

USO DE METAMATERIAIS PARA REFORÇO DE CONCRETO ARMADO

Isabella de Cassia Oliveira<sup>1</sup> (IC), Paulo Cesar Gonçalves (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerdiade Federal de Itajubá.

**Palavras-chave:** Metamateriais. Reforço do concreto. Resistência de aderência no concreto armado.

**Introdução**

Recentemente o emprego de materiais artificiais, denominados Metamateriais, vem estimulando a atenção de pesquisadores em várias áreas, devido a sua particularidade de representar estruturas constituídas frequentemente em arranjos periódicos construídos em blocos, que exibem propriedades e funcionalidades que diferem e superam os seus materiais constituintes. A tecnologia da impressão 3D tem permitido a produção de Metamateriais com uma considerável diversidade de geometrias e diferentes morfologias de superfície e rugosidade, motivando o desenvolvimento de pesquisas, especialmente aplicados a reforços de concreto e argamassa. O objetivo desse trabalho é analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com barras de metamateriais por meio de simulação numérica, de forma a contribuir com o processo de estudos e pesquisas sobre os metamateriais como solução para o concreto, no que tange a possibilidade de aumento da resistência de aderência entre a matriz cimentícia e a barra de reforço. Esta pesquisa visa a simulação numérica de modelos geométricos idealizados de barras metamateriais para o reforço do concreto permitem uma pré-avaliação da sua eficácia, antes de sua produção para análises em ensaios experimentais, possibilitando uma melhor otimização dos estudos e pesquisas. Para realização deste estudo foi empregado simulação numérica por meio do Método dos Elementos Finitos.

**Metodologia**

O desenvolvimento deste trabalho de iniciação científica foi realizado por meio de análises numéricas de modelo reduzidos de vigas em argamassa armada referente as propriedades mecânicas de aderência entre os matérias na região de interface, utilizando o software de elementos finitos ANSYS®. Os modelos de reforços das vigas de argamassa estudados neste trabalho foram utilizados do trabalho de Ramirez, C.Q. et al (2022), conforme ilustrados na Figura 1.

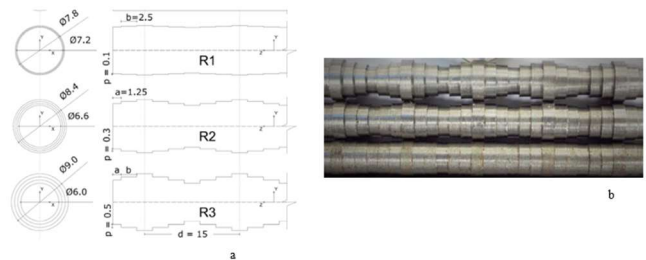


Figura 1 – Barras de reforço de metamaterial: seção transversal XY e seção YZ (a). Foto das Barras de reforço de metamaterial 3D (b).

A partir do trabalho de referência, as barras metamateriais foram modeladas no software ANSYS® (Figura 2).

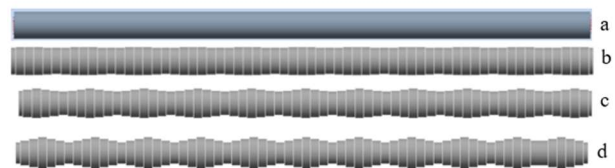


Figura 2 – Modelos 3D de viga reforçada: a) Reforço R0 (Referencia). b) Reforço R1. c) Reforço R2. d) Reforço R3.

Em seguida, no modelador geométrico do software, cada barra de reforço foi inserida em vigas prismáticas, conforme ilustradas na Figura 3.

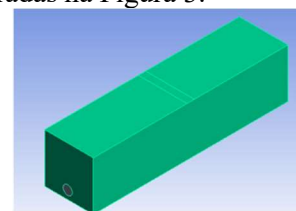


Figura 3 – viga prismática reforçadas

Próximo passo foi a configuração da malha dos elementos finitos e definição das condições de contorno (Figura 4)

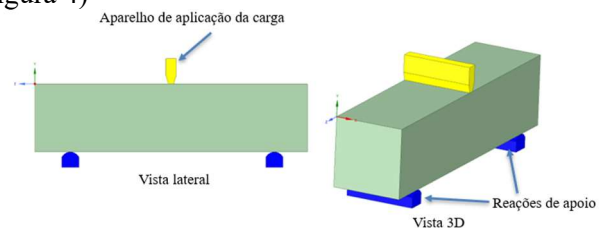


Figura 4 – Condições de contorno dos modelos Para as condições de contorno, os apoios foram considerados

com os graus de liberdade de translação em todas as direções restritos. Para a carga, foi empregada força de 3000N.

## Resultados e discussão

Por meio de simulação numérica em ensaios de flexão a três pontos, foi obtidos e estudados resultados na superfície de contato, em termos de tensão de atrito (*Frictional Stress*), pressão (*Pressure*) e deslizamento relativo entre o reforço e a região de contato no concreto (*Sliding distance*), com objetivo de avaliar a resistência de aderência dos modelos de reforço que empregam barra metamateriais em comparação com o modelo referência, cujo reforço é com barra de superfície lisa. Os resultados em termos de *Frictional Stress* para cada modelo, são apresentados na Figura 5.

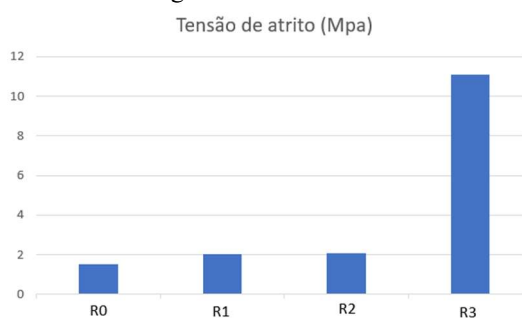
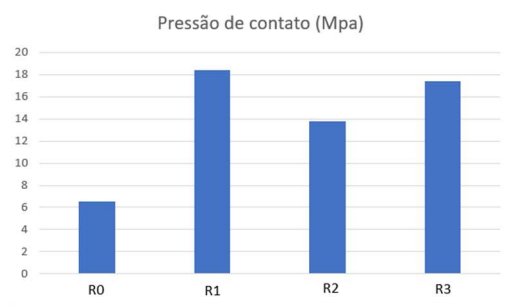


Figura 5 – Valores de tensão de atrito dos modelos tipo metamateriais (R1, R2, R3) e o de barra lisa (R0).

De acordo com o apresentado pela Figura 5, os resultados indicam que as tensões de atrito aumentaram em todos os modelos com reforço em metamaterial em comparação com o modelo com reforço liso. O resultado mais expressivo foi o observado do reforço R3, com aumento de aproximadamente de 7 vezes, em relação ao R0.

Os resultados de *Pressure* para cada modelo estudado estão apresentados na Figura 6



Todos os reforços metamateriais apresentaram valores superiores ao valor obtido com o reforço de referência (R0). Vale ressaltar que os valores apresentados pelos modelos R1 e R3 indicaram um aumento de aproximadamente 2,8 vezes e 2,7 vezes, respectivamente. Esses resultados corroboram com o emprego de reforços do tipo metamateriais para o concreto, promovendo uma melhor aderência entre os materiais.

Quanto a análise do deslizamento relativo (*Sliding distance*) na interface entre o material cimentício e a barra de reforço, foi possível perceber que houve redução dos deslizamentos, sendo mais acentuada conforme maior a rugosidade de superfície da

barra metamaterial. Desta forma, a maior redução do deslizamento relativo ocorreu no modelo com reforço R3, conforme comparação com os resultados do modelo referência R0 (Figura 7).

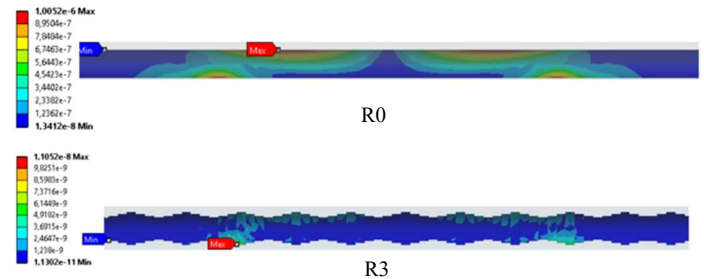


Figura 7 – Deslizamento relativo (m) entre o reforço e o concreto na região de interface (m) entre os modelos R0 e R3

## Conclusões

Este trabalho de pesquisa visou o estudo da possível melhora da resistência de aderência entre o concreto e o reforço. Sendo a aderência o fenômeno essencial para a consolidação do concreto armado como material estrutural, o estudo de novas alternativas para o reforço do concreto motivou o estudo e o desenvolvimento de um modelo de reforço usando a concepção dos metamateriais. Os resultados em termos de tensão de atrito, a qual indica o quanto a barra de reforço apresenta de resistência de aderência, demonstraram que todas as barras metamateriais valores superiores quando comparados com o resultado do modelo de referência.

No mesmo âmbito da análise de incremento da aderência, os modelos de vigas reforçadas com barra metamateriais apresentaram resultados em termos de pressão de contato superiores aos resultados do modelo referência, fenômeno que reforça a capacidade de aumento da resistência de aderência entre os materiais. Ademais, nas análises numéricas do deslizamento ente os materiais cimentício e o reforço, os modelos reforçados com barras metamateriais apresentaram um deslizamento relativo entre os materiais inferior ao resultado obtido pelo modelo de referência. Todos esses resultados obtidos nos modelos de viga reforçadas com metamaterial, em destaque o modelo reforçado R3, corroboram com o estudo do emprego de reforços do tipo metamateriais para o concreto, promovendo uma melhor aderência entre os materiais.

## Agradecimento

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) pela bolsa concedida a aluna autora, cujo apoio incentivou o desenvolvimento dessa pesquisa.

### Referências

- BERTOLDI, K., VITELLI, V., CHRISTENSEN, J., & VAN HECKE, M. (2017). Flexible mechanical metamaterials. *Nature Reviews Materials*, 2. <http://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66>
- CASTRO, C. M. (2002). Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155 p
- CHRISTENSEN J, KADIC M, WEGENER M, KRAFT O, Wegener M (2015) Vibrant times for mechanical metamaterials. *MRS Commun* 5:453
- D. R. SMITH, J. B. PENDRY, AND M. C. K. WILTSHIRE, "Metamaterials and negative refractive index," *Science* 305, 788–792 (2004).
- DUMÊT, T. B. (2003). Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 330 p.
- ELIGEHAUSEN, R.; POPOV, E.P.; BERTERO, V.V. (1983). Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations. Report No. UCB/EERC 83-23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. 162 p.
- FARINA I, FABBROCINO F, CARPENTIERI G, MODANO M, AMENDOLA A, GOODALL R. On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Compos Part B*. 2015;90:76-85
- FERNANDES, R. M. (2000). A influência das ações repetidas na aderência aço concreto. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155 p, São Carlos.
- FUSCO, P. B., Técnica de Armar as Estruturas de Concreto., Editora Pini Ltda 265 pps, São Paulo 1995.
- LEONHARDT, F.; MONNIG, E. Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciencia, 1977.
- LI J, WU Z, HUANG C, LI L. Multiscale carbon nanotube-woven glass fiber reinforced cyanate ester/epoxy composites for enhanced mechanical and thermal properties. *Compos Sci Technol* 2014;104:81e8.
- MECHTCHERINE, V., GRAFE, J., NERELLA, V. N., SPANIOL, E., & HERTEL, M. (2018). 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – manufacture , mechanical properties and bond behaviour. *Construction and Building Materials*, 179, 125–137. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202>.
- PENDRY JB. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett* 2000; 85:3966.
- RAMIREZ, C.Q., SANTOS, C.V.S, GONÇALVES, P.C., GELFUSO, M.V., SANTOS, V.C., SÁNCHEZ, J.A.G. Interfacial Bonding Strength in Cement Mortar Beams Reinforced with Metamaterial Bars. *Materials Research*. 2022; 25:e20210383. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0383>.
- REYES, F. E. G. Análise da aderência entre barras de aço e concretos (CC, CAA E CAAFA), sob influência de ações monotônicas e cíclicas. 209. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- TONG X.C. Functional metamaterials and metadevices. Cham: SpringerInternational Publishing; 2018. Vol. 262.
- VESELAGO VG. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $m$ . *Phys-Usp+* 1968; 10:509–14