XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8630

Efeito isolado de nanotubos de carbono na aderência entre barras lisas de aço e concreto

Isolated effect of carbon nanotubes on the bond strength between smooth steel bars and concrete

Elvys Dias Reis
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | elvys@ufg.br
Fabrice Gatuingt
ENS Paris-Saclay | Gif-sur-Yvette | França | fabrice.gatuingt@ens-paris-saclay.fr
Flávia Spitale Jacques Poggiali
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | flaviaspitale@cefetmg.br
Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | augustobezerra@cefetmg.br

Resumo

Este estudo investiga o efeito exclusivo dos nanotubos de carbono (NTCs) sobre o comportamento de aderência de barras lisas, eliminando o intertravamento mecânico para esclarecer os mecanismos de nanomodificação. Concretos com 0,05% e 0,10% de NTCs, em massa de cimento, foram avaliados com barras de aço lisas de 10 mm, embutidas em comprimentos de ancoragem de 2,4*d*, 4*d* e 7*d*. Em idades iniciais, 0,05% de NTCs aumentou a resistência à compressão em até 23% aos 3 dias e a resistência à tração em mais de 20% aos 28 dias, enquanto a porosidade e a absorção de água reduziram-se em aproximadamente 10%. Os ensaios de arrancamento revelaram alterações positivas no comportamento de aderência: na condição específica de 2,4*d*, 0,05% de NTCs apresentou tensão de aderência aproximadamente duas vezes maior que a do concreto de referência, enquanto, em 4*d*, 0,10% de NTCs proporcionou cerca de 34% de aumento na resistência e na mobilização mais precoce do atrito. Em 7*d*, ambas as dosagens aumentaram a resistência residual, com 0,05% de NTCs sustentando tensões duas vezes superiores ao valor de pico, para um deslizamento de 1 mm. Esses resultados sugerem que os NTCs podem favorecer a transferência por atrito, possivelmente associada à densificação da interface, fortalecendo a interação aço-concreto.

Palavras-chave: Comportamento de aderência. Nanotubos de carbono. Materiais cimentícios.

Abstract

This study investigates the exclusive effect of carbon nanotubes (CNTs) on the bond behavior of smooth bars, eliminating mechanical interlock to clarify nanomodification mechanisms. Concretes with 0.05% and 0.10% CNTs by cement weight were tested using 10 mm plain bars embedded at 2.4d, 4d, and 7d. At early ages, 0.05% CNTs increased compressive strength by up to 23% at 3 days and tensile strength by over 20% at 28 days, while porosity and water absorption decreased by nearly 10%. Pull-out tests revealed positive changes in bond behavior: under the specific 2.4d condition, 0.05% CNTs showed bond strength approximately twice that of the reference concrete, while at 4d, 0.10% CNTs provided ≈34% higher strength and earlier friction mobilization. At 7d, both dosages enhanced residual strength, with 0.05% CNTs sustaining stresses twice the peak value at 1 mm slip. These findings suggest that CNTs may enhance frictional transfer, possibly associated with transition-zone densification, strengthening the steel-concrete interaction.

Keywords: Bond-slip behavior. Carbon nanotubes. Cementitious materials.

Como citar:
REIS, E. D.; GATUINGT, F.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. d. S. Efeito isolado de nanotubos de carbono na aderência entre barras lisas de aço e concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8630

INTRODUÇÃO

A aderência entre aço e concreto é fundamental para o desempenho de estruturas de concreto armado, pois garante a transferência de esforços e a integridade estrutural. Esse comportamento depende de fatores como a condição superficial da armadura, a composição do concreto e o confinamento do material [1].

Barras nervuradas aumentam a aderência por intertravamento mecânico, enquanto barras lisas permitem isolar os mecanismos intrínsecos, baseados exclusivamente na adesão química e no atrito interfacial [2]. Além disso, estudos mostram que a aderência aumenta com a resistência à compressão e diminui com maiores comprimentos de ancoragem [3].

Modificações da matriz, como fibras, materiais alternativos e reciclados, podem melhorar ou reduzir a aderência dependendo da composição e do nível de substituição [4]. Condições ambientais e características superficiais também influenciam significativamente esse comportamento. Temperaturas elevadas, corrosão e fissuração reduzem a aderência [5], enquanto modificações superficiais podem aumentar o intertravamento e a dissipação de energia [6].

Apesar dos avanços, na ausência de intertravamento mecânico, a aderência é fortemente governada pelas características químicas e microestruturais da interface aço-concreto, que apresenta heterogeneidade significativa e influencia diretamente os mecanismos de adesão [7]. Nesse contexto, embora haja crescente interesse, poucos estudos isolaram o efeito de modificadores específicos — como nanotubos de carbono (NTCs) — na aderência, sem a influência do intertravamento mecânico. Os NTCs destacam-se por sua capacidade de refinar a microestrutura, reduzindo a porosidade e aumentando a durabilidade e o desempenho mecânico [8], embora a maioria dos estudos ainda utilize barras nervuradas [9].

Reis et al. [10] conduziram um estudo experimental pioneiro nessa área, avaliando diferentes teores de NTCs (0,025% a 0,10% em massa de cimento) em concretos com baixo teor de cimento. O trabalho analisou os efeitos dos NTCs na resistência à compressão, resistência à tração, porosidade e absorção de água, além da tensão de aderência com barras lisas e nervuradas. Foram observados aumentos de 8% na resistência à compressão, 22,2% na resistência à tração e redução de 9,5% na porosidade. Em termos de aderência, barras lisas apresentaram até 33% de aumento na resistência com 0,05% de NTCs, especialmente para maiores diâmetros e comprimentos de ancoragem. O estudo também demonstrou o potencial de redução do comprimento de ancoragem com o uso de NTCs.

O presente estudo dá continuidade a esse trabalho ao investigar de forma mais aprofundada o efeito isolado dos NTCs na aderência aço-concreto, utilizando exclusivamente barras lisas de 10 mm (d). Foram avaliados dois teores de NTCs (0,05% e 0,10%) com comprimentos de ancoragem de 2,4d, 4d e 7d, sendo 4d já analisado no estudo anterior [10] e 2,4d e 7d investigados como novas condições experimentais, visando compreender melhor a influência dos NTCs em diferentes condições de transferência de tensões. Além disso, foram analisadas a evolução da resistência à

compressão, resistência à tração, porosidade e absorção de água em idades iniciais (3, 7, 14 e 21 dias), complementando resultados previamente obtidos aos 28 dias.

Essa abordagem oferece uma compreensão inédita e mais precisa do papel exclusivo dos NTCs na promoção da adesão e do atrito na interface aço-concreto. Ela fornece subsídios relevantes para o desenvolvimento de concretos mais duráveis e sustentáveis, especialmente em contextos onde a redução do teor de cimento é desejável sem comprometer o desempenho estrutural da aderência.

MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental adotado neste estudo é o mesmo ao previamente publicado por Reis et al. [10] e é aqui descrito apenas de forma resumida. Detalhes completos sobre os materiais, dosagem das misturas, produção dos corpos de prova e procedimentos de ensaio podem ser encontrados na referida publicação.

As amostras de concreto foram preparadas utilizando cimento Portland I 52.5 [11], areias 0/2 mm, areia 0/4 mm e brita 4/8 mm [12][13] e superplastificante (Fluid Optima 100, CHRYSO®). Nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPMs) foram utilizados na forma de dispersão aquosa (AQUACYTM AQ0303, Nanocyl SA [14]), sintetizados por deposição química de vapor e contendo 3% em massa de NC7000™ com um surfactante aniônico.

A dispersão dos NTCs foi realizada manualmente por mistura com água, seguindo as recomendações do fabricante e validação prévia dos autores. A literatura também reporta que esse método pode ser eficaz e escalável quando os NTCs são fornecidos em forma aquosa [15].

A mistura de referência (C0, sem NTCs) utilizou 425 kg/m^3 de cimento, com relação água/cimento (a/c) de 0,42, visando à classe de abatimento S3 (100–150 mm) e classe de resistência à compressão C60/75, de acordo com a EN 206-1 [16]. Dois concretos modificados com NTCs foram produzidos com teores de 0,05% (C05) e 0,10% (C10) em massa de cimento, seguindo recomendações da literatura [17].

As propriedades mecânicas e físicas avaliadas incluíram resistência à compressão (f_c) [18], resistência à tração por compressão diametral (f_{ct}) [19], porosidade ($P_{(\%)}$) e absorção de água ($A_{(\%)}$) [20]. Enquanto o estudo anterior apresentou resultados aos 28 dias [10], o presente trabalho amplia essa análise para idades iniciais: 3, 7, 14 e 21 dias. Três corpos de prova foram utilizados para cada idade e ensaio, sendo apresentados os valores médios.

ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Dezoito corpos de prova cúbicos (150 × 150 × 150 mm) foram moldados em formas metálicas, com barras lisas de aço embutidas no centro. Foram utilizadas barras lisas de aço com diâmetro nominal de 10 mm (d) e resistência ao escoamento de 500 MPa (Eurocode 2 [21]). O comprimento de aderência foi controlado por meio da fixação de tubos de PVC, sendo avaliados três comprimentos de ancoragem: 2,4d, 4d e 7d. Para cada comprimento de ancoragem (l_b), foram preparados dois corpos de prova de

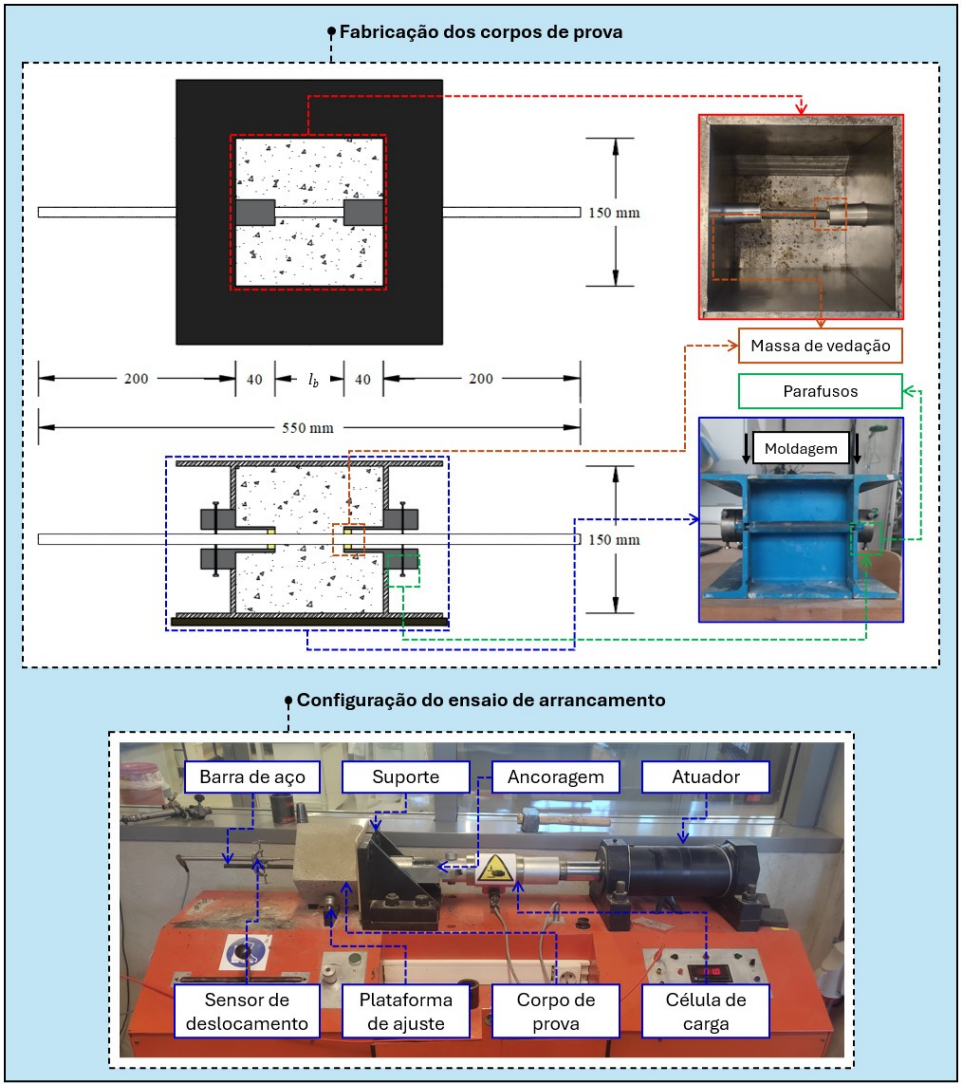
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8630

arrancamento utilizando três diferentes concretos (C0, C05 e C10), resultando em nove combinações (por exemplo, C0-2,4d, C05-4d, C10-7d, entre outras). A razão entre o cobrimento e o diâmetro da barra foi mantida superior a 5 (C/d > 5), a fim de garantir o modo de ruptura por arrancamento [22]. A Figura 1 apresenta a configuração dos corpos de prova e o arranjo geral do ensaio.

Conforme mostra a Figura 1, o deslocamento foi medido em relação à superfície do concreto. A força de tração foi aplicada gradualmente a uma taxa de 0,56·d^2 (N/s) [23]. A força de arrancamento (P) e os dados de deslocamento foram registrados continuamente até a extração da barra ou a ocorrência de ruptura prematura. A tensão máxima de aderência (τ_b) foi calculada a partir da força de pico utilizando a Equação 1, assumindo, para simplificação, uma distribuição uniforme da tensão de aderência.

$$\tau_b = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l_b} \tag{1}$$

Figura 1: Produção dos corpos de prova e arranjo do ensaio de arrancamento.



Fonte: adaptado de Reis et al. [10].

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8630

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PROPRIEDADES DO CONCRETO EM IDADES INICIAIS

Os resultados da Tabela 1 mostram que a adição de NTCs influenciou o desenvolvimento das propriedades do concreto em idades iniciais. Para f_c, o concreto de referência (C0) atingiu 40,61 MPa aos 3 dias e 55,90 MPa aos 28 dias. A mistura C05 apresentou aumento de cerca de 23% aos 3 dias e 8% aos 28 dias, enquanto C10 apresentou ganhos de aproximadamente 11% e 5%, respectivamente. Esses resultados confirmam que teores moderados são mais eficientes, enquanto teores mais elevados podem sofrer com aglomeração [24].

Tabela 1: Propriedades do concreto em diferentes idades: resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_{ct}), porosidade ($P_{(\%)}$) e absorção de água ($A_{(\%)}$)

ID	Prop.	Idade [dias]				
		3	7	14	21	28
C0	f_c [MPa]	40,61±3,47	48,85±3,30	51,32±3,07	53,14±2,70	55,90±2,61
	f_{ct} [MPa]	2,52±0,65	3,50±0,23	3,91±0,50	4,51±0,44	4,60±0,21
	$P_{(\%)}$ [%]	11,13±0,11	9,64±0,12	8,42±0,08	7,77±0,08	7,20±0,09
	$A_{(\%)}$ [%]	5,19±0,07	3,96±0,05	3,37±0,13	3,42±0,10	3,14±0,09
C05	f_c [MPa]	49,88±3,76	58,05±3,29	58,74±2,85	59,28±1,41	60,38±1,36
	f_{ct} [MPa]	3,26±0,54	5,30±0,18	5,37±0,48	5,46±0,28	5,60±0,41
	$P_{(\%)}$ [%]	10,08±0,14	8,10±0,14	7,56±0,11	6,99±0,15	6,52±0,18
	$A_{(\%)}$ [%]	4,24±0,16	3,80±0,09	3,48±0,07	2,94±0,13	2,85±0,18
C10	f_c [MPa]	45,01±3,01	54,03±2,46	55,40±1,90	57,07±1,16	58,84±1,39
	f_{ct} [MPa]	3,61±0,70	4,90±0,38	5,23±0,61	5,33±0,58	5,80±0,30
	$P_{(\%)}$ [%]	10,22±0,09	9,31±0,01	8,49±0,08	7,87±0,11	6,89±0,06
	$A_{(\%)}$ [%]	4,80±0,12	3,82±0,09	4,08±0,10	3,53±0,10	3,14±0,07

Fonte: o autor.

Para f_{ct}, C0 atingiu 4,60 MPa aos 28 dias. Nessa idade, C05 apresentou aumento superior a 20% e C10 cerca de 26%. Aos 7 dias, C05 foi aproximadamente 51% superior ao C0 e C10 cerca de 40%. Esses resultados indicam desenvolvimento mais rápido da resistência à tração, associado ao efeito de ponte de microfissuras promovido pelos NTCs, em concordância com a literatura que aponta teores ótimos abaixo de 0,1% [25].

Para $P_{(\%)}$ e $A_{(\%)}$, C0 apresentou 7,20% e 3,14% aos 28 dias. C05 reduziu ambos em cerca de 10%, enquanto C10 apresentou reduções de aproximadamente 4% em $P_{(\%)}$ e quase nulas em $A_{(\%)}$. Esses resultados refletem o refinamento da zona de transição interfacial (ZTI) e a redução de porosidade promovidos pelos NTCs, sendo o menor desempenho em 0,10% associado à aglomeração [26].

De forma geral, os NTCs melhoraram o desempenho em idades iniciais por meio do refinamento da ZTI e do efeito de ponte de fissuras [27]. O teor de 0,05% foi mais eficiente, enquanto 0,10% apresentou ganhos menores e menos consistentes, corroborando a literatura [28].

TENSÃO DE ADERÊNCIA E RELAÇÃO CARGA-DESLOCAMENTO

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de arrancamento, incluindo a força máxima de arrancamento (P), a tensão máxima de aderência (ou tensão de ruptura equivalente, τ_b), o deslizamento correspondente a esse pico (ΔL_P) e a razão entre a resistência de aderência de cada amostra e a do respectivo concreto de referência ($\tau_b/\tau_{b,C0}$). Além disso, é apresentada a resistência residual medida para um deslizamento de 1 mm ($\tau_{f,1mm}$), juntamente com a razão entre esse valor residual e a tensão máxima de aderência ($\tau_{f,1mm}/\tau_b$).

Tabela 2: Resultados dos ensaios de arrancamento.

ID	P [kN]	τ_b [MPa]	ΔL_P [mm]	$\tau_b/\tau_{b,C0}$	Resistência residual	
					$\tau_{f,1mm}$ [MPa]	$\tau_{f,1mm}/\tau_b$
C0-2,4d	12,59	16,70	0,10	1,00	8,49	0,51
C0-4d	21,48	17,09	0,44	1,00	17,64	1,03
C0-7d	26,75	12,16	0,14	1,00	19,54	1,61
C05-2,4d	25,78	34,20	0,11	2,05	21,42	0,63
C05-4d	19,67	15,65	0,38	0,92	16,04	1,03
C05-7d	30,53	13,88	0,10	1,14	27,82	2,00
C10-2,4d	18,16	24,09	0,11	1,44	13,27	0,55
C10-4d	28,69	22,83	0,21	1,34	19,23	0,84
C10-7d	31,72	14,42	0,21	1,19	21,82	1,51

Fonte: o autor.

Para C0, τ_b foi de 16,70 MPa em 2,4d, 17,09 MPa em 4d e 12,16 MPa em 7d, evidenciando comportamento não linear associado à mobilização inicial do atrito e posterior redistribuição de tensões [3]. Resultados semelhantes foram reportados por Hawreen et al. [28].

A adição de NTCs alterou significativamente esse comportamento. Em 2,4d, C05 apresentou valor de τ_b aproximadamente duas vezes superior ao de C0, enquanto C10 aumentou cerca de 44%, sem alteração significativa em ΔL_P (~0,10–0,11 mm), indicando melhoria da eficiência do atrito sem mudança no mecanismo. Esse comportamento está associado ao refinamento da ZTI e à melhoria da adesão inicial, além da mobilização mais rápida do atrito [29].

Em 4d, C05 apresentou τ_b ligeiramente inferior ao concreto de referência, enquanto C10 aumentou τ_b em ≈34%, com menores deslizamentos no pico (0,38 mm e 0,21 mm contra 0,44 mm), indicando maior rigidez e mobilização antecipada do atrito [30]. Esse comportamento reforça a dependência do teor para maiores comprimentos [31].

Em 7d, C05 e C10 aumentaram τ_b em cerca de 14% e 19%, respectivamente, mas o principal efeito foi na resistência residual. Em 1 mm, C05 atingiu razão de 2,0 (*vs*. 1,61 em C0) e C10 1,51, indicando maior capacidade de transferência de tensões pós-pico. Esse comportamento está associado ao reforço do atrito interfacial, sendo a adesão limitada a pequenos deslizamentos [5].

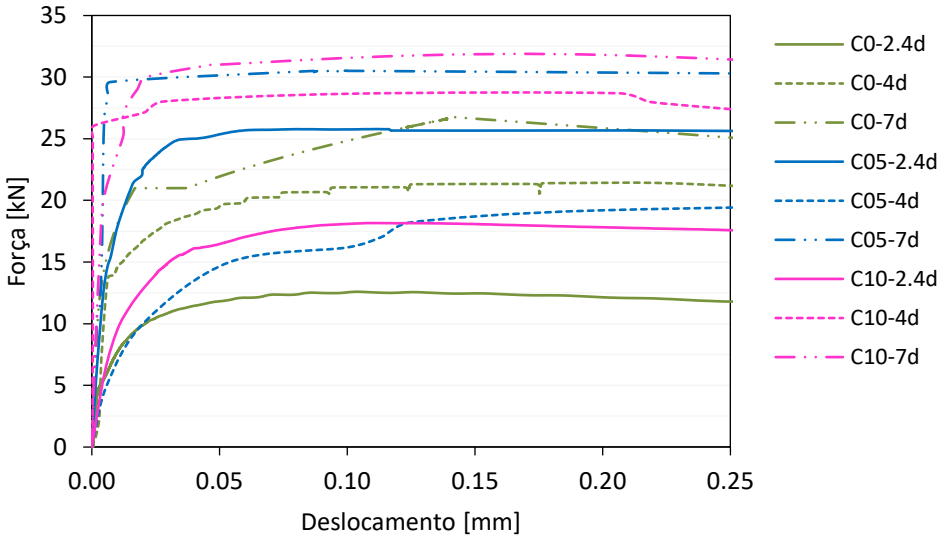
De forma geral, os NTCs melhoraram a aderência, com efeito dependente de l_b: 0,05% foi mais eficiente em 2,4d, 0,10% em 4d e ambos melhoraram o comportamento residual em 7d, com destaque para 0,05%. Esses resultados sugerem que o mecanismo dominante é o atrito, possivelmente intensificado pelo refinamento da ZTI [29].

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8630

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NTCS E DOS COMPRIMENTOS DE ANCORAGEM

A Figura 2 apresenta as curvas força-deslocamento ($P \times \Delta L$) obtidas para concretos com diferentes teores de NTCs e comprimentos de ancoragem.

Figura 2: Curvas $P \times \Delta L$ de concretos com diferentes teores de NTCs e comprimentos de ancoragem.



Fonte: o autor.

O concreto C0 mostrou aumento da carga máxima com l_b, mas redução de τ_b em 7d devido à redistribuição de tensões. Esse comportamento é dominado pelo atrito, com alta variabilidade [32].

Com NTCs, observou-se melhora nas respostas de pico e pós-pico. Em 2,4d, C05 apresentou τ_b aproximadamente duas vezes maior que C0, enquanto C10 apresentou aumento de cerca de 44%, sem alteração na rigidez inicial, indicando melhoria do atrito [29].

Em 4d, 0,05% manteve comportamento próximo ao de referência, enquanto 0,10% aumentou mais de 30% e reduziu o deslizamento no pico, indicando maior rigidez [3].

Em 7d, o principal ganho foi na fase residual: C05 apresentou tensões cerca de duas vezes o pico em 1 mm, enquanto C10 também superou o C0. Isso indica maior capacidade de transferência de tensões após descolamento, associada ao reforço da ZTI [26].

Em conjunto, os resultados mostram que 0,05% maximiza ganhos em comprimentos curtos e resistência residual em comprimentos longos, enquanto 0,10% é mais eficaz em comprimentos intermediários. Isso confirma que a aderência em barras lisas é governada por condições locais da interface aço-concreto, altamente sensíveis à microestrutura [7], sendo o atrito o principal mecanismo, intensificado pelos NTCs [5].

CONCLUSÕES

Este estudo investigou a influência da adição de NTCs no comportamento de aderência de barras lisas de aço embutidas em concreto, isolando os efeitos da adesão e do atrito ao excluir o intertravamento mecânico. As seguintes conclusões podem ser destacadas:

i. Os resultados sugerem que os NTCs promoveram o refinamento da zona de transição interfacial, reduziram a porosidade e a absorção, e aceleraram o desenvolvimento de resistência, especialmente em idades iniciais. O teor de 0,05% mostrou-se mais eficiente para resistência à compressão, resistência à tração e indicadores de durabilidade, enquanto teores mais elevados apresentaram eficiência limitada, possivelmente devido à aglomeração dos NTCs.

ii. Os NTCs influenciaram o comportamento de aderência das barras lisas, com efeitos dependentes do teor e do comprimento de ancoragem. Em 2,4d, 0,05% apresentou os maiores ganhos relativos; em 4d, 0,10% proporcionou maior rigidez e mobilização antecipada do atrito; e em 7d, ambos os teores aumentaram a resistência residual, com melhor desempenho pós-pico para 0,05%.

iii. Os resultados sugerem que os NTCs podem atuar principalmente no reforço da fase de arrancamento controlada por atrito, permitindo a manutenção ou até o aumento da transferência de tensões após o deslizamento de pico. Essa interpretação é baseada nos resultados obtidos e em evidências da literatura, evidenciando o possível papel dos NTCs na melhoria da interação aço-concreto na ausência de intertravamento mecânico.

De forma geral, os resultados mostram que pequenas adições de NTCs já são suficientes para melhorar significativamente a aderência de barras lisas, ao modificar as propriedades locais da interface aço-concreto. Entretanto, o estudo foi limitado a um único diâmetro de barra, dois teores de NTCs e comprimentos específicos, sendo necessárias investigações futuras com diferentes condições e cenários de durabilidade para ampliar a aplicabilidade dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e ao *Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay* (LMPS) pelo financiamento desta colaboração de pesquisa.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o primeiro autor utilizou o ChatGPT, versão 5.5, para a revisão do texto. Após a utilização da ferramenta, os autores revisaram e

editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] WANG, C.; ZHOU, Y.; CAO, F.; SU, T.; WANG, F. Bond behavior between section steel and concrete in partially encased composite structural members. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132521, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132521

[2] GAO, J.; XU, P.; FAN, L.; TERRASI, G. P. Study on bond-slip behavior between seawater sea-sand concrete and carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars with different surface shapes. **Polymers**, v. 14, n. 13, p. 2689, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14132689

[3] DYBA, M. Experimental study of bond-slip relationships in high-performance self-consolidating concrete with plain steel bars. **Engineering Structures**, v. 319, p. 118854, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118854

[4] SHI, H.; LI, H.; WANG, Z.; HUANG, F.; YANG, Z.; WEN, J.; ...; YI, Z. Bond-slip behaviour between recycled sand concrete and steel bars. **Journal of Building Engineering**, v. 86, p. 108980, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108980

[5] LIU, S.; ZHENG, W.; HOU, X.; WANG, Y.; SUN, P. Effect of sustained thermal exposure on the bonding characteristics of plain bars in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 469, p. 140488, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140488

[6] KUANG, Y.; TANG, F.; LIN, W.; LIN, Z. Bond performance of quartz sand modified enamel coated plain steel bars with concrete under reversed cyclic loading. **Construction and Building Materials**, v. 421, p. 135676, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135676

[7] ANGST, U. M.; GEIKER, M. R.; MICHEL, A.; GEHLEN, C.; WONG, H.; ISGOR, O. B.; ...; BUENFELD, N. The steel-concrete interface. **Materials and Structures**, v. 50, n. 2, p. 143, 2017. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-017-1010-1

[8] GUO, E.; ZHANG, W.; LAI, J.; HU, H.; XUE, F.; SU, X. Enhancement of cement-based materials: mechanisms, impacts, and applications of carbon nanotubes in microstructural modification. **Buildings**, v. 15, n. 8, p. 1234, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15081234

[9] CUI, K.; LIANG, K.; JIANG, T.; ZHANG, J.; LAU, D.; CHANG, J. Understanding the role of carbon nanotubes in low-carbon concrete: From experiment to molecular dynamics. **Cement and Concrete Composites**, v. 142, p. 105189, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105189

[10] REIS, E. D.; GATUINGT, F.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S. Influence of carbon nanotubes and cement reduction on the bond strength of steel bars in concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 461, p. 139940, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139940

[11] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN197**: Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria. Bruxelas, 2011.

[12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN-12620+A1**: Granulats pour béton. Bruxelas, 2008.

[13] ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (AFNOR). **NF-P18-545**: Granulats - Élément de définition, conformité et codification. Paris, 2021.

[14] NANOCYL. **AQUACYL™ AQ0303 - Multiwall carbon nanotube waterborne dispersions with ionic dispersant**. Technical Data Sheet, 2023.

[15] REIS, E. D.; RESENDE, H. F.; CHRISTOFORO, A. L.; COSTA, R. M.; GATUINGT, F.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S. Assessment of physical and mechanical properties of concrete with carbon nanotubes pre-dispersed in cement. **Journal of Building Engineering**, v. 89, p. 109255, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109255

[16] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 206**: Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. Bruxelas, 2000.

[17] SONG, X.; LI, Y.; LI, C. Bond behavior between steel bars and carbon nanotube modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119339, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119339

[18] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 12390-3**: Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength. Bruxelas, 2019.

[19] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 12390-6**: Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength. Bruxelas, 2012.

[20] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM C642-21**: Density, absorption, and voids in hardened concrete. West Conshohocken, 2021.

[21] BRITISH STANDARD (BS). **Eurocode 2**: Design of concrete structures (EN 1992-1-1). Londres, 2023.

[22] COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON (CEB). ***fib* Model Code 2010**: Final draft. Lausanne, 2010.

[23] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 10080**: Steel for the reinforcement of concrete. Bruxelas, 2005.

[24] MACLEOD, A. J.; FEHERVARI, A.; GATES, W. P.; GARCEZ, E. O.; ALDRIDGE, L. P.; COLLINS, F. Enhancing fresh properties and strength of concrete with CNT admixture. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118524, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118524

[25] SILVESTRO, L.; GLEIZE, P. J. P. Effect of carbon nanotubes on compressive, flexural and tensile strengths of Portland cement-based materials: A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120237, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120237

[26] IRSHIDAT, M. R. Bond strength evaluation between steel rebars and CNT concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00477, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00477

[27] TAHA, A.; ALNAHHAL, W.; IRSHIDAT, M. Effect of carbon nanotubes on the bonding mechanism of non-corrosive reinforcements to concrete. **Structures**, v. 60, p. 105952, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105952

[28] HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; KURDA, R. Mechanical characterization of CNT-reinforced concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, p. 8361–8376, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s13369-019-04096-y

[29] QASEM, A.; SALLAM, Y. S.; ELDIEN, H. H.; AHANGARN, B. H. Bond-slip behavior between UHPC and FRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119857, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119857

[30] LEE, H.; JEONG, S.; CHO, S.; CHUNG, W. Enhanced bonding behavior of multi-walled carbon nanotube cement composites and reinforcing bars. **Composite Structure**s, v. 243, p. 112201, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112201

[31] ZHANG, Z.; JUNG, D.; ANDRAWES, B. Surface roughness and bond-slip behavior of epoxy-coated bars. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120762, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120762

[32] YURDAKUL, Ö.; ARTAGAN, S. S.; BALABAN, E.; ROUTIL, L. Evaluation of cyclic bond-slip behavior of smooth bars. **Structures**, v. 41, p. 568–585, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.036