

INVESTIGAÇÃO DE UMA BARRA DE METAREFORÇO PARA CONCRETO ARMADO, UTILIZANDO SIMULAÇÕES DE ELEMENTOS FINITOS

Gustavo R. Corrêa¹ (IC), Paulo C. Gonçalves (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Metareforço. Metamaterial. Resistência de aderência. Concreto armado. Elementos Finitos.

Introdução

O concreto armado é um material estrutural compósito, cujo funcionamento adequado depende principalmente da boa aderência entre as barras de aço e o concreto (SEOK, Seungwook et al. 2020). Essa aderência na interface concreto-aço depende de uma complexidade de propriedades mecânicas, físicas e químicas dos dois materiais.

Por conta da importância da aderência no comportamento estrutural e na durabilidade do concreto armado e pela complexa gama de variáveis que rege o seu comportamento. Fica evidente que os estudos sobre o comportamento da aderência na região de interface entre os dois materiais ainda não se esgotaram, e mais pesquisas são necessárias para se ter um melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem nessa interface e desenvolver soluções para melhora da resistência de aderência.

Uma solução com bastante potencial para a melhora do desempenho mecânico do concreto armado são as barras de reforço feitas em Metamaterial (FARINA et.al, 2015, 2016; FABBROCINO et.al.,2016). Esses Metamateriais são estruturas formadas por unidades básicas repetidas periodicamente, com o objetivo de atingir novas propriedades e funcionalidades (BERTOLDI, Katia et al. 2017). Quando aplicados ao concreto estrutural, são chamados de Metareforços e podem contribuir para o aumento da resistência de aderência.

Um modo interessante de avançar os estudos na área de Metareforços é através de simulações numéricas dessas geometrias, tais simulações permitem uma avaliação preliminar de sua eficácia, antecedendo sua fabricação para investigações em ensaios experimentais e permitindo uma otimização mais refinada dos estudos e pesquisas.

Em suma, o objetivo desse estudo é analisar um modelo de viga prismática de concreto reforçada com Metareforços por meio de simulações numéricas. Para então comparar os resultados com o concreto reforçado com vergalhão convencional, verificando o possível aumento da resistência de aderência.

Metodologia

Foram desenvolvidas simulações numéricas através do software de elementos finitos ANSYS®, para o comportamento da aderência na interface concreto-aço em dois modelos de barras prismáticas de concreto armado sujeitas a flexão a três pontos (Figura 1). O primeiro usou como reforço do concreto uma barra de vergalhão convencional de 8,0mm e o segundo usou uma barra de Metamaterial que foi idealizada por Ramirez et.al. (2022).

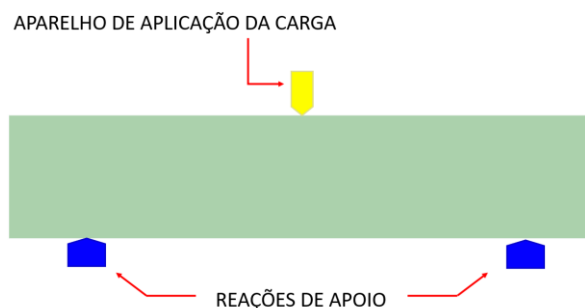


Figura 1: Vigas prismáticas e condições de contorno (Ramírez et al. 2022, Adaptado).

Essa viga prismática de concreto armado, com comprimento de 160mm e seção transversal quadrada de 40mm x 40mm (Figuras 2 e 3).

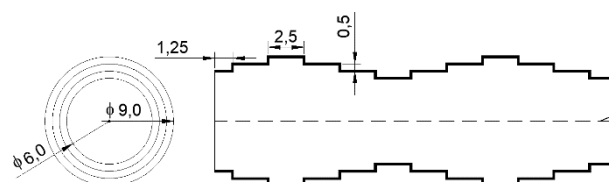


Figura 2: Geometria do Metareforço (Ramírez et al. 2022).



Figura 3: Fotografia do Metareforço (Ramírez et al. 2022).

Os dados do concreto e do Metareforço foram caracterizados no trabalho Ramírez et al. (2022) e as informações para o vergalhão estão disponíveis na seção 8.3 da NBR 6118:2014.

A fim de analisar o possível aumento da aderência na interface de contato concreto-aço, foram realizadas análises estruturais estáticas utilizando o software comercial ANSYS® (2022) dos modelos apresentados.

Em ambos os modelos estudados foi empregada uma malha estruturada com elementos do tipo tetraédrico Tet10, mais especificamente o SOLID187 (ANSYS Inc., 2022), com comportamento de transição suave.

Quanto as dimensões da malha, na viga prismática de concreto foram usados elementos finitos com tamanho de 10 mm e tanto no reforço convencional, quanto no Metareforço, o tamanho dos elementos foi de 2 mm.

Uma vez definida a malha, as condições de contorno foram atribuídas aos dois modelos para simular vigas prismáticas submetidas a flexão a três pontos. Essas condições consistiram em uma carga concentrada aplicada em uma estreita faixa na face superior central e em deslocamentos impedidos em duas faixas estreitas, próximas das extremidades da face inferior das vigas.

A justificativa para a escolha de faixas estreitas para aplicação da carga e da restrição dos deslocamentos, foi de aproximar as condições de contorno do modelo com as encontradas em ensaios experimentais desse tipo.

O sistema de carregamento foi definido em 10 passos de carga, cujo valor máximo foi de 3200N. Esse valor adotado teve como base o trabalho Ramirez et.al. (2022),

no qual o modelo de viga prismática em argamassa cimentícia reforçada com o Metareforço proposto, foi estudado a partir de ensaio experimental.

Resultados e discussão

Os resultados das simulações numéricas focaram no âmbito da aderência, por meio de resultados em termos de tensões de atrito, pressão de contato e deslocamentos relativos determinados por ferramentas de contato (Contact Tool) do Ansys®.

As tensões de atrito constituem as forças de resistência ao movimento entre as superfícies em contato, no sentido longitudinal à interface de contato. Essas forças são cruciais para avaliar a distribuição da resistência de aderência localizadas nos materiais.

Os resultados de pressão de contato apresentam a distribuição de pressão entre as superfícies em contato na direção normal à interface de contato, permitindo uma compreensão mais profunda das forças de reação e da carga suportada por cada parte do sistema. Essa informação é fundamental para garantir uma distribuição adequada de carga e evitar pontos de concentração de tensão.

Os resultados de deslocamentos relativos, por sua vez, permitem analisar os deslocamentos relativos entre as superfícies em contato ao longo do tempo. Esse parâmetro é essencial para entender a cinemática do contato e avaliar a influência do movimento relativo na aderência.

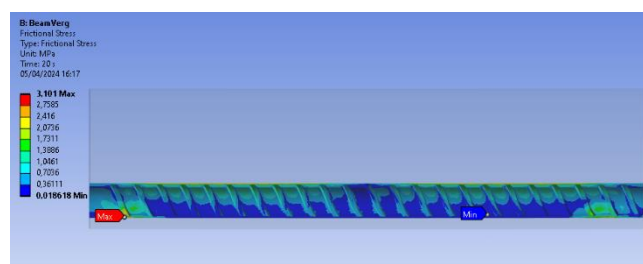


Figura 4: Tensões de atrito [MPa], vergalhão e concreto (Autoria própria).

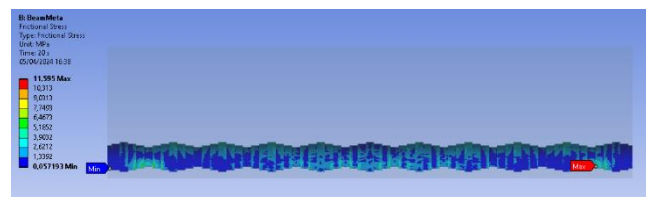


Figura 5: Tensões de atrito [MPa], Metareforço e o concreto (Autoria própria).

A distribuição das tensões de atrito é ligeiramente mais uniforme no modelo que usa o Metareforço (Figura 5) em

relação ao modelo com vergalhão (Figura 4), e os valores das tensões de atrito são maiores no modelo com Metareforço em comparação com o modelo com vergalhão, indicando uma melhor resistência de aderência entre a matriz de concreto e o reforço.

Os valores médios de tensões de atrito para carga máxima foi de aproximadamente 1,71 MPa para o modelo com Metareforço e de 0,58 MPa para o modelo com vergalhão. Representando um aumento de 295%.

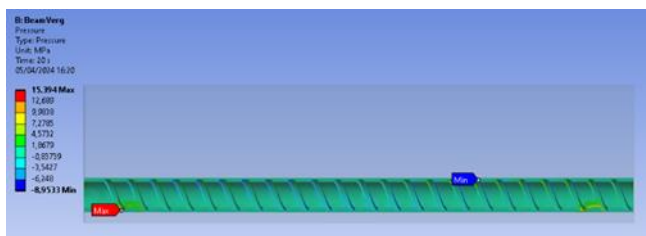


Figura 6: Pressão de contato [MPa], vergalhão e concreto (Autoria própria).

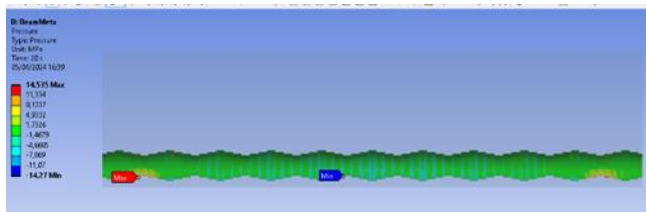


Figura 7: Pressão de contato [MPa], Metareforço e concreto (Autoria própria).

Apesar do modelo com vergalhão (Figura 6) ter apresentado um valor de pressão de contato máxima superior ao modelo de Metareforço (Figura 7), esse resultado ocorreu em ponto muito particular, não representando o comportamento global da barra. Pode-se perceber que no modelo com Metareforço há uma variação bastante uniforme e equilibrada entre os valores de pressão de contato de compressão e de tração.

Em termos de valores médios, o modelo com Metamaterial apresentou -2,28 MPa, e o modelo com vergalhão o valor médio foi de -0,71 MPa. Representando um aumento de 320%.

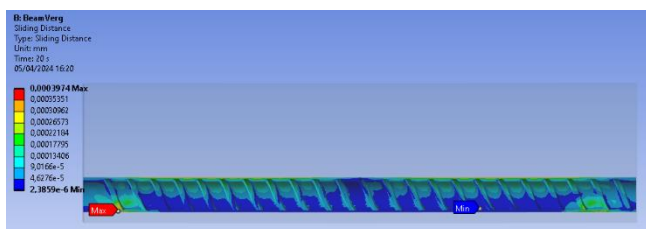


Figura 8: Deslocamentos relativos [mm], vergalhão e concreto (Autoria própria).

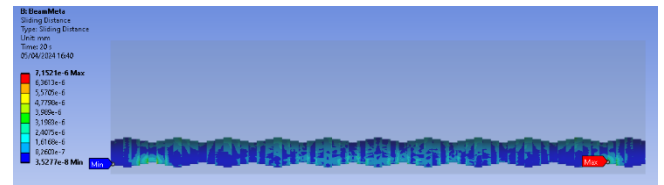


Figura 9: Deslocamentos relativos [mm], Metareforço e concreto (Autoria própria).

Fica evidente a eficiência do Metareforço (Figura 9) em relação ao vergalhão (Figura 8) no âmbito de potencializar o fenômeno da aderência, apresentando menor escorregamento relativo entre as superfícies dos materiais constituintes.

A barra Metamaterial apresenta uma distribuição com valores mais reduzidos de deslocamentos relativos praticamente em torno de toda sua superfície, inclusive na região de tração por flexão, enquanto a barra de vergalhão apresenta uma distribuição de valores reduzidos de deslocamentos relativos mais concentrada na região central e na parte inferior (onde ocorre efeitos de tração na flexão).

O valor médio obtido no modelo que usa o vergalhão foi de $7,35 \cdot 10^{-5}$, já o valor médio de deslocamentos relativos para o Metareforço foi de $1,05 \cdot 10^{-6}$. Representando uma redução de 98,57%.

Esses resultados obtidos no estudo evidenciam que o Metareforço pode gerar uma resistência de aderência superior ao vergalhão convencional. Portanto, estas descobertas de fato confirmam os benefícios potenciais do emprego Metareforço em projetos de estruturas de concreto para melhorar a aderência na interface concreto-aço.

Conclusões

Neste trabalho se procurou novas soluções para o incremento da resistência de aderência entre o concreto e seu reforço. As investigações tiveram como propósito o uso de uma solução inovadora de barra de reforço para o concreto armado, denominada de Metareforço. A análise dos resultados obtidos por meio da simulação numérica utilizando o Ansys® revelou contribuições significativas sobre o fenômeno da aderência entre o concreto e a barra de reforço, especialmente ao comparar o desempenho do Metareforço com o vergalhão convencional.

Os resultados indicam que o Metareforço possui grande potencial de promover uma distribuição mais uniforme das tensões de atrito ao longo da interface entre o concreto e o reforço, resultando em uma resistência de aderência mais elevada.

Além disso, os valores das tensões de atrito foram consideravelmente maiores no modelo com Metareforço

em comparação ao modelo com vergalhão, evidenciando uma elevação substancial na resistência aos esforços externos.

A análise também revelou que a pressão de contato no modelo com Metareforço foi mais uniformemente distribuída ao longo da barra, com valores médios significativamente superiores em comparação com o modelo com vergalhão.

No que tange aos deslocamentos relativos, os resultados do estudo demonstraram que o Metareforço apresenta uma distribuição mais homogênea e de valores inferiores de deslocamentos ao longo da superfície em torno da interface entre os materiais, inclusive em regiões de tração por flexão, enquanto o vergalhão convencional exibiu uma concentração de deslocamentos em regiões específicas.

Mesmo consistindo em um estudo preliminar, foi possível observar um grande potencial do Metareforço como uma solução inovadora para melhorar a aderência entre o concreto e a barra de reforço, oferecendo possíveis benefícios em termos de resistência estrutural, redução de materiais e durabilidade das estruturas. Essas descobertas motivam e apontam para vários caminhos promissores para pesquisas futuras, como a continuidade da simulação numérica mais refinada, uso de modelo não-linear para o concreto e proposta de novas geometrias de Metareforço, com os metamateriais auxéticos.

Agradecimentos

Ao orientador dessa iniciação científica, Prof. Dr. Paulo César Gonçalves, agradeço pelo acompanhamento valioso durante todo o desenvolvimento desse trabalho, pela confiança na minha capacidade e por nossa amizade. Expresso também meu apreço ao grupo MSU (Metamaterials and Structures Unifei), e a Universidade Federal de Itajubá, pela ampla contribuição em minha formação.

Ao meus pais, minha eterna gratidão pelo grande investimento feito em minha educação e por todo o apoio, amor e carinho que recebi durante toda a minha vida.

Referências

ANSYS Inc. 'ANSYS User's Guide', 2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118:2014: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BERTOLDI, Katia et al. Flexible mechanical metamaterials. *Nature Reviews Materials*, v. 2, n. 11, p. 1-11, 2017.

FABBROCINO F.; FARINA I.; AMENDOLA, A., FEO, L.; FRATERNALI, F. Optimal design and additive manufacturing of novel reinforcing elements for composite materials. In 7th European congress on computational methods in applied sciences and engineering; Crete, Greece. Proceedings. Athens: Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research; p. 1893-908. 2016.

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*. 90:76-85. 2015.

RAMÍREZ, C. Q. et al. Interfacial Bonding Strength in Cement Mortar Beams Reinforced with Metamaterial Bars. *Materials Research*, v. 25, p. e20210383, 2022.

SEOK, Seungwook et al. Finite element simulation of bond-zone behavior of pullout test of reinforcement embedded in concrete using concrete damage-plasticity model 2 (CDPM2). *Engineering Structures*, v. 221, p. 110984, 2020.