. Fire resilience of shear connections in a composite floor: Numerical investigation. **Fire Safety Journal**, v. 81, p. 97–108, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.02.003>
- SELDEN, K. L.; FISCHER, E. C.; VARMA, A. H. Experimental Investigation of Composite Beams with Shear Connections Subjected to Fire Loading. **Journal of Structural Engineering**, v. 142, n. 2, p. 04015118, 2016. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001381](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001381)
- SONG, T.-Y. *et al.* Fire performance of blind bolted composite beam to column joints. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 132, p. 29–42, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.011>
- VALENTE, J. C.; NEVES, I. C. Fire resistance of steel columns with elastically restrained axial elongation and bending. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 52, n. 3, p. 319–331, 1999. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00033-4)
- WALD, F. *et al.* Experimental behaviour of a steel structure under natural fire. **Fire Safety Journal**, v. 41, n. 7, p. 509–522, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.05.006>
- WANG, J. *et al.* Temperature analysis of extended end plate joints to square CFST columns in fire. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 7, n. 4, p. 306–315, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2016-021>
- WELLMAN, E. I. *et al.* Experimental Evaluation of Thin Composite Floor Assemblies under Fire Loading. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 9, p. 1002–1016, 2011. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000451](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000451)
- YANG, Y.-F.; FU, F. Fire resistance of steel beam to square CFST column composite joints using RC slabs: Experiments and numerical studies. **Fire Safety Journal**, v. 104, p. 90–108, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.009>



YE, Z. *et al.* Experimental study on cyclically-damaged steel-concrete composite joints subjected to fire. **Steel and Composite Structures**, v. 30, n. 4, p. 351–364, 2019. Available at: <https://doi.org/10.12989/scs.2019.30.4.351>

YU, M.; ZHA, X.; YE, J. The influence of joints and composite floor slabs on effective tying of steel structures in preventing progressive collapse. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 66, n. 3, p. 442–451, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.10.008>

YUAN, Z.; TAN, K. H.; TING, S. K. Testing of composite steel top-and-seat-and-web angle joints at ambient and elevated temperatures, Part I: Ambient tests. **Engineering Structures**, v. 33, n. 10, p. 2727–2743, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.027>