



Análise de Pilares de Concreto Armado de Ultra-Alto Desempenho Utilizando o Software ANSYS 2023 R1

Felipe Pereira Vergara¹, José Guilherme Oliveira Salati², Paula Manica Lazzari³, Adriano Rodrigues da Silva⁴

¹UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / felipepereiravergara@hotmail.com

²UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / joseguilherme-13@live.com

³UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / paula.manica@ufrgs.br

⁴UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / adriano.rds@hotmail.com.br

Resumo

Este trabalho busca avaliar o comportamento de pilares de concreto armado de ultra-alto desempenho, submetidos à compressão axial, utilizando o Método dos Elementos Finitos. A partir do *software* ANSYS, versão estudante 2023 R1, foram estudados três pilares UHPC (*Ultra High Performance*) de Rodrigues (2022), os quais apresentam diferentes índices de confinamento. Para o presente estudo, foi avaliado o modelo numérico de armadura discreta e de armadura incorporada. Também foi verificada a influência da utilização ou não de placas metálicas, as quais auxiliam no confinamento do concreto nas regiões de extremidades do pilar. A análise dos resultados foi feita comparando os dados obtidos de forma experimental com as curvas numéricas: carga x deformação do concreto, carga x deformação da armadura longitudinal e carga x deformação da armadura transversal. Ainda, foi analisado o comportamento do pilar como um todo, observando-se as distribuições de tensões e fissuras. Em relação aos resultados obtidos, foram observadas diferenças entre os modelos estudados, sendo o modelo de armadura incorporada com as placas metálicas aquele que mais se aproximou aos resultados experimentais.

Palavras-chave

Pilares; UHPC; confinamento; ANSYS; armadura discreta; armadura incorporada.

1 Introdução

A simulação do comportamento de elementos estruturais a partir do Método dos Elementos Finitos tem assumido importância por sua precisão, praticidade e baixo custo, quando comparada a ensaios experimentais, por exemplo. Os diferentes tipos de elementos finitos e materiais devem ser avaliados, comparando os resultados numéricos a resultados obtidos experimentalmente, permitindo, assim, que sejam aprimorados até obter um modelo adequado o qual represente o comportamento da estrutura (LAZZARI, 2016). Neste contexto, este artigo tem o objetivo de apresentar a avaliação da utilização de diferentes modelos numéricos para representar o comportamento de pilares UHPC submetidos à compressão axial. Para este estudo, utilizaram-se os dados experimentais da série de pilares UHPC de Rodrigues (2022), os quais apresentam baixo, médio e alto índice de confinamento. A fim de verificar as diferenças entre os modelos, foram testados modelos com armadura discreta e armadura



incorporada, e, ainda, com e sem a consideração de placas metálicas nas extremidades dos pilares. O comparativo entre os resultados experimentais e numéricos mostraram-se satisfatórios, principalmente ao adotar o modelo de armadura incorporada com camisas metálicas nas extremidades.

2 Série de Pilares de UHPC de Rodrigues (2022)

Rodrigues (2022) apresenta em sua pesquisa experimental a avaliação da influência do confinamento e da ductilidade de pilares curtos produzidos com concreto de ultra alto desempenho (*Ultra High Performance* - UHPC). Este concreto é obtido através da utilização de componentes minerais em sua composição, substituindo os agregados graúdos tradicionais. Desta forma, obtém-se um material com elevadas propriedades mecânicas, gerando valores de resistência à compressão entre 120 MPa a 800 MPa. Contudo, ao atingir a tensão de pico do material, o UHPC apresenta uma ruptura instantânea, características de um material frágil. O confinamento de pilares visa suavizar a distribuição de tensões pós-pico, colaborando com o aumento da ductilidade das estruturas. Esta técnica pode ser aplicada, utilizando armaduras transversais (estribos) com espaçamentos menores ou através da aplicação de uma força lateral constante durante todo o carregamento. Para avaliar a influência do confinamento foram estudados pilares com alto, médio e baixo índice de confinamento, sendo estes nomeados de P00A, P00B e P00C, respectivamente. As diferentes geometrias de acordo com o tipo de confinamento constam na Figura 1. Nesta mesma figura, também é possível observar a discretização dos elementos finitos destes pilares, considerando o modelo de armadura incorporada.

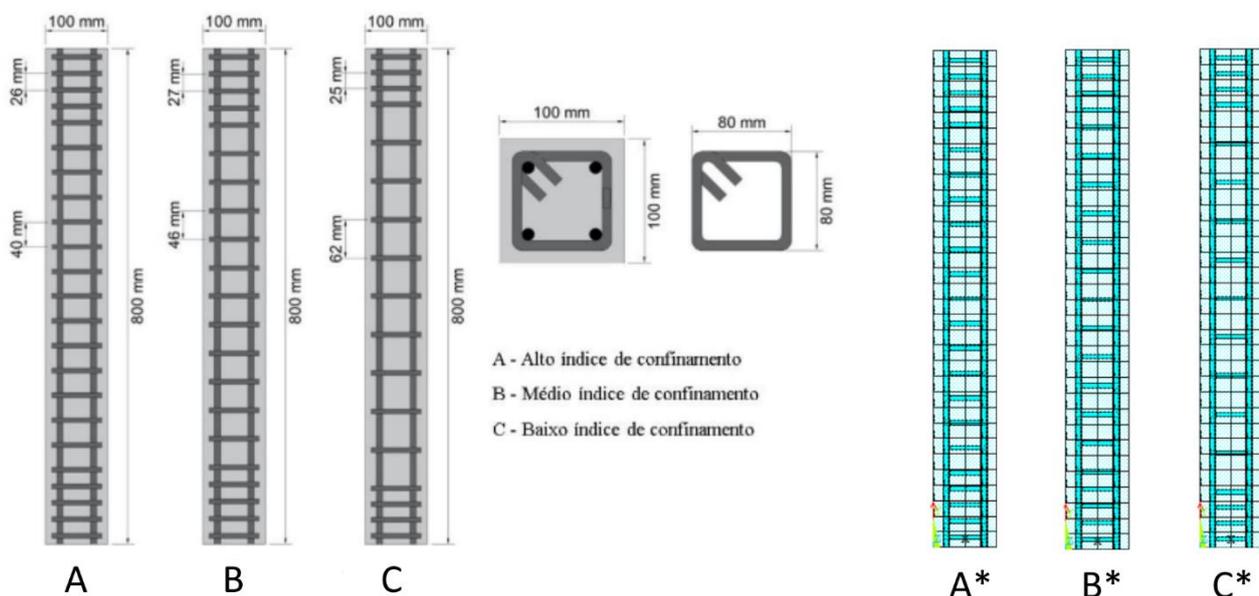


Figura 1 - Geometrias adotadas para os pilares submetidos aos ensaios experimentalmente A, B e C e os respectivos modelos de armadura incorporada A*, B* e C* (AUTOR, 2023)

Os pilares foram ensaiados sob compressão simples, utilizando ao todo quatro *strain gauges* colados nas armaduras transversais e nas armaduras longitudinais para leitura das deformações axiais. Para a leitura da deformação foi feita a instrumentação dos pilares com *Linear Variable Differentiation Transformer* (LVTD). Maiores detalhes da parte experimental estão descritos em Rodrigues (2022).

3 Modelagem Computacional

Para o lançamento numérico dos pilares selecionados do trabalho de Rodrigues (2022), foram utilizados os modelos de armadura discreta e de armadura incorporada. No modelo de armadura discreta, os nós dos elementos finitos da armadura devem coincidir com os nós dos elementos de concreto, havendo a necessidade de alinhar perfeitamente as discretizações dos elementos de linha com os de volume (Figura 2a). Já para o modelo de armadura incorporada, a rigidez das armaduras é acrescentada à rigidez do elemento de concreto. Desta forma, existe a facilidade de não precisar coincidir os nós dos elementos de armadura com os nós dos elementos de concreto, sendo útil no lançamento da geometria e evitando elementos de dimensões muito pequenas que possam gerar um custo computacional elevado (Figura 2b). Além disso, foi avaliado o comportamento do pilar, considerando ou não a camisa metálica nas extremidades, conforme representado na Figura 2 (c) e (d), respectivamente.

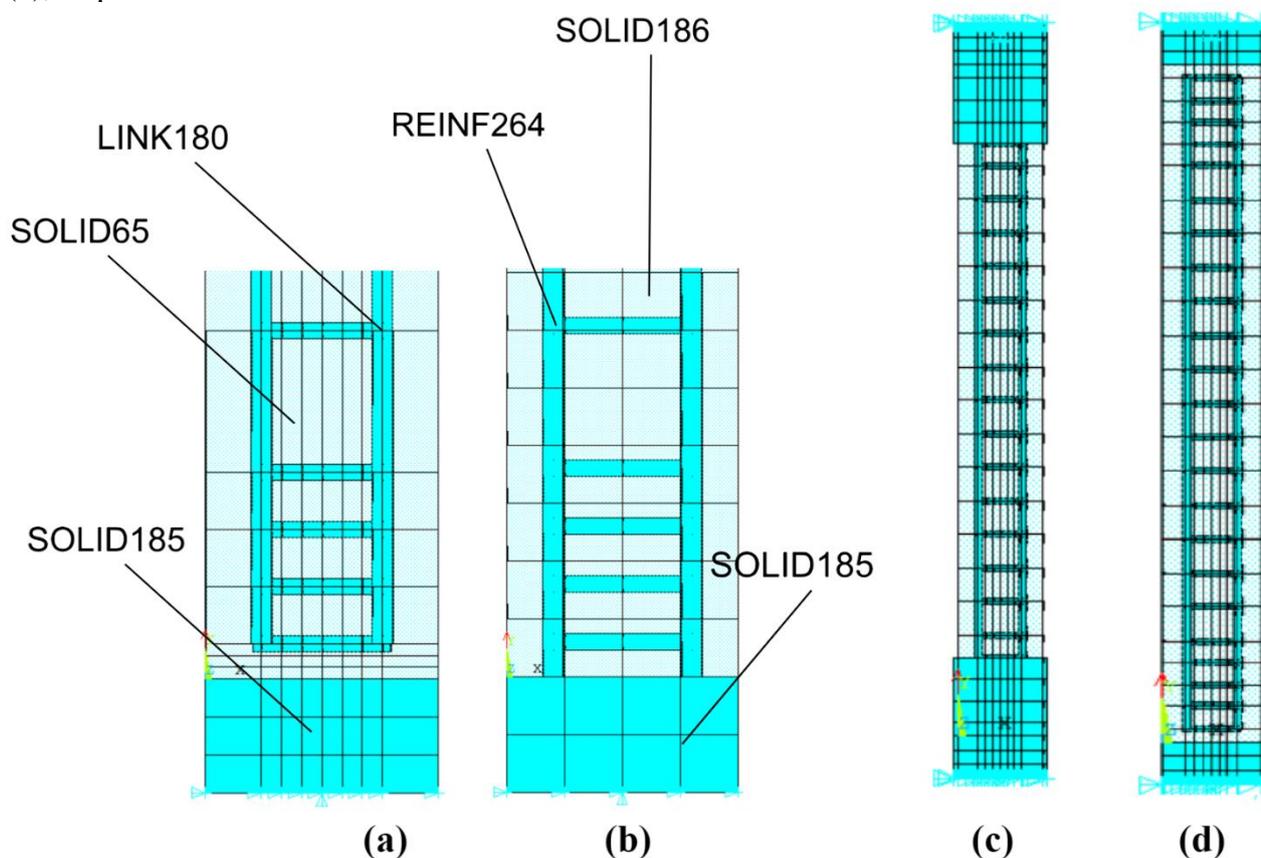


Figura 2 - Comparação da geometria de (a) armadura discreta e (b) armadura incorporada e comparação entre modelo com geometria (c) com confinamento de placa metálica e (d) sem confinamento de placa metálica (AUTOR, 2023)

O concreto foi modelado a partir dos elementos no formato hexaédricos de 8 nós (SOLID65), para o modelo de armadura discreta; e de 20 nós (SOLID186), no modelo de armadura incorporada; ambos com três graus de liberdade em cada nó (translação segundo X, Y e Z). Para as armaduras, no modelo de armaduras discreta, foi utilizado o elemento unidimensional LINK180, com três graus de liberdade em cada nó (translação segundo X, Y e Z). E, para o modelo de armadura incorporada, foi adotado o elemento REINF264, cujas coordenadas nodais, graus de liberdade, e conectividade são idênticas às do elemento base. Para a representação das bases de apoio e das placas metálicas em cada extremidade do pilar, foi utilizado o elemento SOLID185, que é um elemento tridimensional de 8 nós com três



graus de liberdade em cada nó (translação segundo X, Y e Z). No Quadro 1 encontram-se os elementos finitos utilizados na discretização dos pilares.

Quadro 1 - Elementos utilizados nos modelos computacionais (ANSYS, 2023)

	Concreto	Armadura	Placas de apoio/confinamento
Armadura Discreta	<p>SOLID65</p>	<p>LINK180</p>	<p>SOLID185</p>
Armadura Incorporada	<p>SOLID186</p>	<p>REINF264</p>	

As restrições para todos os modelos foram as mesmas. Considerou-se restrição nos sentidos X e Z (plano da seção transversal) na base da placa de apoio e no topo da placa de aplicação de deslocamento e, ainda, restrição em Y (eixo longitudinal) no nó central da base da placa de apoio. Para simular o carregamento, foram aplicados incrementos de deslocamento no nó central superior da placa de apoio.

4 Modelos Constitutivos dos Materiais

O principal desafio ao se modelar estruturas de concreto armado é a diferença entre o comportamento dos materiais concreto e armadura. A representação do comportamento dos materiais aço e concreto foi feita a partir de modelos analíticos e resultados experimentais. Para as armaduras de aço, foi adotado o modelo de comportamento elastoplástico perfeito, onde o aço não sofre endurecimento após o início da plastificação e sim uma plastificação sem aumento de carga (Figura 3). Para todas as armaduras foi considerado aço CA-50, o mesmo utilizado por Rodrigues (2022) nos pilares. Este modelo de material do aço foi aplicado para os elementos finitos LINK180 e REINF264, utilizados nos modelos de armadura discreta e armadura incorporada, respectivamente.

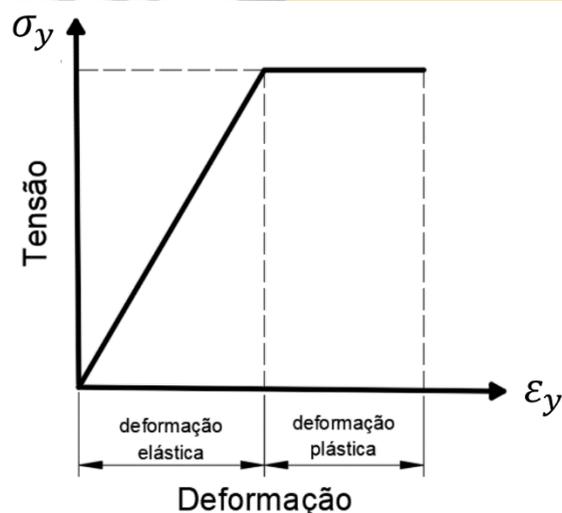


Figura 3 - Comportamento elastoplástico perfeito do aço (AUTOR 2023)

Para a representação do concreto comprimido no modelo de armadura discreta, foi adotada a curva tensão x deformação do Código Modelo *fib* (2013) a partir do valor da resistência à compressão média do concreto (f_{cm}), implementada no modelo MELAS, que habilita a inserção dos pontos da curva. Para o concreto tracionado, foi utilizado o modelo CONCRETE, o qual depende da resistência à tração do concreto. Em todos os modelos foi usado o valor de $f_{cm} = 105,23$ MPa. A Figura 4 mostra o gráfico adicionado ao *script* de entrada de dados referente à curva tensão x deformação do concreto comprimido.

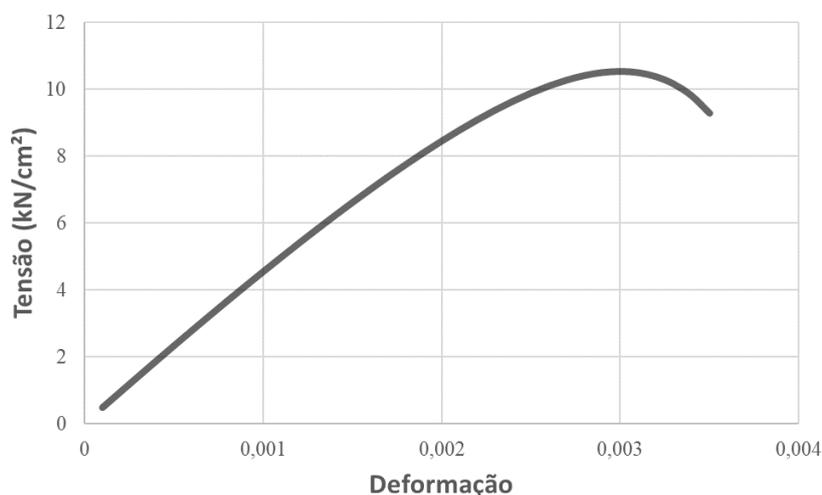


Figura 4 - Curva tensão x deformação modelo do concreto UHPC (AUTOR, 2023)

Como o modelo CONCRETE não está disponível para o elemento SOLID186, foi utilizado o modelo DP-CONCRETE (*Drucker-Prager*), também disponível no ANSYS, para a representação do concreto com o modelo de armadura incorporada. Para a utilização deste modelo, foram lançados os parâmetros como resistência à compressão biaxial, resistência média à tração, dilatância à tração e à compressão, tensão relativa no início da plastificação, deformação plástica última na tração e na compressão e as tensões relativas para deformações plásticas superiores à deformação plástica última, que melhor definem o comportamento não-linear do concreto. Estes parâmetros foram adotados a partir da calibração apresentada no trabalho de Ceron (2021). A Figura 5 representa o comportamento do modelo *Hardening, Softening and Dilatation* (HSD) do elemento à compressão (a) e à tração (b). No Quadro 2 estão indicados os parâmetros utilizados.

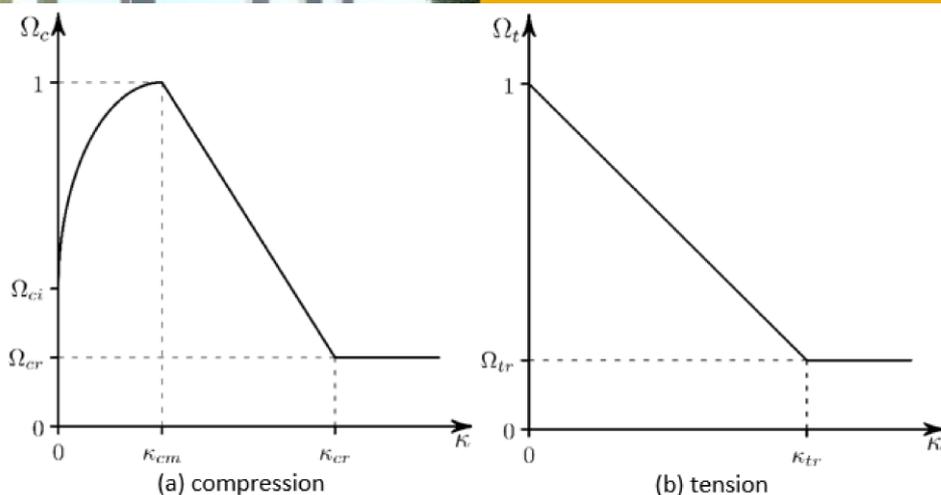


Figura 5 - Curva tensão x deformação modelo do concreto UHPC (ANSYS, 2023)

Quadro 2 - Parâmetros do modelo HSD para o elemento DP (baseados em CERON, 2021)

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
δ_t	0,60	Ω_{ci}	0,65
δ_c	0,55	Ω_{cr}	0,40
K_{cm}	$0,0021 - f_{cm}/E$	K_{tr}	0,001
K_{cr}	$0,0035 - \Omega_{cr} * f_{cm}/E$	Ω_{tr}	0,02

5 Análise de Pilares de Concreto Armado de UHPC

Com posse dos resultados experimentais, extraídos com a utilização do *software* Automeris, a partir das figuras carga x deformação, e obtendo os resultados numéricos com *script* específico de saída de dados do ANSYS, foi possível comparar os resultados experimentais aos resultados obtidos pelos modelos de armadura discreta e armadura incorporada, considerando ou não o confinamento de extremidade. O comparativo destas curvas para o Pilar P00A pode ser observado na Figura 6.

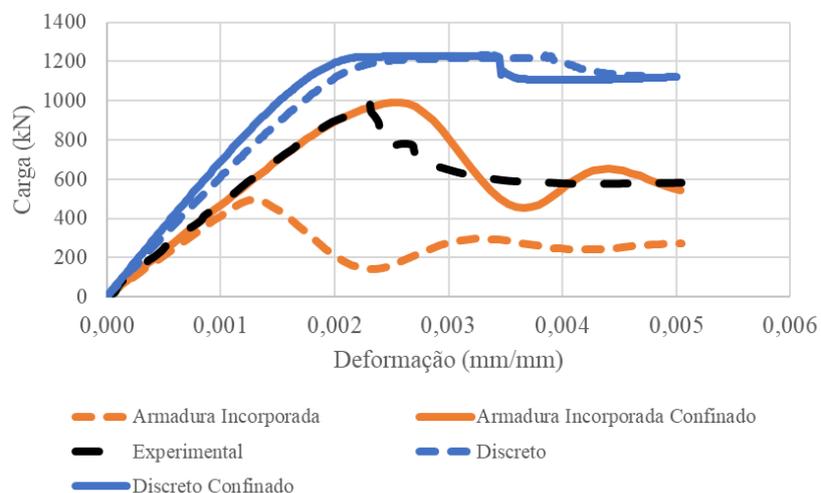


Figura 6 - Comparação curvas carga x deformação para o pilar P00A

Ao analisar os resultados do modelo de armadura discreta, foi possível observar que há uma capacidade de carga maior do modelo numérico em relação ao experimental, gerando uma diferença de 8% da carga máxima. Neste modelo, também se percebeu que não houve uma variação significativa da carga de ruptura do pilar, considerando este com e sem a presença de camisas de aço nas extremidades.

Por outro lado, no modelo de armadura incorporada percebeu-se um comportamento mais semelhante ao obtido experimentalmente apenas ao se colocar a camisa metálica, obtendo-se uma carga de ruptura muito próxima à obtida de forma experimental. Este tipo de comportamento aproxima-se mais da realidade, pois as camisas de aço, aumentam a seção transversal do pilar, reduzem o comprimento de flambagem do pilar e dão confinamento nas regiões onde os estribos são mais exigidos à tração. Tendo em vista que os resultados obtidos a partir do modelo de armadura incorporada foram mais próximos aos resultados experimentais (variação de 0,1% da carga máxima), adotou-se este modelo para o estudo dos pilares P00B e P00C. Além disso, observou-se um melhor comportamento da curva no trecho ascendente, assim como o comportamento pós pico, onde a curva converge para a carga obtida experimentalmente.

Desta forma, para os pilares P00A, P00B e P00C foram desenvolvidos dois modelos com armadura incorporada, com e sem a presença de camisas de aço próximo às extremidades dos pilares. Para todos houve melhor comportamento na presença das camisas que foram usadas na prática nos ensaios experimentais. Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as curvas carga x deformação dos pilares P00B e P00C, respectivamente.

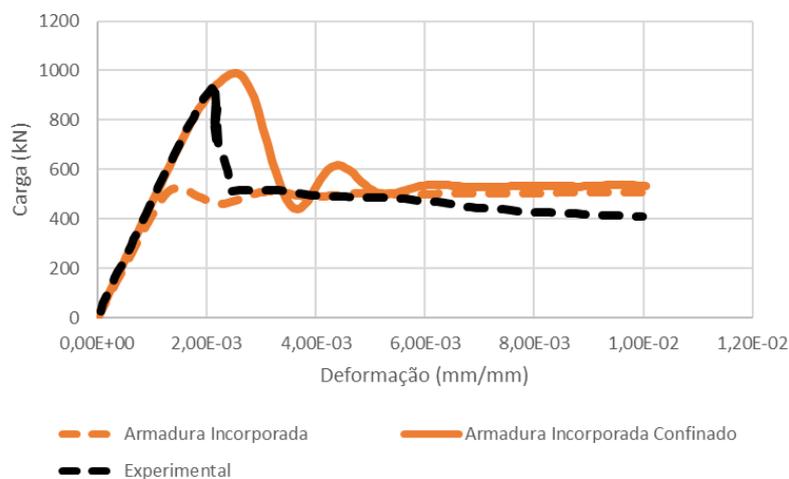


Figura 7 - Comparação curvas carga x deformação para o pilar P00B

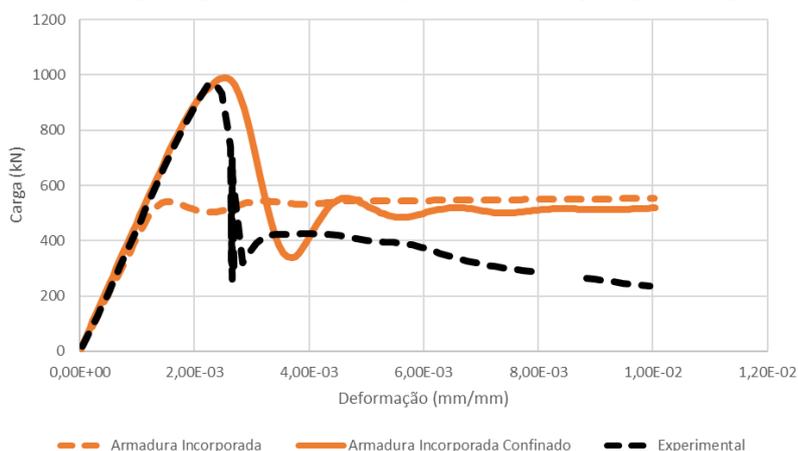


Figura 8 - Comparação curvas carga x deformação para o pilar P00C

Observou-se uma boa aproximação entre as curvas experimentais e numérica com as placas metálicas, apresentando uma diferença máxima na carga de ruptura de 6% para o pilar P00B e de 2% para o pilar P00C.

A interface gráfica do ANSYS permite ver os elementos em escala de cores com as medições de suas respostas aos esforços aos quais são submetidos. Desta forma, é possível verificar se o comportamento da estrutura é coerente e verificar o tipo de falha. Para o concreto foram medidas as tensões no sentido longitudinal do pilar (S_y). A Figura 9 mostra a distribuição de tensões no concreto no pico de carga para os pilares P00A, P00B e P00C, considerando a camisa metálica nas extremidades. Na Figura 10 é possível observar a evolução destas tensões no Pilar P00A, assim como as fissuras observadas experimentalmente por Rodrigues (2022).

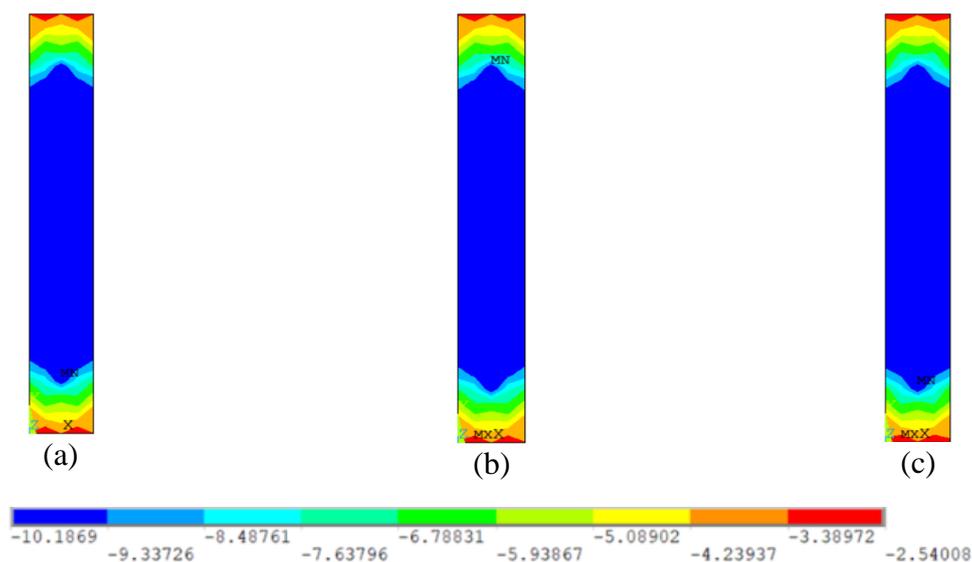


Figura 9 - Distribuição de tensões no concreto (kN/cm^2) para os modelos de armadura incorporada nos pilares (a) P00A, (b) P00B (b) e (c) P00C

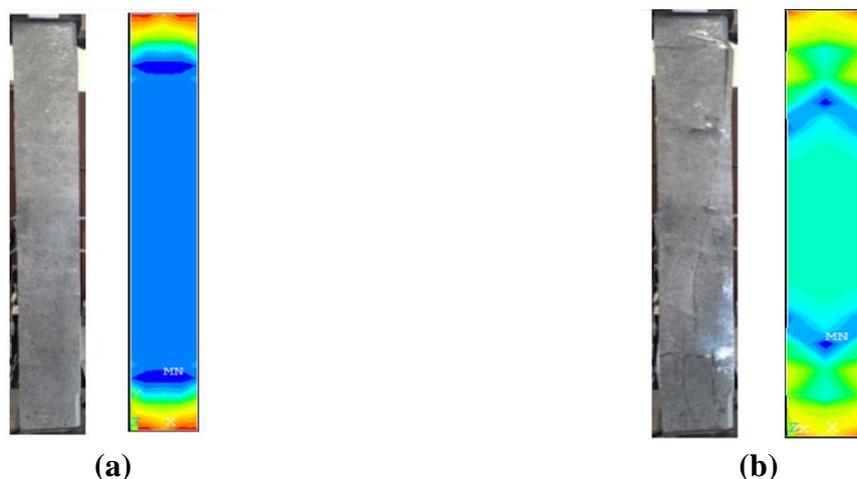


Figura 10 - Comparação entre as fissuras observadas experimentalmente com deformações de (a) 0,002 mm/mm e (b) 0,004 mm/mm no pilar P00A e suas respectivas distribuições de tensões no concreto

Observou-se que nos três pilares o concreto chegou a atingir a sua resistência à compressão máxima e que há redução das tensões na presença das camisas metálicas próximo às extremidades. Também há redução nas tensões das extremidades, por existir um maior índice de confinamento das armaduras. Devido a microestrutura mais densa, o concreto UHPC apresenta menor microfissuração interna e a ruptura ocorre de forma frágil. Rodrigues (2022) comenta que os pilares da série P00 sofreram grande perda da capacidade de carga após o alcance da força máxima, o que é resultado do deslocamento do cobrimento de concreto e, da menor deformação transversal do núcleo, quando comparado aos concretos com fibras. Outros autores, como Lima Junior (2003) e Hosinieh (2014), observaram que pilares com maiores espaçamentos entre armaduras transversais sofrem maior perda de volume de concreto, resultando em maior redução da seção resistente do pilar.

Para as armaduras percebeu-se que a deformação foi elástica até a carga de pico, como observado na Figura 11. Este gráfico mostra a comparação entre os resultados experimentais e numéricos (modelo armadura incorporada) da carga x deformação da armadura longitudinal e transversal. O comportamento no trecho elástico linear experimental é muito semelhante aos obtidos nas simulações com o modelo de armadura incorporada com a utilização de camisas metálicas. Este comportamento se repetiu para os pilares P00B e P00C.

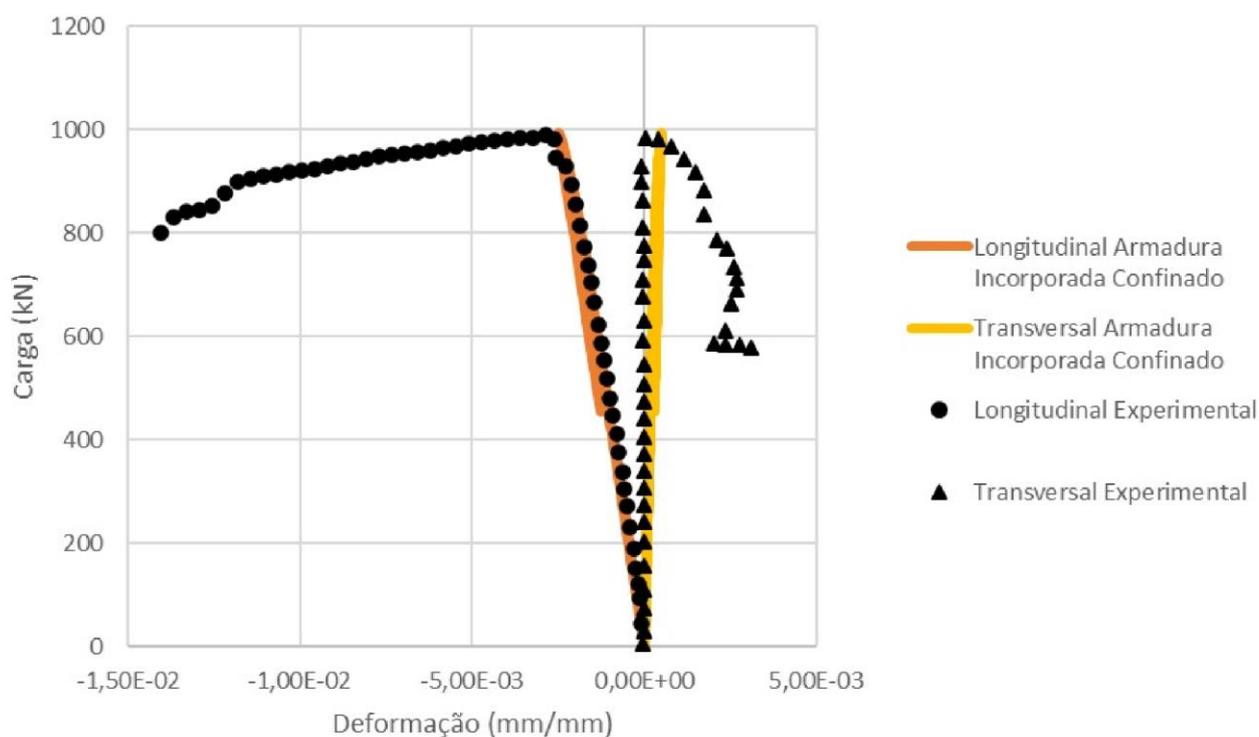


Figura 11 - Deformações nas armaduras longitudinais e transversais do pilar P00A com camisas metálica

6 Conclusões

A modelagem de pilares de UHPC submetidos à compressão axial apresentou resultados semelhantes aos pilares ensaiados experimentalmente, quando a modelagem é feita pelo modelo de armadura incorporada. Além de facilitar consideravelmente o lançamento da geometria, reduzindo o tempo da modelagem, apresenta resultados semelhantes ao experimental mesmo após o pico de carga. O modelo de armadura incorporada, se comporta diferentemente ao serem colocadas as camisas de aço



no entorno das suas extremidades, o que não acontece no modelo discreto. Esta resposta à presença ou não de elementos confinantes é importante ao estar se trabalhando com UHPC, visto que estes são mais frágeis e o confinamento aumenta a ductilidade da estrutura.

Referências

- ANSYS, Inc. ANSYS Mechanical APDL Theory reference. 2023.
- CERON, M.V. Desenvolvimento de um Script Para Análise em Elementos Finitos de Vigas De Concreto Através do Software Ansys. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso, PUCRS.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. 2013. 434 p.
- HOSINIEH, M. M. *Behaviour of High Performance Fibre Reinforced Concrete Columns under Axial Loading Thesis* (Master of Applied Sciences) - Institute for Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, , 2014.
- LAZZARI, P.M. Análise Não Linear Tridimensional de Viga Segmentada com Protensão Externa Utilizando o ANSYS. 2016. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas.
- LIMA JÚNIOR, H. C. Avaliação da ductilidade de pilares de concreto armado submetidos a flexo-compressão reta com e sem adição de fibras metálicas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- RODRIGUES, A.S. Avaliação da Influência do Confinamento e da Adição de Fibras Metálicas na Resistência e Ductilidade de Pilares Curtos Produzidos com Concreto de Ultra Alto Desempenho. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.