

Influência da Protensão na Estabilidade Global de Estruturas: Uma revisão bibliométrica e sistemática

Charles Michel Lasta¹, Francieli Tiecher²

¹ Atitus Educação / Mestrado em Arquitetura e Urbanismo (PPGARQ) / charlesmichellasta@gmail.com

² Atitus Educação / Mestrado em Arquitetura e Urbanismo (PPGARQ) / francieli.bonsembiante@atitus.edu.br

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão bibliométrica e sistemática da influência da protensão na estabilidade global de estruturas. Seguindo uma metodologia adaptada do método PRISMA 2020, realizou-se uma mesma pesquisa em diferentes bases de dados, filtrou-se os resultados conforme critérios estabelecidos, e então efetuou-se uma análise bibliométrica das publicações, bem como a sistematização da leitura das publicações selecionadas, para se definir o atual estado da arte de conhecimento do assunto proposto. A partir dessa revisão, foi possível identificar que a maioria das publicações que relacionam estabilidade e protensão se referem a estudos do solo, e uma minoria realmente aborda a estabilidade global de estruturas, seja qual for o material empregado. Ao dar destaque às estruturas de concreto, nota-se que somente oito trabalhos encontrados tratam da estabilidade global da estrutura com relação com a protensão, e somente dois destes realmente comparam resultados numéricos de estabilidade global com e sem protensão. Isso mostra que o número de trabalhos sobre a estabilidade global de estruturas protendidas tende a continuar aumentando, especialmente nas estruturas de concreto, onde a não-linearidade física é impactada diretamente e deve ser explorada com maior afinco para que uma possível variação desse coeficiente possa ser validada e incluída na ABNT NBR 6118, e então poder ser utilizado em projetos reais no Brasil.

Palavras-chave

Estabilidade global; protensão; revisão sistemática; estruturas.

Introdução

Os primeiros usos e patentes do que hoje conhecemos como concreto surgiram no século XIX, e desde então buscou-se ampliar o conhecimento e a aplicabilidade deste material. Em 1928 foi patenteado o conceito do que viria a se tornar o concreto protendido, partindo-se da ideia transformadora de que o concreto, sozinho, poderia resistir aos esforços de tração, compressão e cisalhamento sem fissurar. Desde então, a protensão possibilitou o projeto de estruturas cada vez mais esbeltas, visto que melhorou a performance do concreto em si, reduzindo drasticamente o peso próprio das estruturas com uma mesma capacidade de carga, quando comparadas às estruturas em concreto armado (VAN DAMME, 2018).

Com o passar dos anos, o desenvolvimento no campo das estruturas tem se tornado cada vez mais evidente. O uso do concreto protendido está crescendo no Brasil, por fatores como a flexibilidade arquitetônica, proporcionada pela protensão, a diminuição de mão-de-obra e de consumo de materiais, e a agilidade de construção proporcionada por esse método. Além disso, a necessidade de se construir estruturas cada vez mais altas, especialmente nas grandes cidades, onde o espaço urbano é limitado, impulsiona o surgimento de estruturas mais esbeltas a cada dia. Associando-se essas informações, chega-se a uma resultante de edificações altas, esbeltas, e sem a presença de vigas para formar pórticos, tornando a estabilidade global dessas estruturas um desafio a ser superado. O aprimoramento do parâmetro de não-linearidade física nas estruturas protendidas se torna relevante para a análise da estabilidade global nessas condições (FEITOSA e ALVES, 2015).

Apesar desse crescimento no uso de lajes em concreto protendido, seu desempenho frente à estabilidade global da estrutura ainda pode ser estudado com maior afinco. Trabalhos desenvolvidos

nessa área podem ser úteis para embasar uma possível alteração normativa da ABNT NBR 6118, visto que atualmente não é apresentada uma variação do coeficiente de não-linearidade física quando os elementos de concreto são protendidos. Diferentemente de algumas normas internacionais que possibilitam que sejam assumidos valores diferentes para lajes ou vigas quando as mesmas têm a influência da protensão, a NBR 6118 (ABNT, 2023) não faz menção a alguma variação nesse sentido, mesmo sendo evidente que um elemento protendido apresente uma fissuração muito menor quando comparado a um elemento sem protensão, o que diminui os efeitos da não-linearidade física do material. A seguir, os valores indicados no item 15.7.3 da NBR 6118 (ABNT, 2023) para consideração aproximada da não linearidade física, evidenciando a ausência de consideração da protensão para variação desses coeficientes:

- lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_c I_c$
- vigas: $(EI)_{sec} = 0,4 E_c I_c$ para $A_s' \neq A_s$ e
 $(EI)_{sec} = 0,5 E_c I_c$ para $A_s' = A_s$
- pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_c I_c$

Onde, I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto, e E_c é o valor representativo do módulo de deformação do concreto.

Diante disso, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma revisão bibliométrica e sistemática sobre a influência da protensão na estabilidade global de estruturas, com ênfase em estruturas de concreto de múltiplos pavimentos.

Procedimentos metodológicos

Este trabalho foi baseado em uma revisão bibliométrica e sistemática da literatura, com o intuito de compreender o atual estado da arte de conhecimento acerca da influência da protensão na estabilidade global de estruturas. A metodologia aplicada neste estudo deriva do método Prisma 2020, buscando em bases de dados conhecidas, trabalhos sobre o assunto mencionado, e aplicando critérios específicos para definir sua inclusão, ou não, na revisão proposta. Dessa forma, apresenta-se uma transparência metodológica e reduz-se a intervenção do pesquisador nas decisões adotadas (PAGE *et al.*, 2021).

Foram elencadas cinco bases de dados para fazerem parte da pesquisa, sendo elas a Scopus, Web of Science, Scielo, Scite e Google Scholar. As buscas ocorreram no idioma inglês, e as palavras-chave adotadas foram *stability* e *prestressed* (“estabilidade” e “protendido”, na tradução livre). Foi aceita a presença das palavras-chave em qualquer parte do trabalho, não se limitando somente ao título ou resumo.

O recorte temporal empregado foi entre os anos de 2015 e 2024, evidenciando a atenção do trabalho às pesquisas atuais sobre o assunto. Após a busca inicial em cada base de dados, foram compilados 152 trabalhos resultantes, 105 da Scopus, 3 da Web of Science, 2 da Scielo, 17 da Scite, e 25 do Google Scholar, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Número de trabalhos encontrados nas bases de dados

Base de dados	Resultados
Scopus	105
Web of Science	3
Scielo	2
Scite	17
Google Scholar	25
TOTAL	152

Fonte: Próprio autor (2024)

O primeiro critério de exclusão dos trabalhos encontrados foi a repetição, ou seja, foram eliminados 12 resultados que se repetiram em diferentes bases de dados. Mais um artigo foi excluído por se tratar de um artigo retratado, ou seja, seus resultados foram apresentados como não confiáveis. Nesse ponto restaram 139 resultados.

Um segundo corte no número de estudos aconteceu após a leitura dos títulos dos trabalhos, tendo sido excluídos 96 artigos por não tratarem de uma temática alinhada com o tema central deste estudo. A partir dos 43 artigos restantes, como último critério de seleção, realizou-se a leitura dos resumos e das palavras-chave, e outros 31 estudos foram retirados da pesquisa por apresentarem um conteúdo não compatível com o objetivo deste artigo. Ao final, 12 trabalhos foram lidos integralmente e incluídos na revisão sistemática. A Figura 2 apresenta o fluxograma da revisão sistemática realizada.



Figura 2 – Fluxograma do procedimento de revisão sistemática adotado

Fonte: Próprio autor (2024)

Os resultados utilizados para a revisão bibliométrica e sistemática foram organizados com auxílio do *software* Excel e então analisados de acordo com seu ano de publicação, país da instituição, tipo de pesquisa, e temática abordada.

Resultados e discussões

Revisão bibliométrica

Conforme apresentado no capítulo de procedimentos metodológicos, o presente trabalho buscou trabalhos a partir do ano de 2015, procurando entender o atual momento das pesquisas relacionando à estabilidade global de estruturas com o uso da protensão. A Figura 3 mostra como as pesquisas, de modo geral, têm aumentado ao longo dos últimos anos, com uma linha de tendência ascendente. Nota-se que o aumento não é linear, tendo apresentado diminuição entre os anos de 2016 e 2018, e de 2022 para 2023.

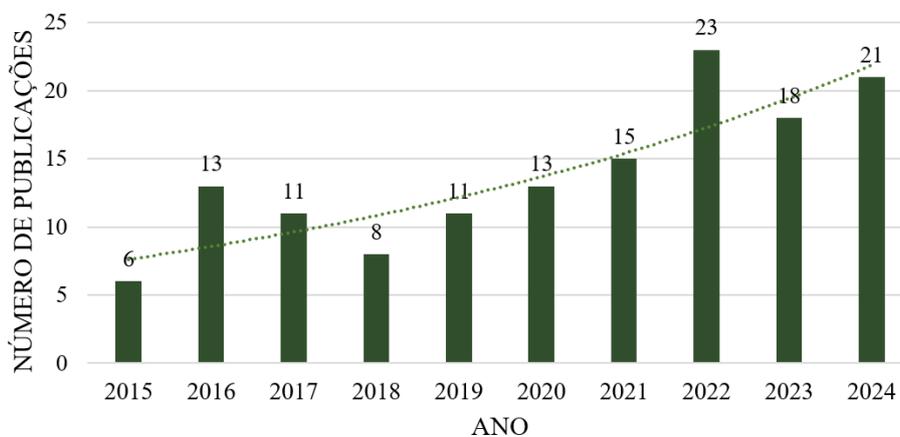


Figura 3 – Evolução temporal das publicações nas cinco bases de dados utilizadas

Fonte: Próprio autor (2024)

No que diz respeito aos países com maior contribuição em pesquisas relacionando a protensão e estabilidade, percebe-se uma concentração desproporcional de publicações em instituições chinesas quando comparada a outros países. A Figura 4 apresenta essa disparidade, mostrando a China em primeiro lugar, com 80 publicações, seguida dos Estados Unidos, com 10, e do Brasil, com 8 publicações.

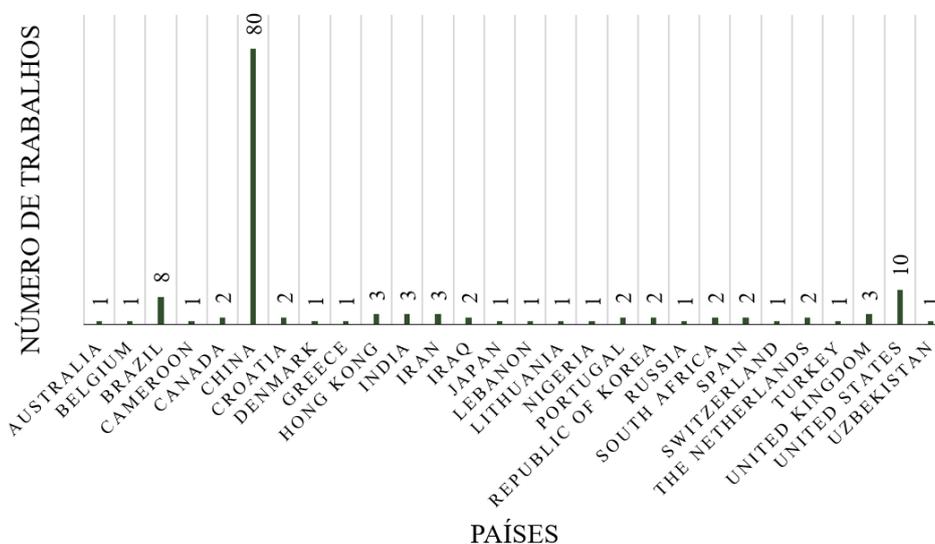


Figura 4 – Contribuição de cada país para o tema

Fonte: Próprio autor (2024)

Analisando os tipos de estudos encontrados, conforme mostra a Figura 5, nota-se que os artigos científicos representam 76% dos resultados, seguidos por trabalhos de revisão, com 13%, e de trabalhos de conferências, com 6%. Reportagens, livros, e capítulos de livros somados alcançam 5% do total de 139 publicações analisadas nesta revisão bibliométrica.

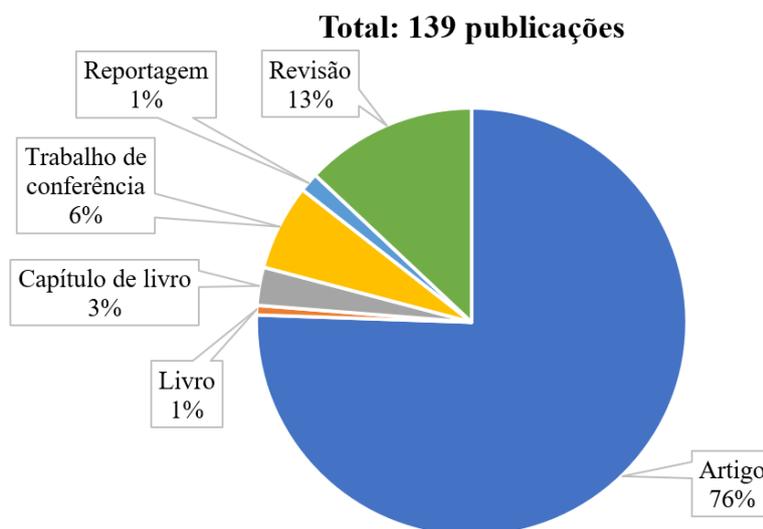


Figura 5 – Categoria dos trabalhos

Fonte: Próprio autor (2024)

Revisão sistemática

Em sua maioria, as publicações encontradas referem-se à estabilidade de solo (taludes, túneis, aterros e contenções), situações de terremotos, cúpulas, ou ainda tratam da estabilidade local de elementos, e não global (especialmente de pilares e treliças metálicas). Assim, nota-se que as pesquisas no âmbito da estabilidade global de estruturas protendidas têm espaço para aumentarem não apenas nas estruturas de concreto, mas sim em qualquer outro material construtivo. A Tabela 2 apresenta o título, autores e país de origem das 12 publicações utilizadas para a revisão sistemática deste trabalho.

Tabela 2 – Publicações utilizadas na revisão sistemática

	TÍTULO	AUTORES	PAÍS
1	Analysis of factors affecting the stability of large-span cable-braced timber gridshells	G. Wang, L. Zhang, C. Xu, S. Zhang, Z. Zhou, S. Guo, X. Ji, H. Lei	China
2	Multi-material topology optimization for maximizing structural stability under thermo-mechanical loading	Y. Wang, O. Sigmund	Dinamarca
3	Analysis of constructive effect and soil-structure interaction in tall building projects with shallow foundations on sandy soils	O. C. Marques, L. A. Feitosa, K. V. Bicalho, E. C. Alves	Brasil
4	Topology-Finding of Tensegrity Structures Considering Global Stability Condition	Y. Wang, X. Xu, Y. Luo	China
5	Concrete material science: Past, present, and future innovations	H. Van Damme	Estados Unidos

6	Simplified Approach Based on the Natural Period of Vibration for Considering Second-Order Effects on Reinforced Concrete Frames	D. G. Reis, G. H. Siqueira, L. C. M. Vieira Jr, R. D. Ziemian	Brasil
7	Static properties and stability of segmentally prestressed cylindrical reticulated mega-structures	Y. He, J. Wang, X. Zhou, Q. He	China
8	Study of global stability of tall buildings with prestressed slabs	L. A. Feitosa, E. C. Alves	Brasil
9	Analysis of instability of tall buildings with prestressed and waffle slabs	V. M. Passos, L. A. Feitosa, E. C. Alves, M. S. Azevedo	Brasil
10	Statistical analysis of second order effects variation with the stories height of reinforced concrete buildings	D. M. Oliveira, N. A. Silva, C. C. Ribeiro, S. E. C. Riberio	Brasil
11	Floors number influence on the instability parameter of reinforced concrete frame-braced buildings	R. J. Ellwanger	Brasil
12	The State of Knowledge and Practice in Concrete Structure Design for Earthquake	J. S. Ma	Estados Unidos

Fonte: Próprio autor (2024)

Após a leitura completa das 12 publicações discriminadas na Tabela 2, as mesmas foram agrupadas de acordo com as suas abordagens sobre a influência da protensão na estabilidade global de estruturas. Sendo assim, verificou-se que Wang *et al.* (2024) analisaram os fatores que afetam a estabilidade de cabos de contraventamento em grandes vãos de estruturas de madeira, e, mesmo considerando as não-linearidades física e geométrica dos materiais, o estudo mostra que a protensão não necessariamente melhora a performance do cabo.

Wang, Xu e Luo (2020) realizaram um trabalho de otimização da tipologia de estruturas de tensegridade, considerando sua estabilidade global. A publicação mostra que o nível de protensão de uma estrutura de tensegridade pode afetar sua rigidez significativamente. Porém, como a protensão não pode ser aumentada infinitamente, pela possibilidade de causar flambagem no elemento protendido, utilizar a protensão não é garantia de estabilidade global, e pode ser necessário uma alteração na tipologia para aumentar a rigidez da estrutura e evitar instabilidade a nível local.

Os estudos de Wang e Sigmund (2023) e de He *et al.* (2020) apresentam a melhora da estabilidade global de estruturas metálicas quando é utilizada a protensão, e, além disso, evidenciam o aumento da resistência à flambagem dos elementos protendidos, fator que contribui diretamente para uma maior estabilidade da estrutura. Os resultados de He *et al.* (2020) também mostram que grandes vãos causam um grande deslocamento da estrutura, o que provoca uma baixa na estabilidade e um alto consumo de aço, deteriorando a qualidade técnica e os indicadores econômicos, mas, fazendo-se uso da protensão, todos esses itens podem ser melhorados.

O restante das publicações selecionadas aborda estruturas de concreto, totalizando 8 trabalhos, aproximadamente 67% dos lidos por completo, confirmando ser esse o foco principal desta pesquisa. A análise da estabilidade global de estruturas de concreto, mas não a influência direta da protensão foi realizada por 4 trabalhos: (MARQUES *et al.*, 2021; REIS *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2017; ELLWANGER, 2019). Nos estudos apenas são citados conceitos e/ou é sugerido que a pesquisa seja ampliada para essa área. Oliveira *et al.* (2017), em sua análise da variação dos efeitos de 2ª ordem em função da altura dos pavimentos, em edifícios de concreto armado, descrevem que a estabilidade local

não garante a estabilidade global de uma estrutura, e vice-versa, e apresentam uma revisão sobre o coeficiente gama-z, que é um dos parâmetros apontados na NBR 6118 (ABNT, 2023) para análise da estabilidade global de estruturas de concreto. Já Ellwanger (2019), aborda outra análise indicada na NBR 6118 (ABNT, 2023) sobre a estabilidade global de estruturas de concreto, apresentando uma revisão do parâmetro alfa, e enfatiza a importância de se estimar corretamente o parâmetro de não-linearidade física de um material, pois o mesmo tem influência direta na inércia da estrutura, e, conseqüentemente, na sua estabilidade global.

Nos estudos de Van Damme (2018) e Ma (2019) é feita a conceitualização de parâmetros e uma revisão técnica e histórica do concreto, onde a alta performance da protensão é citada, inclusive para a estabilidade da estrutura.

E, por fim, duas publicações realmente avaliam a influência da protensão na estabilidade global de estruturas de concreto, mostrando que ela pode aumentar a rigidez das estruturas, de acordo com a forma com que for utilizada. Feitosa e Alves (2015) estudaram a estabilidade global em edifícios altos com lajes protendidas, explorando alguns fatores que influenciam nessa estabilidade, inclusive a não-linearidade física dos materiais. Os autores concluem o estudo destacando que:

- (a) carga e rigidez são as variáveis que mais afetam a estabilidade global das estruturas, por isso utilizar materiais leves, como *steel-frame* e contrapisos leves melhoram a estabilidade global. Isso se torna ainda mais importante nas estruturas com lajes protendidas por conta da ausência de pórticos;
- (b) aumentar a espessura de lajes protendidas compensa na estabilidade global, pois apesar de aumentar a carga, a rigidez também é aumentada;
- (c) é importante considerar a laje como um diafragma rígido para o travamento da estrutura, bem como utilizar um coeficiente coerente de plastificação na ligação laje/pilar.

No trabalho de Passos *et al.* (2016) é feita uma análise da instabilidade de edifícios altos com lajes protendidas e nervuradas. As conclusões dos pesquisadores corroboraram com Feitosa e Alves (2015), ou seja, carga e rigidez são as variáveis que mais influenciam na estabilidade global da estrutura, e o aumento da espessura da laje também é um fator positivo para a estabilidade apesar do aumento na carga. Passos *et al.* (2016) ainda concluem que a maior alteração no coeficiente gama-z de estabilidade ocorreu com a variação do valor da não-linearidade física do concreto, e sugere que outros trabalhos estudem com maior ênfase esse assunto para que o mesmo possa ser estimado com maior precisão nos projetos reais.

Considerações finais

Após a busca e análise das publicações durante todo o processo metodológico, foi possível constatar que:

- Dentre todos os 139 resultados analisados, apenas 8 abordam estruturas de concreto, mesmo contando aqueles que não tratam diretamente da influência da protensão da estabilidade global, apenas citando conceitualmente. Esse número evidencia que a grande maioria das publicações que relacionam as palavras “estabilidade” e “protendido” não tratam do material construtivo mais utilizado nas edificações atualmente, que é o concreto. Ademais, apenas 12 publicações foram elencadas para leitura completa por serem as únicas que indicaram referir-se à estabilidade global de uma estrutura, seja qual for o seu material;
- Apesar do presente trabalho mostrar que o número de estudos sobre a influência da protensão na estabilidade global de estruturas está aumentando na última década, apenas dois trabalhos abordam diretamente a influência da protensão na estabilidade global de estruturas de concreto;

- A influência da não-linearidade física na estabilidade global dessas estruturas é citada como essencial, porém, mesmo assim, através da busca realizada, verificou-se que faltam estudos que aprofundem o conhecimento nesse coeficiente e consigam atingir resultados numéricos práticos, para serem usados em projetos de estruturas de concreto, contribuindo para a norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, a ABNT NBR 6118.

Em resumo, percebe-se que as publicações que relacionam estabilidade e protensão têm aumentado na última década, mas ainda há um campo vasto a ser explorado, especialmente no que diz respeito às estruturas verticais em concreto, e como uma variação da não-linearidade física pode ser abordada nesse contexto do uso da protensão, alterando a rigidez da estrutura, e, possivelmente, sendo incorporada à ABNT NBR 6118 para projetos de estruturas de concreto no Brasil.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: Abnt, 2023. 242 p.

ELLWANGER, R. J.. Floors number influence on the instability parameter of reinforced concrete frame-braced buildings. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1034-1057, out. 2019. FapUNIFESP (SciELO).

FEITOSA, L. A.; ALVES, E. C.. Study of global stability of tall buildings with prestressed slabs. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 196-224, abr. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

HE, Y.; WANG, J.; ZHOU, X.; HE, Q.. Static properties and stability of segmentally prestressed cylindrical reticulated mega-structures. **Thin-Walled Structures**, [S.L.], v. 155, p. 106949, out. 2020. Elsevier BV.

MA, J. S.. The State of Knowledge and Practice in Concrete Structure Design for Earthquake. **Concrete Structures In Earthquake**, [S.L.], p. 95-110, 2019. Springer Singapore.

MARQUES, O. C.; FEITOSA, L. A.; BICALHO, K. V.; ALVES, E. C.. Analysis of constructive effect and soil-structure interaction in tall building projects with shallow foundations on sandy soils: [s. l.]. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 1, mar. 2021. FapUNIFESP (SciELO).

OLIVEIRA, D. M.; SILVA, N. A.; RIBEIRO, C. C.; RIBEIRO, S.E. C.. Statistical analysis of second order effects variation with the stories height of reinforced concrete buildings. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 333-357, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO).

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; MOHER, D.. Updating guidance for reporting systematic reviews: development of the prisma 2020 statement. **Journal Of Clinical Epidemiology**, [S.L.], v. 134, p. 103-112, jun. 2021. Elsevier BV.

PASSOS, V. M.; FEITOSA, L. A.; ALVES, E. C.; AZEVEDO, M. S.. Analysis of instability of tall buildings with prestressed and waffle slabs. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 244-262, abr. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

REIS, D. G.; SIQUEIRA, G. H.; VIEIRA, L. C. M.; ZIEMIAN, R. D.. Simplified Approach Based on the Natural Period of Vibration for Considering Second-Order Effects on Reinforced Concrete Frames. **International Journal Of Structural Stability And Dynamics**, [S.L.], v. 18, n. 05, p. 1850074, maio 2018. World Scientific Pub Co Pte Lt.



VAN DAMME, H.. Concrete material science: past, present, and future innovations. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 112, p. 5-24, out. 2018. Elsevier BV.

WANG, Y.; SIGMUND, O.. Multi-material topology optimization for maximizing structural stability under thermo-mechanical loading. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, [S.L.], v. 407, p. 115938, mar. 2023. Elsevier BV.

WANG, Y.; XU, X.; LUO, Y.. Topology-Finding of Tensegrity Structures Considering Global Stability Condition. **Journal Of Structural Engineering**, [S.L.], v. 146, n. 12, dez. 2020. American Society of Civil Engineers (ASCE).

WANG, G.; ZHANG, L.; XU, C.; ZHANG, S.; ZHOU, Z.; GUO, S.; JI, X.; LEI, H.. Analysis of factors affecting the stability of large-span cable-braced timber gridshells. **Developments In The Built Environment**, [S.L.], v. 17, p. 100360, mar. 2024. Elsevier BV.