

ANÁLISE NUMÉRICA DE PILARES MISTOS PARCIALMENTE REVESTIDOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO

Pereira, M. F.¹, Diógenes, H. J. F.² & El Debs, A. L. H. C.³

Resumo

O pilar misto parcialmente revestido é fruto da associação de um perfil metálico e concreto trabalhando em conjunto. Nestes pilares o perfil metálico, normalmente perfil I ou H, não é totalmente envolvido por concreto, sendo apenas a região entre as mesas preenchida. Este trabalho buscou avaliar o comportamento estrutural do pilar misto parcialmente revestido quando as armaduras convencionais do concreto, em forma de barras vergalhões (apagar a palavra vergalhão), são substituídas por fibras de aço descontínuas e distribuídas aleatoriamente. Para tanto foram realizadas análises experimentais e numéricas em protótipo de pilar misto revestido por concreto, com adição de 1,5% de fibras, com 25 mm de comprimento. Pode-se constatar que as fibras de aço previnem a fissuração precoce, contribuindo para a integridade do concreto e conseqüentemente para uma maior capacidade resistente residual. Desta forma, a substituição da armadura transversal pela fibra de aço mostra-se promissora.

Palavras-chave: Pilar misto parcialmente revestido. Fibras de aço. Comportamento estrutural.

NUMERICAL ANALYSIS OF PARTIALLY ENCASED COMPOSITE COLUMNS USING FIBER REINFORCED CONCRETE

Abstract

Partially encased composite column is the result of the combination of a steel section and concrete working together. In these columns the steel section, typically I or H-shaped, is not completely encased in concrete, being filled only the space between the flanges. This study aims to assess the structural behavior of the partially encased composite column when conventional reinforcement of concrete, in the form of rebar, is replaced by discrete steel fibers randomly distributed. For this, experimental and numerical analysis on a model of composite column with steel fiber concrete, 1.5% of fibers with length of 25 mm, were made. It can be seen that the steel fibers prevent premature cracking, contributing to the integrity of the concrete and therefore a residual load-bearing. Thus the replacement of shear reinforcement for fiber reinforced concrete has shown promising results.

Keywords: Partially encased composite columns. Steel fibers. Structural behavior.

1 INTRODUÇÃO

Os pilares mistos parcialmente revestidos são constituídos por um perfil de aço, normalmente I ou H, com a região entre as mesas revestidas por concreto (Figura 1-(a)). As principais vantagens na utilização deste tipo de pilar contemplam questões estruturais e construtivas. A associação do aço e concreto é feita de modo que seja atribuída a seção mista qualidades de cada um dos materiais. Além disso, em termos construtivos ao se comparar a soluções mistas com as estruturas em concreto

¹ Mestranda em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, margot.pereira@usp.br

² Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, hidelbrando.diogenes@ufersa.edu.br

³ Professora do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, analucia@sc.usp.br

armado, verifica-se a possibilidade de reduzir ou dispensar fôrmas e escoramentos, diminuir custos provenientes de materiais e mão-de-obra, reduzir o peso próprio da estrutura – utilização de elementos mistos estruturalmente mais eficientes – e aumentar a precisão dimensional dos elementos. Entretanto, encontra-se uma dificuldade no processo executivo de pilares mistos parcialmente revestidos relacionada com a obrigatoriedade, segundo a ABNT NBR 8800:2008, de utilização de armadura longitudinal e transversal para garantir a integridade do concreto.

Vários pesquisadores desenvolvem estudos voltados para a análise do comportamento dos pilares mistos parcialmente revestidos considerando inúmeras possibilidades de seção transversal, entre os quais se destaca o amplo programa experimental realizado pelo Grupo Canam Macan na década de 1990 (VINCENT; TREMBLAY, 2001), (CHICOINE et al., 2002), (TREMBLAY; CHICOINE; MASSICOTE, 2002), (CHICOINE; TREMBLAY; MASSICOTE, 2003)). O principal objetivo deste estudo era a diminuição o abatimento (apagar abatimento) do custo dos elementos através do desenvolvimento de pilares parcialmente revestidos compostos por perfis de chapa fina. Com a redução da espessura das chapas as instabilidades locais passam a ser importantes, desta forma, são introduzidas barras transversais para sua prevenção (Figura 1 – (b)).

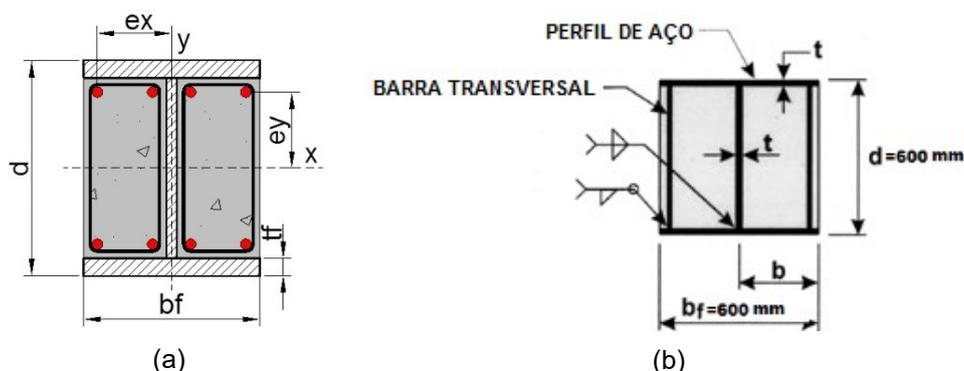


Figura 1 – Pilar misto parcialmente revestido (a) Seção típica; (b) Seção estudada pelo Grupo Canam Macan.
Fonte: CHICOINE et. (apagar o ponto em et) al., 2002.

Os autores verificaram com isto que as barras transversais melhoram a ductilidade e a resposta pós-pico do pilar, mas não incrementa a capacidade resistente.

Na mesma linha PRICKETT e DRIVER (2006) pesquisaram a influência da resistência do concreto no comportamento de pilares mistos parcialmente revestidos com chapas finas. Também foi avaliada a adição de fibras de aço ao concreto de revestimento. Os resultados mostram que pilares com concreto de resistência usual possuem maior ductilidade que aqueles com concreto de alta resistência. Porém, aproximando mais as barras transversais e adicionando fibras de aço ao concreto de alta resistência, os pilares revestidos por este concreto também terão ruptura mais dúctil.

O concreto possui propriedades que não são adequadas à utilização estrutural, como o comportamento frágil. As fibras auxiliam na transferência de tensões mesmo após a fissuração do concreto de modo que proporciona uma resistência residual aos esforços solicitantes aplicados (apagar a palavra aplicados) ao mesmo. Outras características mecânicas são incrementadas pela introdução de fibras de aço no concreto, como a tenacidade à flexão, ao impacto e controle de fissuração.

De modo que a utilização de fibras de aço pode levar à redução ou eliminação das armaduras, além disso, de auxiliar no comportamento conjunto aço-concreto.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de investigar a substituição da armadura convencional exigida pela ABNT NBR 8800:2008 pela utilização de concreto com adição de fibras de aço para uma seção típica de pilar misto parcialmente revestido. Para isto, foram realizadas análises experimentais e numéricas.

2 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

As características geométricas da seção transversal do modelo físico avaliado são apresentadas na Figura 2. O modelo possui uma seção transversal de 125 mm x 125 mm e uma altura de 1000 mm.

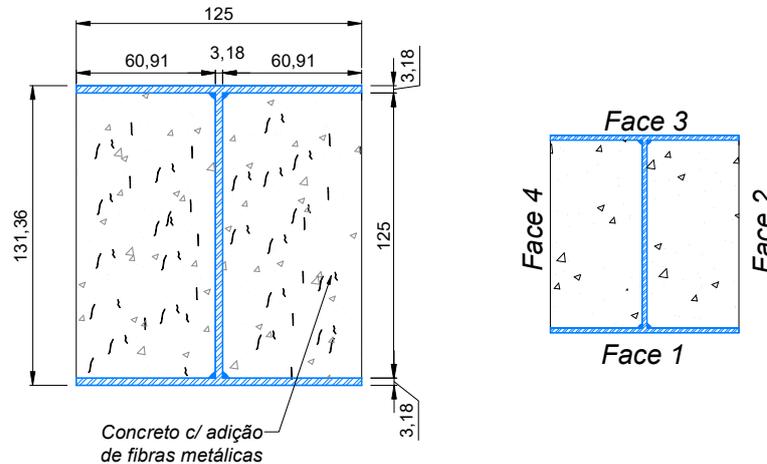
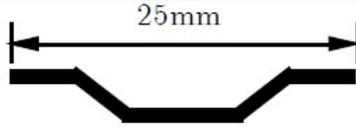


Figura 2 – Seção transversal dos modelos físicos

O concreto de revestimento possui adição de 1,5% de fibras de aço de 25 mm de comprimento, cujas principais características são apresentadas na Tabela 1. Não foram utilizadas armaduras na forma de vergalhões nem conectores de cisalhamento. Busca-se com isto avaliar o comportamento conjunto aço-concreto com fibras sem mecanismos de aderência auxiliares.

Tabela 1 – Características das fibras de aço

Fibras de aço	FS8 Wirand – 25 mm
Formato longitudinal	
Diâmetro nominal	0,75 mm
Área da seção transversal	0,4418 mm ²
Fator de forma	33
Tensão máxima de tração	1100 MPa
Massa Peso (apagar a palavra Peso) especificação (trocar a letra o por a)	7850 kg/m ³

A preparação do modelo físico foi realizada em duas etapas. Inicialmente foi concretado um dos lados do pilar, e este foi submetido a um período de cura de quatro dias. Apenas após o referido período de cura do primeiro lado concretado foi realizada a concretagem do outro lado (Figura 3). Este procedimento de concretagem em duas etapas permitiu a eliminação de fô(o, apagar)rmas, entretanto cada face do pilar possui concretos distintos, com 53 MPa e 47 MPa de resistência média à compressão. Já os perfis as chapas (apagar as chapas) de aço possuem tensão (resistência?????) de escoamento média igual a 226 MPa.

A figura 3 não está citada no texto e não explicação a respeito dela. Completar.

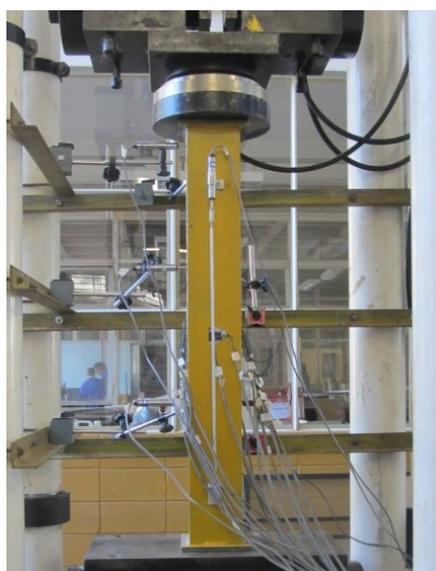


Figura 3 – Detalhes da concretagem

A Figura 4 – (a) apresenta o esquema de ensaio utilizado. Este foi realizado na Máquina de Ensaio servo-controlada, de fabricação da INSTRON Instruments, modelo 8506, com capacidade para aplicar até 2500 kN de força na tração ou compressão. Para a aplicação de um carregamento excêntrico foi adotada uma chapa na forma de meia lua, com seu o centro deslocado 10 mm com relação ao centro do pilar, como mostra a Figura 4 – (b).

O carregamento foi feito em duas etapas: primeiro aplicou-se uma força equivalente a 30% da máxima prevista (força de escorvamento). Após a escorva foi reiniciado o carregamento a uma velocidade de 0,005 mm/s até atingir a força máxima resistida pelo modelo. No trecho pós-pico da capacidade resistente à compressão, a velocidade foi reduzida pela metade visando o melhor acompanhamento do trecho descende da curva experimental do modelo.

O encurtamento do pilar foi medido por meio de um transdutor de deslocamento localizado verticalmente na face 1, que captou o deslocamento relativo entre dois pontos distantes de 720mm. Já os deslocamentos laterais foram medidos por meio de transdutores de deslocamentos (curso de 25 mm) posicionados horizontalmente em três pontos distribuídos ao longo do comprimento do pilar em duas faces perpendiculares entre si. Estes transdutores tiveram por função verificar o aparecimento de deslocamentos transversais, os quais caracterizariam a flexão do pilar.



(a)



(b)

Figura 4 – Esquema de ensaio do modelo

3 RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

A Figura 5 apresenta a curva força vs. encurtamento para o modelo experimental. Verificou-se que capacidade resistente do modelo foi de 816 kN. Após a força máxima houve a queda gradativa da capacidade resistente, com capacidade de deformação pós-pico.

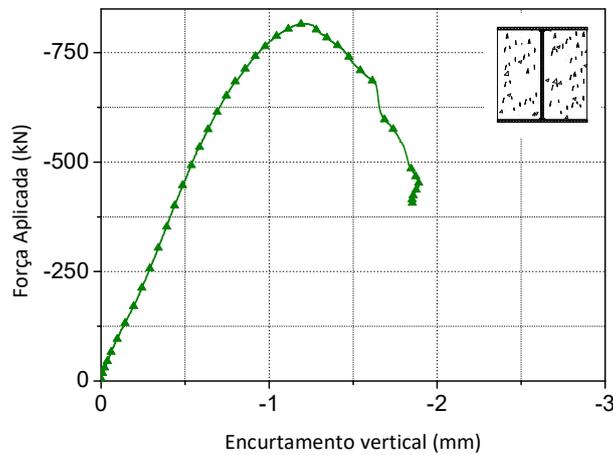


Figura 5 – Curva força vs. encurtamento experimental

A Figura 6 apresenta os deslocamentos laterais registrados pelos transdutores de deslocamento posicionados na face 4 do modelo físico. É possível visualizar que houve um deslizamento da extremidade superior do pilar com o incremento de carga, além disso, há a formação de uma curvatura de flexão que confirma a ocorrência de flexão no eixo desejado.

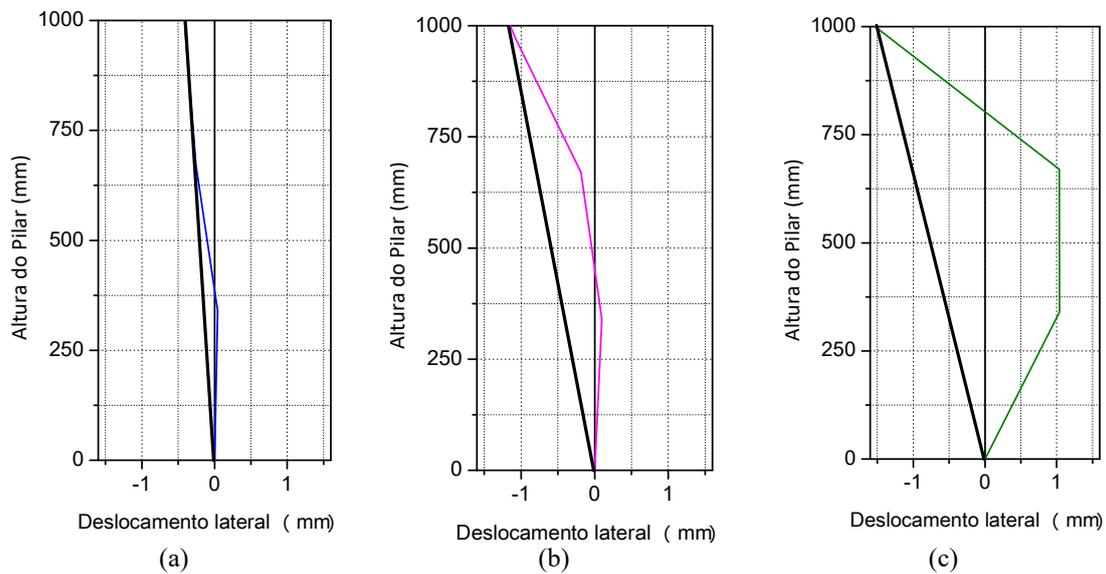


Figura 6 – Deslocamentos para o modelo físico: (a) 200 kN; (b) 600 kN; (c) 800 kN

A Figura 7 mostra a configuração deformada final do modelo. Observa-se claramente a formação de uma curvatura que confirma a existência de excentricidade na aplicação do carregamento para este elemento. Os primeiros sinais de instabilidade local no perfil metálico e de perda de aderência entre o aço e o concreto ocorreram para uma força correspondente a 70% da força máxima. A fissuração do concreto concentrou-se na face mais comprimida ocorrendo predominantemente no trecho pós-pico. O modo de falha constatado foi o esgotamento da seção mista por esmagamento do concreto seguido de instabilidades locais da mesa.

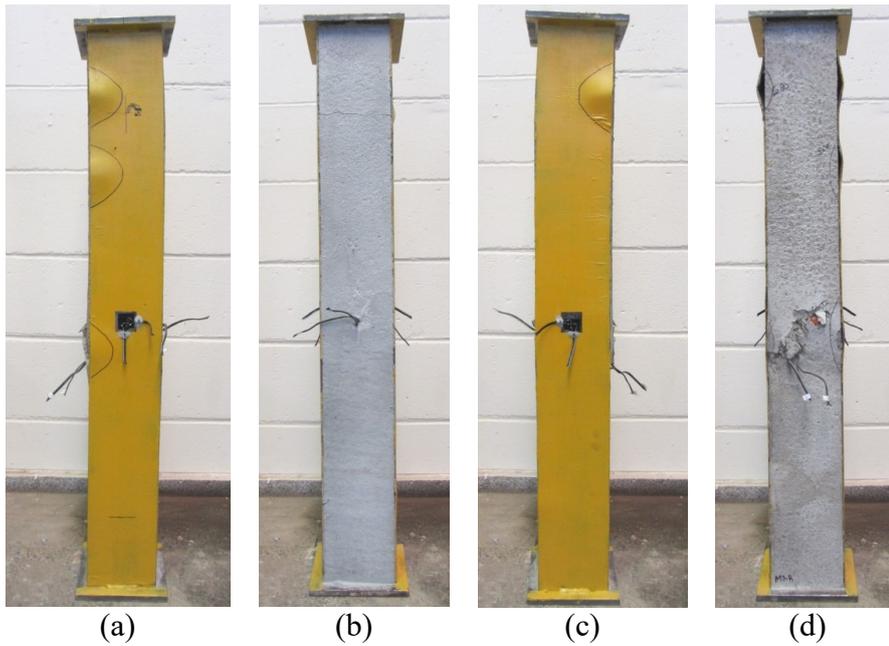


Figura 7 – Configuração final do modelo físico: (a) Face 1; (b) Face 2; (c) Face 3; (d) Face 4

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O pacote computacional Fx+DIANA[®] é um programa em elementos finitos baseado no método dos deslocamentos que possibilita a realização de análises não lineares. Desenvolveu-se um modelo tridimensional com as mesmas características geométricas do modelo experimental. Uma chapa com material de elevado módulo de elasticidade ($E = 1000 \text{ GPa}$) foi posicionada na extremidade superior do pilar. Foram restritas, em todos os nós, as translações em z, e apenas para os nós da alma do perfil restritas as translações em x e y, na região da base.

Para representação da chapa de aço, perfil metálico e concreto foi utilizado o elemento finito sólido HX24L, que é um elemento isoparamétrico com oito nós e aproximação linear. A malha de elementos finitos empregada possui 13200 elementos e 18548 nós, mostrada na Figura 10.

O comportamento do concreto foi representado pelo o modelo de fissuração distribuída com fissuração fixa baseado na deformação total (Total Strain fixed crack model) onde se utilizou uma curva exponencial para representar o amolecimento do material à tração e uma curva parabólica para representar o comportamento à compressão do material (Figura 8).

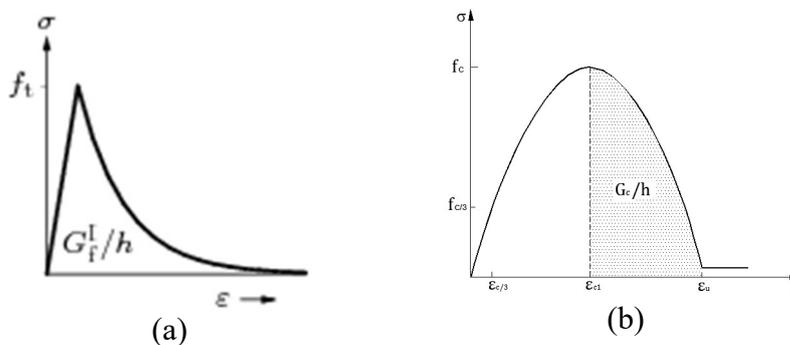


Figura 8– (a) Modelo de amolecimento à tração; (b) Curva tensão-deformação do concreto à compressão uniaxial. Adaptado de DIANA, 2012

Já para o aço que constitui o perfil metálico foi adotado um comportamento elástico-plástico perfeito com critério de plastificação de von Mises. O critério de von Mises é geralmente aplicado a materiais dúcteis, como o aço. Este modelo de material considera resistências iguais à tração e à compressão. A Figura 9 – (b) apresenta a equação e a interpretação geométrica para o critério de von Mises que apresenta forma de um cilindro em torno do eixo hidrostático.

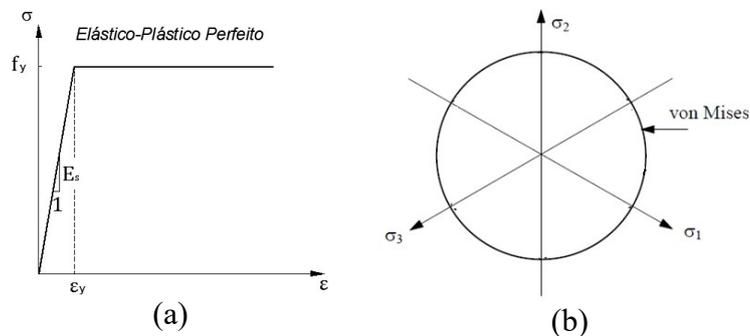


Figura 9 – Comportamento elástico-plástico perfeito e critério de plastificação para o aço

As interfaces foram representadas por meio do elemento finito de interface Q24IF, adotando um modelo de interface linear, cujos parâmetros são a rigidez tangencial (K_t) e normal (K_n) iniciais. Foi realizada uma análise qualitativa das alterações no comportamento global com as características da interface entre os componentes dos pilares mistos.

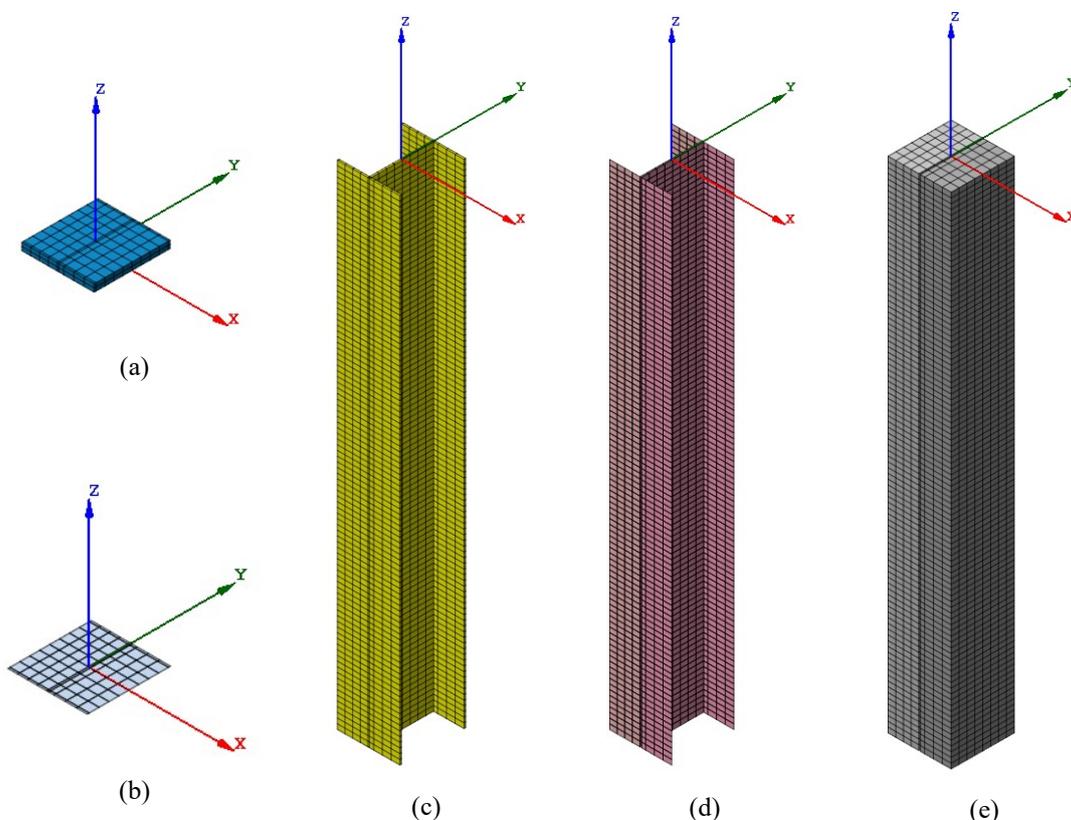


Figura 10 – Componentes do modelo numérico: (a) Chapa de topo; (b) Perfil metálico; (c) Blocos de concreto. descrever as figuras (d) e (e)

Para avaliar a sensibilidade do modelo à variação destes parâmetros foram testadas três combinações de valores para a interface perfil-concreto indicadas na Tabela 2. Com estas combinações busca-se verificar qual parâmetro tem maior influência no comportamento do pilar misto.

Tabela 2 – Interfaces avaliadas

Modelo	Tipo de Interface
Interface 1	Aderência perfeita
Interface 2	Rigidez normal = 10^{10} N/mm ³ e Rigidez transversal = 0,01 N/mm ³
Interface 3	Rigidez normal = 0,01 N/mm ³ e Rigidez transversal = 10^{10} N/mm ³

Quanto à interface entre a chapa de topo e o pilar, foi adotada em todas as análises um valor mínimo para a rigidez tangencial e um valor muito alto para a rigidez normal. Deste modo, é possível que a chapa deslize sobre o pilar sem penetrar a seção.

5 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA

A Figura 11 apresenta os resultados experimentais obtidos para o modelo comparado com os resultados numéricos obtidos para as diferentes interfaces. Observa-se que a melhor correlação entre as curvas experimental e numérica ocorre para uma rigidez tangencial muito elevada o que sugere o comportamento de aderência perfeita, justificando os bons resultados obtidos com a Interface 1.

Com a aderência perfeita, a capacidade de carga obtida pelo modelo numérico foi de 817kN, menos de 1% de diferença para os resultados experimentais. Além disso, a curva força vs. deslocamento ajusta-se à curva experimental satisfatoriamente mesmo no trecho pós-pico.

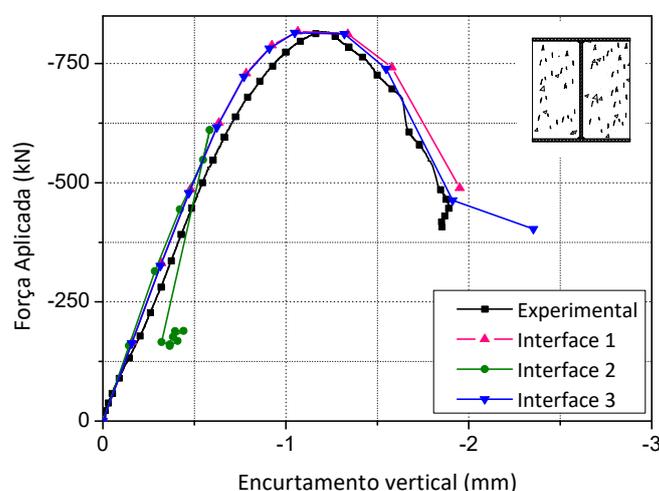


Figura 11 – Curva força aplicada vs. encurtamento vertical para modelos com interface

Observou-se que para a Interface 2 a fissuração ocorria de modo concentrado nas extremidades do pilar, já para a Interface 3 a fissuração ocorreu de modo distribuído, mais compatível com o comportamento experimental.

Para a interface 3, que melhor representou o modelo experimental, apresentam-se as tensões de von Mises para o perfil metálico na Figura 12. Para a força máxima o perfil está submetido a elevadas intensidades níveis (apagar a palavra níveis) de tensão, em especial na face mais comprimida do pilar misto, na qual ocorre a plastificação do perfil.

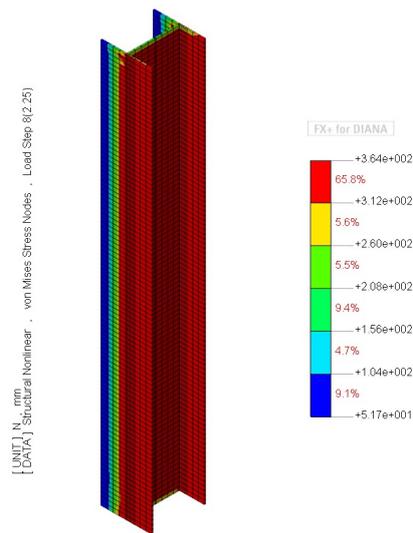


Figura 12 – Panorama de tensões de von Mises para o perfil metálico

Na Figura 13 mostram-se o gradiente de tensões principais S1, indicadas com (a), e também a região do bloco de concreto onde as tensões excederam as de tração do material, indicadas como (b). As tensões principais S1 indicam que as maiores tensões de tração estão localizadas no concreto adjacente as mesas do perfil metálico e em uma das faces expostas de concreto. Já as tensões de compressão que excederam a tensão de resistência do material estão localizadas no concreto na interface com a alma do perfil metálico.

O panorama de fissuração é coerente com as concentrações de tensões apresentadas. Nota-se em uma das faces uma concentração de fissuras na extremidade superior do pilar compatível com a fissura de tração observada no modelo físico.

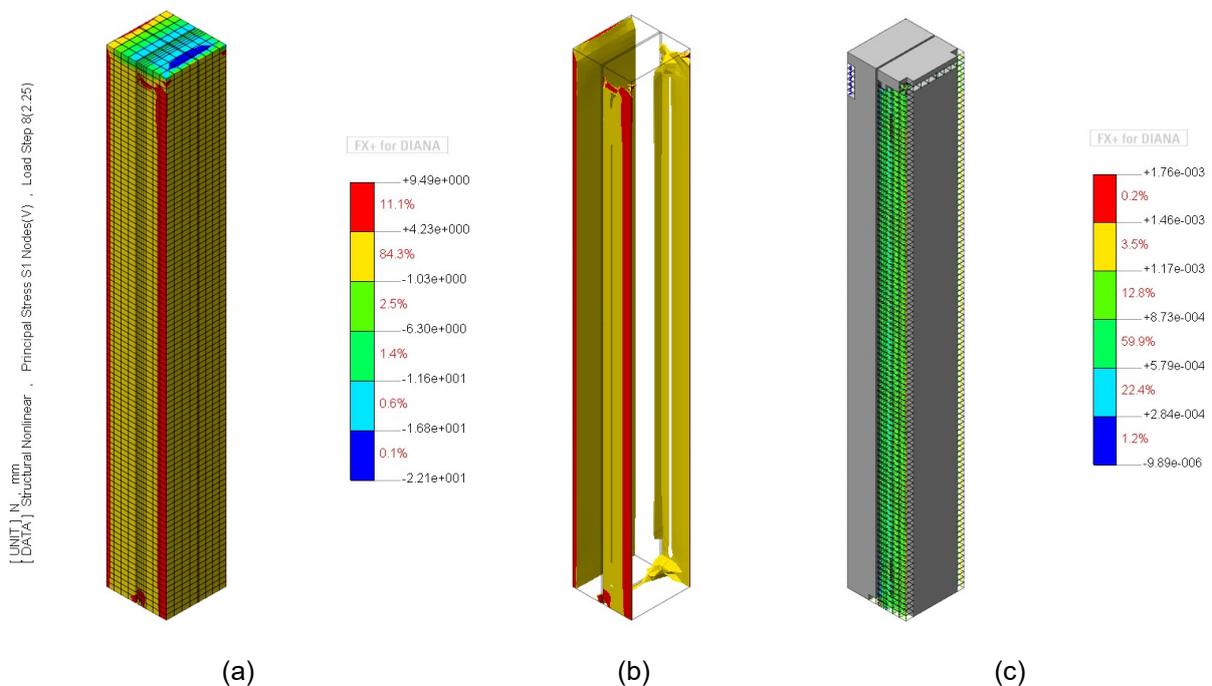


Figura 13 – (a) Panorama da tensão principal S1 no bloco de concreto; (b) Região do bloco onde a tensão S1 excedeu a tensão de tração no concreto; (c) Fissuração no concreto referente à força máxima.

A Figura 14 apresenta o panorama de tensões principais S2 e S3. Observa-se que a região próxima à alma do perfil metálico atinge tensões de compressão acima do valor da resistência do material.

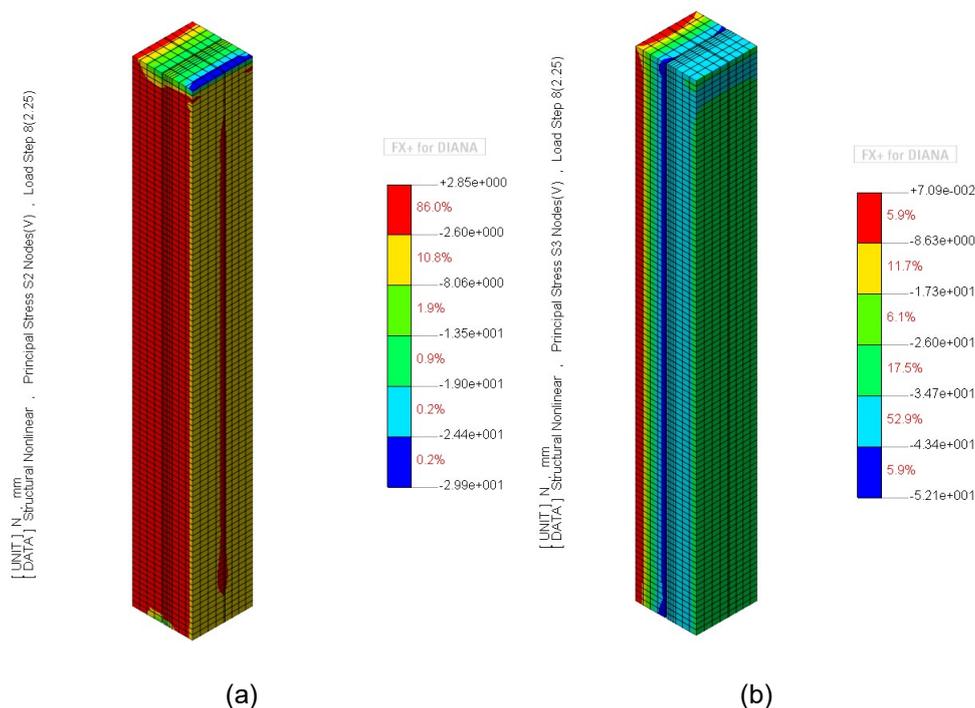


Figura 14 – Panorama das tensões principais: (a) S2; (b) S3.

6 CONCLUSÕES

O pilar misto parcialmente revestido com concreto com adição de fibras de aço apresentou comportamento estrutural satisfatório mesmo quando solicitado a esforços solicitantes relativos a situação de flexo-compressão.

O modelo numérico foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do pilar misto, em termos de rigidez, capacidade resistente e de deformação.

Com base nos resultados apresentados acredita-se que a substituição das armaduras por concreto com adição de fibras de aço seja promissora. É necessário um programa de ensaio mais amplo onde possam ser avaliados outros parâmetros, como por exemplo, a influência das dimensões da seção transversal, altura do pilar, excentricidades, e as propriedades das interfaces envolvidas. Isto culminaria no refino do modelo numérico e por conseguinte na proposição de modelos analíticos.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, onde foram desenvolvidos os ensaios experimentais, e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio financeiro.

8 REFERÊNCIAS

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

CHICOINE, T. et al. (2002). Behavior and Strength of partially encased composite columns with built-up shapes. **Journal of Structural Engineering**, v.128, n. 3, p. 279-288, Mar., 2002.

CHICOINE, T.; TREMBLAY, R.; MASSICOTTE, B. (2003). Long-term Behavior and Strength of partially encased composite columns made with built-up steel shapes. **Journal of Structural Engineering**, v.129, n. 2, p. 141-150, Feb., 2003.

PRICKETT, B.S.; DRIVER, R.G. (2006). **Behavior of Partially Encased Columns Made with High Performance Concrete**. 2006. 221f. Structural Engineering Report no 262, Dept. of Civil and Environment Engineering, University of Alberta, AB, Canada, 2006.

TREMBLAY, R. CHICOINE, T.; MASSICOTTE, B. (2002). Design equation for the capacity of partially encased non-columns. **Proceedings, Composite Construction in steel and concrete IV**, ASCE, Reston, VA, p.506-517, 2002.

VINCENT, R.; TREMBLAY, R. (2001). An Innovative Partially Composite Column System for High-Rise Buildings. Proceedings, **North American Steel Construction Conf.**, Fort Lauderdale, FL., p. 30-3 a 30-17, 2001.