

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA EVOLUÇÃO DE FISSURAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO MODELO DE ARMADURA INCORPORADA

José Guilherme Oliveira Salati¹, Mário Vargas Ceron², Paula Manica Lazzari³

¹UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / joseguilherme-13@live.com

²UFRGS / Departamento de Engenharia Civil / mario.ceron@ufrgs.br

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

Resumo

Este trabalho tem por finalidade avaliar computacionalmente a utilização do *script* desenvolvido por Ceron (2021) para a representação da evolução de fissuras em elementos de concreto armado utilizando modelos com armadura incorporada. Para isso, foram estudadas as vigas testemunho ensaiadas em laboratório por Tirado (2022). A ferramenta empregada foi o *software* ANSYS v. 2024 R1, versão estudantil, que utiliza o método dos elementos finitos em suas análises. Para qualificar o estudo, comparou-se o resultado obtido com o modelo de armadura discreta, cuja fissuração já é disponibilizada pelo *software*. Além disso, para a validação do modelo utilizado observou-se a aproximação das curvas de carga x deslocamento e carga x deformação do aço e do concreto com aquelas obtidas do ensaio experimental. O diagrama de fissuras obtido a partir do *script* utilizado apresenta boa aproximação em comparação com o modelo disponibilizado pelo *software*.

Palavras-chave

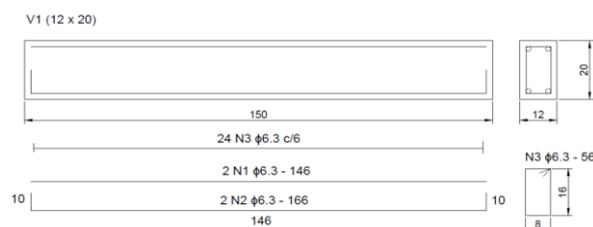
Fissuração; armadura discreta; armadura incorporada; ANSYS; *script*.

1 Introdução

O custo elevado, o tempo despendido e a alta demanda de espaço para a execução dos ensaios experimentais, podem ser substituídos por modelos computacionais que geram resultados cada vez mais próximos dos físicos. Dessa forma, o emprego de uma análise avançada, com simples manejo e de baixo custo, se faz necessária para o âmbito da engenharia civil. O método dos elementos finitos, possibilita a manipulação de modelos complexos e não lineares, como estruturas em concreto armado. O método divide o contínuo em elementos discretos, cujo comportamento é conhecido, formando uma malha de elementos, assim se obtém uma solução aproximada das solicitações na estrutura (LAZZARI, 2016). Sendo assim, este trabalho dá continuidade a uma série de estudos que buscam implementar um modelo numérico fiel ao comportamento físico. Para isso, nesta pesquisa será implementada uma nova ferramenta, elaborada por Ceron (2021), que permite a visualização da evolução da fissuração no concreto no modelo mais atual, ou seja, utilizando o modelo de armadura incorporada. Foram utilizados resultados obtidos experimentalmente para validação dos modelos numéricos. Também, foi abordado o comparativo entre o modelo já disponibilizado para armadura discreta e o implementado neste relatório. Para avaliar a eficiência, foi realizado um estudo de malha e construído um *script* auxiliar para obtenção do tempo despendido para processamento de cada malha adotada.

2 Modelo Experimental

Para este estudo, foram abordados os ensaios da série de vigas testemunho (VT) de Tirado (2022), cujo trabalho teve como intuito avaliar diferentes metodologias de incremento de ancoragem de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), ou seja, as vigas em concreto armado foram subdimensionadas longitudinalmente para justificar a utilização do reforço estrutural. Os protótipos possuem dimensões de 150 cm x 12 cm x 20 cm de comprimento, base e altura respectivamente. As peças foram moldadas utilizando concreto de $f_{ck} = 25$ MPa e armadas com quatro barras de $\text{Ø}6,3\text{mm}$ dispostas nos vértices da armadura transversal de $\text{Ø}6,3\text{mm}$ c/ 6 cm (Figura 1.a), cujo dimensionamento foi adotado a fim de superdimensionar a armadura transversal, evitando falhas pelo esforço cortante. Para avaliar a resistência das peças foi empregado o ensaio de flexão a 4 pontos (Figura 1.b).



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Detalhamento da viga e (b) ensaio Tirado (2022)

3 Modelo Computacional

Neste estudo, foi implementada computacionalmente a viga testemunho utilizando o modelo de armadura discreta, cuja análise exige a perfeita coincidência entre os nós dos elementos de aço e concreto, e também de armadura incorporada, que de forma inversa, garante a aderência incorporando a rigidez do aço aos elementos de concreto, abrindo mão de concordâncias entre malhas. Para isso, foram utilizados elementos disponíveis na biblioteca do ANSYS na discretização do modelo. Para o concreto, foram utilizados os elementos SOLID 65 no modelo com armadura discreta (Figura 2.a) e SOLID 186 no modelo com armadura incorporada (Figura 2.b). Para o aço, foram empregados os

elementos LINK 180 e REINF 264, respectivamente. Em ambas as análises, utilizou-se o SOLID 185 para modelar os apoios.

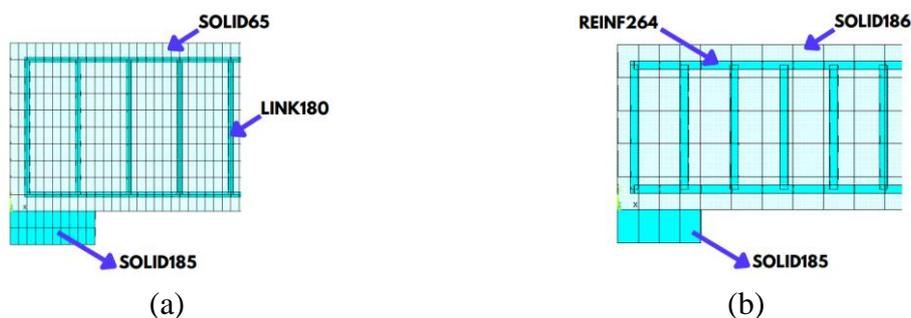


Figura 2 – Armadura (a) Discreta e (b) Incorporada

Os modelos constitutivos dos materiais são definidos a fim de extrair a melhor aproximação possível. Sendo assim, foi preciso definir para ambos os modelos de análise o comportamento à tração e compressão do concreto, fatores divergentes em cada abordagem. Para elementos do tipo SOLID 65, empregado na análise de armadura discreta, utilizou-se o modelo CONCRETE (critério de Willam-Warnke) para representar o comportamento do concreto à tração, cuja implementação depende da resistência à tração média do concreto (f_{ctm}), definida no item 8.2.5 da NBR 6118 (ABNT, 2023). Enquanto que para representação do concreto comprimido na análise discreta, implementou-se o Código Modelo *fib* (2013), que descreve o comportamento a partir de uma curva tensão x deformação em formato parabólico (Figura 3), construída a partir da resistência à compressão média do concreto (f_{cm}), cujo valor adotado é $f_{cm} = 26,01 \text{ MPa}$, obtido a partir de ensaios laboratoriais. Uma vez obtidos os dados da parábola, inseriu-se no ANSYS com a função *Multilinear Elasticity* (MELAS).



Figura 3 – Tensão x Deformação Código Modelo (*fib*, 2013)

Já para a análise de armadura incorporada, para representar o comportamento do concreto foi utilizado o modelo DP-CONCRETE, que simula o material a partir de duas superfícies de plastificação de *Drucker-Prager*, uma para o concreto comprimido e outra para tracionado. Para a implementação do modelo foi necessário a definição de parâmetros de entrada, como a dilatância à compressão e tração (δ_c e δ_t , respectivamente).

Ainda, deve-se definir um modelo de comportamento do material em processo de plastificação. Para tal, utilizou-se o modelo *Hardening, Softening, dilatation* (HSD), que simula o material sob os estados de endurecimento e amolecimento. Com o modelo HSD *Linear*, foi preciso definir os parâmetros de deformação plástica última em tração (κ_{tr}), deformação plástica última para compressão (κ_{cr}), deformação plástica última na resistência à compressão média (κ_{cm}), tensão relativa no início da plastificação na compressão (Ω_{ci}), tensão relativa para deformação plásticas superiores à κ_{cr} (Ω_{cr}) e tensão relativa para deformações plásticas superiores à κ_{tr} (Ω_{tr}).

Para este estudo, a fim de comparação dos resultados, foram abordados parâmetros calibrados por Ceron (2021) e Benincá (2019), explicitados no Quadro 1, sendo E o módulo de elasticidade do concreto.

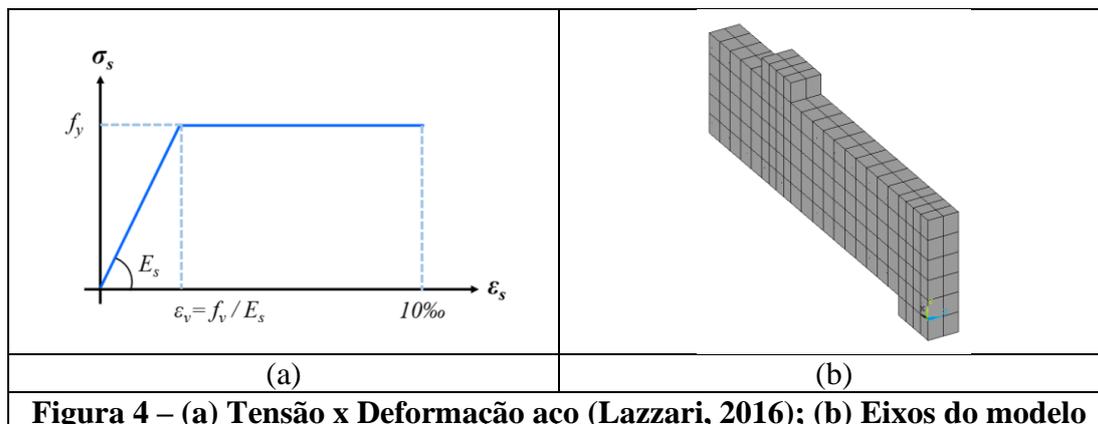
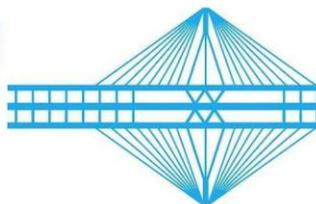
Quadro 1: Parâmetros comportamento do concreto

		Ceron (2021)	Benincá (2019)
DP - Concrete	δ_c	0,6	1
	δ_t	0,55	1
HSD - Linear	k_{tr}	0,001	0,001
	k_{cr}	$0,0035 - \Omega_{cr} * \frac{f_{cm}}{E}$	$0,0035 - \Omega_{cr} \frac{f_{cm}}{E}$
	k_{cm}	$\frac{0,7 f_{cm}^{0,31}}{1000} - \frac{f_{cm}}{E}$	$0,0021 - \frac{f_{cm}}{E}$
	Ω_{ci}	0,65	0,4
	Ω_{cr}	0,8	0,65
	Ω_{tr}	0,02	0,02

(elaborado pelo autor)

Para simular o comportamento do aço CA-50, em ambas as análises foi aplicado o modelo *Bilinear Isotropic Hardening* (BISO), com comportamento elastoplástico perfeito (Figura 4.a), isto é, desconsiderando o endurecimento do aço após a tensão de escoamento. Para isso, é necessário definir o módulo de elasticidade do aço ($E=21000$), o coeficiente de Poisson ($\nu=0,3$) e a tensão de escoamento ($f_y=60,3$ MPa). Além disso, os apoios foram modelados com comportamento elástico linear, sendo necessário definir o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Para as análises abordadas, foram considerados os mesmos valores que os do aço.

A fim de otimizar o processamento, considerou-se a condição de simetria da viga, isto é, o modelo representa apenas um quarto da peça. Para isso, foram aplicadas restrições de deslocamento em Z nas faces pertencentes aos planos de simetria. Além disso, a fim de impedir o movimento dos apoios, restrições de deslocamento verticais foram aplicadas (Figura 4.b).



4 Metodologia de análise

Foram avaliadas diferentes combinações de incrementos de carga, taxa de discretização e modelos de análise em busca do melhor equilíbrio entre proximidade dos resultados experimentais e custo computacional. Uma das vantagens de se empregar a análise de elementos finitos é a consideração da não linearidade dos materiais, utilizado no ANSYS a partir do método de Newton-Raphson.

Para tanto, utilizando os *scripts*, foram modeladas numericamente as vigas testemunho utilizando malhas de 1, 2 e 4 cm para armaduras incorporadas e somente de 1 cm para a análise de armadura discreta (Figura 5). O carregamento é simulado a partir de um incremento de deslocamento aplicado no centro do apoio central, desta forma os *substeps* dividem o carregamento total em menores, permitindo cálculos mais refinados. Para este estudo, foram avaliados 100, 200, 500 e 1000 incrementos para ambos os modelos de armadura. Ao longo do estudo, notou-se o destaque nas análises para 500 *substeps*, com isso, os demais modelos de carga foram abandonados.

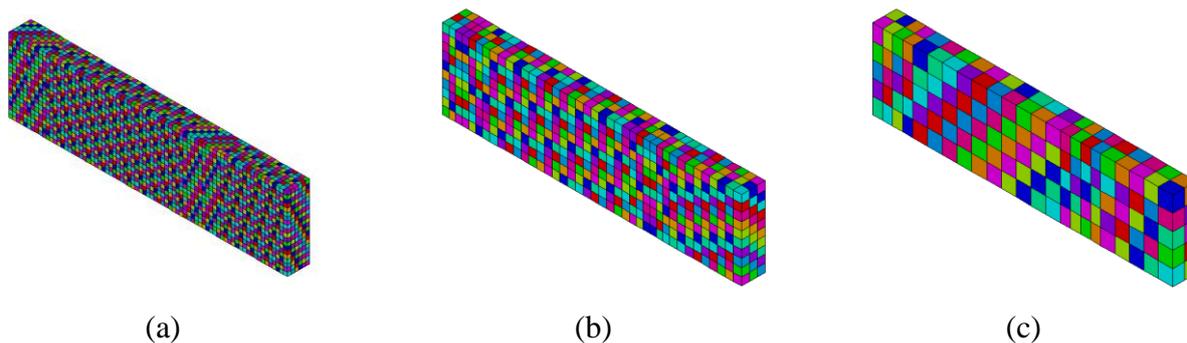


Figura 5: Malhas: (a) 1 cm, (b) 2 cm e (c) 4 cm

Para diferenciar os resultados obtidos, foi adotada uma nomenclatura que se refere ao elemento representativo do concreto, tamanho máximo dos elementos e uma referência ao método de análise. Com relação ao concreto, existe o SOLID65 (S65) e SOLID 186 (S186). Já para a malha, as dimensões são de 1, 2 ou 4 cm. Por último, as análises podem ser de Willam-Warnke (WW), modelo discreto, e Ceron (C) e Benincá (B), modelo incorporado.

Além disso, foram feitas outras duas análises para estudo de custo computacional. Como o elemento SOLID186 (20 nós) é empregado por haver compatibilidade com o modelo de armadura incorporada,

estudou-se a implementação do SOLID185 (8 nós) para representar o concreto, pois este também é compatível com o modelo de reforço incorporado e por conta da alta taxa de discretização da malha para 1 cm, o uso do S185 permite a redução do tempo de processamento. Para isso, foi feito o estudo comparativo de tempo de processamento, a partir de um *script* auxiliar.

5 *Script* de Fissuração

Atualmente, a biblioteca do ANSYS possui suporte para a visualização de um diagrama de fissuras apenas para o elemento SOLID65, uma vez que a formulação deste é apropriada para representação do concreto, tendo o comando *crack/crushing* já disponível no menu do *software*. Desta forma, o modelo de armadura incorporada, não possui a ferramenta para fissuração, sendo necessário apelar a comandos avançados de programação para obter o comparativo.

O *script* desenvolvido por Ceron (2021), proporciona uma visualização simplificada semelhante à disponibilizada para o elemento SOLID65. O código baseia-se nos conceitos fundamentais da resistência dos materiais, uma vez que a formulação é obtida a partir de um cubo submetido a tensões que geram deformações. Sob uma determinada orientação, utilizam-se as equações de transformação das deformações no plano.

Para a visualização do diagrama de fissuras a partir do *script*, basta alterar o valor da variável “rupt”, que representa o estado de fissuração sob um determinado deslocamento. Dessa forma, é possível utilizar o código em conjunto ao já empregado para a implementação do modelo numérico, também desenvolvido por Ceron (2021). De forma simplificada, a rotina calcula os ângulos e intensidades das deformações plásticas principais, com base apenas nas deformações plásticas nas direções X, Y e XY, estas obtidas diretamente pelo ANSYS. As direções X e Y referem-se, respectivamente, as direções paralelas ao comprimento e altura. Em seguida, define-se o valor máximo e o mínimo, armazenados nas variáveis Max1 e Min1, respectivamente, para posterior utilização como parâmetro de utilização. Por último, utilizam-se as bibliotecas /LSPEC e /AN3D, que permitem criar anotações no modelo, para efetuar a criação de linhas. Para isso, é feito um laço contendo dois condicionais *IF. Estes são responsáveis por avaliar as deformações principais calculadas e se estas são maiores do que zero. Em caso afirmativo, efetua-se a criação das linhas (Figura 6).

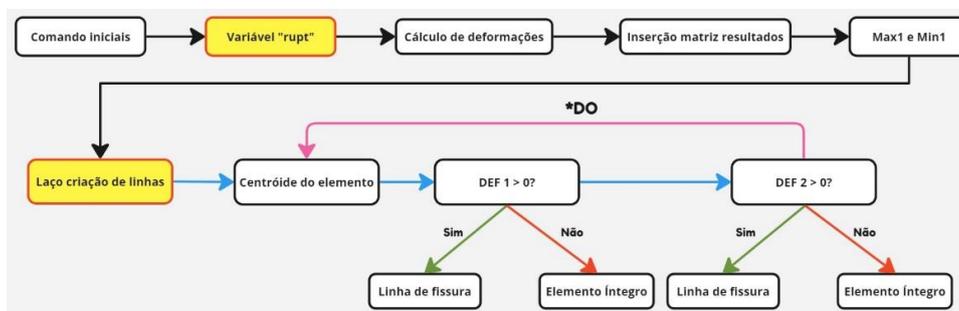


Figura 6 – Fluxograma do *script*

6 Análise de resultados

A partir dos resultados obtidos por Tirado (2022) dos dois modelos físicos da viga VT e dos dados coletados computacionalmente, é possível observar a concentração dos resultados numéricos na região entre as curvas experimentais. Percebe-se que o modelo discreto (WW) possui a primeira fissura muito antecipada em relação às demais. Além disso, a análise de WW não conseguiu representar o pico de resistência como os demais modelos analisados. Os exemplos de 1 e 2 cm de malha com parâmetros de Ceron (C), tocam a curva experimental e chegam a valores menores que o experimental em alguns momentos. Ressalta-se o comportamento das curvas de 1 cm e 2 cm para os parâmetros DP de Benincá (B), cujas curvas assemelham-se (Figura 7).

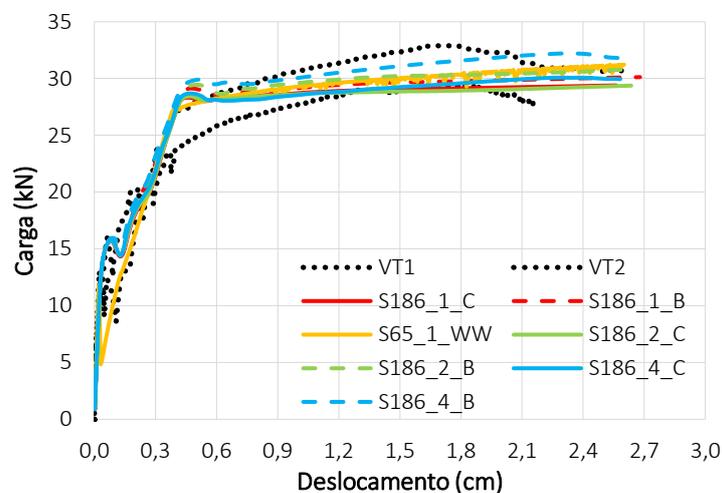
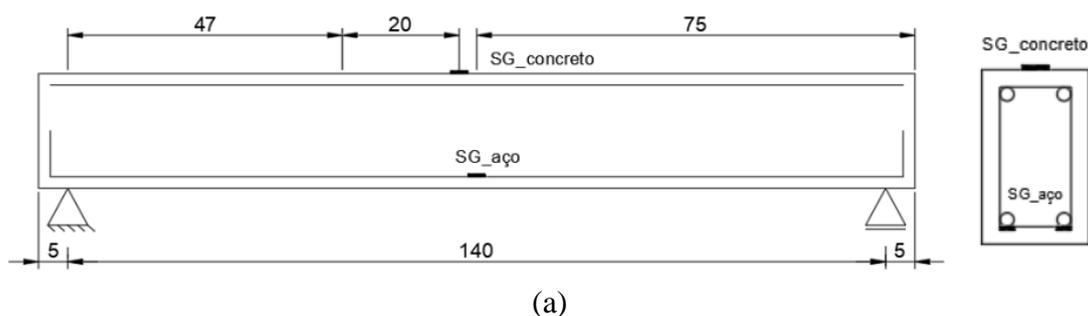


Figura 7 – Gráfico carga x deslocamento VT

Além dos dados de carga x deslocamento, foram coletados em laboratório dados de carga x deformação no aço e no concreto, a partir de extensômetros posicionados estrategicamente. Para avaliar a deformação no concreto, foi implementado o equipamento na face superior da viga próximo ao centro do vão, enquanto que para o aço foram utilizados dois extensômetros posicionados no centro de cada armadura longitudinal de tração (Figura 8.a). Assim como na análise anterior, coletou-se os dados de deformação nos materiais, a partir de *script* específico, nos pontos específicos citados no ensaio laboratorial e comparou-se com os experimentais. As deformações no modelo WW apresentam uma descontinuidade antecipada, enquanto que os modelos de armadura incorporada tiveram comportamento semelhante uns aos outros (Figura 8.a e 8.b).



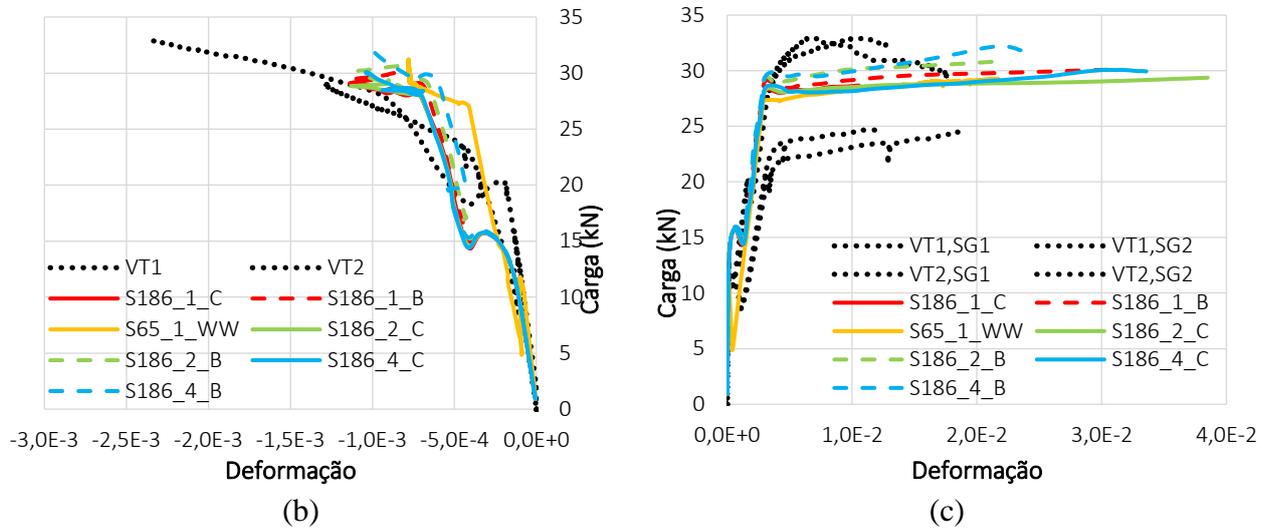


Figura 8 – Posição de coleta de dados; Gráfico carga x deformação: (b) concreto e (c) aço

Para avaliar a economia no custo computacional, foram comparados os dados coletados a partir do modelo com o elemento SOLID185 para representação do concreto. Foram comparadas malhas de 1cm para os parâmetros de Benincá e Ceron com os resultados obtidos em S186_4_C e S186_4_B. Os modelos apresentaram uma considerável similaridade com um menor custo, quando comparado aos modelos tradicionais com SOLID186 (Figura 9).

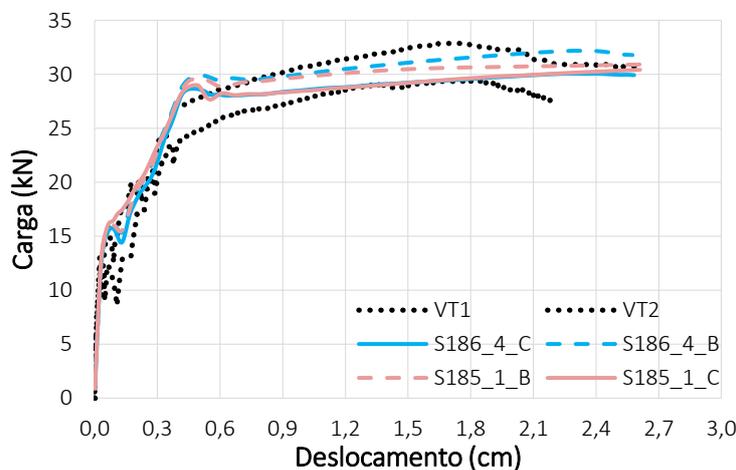


Figura 9 – Gráfico carga x deslocamento SOLID 185

A partir da utilização de um *script* auxiliar foi possível avaliar o tempo de processamento para cada modelo. A rotina coleta o tempo em que a máquina realmente exerceu um processamento, isto é, não é computado o tempo em que a máquina permanece ociosa. A linguagem APDL disponibiliza o tempo a partir do comando *GET, em que em um dos parâmetros de entrada está a variável CPU, cuja função é coletar o tempo de processamento em segundos (s). Dessa forma, observa-se a notável diferença tempo entre as análises (Quadro 2).

Quadro 2: Tempo de Processamento (s)

	Benincá	Ceron	Benincá	Ceron
	SOLID 185		SOLID 186	
500,4	227,797	228,25	276,813	349,875
500,2	982,594	983,156	1.326,375	1.425,578
500,1	6.388,422	7.171,547	14.961,422	12.916,844

Este tempo de processamento foi alcançado utilizando uma máquina com processador Inter Core i5 9300H e memória DDR4 de 16 Gigabytes operando em *dual channel*.

Os diagramas de fissuração obtidos (Figura 9), representam um instante de carga cujo deslocamento é aproximadamente igual a 0,23 cm, medidos na ponta da viga. Este momento, ocorre no *substep* 1,094 cuja carga aplicada é de aproximadamente 19 kN. É possível notar que o *script* reproduz as linhas de acordo com o modelo discreto, representando a intensidade e a inclinação das fissuras.

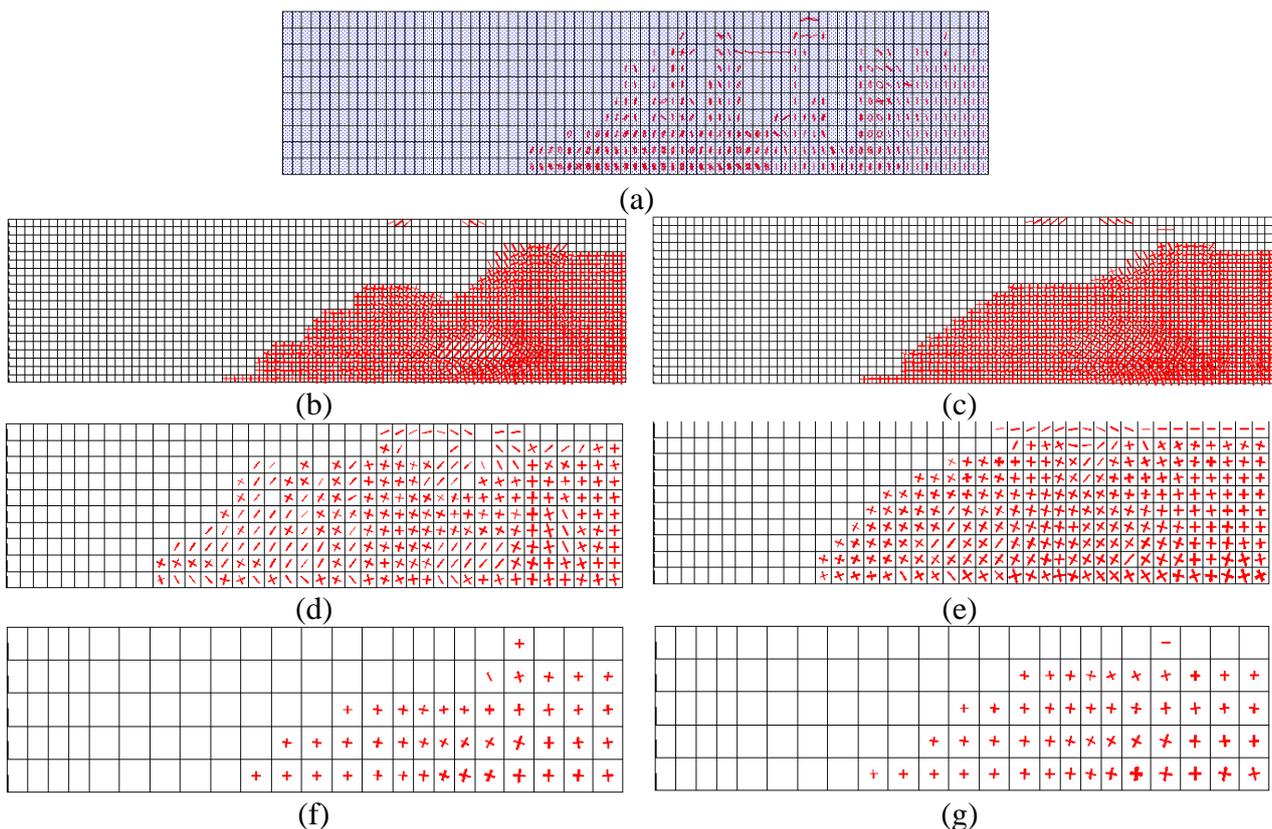


Figura 9 – Fissuras (a) S65_1_WW, (b) S186_1_C, (c) S186_1_B, (d) S186_2_C, (e) S186_2_B, (f) S186_4_C e (g) S186_4_B

Além disso, observou-se uma melhor aproximação das fissuras nos modelos S186 com parâmetros de Ceron, uma vez que este, representou melhor as descontinuidades existentes no diagrama. Ainda, o modelo S186_1_B, apresentou elevada concentração de fissuras na região próxima a borda inferior. O *script* pode ser melhorado para condições de visualização, isto é, é possível representar as fissuras

no interior dos elementos, ajustando os parâmetros Z de desenho no comando /AN3D, que posiciona os pontos iniciais e finais das linhas de fissura, de acordo com a malha abordada (Figura 10).

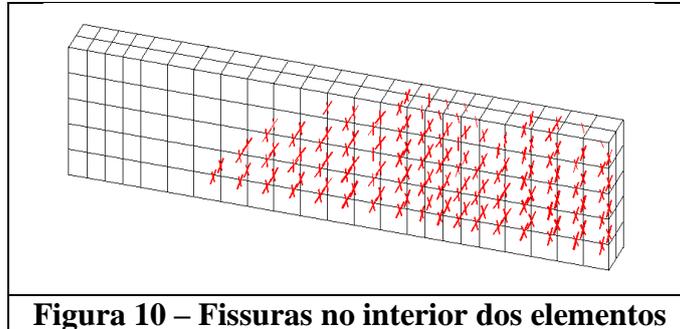


Figura 10 – Fissuras no interior dos elementos

Conclusões

De fato, o modelo numérico ainda tem muitos pontos a evoluir, porém, as pesquisas já demonstram resultados promissores. A partir do estudo apresentado, é possível abordar demais problemas utilizando malhas menos refinadas e ainda assim obter bons resultados, como demonstrado na análise dos elementos SOLID185. Também, a fissuração dos elementos de concreto utilizando a armadura incorporada, apresenta grande semelhança com a disponibilizada pelo ANSYS. Dessa forma, agregasse mais uma ferramenta para abordar o modelo de armadura incorporada, o qual possui grande aplicação, uma vez que reduz o trabalho de modelagem e apresenta resultados mais próximos dos experimentais.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- BENINCÁ, M. E. Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto: modelo parametrizado de elementos finitos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- CERON, M. V. Desenvolvimento de um script para análise em elementos finitos de vigas de concreto através do software ANSYS. 2021. 136 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. Fib Model Code for Concrete Structures 2010. 2013. 434 p.
- LAZZARI, P. M. Simulação Numérica das Etapas Construtivas de Pontes Estaiadas através do Método dos Elementos Finitos. 2016. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TIRADO, L. H. B. Análise Experimental de Métodos de Ancoragem de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) em Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.