

ESTUDO COMPARATIVO DAS FORÇAS AXIAIS RESISTENTES DE CÁLCULO À COMPRESSÃO DE PILARES MISTOS TOTALMENTE REVESTIDOS OBTIDAS PELO MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES DE ACORDO COM A ABNT NBR 8800:2008 E AISC:360-22

COMPARATIVE STUDY OF THE COMPRESSION RESISTANT AXIAL FORCES OF ENCASED COMPOSITE COLUMNS OBTAINED BY THE LIMIT STATE METHOD IN ACCORDANCE WITH ABNT NBR 8800:2008 AND AISC:360-22

Roberto da Silva Souza ¹
Walliston dos Santos Fernandes ¹
Flávio Teixeira de Souza ²

Resumo: O presente trabalho teve por objetivo efetuar a comparação entre os valores de força axial resistente de cálculo à compressão, de pilares misto totalmente revestidos, obtidas por meio do uso das metodologias de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 e da AISC: 360-22. Os pilares mistos foram, inicialmente, utilizados de forma despreziosa para as situações de fogo na década de 40, no entanto na década de 60 surgiram os primeiros estudos para o uso deste tipo de estrutura para edifícios altos. Neste sentido, por não ser tradicional, no Brasil, edifícios altos, o estudo calculou o valor de força axial resistente de cálculo à compressão de pilar misto totalmente revestido e do perfil metálico central do pilar misto, e comparou os resultados. Foi utilizado para o estudo um exemplo de pilar misto totalmente revestido e a este foi aplicado as duas diferentes normas, após os resultados foram comparados. Embora ambas as normas utilizam o estados-limites para o cálculo, os resultados obtidos pela ABNT NBR 8800:2008 apresentaram valores superiores aos obtidos pela AISC:360-22. Deste modo, a norma americana se apresentou para o cálculo da força axial resistente valores mais conservadores.

Palavras-chaves: pilar misto totalmente revestido; pilar metálico; força axial; resistência à compressão.

Abstract: *The objective of the present work was to compare the values of axial force resistant to compression calculations of encased composite columns, obtained using the calculation methodologies of ABNT NBR 8800:2008 and AISC: 360-22. Composite columns were initially used unpretentiously for fire situations in the 1940s, however, in the 1960s the first studies appeared on the use of this type of structure for High-rise buildings. In this sense, as tall buildings are not traditional in Brazil, the study calculated the value of the resistant axial force in the compression calculation of the fully encased composite pillar and the central metallic profile of the composite pillar, and compared the results. An example of a encased composite column was used for the study and the two different standards were applied to it, after which the results were compared. Although both standards use limit states for calculation, the results obtained by ABNT NBR 8800:2008 presented higher values than those obtained by AISC:360-22. In this way, the American standard presented more conservative values for calculating the resistant axial force.*

Keywords: *encased composite column; steel column; axial force, compressive strength.*

¹Universidade ou Faculdade de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro – Brasil, e-mail: roberto.ss@aluno.ufop.edu.br, walliston.fernandes@ufop.edu.br

²Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Ouro Preto – Brasil, e-mail: flavio.souza@ifmg.edu.br

1 Introdução

A tecnologia das estruturas mistas de aço e concreto, normalmente, leva ao leigo a pensar da junção das tecnologias de estruturas de concreto armado com a de estruturas metálicas, porém, a tecnologia das estruturas mistas possui metodologia de dimensionamento própria e diferente das outras tecnologias anteriormente citadas.

As estruturas mistas de aço e concreto foram inicialmente introduzidas na indústria da construção civil de forma despreziosa, no tocante ao aumento da rigidez, uma vez que o acréscimo do concreto à estrutura metálica, na década de 40, tinha como objetivo principal a proteção da estrutura ao fogo, conforme relata Taranath (2012). Porém de acordo com American Institute of Steel Construction - AISC (2003) as estruturas mistas começaram a ser estudadas nos anos 60 após a publicação das primeiras discussões sobre este tipo de estrutura, publicadas pelo engenheiro estrutural e arquiteto Dr. Fazlur Rahman Khan para o uso em edifícios altos com o objetivo de resistir a ventos e terremotos.

Segundo descrito na ABNT NBR 8800:2008, são consideradas estruturas mistas aquelas formadas por componentes de aço e de concreto, armado ou não, trabalhando em conjunto. Sendo que o concreto poderá ser de densidade normal ou de baixa densidade, desde que não haja restrições quando ao seu uso por parte da norma.

No Brasil, a primeira normatização das estruturas mistas ocorreu com a publicação da norma ABNT NBR 8800: 1986, porém a norma abordava somente vigas mistas. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo efetuar a comparação entre os valores de força axial resistente de cálculo à compressão, de pilares misto totalmente revestidos, obtidas por meio do uso das metodologias de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 e da AISC: 360-22 para identificar se existem discrepâncias entre as duas metodologias de cálculo e mensurar suas diferenças.

O estudo da diferença das metodologias de cálculo das normas ABNT NBR 8800:2008 e da AISC: 360-22 permitirá que o profissional que futuramente trabalhe com a execução e/ou com elaboração de projetos de obras internacionais com estruturas mistas consiga ter maior confiabilidade em suas tomadas de decisões.

2 Força Axial Resistente de Cálculo à Compressão

São apresentadas na Tabela 1 as formulações para o cálculo da força axial resistente de cálculo à compressão para as normas aqui analisadas. Cabe ressaltar que para o presente estudo foram calculadas a força axial resistente de cálculo à compressão de um pilar misto totalmente revestido de acordo com a norma ABNT NBR 8800:2008 e da AISC:360-22; e de um pilar metálico composto unicamente pelo perfil utilizado no cálculo do pilar misto também de acordo com ambas as normas.

Destaca-se que a AISC: 360-22 possui duas diferentes metodologias de cálculo a *Allowable Strength Design* (ASD) e a *Load and Resistance Factor Design* (LRFD), sendo importante compreender que nem sempre existiram as duas metodologias conforme relata Mentzer (2001). A ASD foi a primeira metodologia a ser introduzida na norma americana e tem servido com sucesso desde 1923 aos engenheiros calculistas.

No gráfico de tensão de deformação, da Figura 1, são identificados os trechos/comportamento dos materiais em que cada metodologia trabalha no cálculo da força resistente de cálculo.

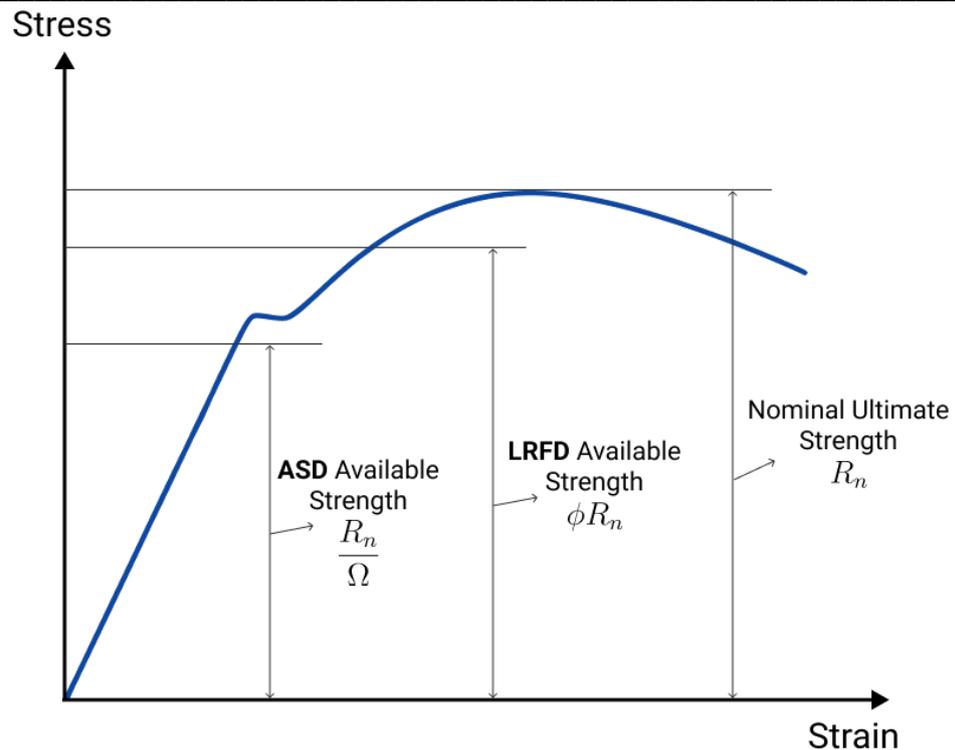


Figura 1. Gráfico tensão deformação e as metodologias LRFD e ASD, fonte: Sanchez (2023)

2.1 Formulação ABNT NBR 8800:2008 Força axial de resistência de cálculo à compressão (Pilar misto totalmente revestido)

A força axial resistente de cálculo de pilar misto axialmente comprimido sujeitos à instabilidade por flexão é dada por:

$$N_{c,Rd} = \chi N_{pl,Rd} \quad (1)$$

O fator de redução, χ , fornecido pela norma é em função do índice de esbeltez reduzido λ_0 :

$$(a) \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (2)$$

para $\lambda_0 \leq 1,5$

$$(b) \chi = 0,877/\lambda_0^2 \quad (3)$$

para $\lambda_0 > 1,5$

A força axial resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total, $N_{pl,Rd}$, é dada pela soma das forças axiais resistentes de cálculo de seus componentes, perfil de aço, concreto e armadura longitudinal:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + \alpha A_c f_{cd1} + A_s f_{sd} \quad (4)$$

onde α é um coeficiente igual a 0,85 para pilar misto totalmente revestido.

2.2 Formulação AISC: 360-22 Força axial de resistência de cálculo à compressão (Pilar misto totalmente revestido)

Fator de resistência, ϕ_c , para obtenção da força resistente de cálculo à compressão para projeto elaborados com as provisões da LRFD.

$$\phi_c P_n \quad (5)$$

Onde $\phi_c = 0,75$

Fator de segurança para obtenção da força resistente de cálculo à compressão para projeto elaborados com as provisões da ASD.

$$P_n / \Omega_c \quad (6)$$

Onde $\Omega_c = 2,00$

Resistência nominal de elementos submetidos à compressão.

$$(a) P_n = P_{no} (0,658^{P_{no}/P_e}) \quad (7)$$

para $P_{no}/P_e \leq 2,25$

$$(b) P_n = 0,877 P_e \quad (8)$$

para $P_{no}/P_e > 2,25$

Resistência à compressão axial nominal sem consideração dos efeitos de comprimento.

$$P_{no} = F_y A_s + F_{ysr} A_{sr} + 0,85 f'_c A_c \quad (9)$$

Carga de crítica de flambagem elástica.

$$P_e = \pi^2 (EI_{eff}) / L_c^2 \quad (10)$$

Rigidez efetiva da seção mista

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_s I_{sr} + C_1 E_c I_c \quad (11)$$

Módulo de elasticidade do concreto.

$$E_c = 0,0043 w_c^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad (12)$$

Coefficiente para cálculo da rigidez efetiva da seção mista totalmente revestida.

$$C_1 = 0,25 + 3[(A_s + A_{sr})/A_g] \leq 0,7 \quad (13)$$

2.3 Formulação ABNT NBR 8800:2008 Força axial de resistência de cálculo à compressão (Pilar metálico)

A força axial resistente de cálculo de pilar metálico axialmente comprimido sujeitos à instabilidade por flexão é dada por:

$$N_{c,Rd} = \chi Q A_g f_y / \gamma_{a1} \quad (14)$$

O fator de redução associado a compressão, χ , é dado por:

$$(a) \chi = 0,658^{\lambda_0^2} \quad (15)$$

para $\lambda_0 \leq 1,5$

$$(b) \chi = 0,877 / \lambda_0^2 \quad (16)$$

para $\lambda_0 > 1,5$

O índice de esbeltez reduzido é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{Q A_g f_y / N_e} \quad (17)$$

2.4 Formulação AISC: 360-22 Força axial de resistência de cálculo à compressão (Pilar metálico)

Fator de resistência para obtenção da força resistente de cálculo à compressão para projeto elaborados com as provisões da LRFD.

$$\phi_c P_n \quad (18)$$

Onde $\phi_c = 0,90$

Fator de segurança para obtenção da força resistente de cálculo à compressão para projeto elaborados com as provisões da ASD.

$$P_n / \Omega_c \quad (19)$$

Onde $\Omega_c = 1,67$

Resistência nominal de elementos submetidos à compressão com base no estado limite de flambagem por flexão.

$$P_n = F_n A_g \quad (20)$$

Cálculo da tensão nominal.

$$(a) F_n = \left(0,658^{\frac{F_y}{F_e}} \right) F_y \quad (21)$$

quando $L_c/r \leq 4,71\sqrt{E/F_y}$ (ou $F_y/F_e \leq 2,25$)

$$(b) \quad F_n = 0,877F_e \quad (22)$$

quando $L_c/r > 4,71\sqrt{E/F_y}$ (ou $F_y/F_e > 2,25$)

Tensão de flambagem elástica:

$$F_e = \pi^2 E / (L_c/r)^2 \quad (23)$$

Raio de giração:

$$r = \sqrt{I/A_g} \quad (24)$$

3 Metodologia Aplicada

Para o estudo comparativo das forças axiais resistente de cálculo à compressão obtidas por meio das metodologias de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 e a da AISC:360-22, para pilares mistos totalmente revestidos, foi utilizado como modelo o exercício proposto no livro Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto dos autores Fakury *et al* (2016).

Para obtenção das forças axiais resistentes de cálculo à compressão foi desenvolvido um algoritmo na linguagem de programação Python para ambas as normas. Sendo o programa validado com a aplicação do exercício de Fakury *et al* (2016).

Após a obtenção dos valores, foi realizada uma análise comparativa entre os valores obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo tanto para o comprimento destravado de 350 cm quanto para o comprimento destravado de 1200 cm.

4 Exemplo de um Pilar Misto Totalmente Revestido

4.1 Apresentação do Problema

A configuração do pilar misto totalmente revestido utilizado para o desenvolvimento do tema proposto encontra-se detalhado na Figura 2.

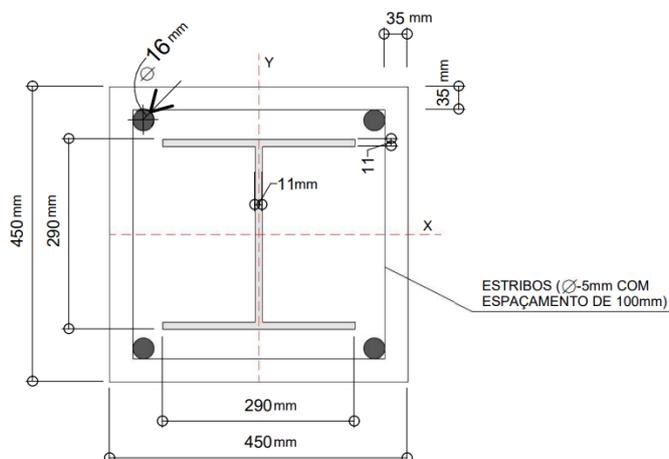


Figura 2 - Pilar Misto, Fakury *et al* (2016).

O exercício de Fakury *et al* (2016) propõe o cálculo da força axial resistente de cálculo à compressão de um pilar misto bi-rotulado, com comprimento destravado de 350 cm, situado em ambiente urbano. Porém cabe ressaltar que para o presente estudo também foi calculado para um comprimento destravado de 1200 cm. Além disso, foi efetuado o cálculo da força axial resistente de cálculo à compressão o perfil isolado.

As propriedades mecânicas dos elementos que compõe o pilar misto são: Perfil de aço HP 310 x 79.0 ($f_y = 345\text{MPa}$); Barras de aço $\phi = 16\text{mm}$, CA-50 ($f_{yr} = 500\text{MPa}$); e concreto com brita 1gnaisse ($f_{ck} = 40\text{MPa}$). Já na Tabela 1 são apresentados os parâmetros do perfil HP 310.

Tabela 1 - Parâmetros do perfil HP 310 x 79.0

Perfil	$b_f(\text{mm})$	$t_f(\text{mm})$	$d'(\text{mm})$	$t_w(\text{mm})$	$A_a(\text{cm}^2)$	$I_x(\text{cm}^4)$	$I_y(\text{cm}^4)$
HP 310X79	306	11	245	11	100	16.316	5.258

4.2 Resultados

Os resultados obtidos pelas metodologias de cálculo apresentadas pela ANBT NBR 8800:2008 e pela AISC: 360-22, para obtenção da força axial resistente à compressão do pilar misto e do perfil isolado, são apresentados na Tabela 2.

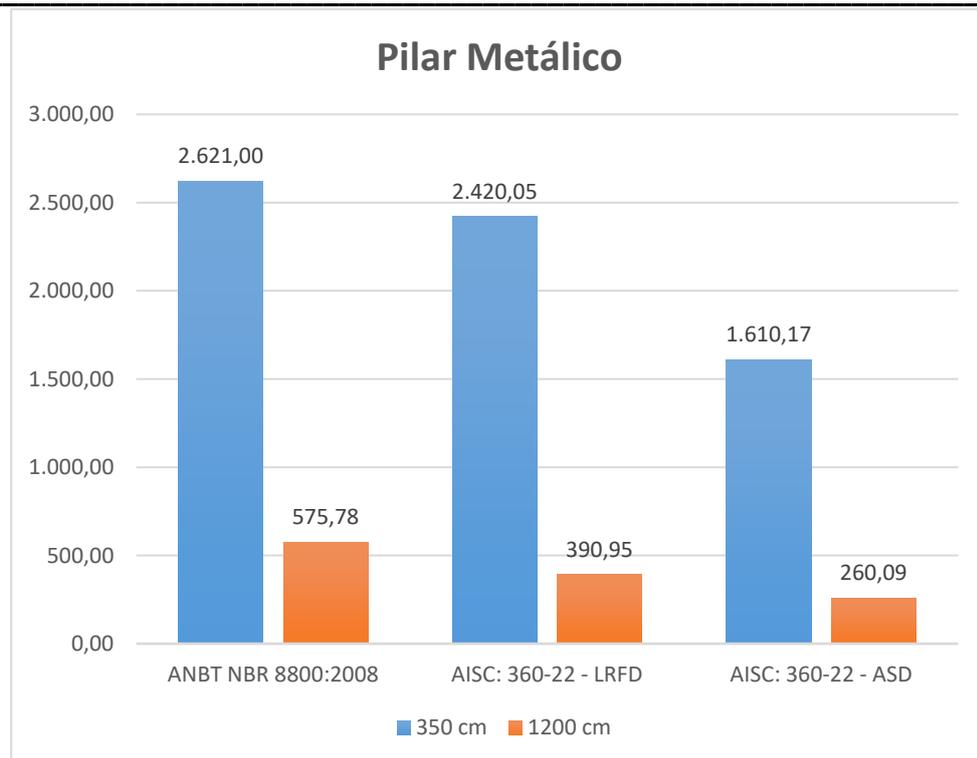
Tabela 2 - Resumo das forças resistente de cálculo.

	Capacidade Resistente (kN) para L = 350 cm	Capacidade Resistente (kN) para L = 1200 cm	Redução com aumento do comprimento L
Pilar Misto			
ABNT NBR 8800:2008	7.165,00	1.989,81	72,28%
AISC: 360-22 - LRFD	6.624,38	1.513,53	77,15%
AISC: 360-22 - ASD	4.416,25	1.009,02	77,15%
Pilar metálico*			
ABNT NBR 8800:2008	2.621,00	575,78	78,03%
AISC: 360-22 - LRFD	2.420,05	390,95	83,84%
AISC: 360-22 - ASD	1.610,17	260,09	83,84%

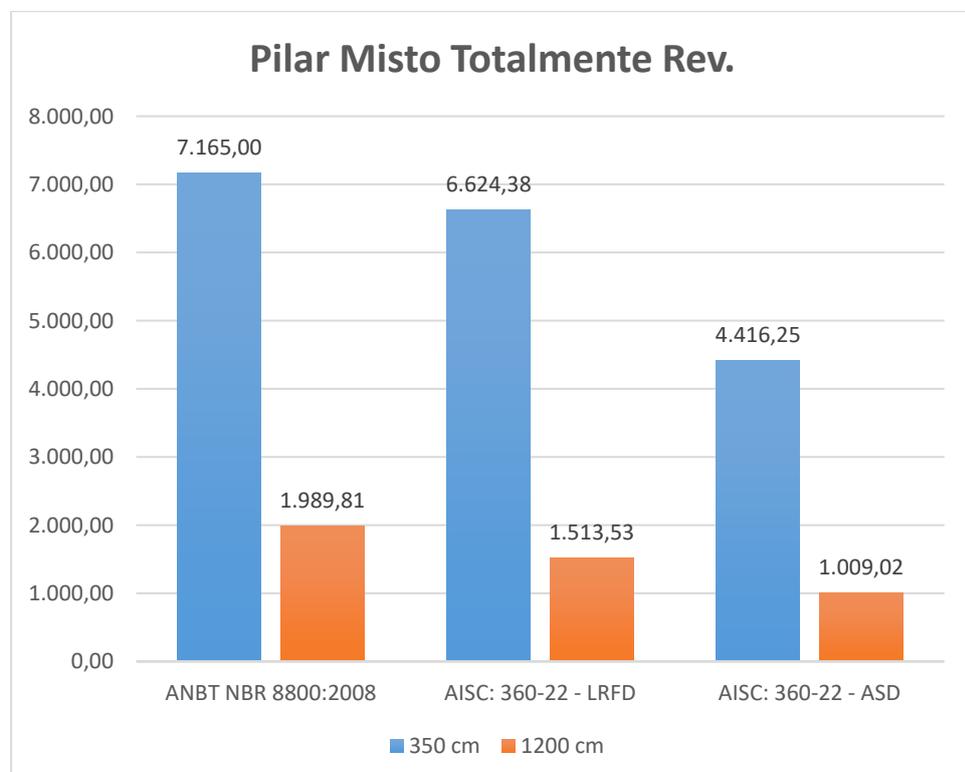
*HP 310 x 79.0

4.2.1 Análise dos Resultados

Conforme pode ser verificado na Figura 3 para ambos os comprimentos L=350 cm e L=1200 cm, a metodologia de cálculo da ABNT NBR 8800:2008 apresentou valores de força axial resistente de cálculo a compressão superiores aos da AISC: 360-22. Além disso, observa-se na Tabela 3 que a redução foi de ao menos 72% com o aumento do comprimento, ou seja, o pilar com L= 1200 cm possui um valor resistente menor que o pilar com L=350 cm para as situações apresentadas.



(a) Pilar Metálico



(b) Pilar Misto Totalmente Revestido

Figura 3. Força Axial Resistente de Cálculo

Ao compararmos o pilar metálico isolado com o pilar misto totalmente revestido verifica-se que há um ganho da força axial resistente de cálculo à compressão tanto pela ABNT NBR 8800:2008, quanto pela AISC: 360-22, sendo o ganho foi de cerca de 273% para o $L = 350$ cm, em ambas normas; e de 345% para ABNT NBR 8800:2008 e 387% para a AISC: 360-22, para o $L = 1200$ cm.

Considerando que todas as seções dos materiais que compõe a seção do pilar misto eram constantes tanto para $L = 350$ cm quanto para $L = 1200$ cm, verifica-se que a metodologia LRFD da AISC: 360-22 foi a que mais se aproximou da metodologia da ABNT NBR 8800:2008, tanto para o cálculo da força resistente de cálculo à compressão do pilar misto totalmente revestido quanto para o pilar metálico.

5 Conclusões

Foram aqui apresentados os procedimentos para obtenção da força axial resistente de cálculo à compressão pela norma americana AISC:360-22 e pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. Além disso, os resultados apresentados na aplicação de ambas as normas a mesma seção bruta, bem como ao mesmo comprimento destravado demonstraram que a transformação do pilar metálico em pilar misto totalmente revestido proporcionou um considerável ganho de resistência à compressão.

Foi observado também que os valores de força axial resistente de cálculo à compressão obtidos pela metodologia da AISC:360-22 são mais conservadores que aos obtidos pela ABNT NBR 8800:2008. Sendo que a método LRFD é o que o que mais aproximou da metodologia da ABNT NBR 8800:2008 pois em ambos métodos o material trabalha fora do regime elástico o que também explica o porquê os valores obtidos pelo método ASD apresentaram os menores valores.

Outro ponto observado foi que o ganho de força por cm^2 de concreto com o aumento do comprimento destravado do pilar reduziu consideravelmente, no entanto, ainda sim apresentou valores superiores ao perfil metálico isolado.

Por fim cabe ressaltar que a ABNT NBR 8800:2008 encontra-se em processo de revisão pela comissão de estudos de aços e mistas de aço e concreto, o que poderá proporcionar resultados diferentes do que os obtidos.

Referências

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. **ANSI/AISC 360-22: Specification for Steel Structural Buildings**. Washington, 2022.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI. **Steel Design Guide Series 6: Load and Resistance Factor Design of W-Shapes encase in concrete**. Washington, 2003.

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

FAKURY, R.H.; CASTRO E SILVA, A.L.R.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aços e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Editora Pearson Education do Brasil, 2016.

MENTZER, M. **Should Structural Engineers Adopt A New Design Method?: LRFD vs. ASD.** Penn State College Of Engineering. 2001.

SANCHEZ, O. **LRFD vs ASD.** Sky Civ. Sydney, Australia, 06 de mar. De 2023. Disponível em: <https://skyciv.com/docs/tech-notes/structural-3d/lrfd-vs-asd/> . Acesso em: 27 de jan. de 2024.

TARANATH, B. S. **Structural analysis and design of tall buildings: steel and composite construction.** CRD Press, 2012.