

REVISÃO SISTEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DE LONGA DURAÇÃO EM VIGAS MISTAS

K. K. F. NUNES* , L. R. A. COSTA, H. J. F. DIÓGENES, M. I. B. VALENTE

Federal University of Paraíba¹, University of Minho²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3818-4314> *

kildenberg.nunes@ifpb.edu.br*

Submitted January 20, 2023 - Accepted November 27, 2023

DOI: 10.15628/holos.2023.14693

RESUMO

As vigas mistas aço-concreto são uma solução econômica e eficiente para aplicações em edifícios e pontes. No entanto, na análise de estruturas, muitas vezes apenas a deformação instantânea é levada em consideração, mas cargas de longa duração podem causar deformações mais significativas para uma mesma carga aplicada. Este trabalho trata dos efeitos do comportamento do concreto dependente do tempo, como fluência e retração, que afetam os estados limite de serviço e último. Assim, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar o comportamento à flexão a longo prazo e o

funcionamento de vigas mistas aço-concreto por meio de uma revisão sistemática da literatura. Foi possível fazer uma análise qualitativa do aumento da deflexão e slip ao longo do tempo e efeitos nas disposições das deformações da seção transversal em carregamentos de longa duração. Após essa discussão, foi possível deduzir que o comportamento de longo prazo pode variar muito as características de curto prazo excedendo as disposições dos dispositivos normativos. No entanto, ainda faltam dados em resultados experimentais para uma análise mais detalhada.

Palavras chave: Aço-concreto, Vigas mistas, Comportamento de longa duração.

SYSTEMATIC REVIEW OF LONG-TERM BEHAVIOR IN COMPOSITE BEAMS

ABSTRACT

Composite steel-concrete beams are an economical and efficient solution for building and bridge applications. However, In the analysis of structures, only the instantaneous deformation is often taken into account, but long-term loads can cause more significant deformations for the same applied load. This work concerns the effects of time-dependent concrete behavior, such as creep and shrinkage, which include service and ultimate limit states. So the general aim of this research was to evaluate the long-term flexural

behavior and functioning of steel-concrete composite beams through a systematic literature review. It was possible to do a qualitative analysis of the increase of deflection and slip through time and effects in dispositions of strains in long-term loading. After that discussion, it was possible to deduce that long-term behavior can vary a lot in the characteristics of the short-term exceeding design code provisions. However, there is still a lack of data in experimental results for more detailed analysis.

KEYWORDS: Steel-concrete, Composite beams, Long-term behavior



1 INTRODUÇÃO

Todos os projetos destacados na área de engenharia necessitam passar por um processo de otimização, atendendo a premissas essenciais para os engenheiros: (a) economia e (b) bom desempenho (Leite & Pereira Júnior, 2019). Os pioneiros na incorporação de elementos combinados de aço e concreto na indústria da construção foram as vigas mistas. Inicialmente, os perfis eram revestidos com concreto não estrutural, visando reforçar a resistência dos elementos de aço contra os efeitos do fogo. No entanto, com as vantagens alcançadas, essa técnica também é empregada para aumentar a resistência da viga (Rossi *et al.*, 2022).

A presença de conectores de cisalhamento proporciona a ação mista, esses são, na maioria das vezes, soldados na mesa superior da viga de aço e embutidos na laje de concreto durante a concretagem. Este componente estrutural é eficiente quando submetido a momentos positivos, aproveitando a capacidade do concreto e do aço de se comportarem bem em compressão e tração, respectivamente. Essa eficiência garante que muitos estados limites sejam satisfeitos. Este trabalho trata daqueles afetados pelo comportamento do concreto dependente do tempo, como fluência e retração, que incluem os estados limite de serviço e último.

Muitas vezes, na análise de estruturas, apenas a deformação instantânea é levada em consideração, mas cargas de longa duração podem causar deformações mais significativas para uma mesma carga aplicada. Gilbert & Bradford (1995) estudaram o comportamento de vigas mistas conectadas por conectores do tipo stud. Os resultados mostraram que as deformações de longa duração atingiram entre duas e três vezes o valor das deformações instantâneas sob as mesmas cargas aplicadas.

A capacidade de manutenção de tais estruturas é fundamentalmente afetada pela fluência e fissuração e sua interação, tornando o comportamento da estrutura proeminentemente não linear. Publicações recentes destacaram o efeito da fluência e retração no comportamento geral de vigas mistas (Nguyen & Hjiij, 2016).

No que diz respeito ao comportamento a longo prazo de tais vigas mistas inovadoras, apenas alguns estudos estão na literatura aberta, apesar de extensas investigações sobre o comportamento de longa duração de vigas mistas com conectores studs (Bradford M.A. & Gilbert, 1992)(R I Gilbert, Bradford, Gholamhoseini, & Chang, 2012)(Mirza & Uy, 2010)(Nguyen, Hjiij, & Uy, 2010)(Liu, Bradford, & Erkmen, 2013)(Ranzi, Leoni, & Zandonini, 2013).

É desafiador conhecer todo o conhecimento já publicado em uma área temática com o constante crescimento de pesquisas e muitos artigos publicados mundialmente. Uma Revisão Sistemática (RS) vem com uma abordagem diferente de uma revisão de literatura tradicional. Uma RS bem executada é uma abordagem rigorosa e replicável para identificar, avaliar e resumir evidências científicas relevantes para uma questão clínica ou política (EFSA, 2010).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi buscar estudos relevantes por meio de critérios de busca em bases de dados, critérios de inclusão dos estudos para selecioná-los e critérios de avaliação da metodologia e seus resultados. Com isso, espera-se que seja possível buscar evidências que possam julgar o comportamento de vigas mistas aço-concreto quando sob ação de cargas de longa duração.

2 METODOLOGIA

Para a RS, a fonte primária de informação foi o Scopus, oficialmente denominado SciVerse Scopus, introduzido pela Elsevier Science em 2004. Web of Science e Scopus são os bancos de dados mais abrangentes e frequentemente usados para pesquisar a literatura. No entanto, o Scopus abrange um número superior de periódicos (Chadegani *et al.* 2013).

2.1 Planejamento da revisão

Previamente, quatro pesquisadores foram convidados a contribuir com o protocolo de pesquisa. Este protocolo especifica o processo de identificação de pesquisas relevantes. Neste caso, a questão de pesquisa foi definida a estratégia de busca e os critérios de exclusão. De acordo com o principal objetivo e escopo desta RS, a questão de pesquisa proposta foi: Como é o comportamento a longo prazo de vigas mistas aço-concreto?

2.2 Identificação dos estudos

Este processo foi iniciado pela construção de um conjunto abrangente de termos de pesquisa relacionados ao comportamento de longa duração em estruturas compostas. Estes foram concatenados em uma string de pesquisa usando os operadores booleanos 'AND' e 'OR'. Aplicou um limite para a área temática e nenhum para idioma ou ano de publicação. Todas as outras opções de refinamento de pesquisa não foram alteradas. A base de dados Scopus® foi adotada utilizando a estratégia apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na pesquisa

Pesquisa	
Primeiro campo	<i>Time dependent OR long term OR creep OR shrinkage</i>
Operador	AND
Segundo campo	<i>Steel AND concrete AND composite beam</i>

Assim, a pesquisa foi realizada em dezembro de 2022. Essas citações foram baixadas e exportadas para o gerenciador de referências Mendeley® para a seleção dos estudos.

2.3 Seleção dos artigos, definição dos critérios de inclusão, extração e síntese dos dados

O processo de seleção começou selecionando artigos relevantes em potencial por meio de uma varredura de títulos e resumos de citações. Depois disso, as citações que correspondiam explicitamente aos critérios de exclusão foram excluídas da RS. Os critérios de

exclusão, diretamente relacionados ao objetivo da pesquisa, foram desenvolvidos para descrever os tipos de estudo elegíveis para uma revisão em profundidade. Os critérios de exclusão estão listados em Tabela 2.

Tabela 2 – Critério de exclusão

No.	Critério	Razão para exclusão
1	Apenas artigo como tipo de documento	Outro tipo pode não ser relevante
2	Ter JCR	a. Qualidade e validade da pesquisa b. Para reduzir a síntese de dados tendenciosos
3	Artigos de texto completo indisponíveis eletronicamente	Recursos e tempo não estão disponíveis para reuni-los
4	Idioma diferente do inglês	Pode não ser relevante e amplamente divulgado academicamente
5	Não aborde o comportamento experimental de longo prazo de vigas mistas aço-concreto.	O comportamento de longo prazo de vigas mistas de aço e concreto será o foco deste trabalho

A extração de dados deve estar diretamente ligada à questão de revisão e aos critérios para avaliar a elegibilidade dos estudos. Dentro da SR, a remoção de dados duplicados é um recurso comum projetado para melhorar a confiabilidade, aumentar a precisão e validar a interpretação dos dados. Assim, os revisores avaliaram independentemente cada pesquisa apresentada na Tabela 1. Cada pessoa extraiu os dados em uma tabela de evidências pré-definida. Posteriormente, as duas tabelas foram comparadas e as discordâncias foram resolvidas por meio de discussão com o especialista.

Os dados qualitativos coletados de cada artigo incluem:

- A ideia principal da aplicação do objeto de estudo;
- Procedimentos metodológicos adotados no programa experimental;
- Uma descrição completa sobre o comportamento de longa duração dos protótipos.

Cabe ressaltar que os dados foram categorizados com base na similaridade dos estudos, ou seja, para explorá-los na busca de padrões consistentes ou relações sistemáticas entre as variáveis.

2.4 Obtenção dos resultados

Nesta etapa, foram avaliados qualitativamente os parâmetros previamente definidos referentes aos ensaios de flexão de vigas mistas realizados pelas respectivas obras selecionadas. Dessa forma, foram avaliadas as evidências que tratam dos parâmetros de fluência, retração e ductilidade, como curvas de deslizamento e deflexão no tempo e características de fissuração dos respectivos modelos. Nesse sentido, procurou-se sintetizar as evidências para responder à desejada questão científica apresentada no 2.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial sem filtrar a área de assunto para engenharia registrou 262 estudos no banco de dados, mas depois, ainda no banco de dados, com o filtro de área de assunto aplicado, foram registrados 247. Em que com a pesquisa conforme descrito na Tabela 1. Por título e resumo, foram selecionados 111 estudos potencialmente relevantes para a RS. Portanto, esses estudos foram avaliados de acordo com os critérios de elegibilidade. Ao final, 6 artigos atenderam aos critérios de inclusão e foram adicionados à RS, para serem analisados criteriosamente.

Além disso, o trabalho de Bradford & Gilbert (1991) foi incluída nesta pesquisa. Mesmo não estando na base Scopus, este trabalho atende a todos os critérios da Tabela 4, sendo citado pela maioria dos trabalhos estudados nesta revisão sistemática. A Figura 1 apresenta o fluxograma de pesquisa do estudo e a Tabela 3 descreve os resultados.

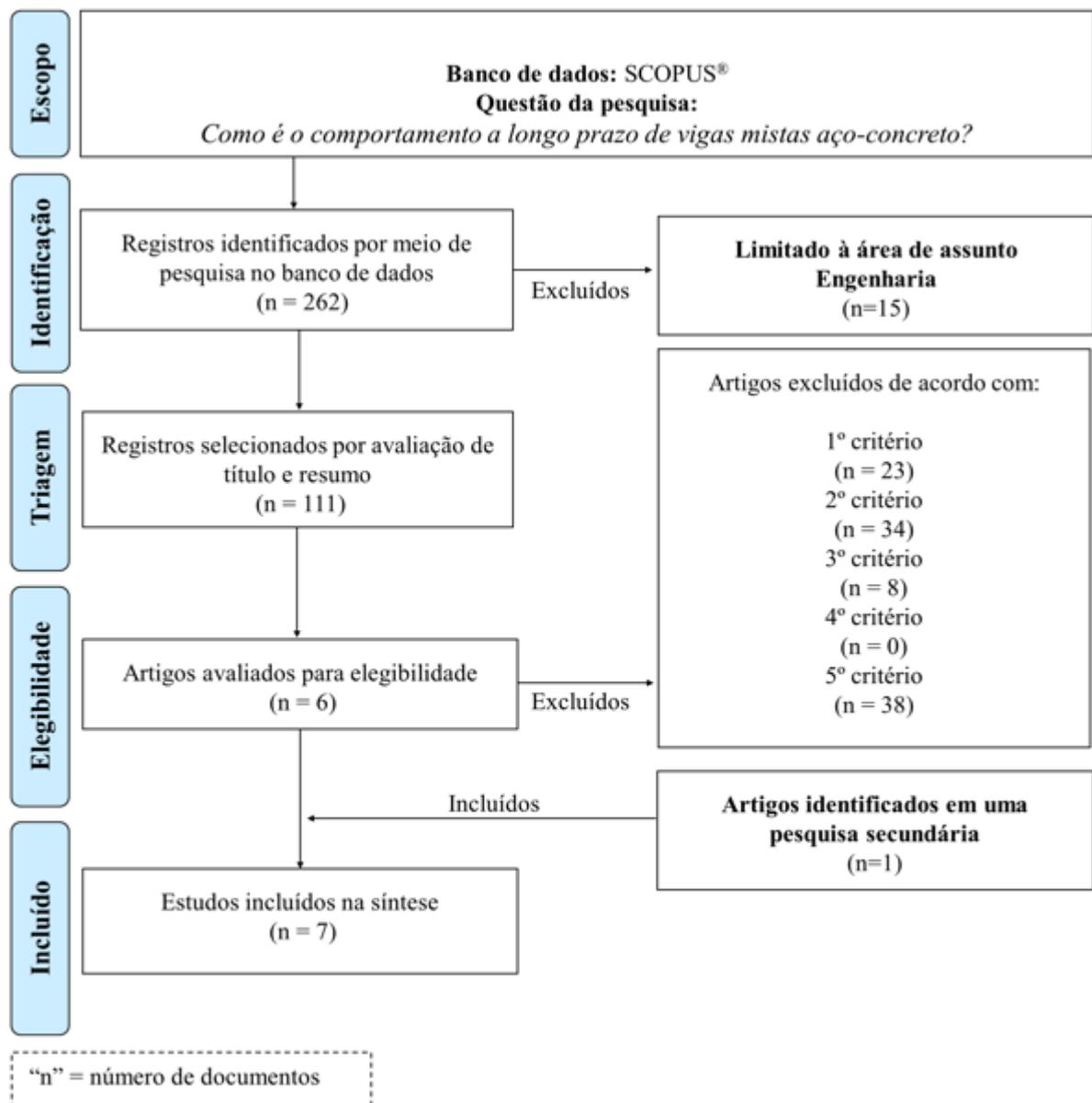


Figura 1. Fluxograma do processo de revisão sistemática (PRISMA flow diagram).

Tabela 3 – Estudos selecionados

Citação	Título
Al-Deen <i>et al.</i> (2011a)	Full-scale long-term and ultimate experiments of simply-supported composite beams with steel deck
Al-Deen <i>et al.</i> (2011b)	Full-scale long-term experiments of simply supported composite beams with solid slabs
Al-Deen <i>et al.</i> (2012)	Long-term experiments of composite beams and connections
Ban <i>et al.</i> (2015)	Time-dependent behaviour of composite beams with blind bolts under sustained loads
Bradford & Gilbert (1991)	Time-dependent behaviour of simply supported steel-concrete composite beams
Fan <i>et al.</i> (2010)	Long-term behavior of composite beams under positive and negative bending. I: Experimental study
Xue <i>et al.</i> (2008)	Long-term behavior of prestressed composite beams at service loads for one year

3.1 Análise bibliométrica

A visualização dos indicadores bibliométricos na disciplina é fundamental, pois ajuda a medir os índices de produção e disseminação do conhecimento que acompanham o desenvolvimento da disciplina científica, bem como os padrões de autoria, publicação e utilização dos resultados das pesquisas.

A Figura 2 mostra a distribuição anual dos estudos incluídos de 1995 a 2015. A pesquisa foi realizada sem limite de data de publicação do artigo. Após os critérios de exclusão, havia apenas um artigo em 1995, e havia uma lacuna na pesquisa, com artigos somente após 2008. Isso indica que, embora esse assunto tenha sido estudado antes, ainda há algumas lacunas a serem preenchidas.

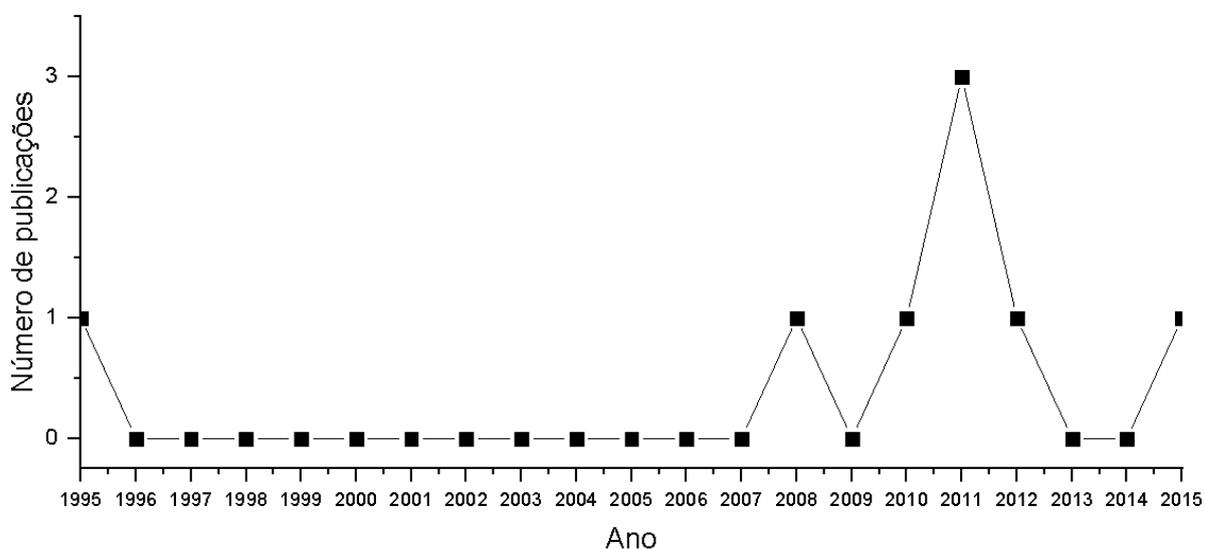


Figura 2 - Distribuição anual de publicações.

A Tabela 4 apresenta informações sobre a relevância e distribuição dos periódicos em que os trabalhos são publicados. Das 3 revistas coletadas, o *Journal of Constructional Steel*

Research se destacou com 3 trabalhos (42,8%). Os demais apresentaram apenas dois artigos que compuseram esta revisão.

Quanto aos parâmetros de avaliação dos periódicos, há uma significativa relevância acadêmica dos periódicos coletados, com média *Journal Impact Factor* (JIF) de 1,19 e *Scimago Journal Rank* (SJR) de 0,853. Entre esses periódicos, como pode ser visto na Tabela 4, o *Journal of Constructional Steel Research* teve a maioria nos dois rankings simultaneamente.

É possível observar a presença de publicações em apenas 3 países, Holanda, Estados Unidos e Reino Unido. Embora a referência aos locais de publicação em alguns casos difira dos locais onde os estudos foram realizados. Esse resultado ilustra uma referência por parte de quem publica, indicando países mais receptivos a essas tecnologias e, portanto, mais desenvolvidos.

Tabela 4 – Periódicos abrangidos.

#	Periódicos	Quantidade	Freq. (%)	SJR (2021)	JIF (2021)	País de publicação
1	<i>Journal of Constructional Steel Research (JCSR)</i>	3	42,8	1.388	3.646	Holanda
2	<i>Journal of Structural Engineering (JSE)</i>	2	28,6	1.385	3.312	EUA
3	<i>Magazine of Concrete Research (MCR)</i>	2	28,6	0.797	2.46	Reino Unido
	Total/Mean	7	100	1.190	3.139	

3.2 Caracterização dos estudos

A Tabela 5 apresenta uma visão geral dos estudos selecionados nesta revisão sistemática. Com relação à tensão estudada, todos os trabalhos estudaram o momento fletor, que é a forma mais comum de dimensionar vigas mistas. No entanto, as vigas mistas também podem ser submetidas a um momento de sobrecarga quando estão próximas de juntas viga-pilar ou construídas como elementos contínuos. Mesmo que não seja a configuração mais eficiente para vigas mistas aço-concreto, uma vez que o concreto estará sujeito a tensões de tração.

A fim de levar em conta as situações em que essas estruturas compostas são submetidas a momentos de sobrecarga, Al-Deen *et al.* (2012) e Fan *et al.* (2010) estudaram esse tipo de estresse em suas obras. Adicionalmente, Xue *et al.* (2008) estudou vigas mistas protendidas para fornecer dados sobre o relaxamento dos cabos.

Hoje há muitos tipos de conectores de cisalhamento, mas todos os estudos utilizaram conectores do tipo *stud* para a ligação de cisalhamento nas vigas mistas. Somente em Ban *et al.* (2015), também foram utilizados dois outros tipos de conectores com parafusos e uma laje de concreto e viga de aço sem conector de cisalhamento. Isso pode ser devido à dificuldade de execução de obras de longo prazo. É preferível usar o tipo mais comum de conector de cisalhamento.

Em relação ao tipo de laje estudado nas obras, quase todas as obras utilizaram lajes maciças. Somente em Al-Deen *et al.* (2011a), foram utilizadas lajes *steel deck*. Lajes maciças são mais fáceis de prever, pois sua geometria é a mesma longitudinalmente, mas com o surgimento de tipos mais eficientes de lajes de concreto, são necessários mais trabalhos para estudar outros modelos de laje.

Para o tipo de construção, foi separado aqui neste trabalho: Construção não escorada e escorada. Al-Deen *et al.* (2011a) estudou apenas Construção Não Apoiada, Al-Deen *et al.* (2011b) e Ban *et al.* (2015) estudaram os dois tipos e o restante dos artigos utilizaram a Construção Apoiada. A construção não escorada pode aumentar os perfis de aço, mas pode reduzir o tempo de construção. Para o comportamento a longo prazo, o uso de construção não escorada permite que o peso próprio do concreto seja suportado pela viga de aço no momento da concretagem, evitando assim a fluência no concreto devido a esta carga permanente (Al-Deen *et al.*, 2011).

Para a resistência do concreto, a resistência média do concreto de 29,06 MPa com desvio padrão de 3,67 MPa. Assim, nenhuma das obras utilizou concreto de alta resistência, o que aumentaria a dificuldade de conseguir maiores deformações, pois a carga teria que ser maior, porém é desafiador manter cargas maiores para testes de longa duração.

Em relação ao limite de escoamento do conector, os conectores tipo stud apresentaram resistência média de 396,8 MPa; para o tipo parafuso, foi de 852,2 MPa. Comparando com a resistência da viga de aço, que teve resistência média de 330,6 MPa, os valores dos conectores stud são próximos, mas os tipos *blind-bolt* superaram em mais de 400 MPa a resistência da viga de aço.

Para avaliar os ensaios de longa duração, os trabalhos observaram as flechas nas vigas mistas ao longo do tempo. Para isso, algumas vigas foram submetidas apenas ao seu peso próprio, e para outras foi adicionado carregamento externo. Todos os trabalhos apresentaram carga externa em suas pesquisas. No entanto, Al-Deen *et al.* (2011a), Al-Deen *et al.* (2011b), Al-Deen *et al.* (2012), e Bradford & Gilbert (1991) adicionaram amostras submetidas apenas ao peso próprio.

Com relação ao grau de ligação nas lajes mistas, nem todos os trabalhos apresentaram o grau utilizado. No entanto nos trabalhos com essa informação fornecida, a variação foi de 0,46 a 1, sendo que este último representaria uma conexão de cisalhamento total. Isso poderia nos fornecer o comportamento de longo prazo de diferentes graus de conexão de cisalhamento.

O tempo de carregamento é um dos parâmetros mais importantes ao estudar o comportamento a longo prazo, pois fornecerá dados precisos sobre como a seção se comportará ao longo do tempo. A maioria dos trabalhos apresentou tempo de carregamento inferior a um ano. No entanto, Fan *et al.* (2010) estudaram o comportamento de vigas erradas por quase três anos, o que proporcionará um melhor resultado para prever a flecha por períodos de tempo mais prolongados.

Como estratégia metodológica, todos os estudos apresentaram alguma variação na configuração experimental de alguma forma. No entanto, todos tinham vigas mistas submetidas a carregamentos de longa duração, como estavam anteriormente nos critérios de exclusão. Para entender melhor as variações de layout e o objetivo principal do trabalho, a Tabela 6 apresenta as principais características da metodologia e a quantidade de modelos utilizados na pesquisa.

Tabela 5. Visão geral dos estudos incluídos.

Ref.	Esforço estudado	Tipo do conector	Tipo de laje	Tipo de construção	Resistência do concreto (MPa)	Tensão de escoamento do conector (MPa)	Tensão de escoamento da viga de aço (MPa)	Tipo de carregamento	Grau de conexão	Tempo de carregamento (Dias)
Al-Deen <i>et al.</i> (2011a)	SM	Stud	SD	UP	26.1	351.6	326.98	SW and EL	0.79	134
Al-Deen <i>et al.</i> (2011b)	SM	Stud	SS	UP and PP	27.7	351.6	324.27	SW and EL	0.5	222 and 461
Al-Deen <i>et al.</i> (2012)	SM and HM	Stud	SS	PP	27.65	351.6	323	SW and EL	0.93 and 0.46	130
Ban <i>et al.</i> (2015)	SM	BB ¹ , Stud ² and NC	SS	UP and PP	34.4	852.2 ¹ and 394.4 ²	404.85	EL	NI	251
Bradford and Gilbert (1991)	SM	Stud	SS	PP	31.1	NI	NI	SW and EL	NI	250
Fan <i>et al.</i> (2010)	SM and HM	Stud	SS	PP	24.5 and 34.0	NI	303.6	EL	1	1085
Xue <i>et al.</i> (2008)	PSD and SM	Stud	SS	PP	27.1	400.0	301	EL and PSD	NI	360
Notes:										
	SM	Momento Positivo				SS			Laj maciça	
	HM	Momento Negativo				UP			Não escorada	
	PSD	Protensão				PP			Escorada	
	BB	Parafuso				NI			Não informado	
	NC	Sem conector				SW			Peso Próprio	
	SD	Steel Deck				EL			Carregamento Externo	

Tabela 6. Principais características da metodologia.

Ref.	Descrição do setup	Justificativa do trabalho	Número de modelos
Al-Deen <i>et al.</i> (2011a)	Ensaio de longo prazo de vigas compostas aço-concreto simplesmente apoiadas em escala real conectadas por studs sujeitas a peso próprio e carga externa.	Investigar seu comportamento de longo prazo e como isso afeta sua resposta final e fornecer dados de referência para a modelagem numérica.	2
Al-Deen <i>et al.</i> (2011b)	Ensaio de longo prazo de vigas compostas aço-concreto simplesmente apoiadas em escala real conectadas por studs sujeitas a peso próprio e carga externa..	Comparar o comportamento de longo prazo dessas vigas em relação às condições de cura e carregamento.	3
Al-Deen <i>et al.</i> (2012)	Ensaio de longo prazo de vigas mistas em vigas contínuas conectadas utilizando uma placa lateral da alma com conectores do tipo stud submetidos a momentos negativos.	Avaliar o estado limite de utilização de tais juntas em relação ao seu comportamento dependente do tempo.	6
Ban <i>et al.</i> (2015)	Ensaio de longo prazo de vigas compostas aço-concreto simplesmente apoiadas em escala real conectadas por parafusos e conectores de cisalhamento do tipo stud sujeitos a carga externa.	Analisar o comportamento dependente do tempo de vigas mistas com conectores do tipo parafuso submetidas a cargas externas.	4
Bradford & Gilbert (1991)	Ensaio de longo prazo de vigas compostas aço-concreto simplesmente apoiadas em escala real conectadas por studs sujeitas ao peso próprio e carga externa.	Fornecer dados de referência para calibrar modelos teóricos mais complexos que incorporam fluência, retração e deslizamento do conector.	4
Fan <i>et al.</i> (2010)	Ensaio de longo prazo de vigas mistas simplesmente apoiadas e contínuas conectadas por conectores de cisalhamento do tipo stud submetidos a uma carga externa.	Examinar o comportamento a longo prazo de vigas mistas aço-concreto sob cargas externas..	4
Xue <i>et al.</i> (2008)	Ensaio de longa duração de vigas mistas protendidas e não protendidas conectadas por studs submetidas a uma carga externa.	Examinar o comportamento de longo prazo de vigas mistas protendidas submetidas a cargas externas por um ano.	3

Com relação aos parâmetros analisados nos estudos, pode-se observar um comportamento não uniforme em relação aos estudos na medida em que cada estudo tem uma abordagem metodológica diferente do assunto, tendo assim a análise de diferentes parâmetros. No entanto, apesar das diferentes abordagens, muitos parâmetros estão presentes em diversos trabalhos, refletindo os principais parâmetros relacionados ao comportamento a longo prazo das vigas mistas. A Tabela 7 mostra os parâmetros avaliados nesses estudos.

Tabela 7. Parâmetros avaliados.

Ref.	Retração	Fluência	Modelo analítico	Modelo numérico	Temperatura	Umidade	Fissuras	Push-outs	Ensaio de curta duração	Revisão de cálculo	Revisão de normas	Carga última	Parâmetros avaliados
Al-Deen <i>et al.</i> (2011a)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	Retração não uniforme; Peso Próprio vs. Carga Externa; Steel deck
Al-Deen <i>et al.</i> (2011b)	✓	✓		✓	✓	✓		✓		✓			Peso Próprio vs. Carga Externa; Construção escorada vs. Não escorada
Al-Deen <i>et al.</i> (2012)	✓	✓			✓	✓	✓	✓		✓			Configuração de carga; Junta de viga de aço
Ban <i>et al.</i> (2015)	✓	✓		✓	✓	✓		✓		✓			Diferentes tipos de conectores de cisalhamento; não apoiado vs. apoiado
Bradford & Gilbert (1991)	✓	✓						✓		✓			Peso Próprio vs. Carga Externa; Diferentes intervalos de Stud
Fan <i>et al.</i> (2010)	✓				✓	✓	✓	✓		✓	✓		Diferentes tensões; Diferentes resistências do concreto; Rachaduras
Xue <i>et al.</i> (2008)			✓							✓	✓		relaxamento de tendões de protensão
	86%	71%	29%	43%	71%	71%	43%	86%	14%	100%	29%	14%	



3.3 Discussão

Ainda que os estudos com vigas mistas analisados neste trabalho mostrem diferenças consideráveis entre as propriedades dos materiais, vãos, geometria da estrutura, tipo de carregamento, etc., esta parte irá discutir algumas das principais características das obras analisadas.

3.3.1 Teste de resistência última

O foco neste trabalho é o comportamento de longo prazo, mas em Al-Deen *et al.* (2011a), a viga mista também é submetida a um ensaio de curta duração para ver se a sua resistência à ruptura sofreu alguma diminuição devido ao ensaio de longa duração que lhe foi aplicado.

Em Al-Deen *et al.* (2011a), A capacidade máxima de flexão da viga observada no experimento foi bem maior do que a capacidade máxima de flexão esperada. Com base nesses resultados, pode-se concluir que a resposta final não foi afetada pelos efeitos do tempo para a faixa geométrica e material considerada neste estudo.

No entanto, deve-se notar que a carga aplicada no teste de longa duração foi de apenas 14% da capacidade máxima de flexão no teste final. Por causa disso, outros estudos devem tentar outra porcentagem de resistência para determinar como cargas maiores de longo prazo podem afetar o comportamento de vigas mistas.

3.3.2 Curvas de deflexão x tempo

Deve-se notar que a fluência e a retração são dois fatores principais que influenciam o comportamento de vigas mistas submetidas a vigas de longa duração. A retração funcionará de forma diferente em momentos positivos e negativos; no momento positivo, acompanhará a compressão do concreto, diminuindo o comprimento do concreto. Porém, no momento negativo, as tensões vão provocar tração no concreto, mas a retração vai provocar tensões no sentido contrário. Dessa forma, a deflexão também pode diminuir com o tempo.

Devido às suas diferenças de comportamento, vamos separar os tópicos das vigas submetidas a momentos positivos e negativos.

- Vigas mistas submetidas a momentos positivos

Em todos os trabalhos selecionados para esta pesquisa, a tendência geral é de uma alta taxa de aumento da deflexão para o período inicial após o carregamento, seguida de uma taxa mais gradual de aumento da deflexão. Em quase todos os estudos, exceto Fan *et al.* (2010) e Xue *et al.* (2008), não houve nenhuma ou quase nenhuma diminuição da deflexão ao longo do teste.

Em Fan *et al.* (2010), as flechas das vigas mistas tiveram um aumento mais gradativo nos primeiros quatro meses após o carregamento, atingindo seu primeiro pico de flecha durante esse tempo, depois oscilando devido à variação das condições ambientais. Isso pode ser explicado pelo fato de que a fluência e retração do concreto se desenvolveram quase inteiramente durante os primeiros quatro meses. Para o restante do teste, observou-se uma alta correlação: a diminuição progressiva da deflexão foi acompanhada pelo aumento progressivo da temperatura e/ou umidade, e o inverso também foi verdadeiro.

O trabalho de Xue *et al.* (2008) não forneceu informações sobre temperatura ou umidade, portanto, não foi possível avaliar a influência desses parâmetros na diminuição da deflexão no período anterior do teste. No entanto, o rápido relaxamento dos cabos protendidos pode ter causado isso, pois não foi observada diminuição da flecha para a viga mista não protendida testada.

Um dado essencial sobre as curvas de deflexão x tempo é a deflexão máxima adquirida pelos corpos de prova por fluência e retração e a relação entre esta e a deflexão instantânea. A Figura 3 mostra a proporção de deflexão de longo prazo e deflexão instantânea (δ_{lt}/δ_i). Os corpos de prova são divididos pelas obras selecionadas e pelo tipo de carregamento.

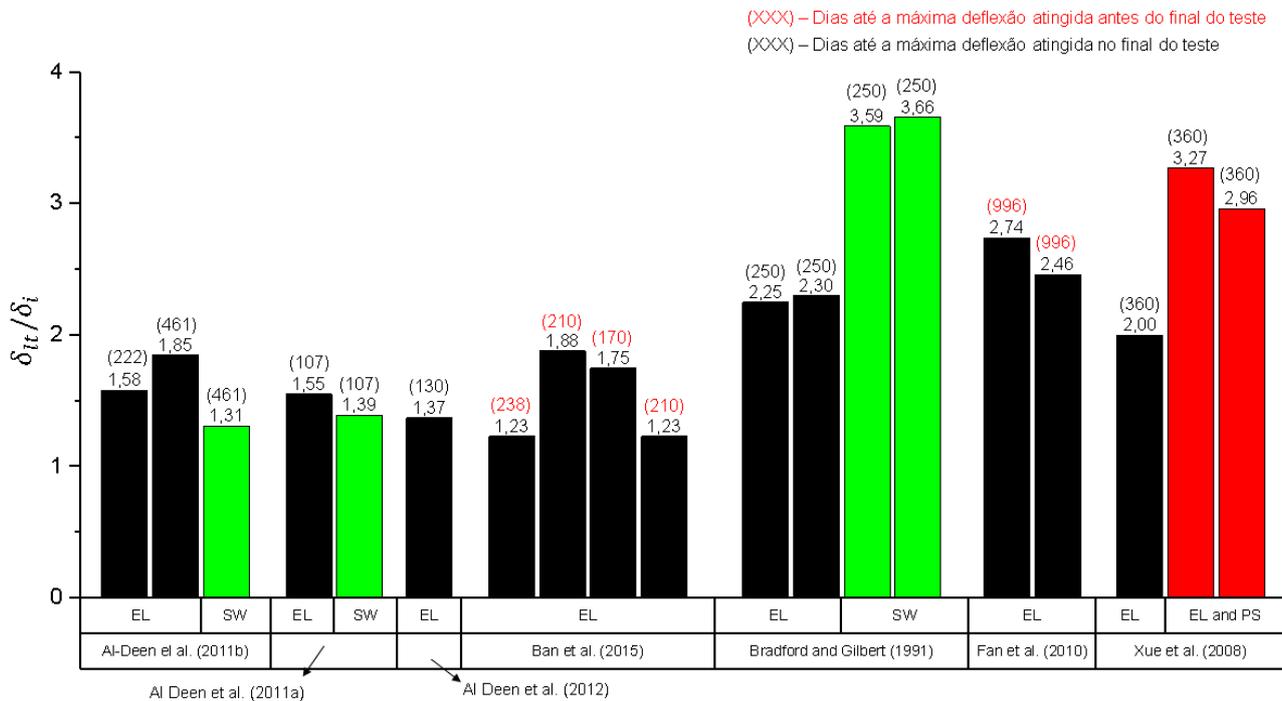


Figura 3 - Razão entre deflexão de longo prazo e deflexão instantânea (δ_{lt}/δ_i) dos estudos selecionados.

Na Figura 3 é possível observar que o aumento da deflexão teve uma variação significativa ao longo do ensaio, que pelo menos houve um aumento da deflexão em 23% por fatores de longo prazo. Além disso, esses valores dependem do valor da deflexão instantânea. Por exemplo, em Bradford & Gilbert (1991), o aumento da flecha em valor absoluto foi maior para as vigas submetidas ao carregamento externo do que quando submetidas apenas ao peso próprio. Porém, como a deformação do peso próprio foi bem menor, a relação δ_{lt}/δ_i foi maior para estes últimos. Para tanto, diferentes valores de porcentagem da resistência última das vigas mistas podem ocasionar valores muito diferentes para δ_{lt}/δ_i .

Além disso, na Figura 3 para Xue *et al.* (2008), é possível perceber que as vigas protendidas apresentam maior aumento de flecha do que as não protendidas, o que pode ser explicado pelo fato de que além da fluência e retração, há também o efeito da relaxação dos cabos de protensão.

Além disso, o número de dias de teste afetaria os resultados de deflexão, com testes durando até 1085 dias. A maioria dos trabalhos selecionados apresentou deflexão máxima ao final do ensaio, mostrando que poderia aumentar a deflexão com mais tempo.

A Figura 4 resume o multiplicador da deflexão instantânea por um *boxplot*. Eurocode 4 (2004) vigas mistas não protendidas e protendidas têm proporções de flechas de longo prazo para



instantâneas de 1,4 e 1,5 por um ano, respectivamente. Além disso, de acordo com o Chinese Code GB50017-2017, vigas mistas protendidas e não protendidas têm proporções de deflexão de longo prazo para instantânea de 1,3 e 1,2 por um ano, respectivamente.

A ABNT NBR 8800:2008 não menciona diferenças de efeitos em vigas mistas protendidas e não protendidas. No entanto, ele diz que, para considerar os efeitos de longo prazo, pode simplesmente multiplicar a deflexão de curto prazo por 3.

Com isso, o Chinese Code GB50017-2017 e o Eurocode 4 (2004) não abrangem metade dos resultados apresentados nesta revisão sistemática. No entanto, a ABNT NBR 8800:2008 abrange mais de 75% dos resultados do aumento da flecha. Portanto, como todos os códigos apresentados aqui não cobrem todos os resultados nesta revisão sistemática, eles devem ser revisados para calcular valores mais altos δ_{lt}/δ_i .

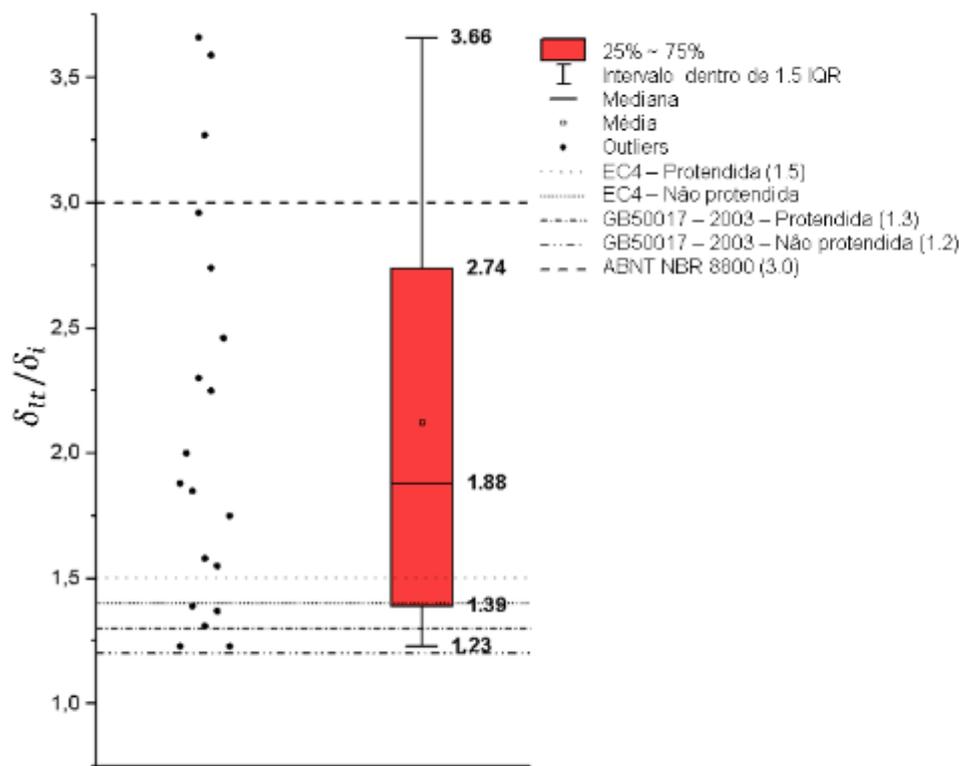


Figura 4 - Boxplot de deflexão de longo prazo e deflexão instantânea (δ_{lt}/δ_i) de estudos selecionados em comparação com códigos de design – momento positivo.

- Vigas mistas submetidas a momentos negativos.

Apenas nos trabalhos de Al-Deen *et al.* (2012) e Fan *et al.* (2010) tiveram espécimes submetidos ao momento negativo. Para esses casos, as variações nas deflexões observadas após o início do carregamento permaneceram pequenas em comparação com a magnitude dos deslocamentos instantâneos (Figura 5) em relação as vigas compostas submetidos a momento positivo, o que pode ser explicado, pois a retração estava atuando em direções opostas de fluência.

Em Al-Deen *et al.* (2012), mesmo os corpos de prova submetidos a uma carga maior para induzir fissuras pronunciadas não diferiram significativamente no aumento da flecha, e não houve novas fissuras no concreto ao longo do tempo. O comprimento das fissuras existentes não variou

com o tempo. Nesse estudo, também houve diferença no grau de interação por diferentes espaçamentos dos conectores de cisalhamento, mas isso também não causou uma variação significativa da flecha.

Fan *et al.* (2010) monitoraram uma rápida diminuição na deflexão durante o período de carregamento inicial, o que pode ser explicado pelas tensões na laje de concreto durante a retração do concreto. Após 80 dias, começaram a ocorrer fissuras na laje de concreto na região de flexão negativa. Eles interromperam a diminuição da deflexão, resultando em um ponto de quebra na curva de deflexão aos 80 dias de carregamento. Após 200 dias, a deflexão oscilou, mas principalmente devido à variação de temperatura e umidade.

No mesmo estudo, a comparação entre a flecha testada e a flecha calculada pelo Eurocode 4 (2004) mostrou que o método do módulo efetivo é preciso para calcular a flecha instantânea. No entanto, não é preciso no cálculo de flechas de longo prazo, especialmente para vigas mistas sob momentos fletores negativos.

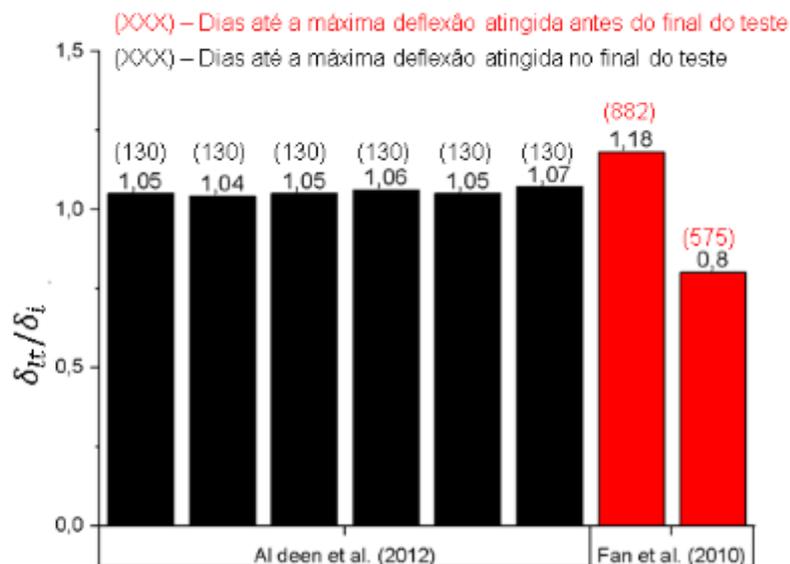


Figura 5 - Boxplot de deflexão de longo prazo e deflexão instantânea (δ_{lt}/δ_i) de estudos selecionados em comparação com códigos de design – momento negativo.

3.3.3 Curvas de deslizamento x tempo

Para o deslizamento, pode-se observar nos trabalhos selecionados que a resposta a longo prazo dependerá de qual terá efeitos mais substanciais, retração ou fluência. Em Al-Deen *et al.* (2011a) é possível ver a diferença de vigas submetidas a momentos positivos apenas pelo peso próprio ou carregamento externo. Quando é apenas o peso próprio, a retração afeta o comportamento a longo prazo, então a laje de concreto tende a escorregar para dentro, o que é considerado um deslizamento negativo neste trabalho. No entanto, quando o carregamento externo é adicionado, a fluência governará o comportamento a longo prazo, mas às vezes pode não superar a retração e o escorregamento a longo prazo tende a ser próximo de zero. É possível confirmar esse comportamento em Al-Deen *et al.* (2011b), Al-Deen *et al.* (2012) e Bradford & Gilbert (1991).

Apenas Al-Deen *et al.* (2012) apresentou deslizamentos para vigas mistas submetidas a momentos negativos. Da mesma forma que as medidas de deflexão, os valores de escorregamento de longo prazo foram menores que os instantâneos.

3.3.4 Deformações

Apenas nos trabalhos de Al-Deen *et al.* (2011a), Al-Deen *et al.* (2011b), Al-Deen *et al.* (2012), Bradford & Gilbert (1991) e Fan *et al.* (2010) tiveram medições de deformação. Quando as vigas foram submetidas a momentos positivos, todos os estudos apresentaram o mesmo comportamento, a mudança no eixo neutro dos corpos de prova movendo-se para baixo. Portanto, dependendo de onde o eixo neutro da seção composta estava situado, as deformações do aço ou do concreto podem mudar de tração para compressão.

O único trabalho que mostrou medidas de deformações em vigas mistas submetidas a momentos negativos foi Fan *et al.* (2010). Para esta obra, durante os primeiros 50 dias, as deformações do concreto e das armaduras diminuíram gradativamente devido à retração do concreto. No entanto, a fissuração do concreto incorreu em um aumento abrupto da deformação do concreto, resultando em uma diminuição repentina da deformação do aço na mesa comprimida. Portanto, para evitar mudanças significativas na deformação, mais reforço deve ser fornecido para reduzir a fissuração do concreto.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, uma revisão sistemática foi realizada para propor uma nova discussão sobre o comportamento a longo prazo de vigas mistas aço-concreto. Embora existam muitos estudos sobre estruturas compostas, poucos têm dados experimentais que forneçam dados precisos para análises mais extensas, provavelmente devido ao alto custo e complexidade dos testes de longo prazo. Com isso, apenas 7 foram selecionados pelos critérios de exclusão.

Para isso, foi realizada uma análise bibliométrica dos estudos para identificar as principais ideias da aplicação dos conectores e as estratégias metodológicas utilizadas pelos autores. Além disso, diversas características observadas nas obras selecionadas foram discutidas qualitativamente. Assim, tem como conclusões:

Cargas de longo prazo podem não alterar a capacidade de carga do membro misto para a faixa geométrica e material considerada neste estudo.

Para vigas submetidas a momentos positivos, em todos os trabalhos selecionados para esta pesquisa, a tendência geral é um aumento de flecha elevado para o período inicial após o carregamento, seguido de um aumento mais gradual da taxa de flecha. No entanto, para vigas mistas submetidas a momentos negativos, as variações nas flechas observadas após o dia do carregamento permaneceram pequenas em comparação com as vigas mistas submetidas a momentos positivos, o que essa retração poderia explicar estar atuando em direções opostas à fluência quando o momento de esmagamento é aplicado.

Quando submetido a cargas de longa duração, o eixo neutro dos corpos de prova se move para baixo em vigas mistas submetidas a momentos positivos.

De acordo com os trabalhos selecionados, o multiplicador de deflexão instantânea fornecido por Chinese code GB50017-2017, Eurocode 4 (2004), e ABNT NBR 8800:2008 não cobrem todos os resultados apresentados nesta revisão sistemática. Portanto, aqui, propõe-se obter as flechas verticais de longo prazo para um ano de vigas mistas não protendidas usando 3,66 como multiplicador da flecha instantânea e 3,26 para vigas mistas protendidas.

Mais trabalhos experimentais são necessários para validar a gama geométrica e de materiais e as diferentes relações entre a resistência máxima e as cargas de longo prazo. Uma vez que a maioria dos trabalhos utilizou apenas uma pequena fração da resistência última das vigas mistas.

5 REFERENCES

- ABNT - NBR 8800:2008. (2008). *NBR 8800: Design of steel and composite structures for buildings*. Rio de Janeiro.
- Al-Deen, S., Ranzi, G., & Vrcelj, Z. (2011a). Full-scale long-term and ultimate experiments of simply-supported composite beams with steel deck. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(10), 1658–1676. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.010>
- Al-Deen, S., Ranzi, G., & Vrcelj, Z. (2011b). Full-scale long-term experiments of simply supported composite beams with solid slabs. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.001>
- Al-Deen, S., Ranzi, G., & Vrcelj, Z. (2012). Long-term experiments of composite beams and connections. *Magazine of Concrete Research*, 64(9), 849–861. <https://doi.org/10.1680/mac.10.00189>
- Ban, H., Uy, B., Pathirana, S. W., Henderson, I., Mirza, O., & Zhu, X. (2015). Time-dependent behaviour of composite beams with blind bolts under sustained loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.05.004>
- Bradford, M. A., & Gilbert, R. I. (1991). Time-dependent behaviour of simply-supported steel-concrete composite beams. *Magazine of Concrete Research*, 43(157), 265–274.
- Bradford M.A., S., & Gilbert, R. I. (1992). Composite beams with partial interaction under sustained loads. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 118(7), 1871–1883. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:7\(1871\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:7(1871))
- Chadegani, A. A., Salehi, H., Md Yunus, M. M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., & Ale Ebrahim, N. (2013). A comparison between two main academic literature collections: Web of science and scopus databases. *Asian Social Science*, 9(5), 18–26. <https://doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>
- European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 4 — Design of composite steel and concrete structures. *Strategy*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009305.pub2>
- European Food Safety Authority. (2010). Application of systematic review methodology to food and feed safety assessments to support decision making. *EFSA Journal*, 1–90.
- Fan, J., Nie, J., Li, Q., & Wang, H. (2010). Long-term behavior of composite beams under positive and negative bending. I: Experimental study. *Journal of Structural Engineering*, 136(7), 849–857. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000175](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000175)



- Gilbert, R. Ian, & Bradford, M. A. (1995). Time-dependent behavior of continuous composite beams at service loads. *Journal of Structural Engineering (United States)*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:2\(319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(319))
- Gilbert, R I, Bradford, M. A., Gholamhoseini, A., & Chang, Z.-T. (2012). Effects of shrinkage on the long-term stresses and deformations of composite concrete slabs. *Engineering Structures*, 40, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.016>
- Leite, M. B., & Pereira Júnior, W. M. (2019). UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO. *HOLOS*, 3, 1–18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15628/holos.2019.6282>
- Liu, X., Bradford, M. A., & Erkmen, R. E. (2013). Time-dependent response of spatially curved steel-concrete composite members. II: Curved-beam experimental modeling. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 139(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000699](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000699)
- Mirza, O., & Uy, B. (2010). Finite element model for the long-term behaviour of composite steel-concrete push tests. *STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES*, 10(1), 45–67.
- National Standard of the People's Republic of China. (2017). *GB 50017-2017 - Standard for design of steel structures*.
- Nguyen, Q.-H., & Hjiij, M. (2016). Nonlinear Time-Dependent Behavior of Composite Steel-Concrete Beams. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 142(5).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001432)
- Nguyen, Q.-H., Hjiij, M., & Uy, B. (2010). Time-dependent analysis of composite beams with continuous shear connection based on a space-exact stiffness matrix. *Engineering Structures*, 32(9), 2902–2911. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.05.009>
- Ranzi, G., Leoni, G., & Zandonini, R. (2013). State of the art on the time-dependent behaviour of composite steel-concrete structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 252–263.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.08.005>
- Rossi, A., Nicoletti, R. S., Souza, A. S. C., & Martins, C. H. (2022). Investigação da flambagem lateral com distorção em vigas mistas de aço e concreto com lajes alveolares. *HOLOS*, 8, 28.
<https://doi.org/https://orcid.org/0000-0001-9590-1554>
- Xue, W., Ding, M., He, C., & Li, J. (2008). Long-term behavior of prestressed composite beams at service loads for one year. *Journal of Structural Engineering*, 134(6), 930–937.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:6\(930\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:6(930))

HOW CITE THIS ARTICLE

Nunes, Kildenberg Kaynan Felix. (2023). SYSTEMATIC REVIEW OF LONG-TERM BEHAVIOR IN COMPOSITE BEAMS. HOLOS, 4(39). Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/14693>



ABOUT THE AUTHORS

K.K.F. NUNES

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) – UFPB. Grupo de Pesquisa em Modelagem da Informação na Construção e Experimentação e Modelagem de Estruturas.

E-mail: kildenberg.nunes@ifpb.edu.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3818-4314>

L. R. A. COSTA

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) – UFPB. Grupo de Pesquisa em Modelagem da Informação na Construção e Experimentação e Modelagem de Estruturas.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9935-018X>

H. J. F. DIÓGENES

Professor Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) – UFPB. Grupo de Pesquisa em Modelagem da Informação na Construção e Experimentação e Modelagem de Estruturas.

E-mail: hidelbrando@ct.ufpb.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2480-7688>

M. I. B. VALENTE

Professora Doutora

Universidade do Minho, Portugal

E-mail: Isabelv@civil.uminho.pt

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0502-9956>

Editora Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: Eduardo Chahud e Arthur Gomes Dantas de Araújo



Submitted January 20, 2023

Accepted November 27, 2023

Published December 15, 2023

