Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE PINOS ARTESANAIS EMBUTIDOS EM CRFA

EVALUATION OF PULL-OUT STRENGTH FOR HANDCRAFTED STUDS EMBEDDED IN SFRC

Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi [1]
Victória Figueiredo de Seixas [2]
Dênio Ramam Carvalho de Oliveira [3]

Resumo: O conceito de mecânica da fratura para previsão da capacidade resistente do concreto sob força axial de arrancamento dos pinos leva em consideração apenas a influência da projeção da área cônica e da resistência à tração do concreto; portanto, a precisão do modelo depende apenas do coeficiente de ajuste (*k*) do modelo, obtido experimentalmente. Este trabalho apresentou resultados experimentais da capacidade resistente de pinos isolados embutidos em blocos de concreto de fibra de aço para avaliar a precisão dos modelos empíricos da literatura. Os parâmetros estudados foram a espessura das cabeças dos pinos e as taxas volumétricas das fibras de aço. Os resultados experimentais mostraram ganhos de resistência em torno de 50% e 60%, respectivamente, para 0,5% e 1,0% de adição de fibra, para a resistência à compressão do concreto de 25 MPa e a espessura de cabeça t_h > 5,0 mm. A comparação com os modelos teóricos mostrou-se bastante conservadora, com valor de k inferior a 17, e mais precisa com a consideração do efeito da espessura da cabeça.

Palavras-chaves: Ancoragens, CCD, Fibra de aço, Pino com cabeça, Resistência de arrancamento.

Abstract: *The fracture mechanics concept for predicting the concrete strength capacity under axial stud pull-out force only takes into account the influence of the conical area projection and the concrete tensile strength; therefore, the accuracy of the model only depends on the fit coefficient (k) of the model, obtained experimentally. This work presented experimental results of the strength capacity of isolated studs embedded in steel fiber concrete blocks to evaluate the accuracy of literature empirical models. The study parameters were the stud heads' thickness and the steel fiber's volumetric rates. The experimental results showed strength gains of around 50% and 60%, respectively, for 0.5% and 1.0% of fiber addition, for a concrete compressive strength of 25 MPa and a head thickness t_h > 5.0 mm. The comparison with the theoretical models proved to be very conservative, with a k value of less than 17, and more accurate with the effect of head stud thickness consideration.*

Keywords: *Anchorages, CCD, Headed stud, Pull-out strength, Steel fiber.*

[1] *Universidade Federal do Pará, Campus Guamá – Brasil, e-mail: aaronkadima@gmail.com*
[2] *Universidade Federal do Pará, Campus Guamá – Brasil, e-mail: engvictoriafigueiredo@gmail.com*
[3] *Universidade Federal do Pará, Campus Guamá – Brasil, e-mail: denio@ufpa.br*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

1 Introdução

O pino artesanal com cabeça consiste em uma barra lisa ou nervurada com dispositivo de ancoragem, cabeça soldada em uma ou ambas as extremidades. O sistema de ancoragem, sob influência da carga axial de tração, transfere as cargas externas para os elementos estruturais de concreto (FARHAT et al., 2019) como laje, bloco de fundação, viga, parede e pilar. A falha de um sistema de ancoragem pode ocorrer pelo rompimento da haste ou arrancamento do pino, conforme mostra a Figura 1a, e pelo fendilhamento ou formação do cone do concreto, conforme mostra a Figura 1b, (NZAMBI et al., 2021a, NZAMBI et al., 2023, NZAMBI e OLIVEIRA, 2024). A prática comum para o dimensionamento da resistência de arrancamento (N_u) de um sistema de ancoragem, segundo o conceito de mecânica da fratura proposto por FUCHS et al. (1995) (método CCD - Concrete Capacity Design), leva em consideração o raio da área projetada da superfície de ruptura cônica (influenciado pela inclinação do ângulo $\theta \sim 28º$ - $45º$) e a resistência à tração do concreto, conformo mostra a Figura 1c. Portanto, os principais mecanismos que contribuem na transferência de carga de pino para o concreto são as resistências devido à aderência da haste e à aderência mecânica desenvolvida pela cabeça do pino. De acordo com THOMPSON et al. (2003), os mecanismos de transferência de carga dos pinos com cabeça consistem em dois estágios. No primeiro momento, a ancoragem é garantida pela aderência da haste, influenciada pelo comprimento de efetivo de ancoragem (h_{ef}) e do diâmetro da haste (d_s), até atingir o pico da tensão de aderência. No segundo estágio, a aderência começa a deteriorar-se ao longo da haste e a tensão começa a ser resistida pela cabeça da âncora, influenciada pela espessura (t_h) e o diâmetro (d_h) da cabeça. A literatura indica um aumento de até 32% na capacidade última de arrancamento sob influência da aderência da haste do pino. No entanto, a parcela resistida pela ancoragem mecânica através do efeito da espessura ou do diâmetro da cabeça não deve ser negligenciado no dimensionamento.

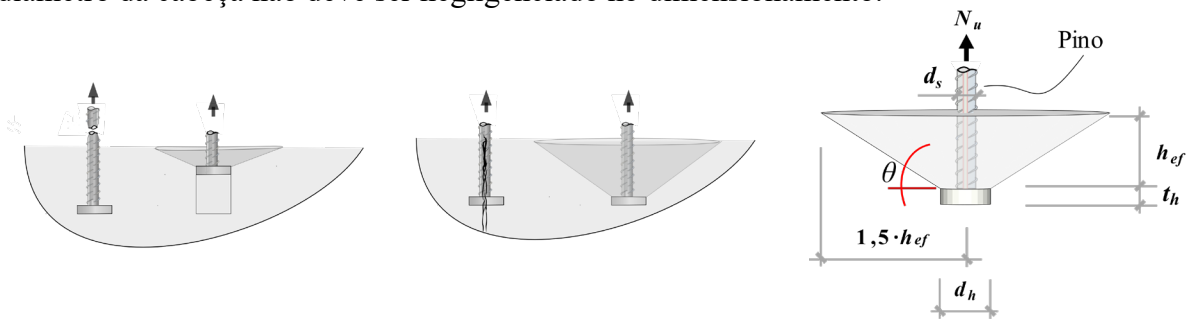


Figura 1. Típicos modos de ruptura: (a) rompimento da haste-arrancamento do pino, (b) fendilhamento-cone de concreto e (c) Parâmetros do método CCD

Segundo OLIVEIRA et al. (2019), negligenciar a espessura da cabeça do pino é inaceitável porque a carga última desejada deve ocorrer no concreto após a carga de escoamento da haste ter sido atingida, corroborando com as falhas inesperadas que ocorrem na cabeça do pino, como a falha na solda, a deflexão da cabeça e o deslizamento precoce da haste. Em concretos com adição de fibra de aço, a interação fibra-matriz e barra de aço com superfície nervurada aumenta consideravelmente a resistência de arrancamento (NZAMBI et al. 2021b), retardando a propagação de fissuras com alteração do modo de ruptura e da formação do cone do concreto (NZAMBI et al. 2021a). Assim, este trabalho avaliou a acurácia do método CCD para as previsões das resistências de arrancamento dos pinos embutidos em concreto com fibra de aço, comparando os resultados experimentais e teóricos estimados pelos modelos de ACI Committee 318 (ACI, 2019), CEB BULLETIN 233 (CEB, 1996), De VRIES (1999), FIB BULLETIM 58 (FIB, 2011), FUCHS (1995), e NZAMBI et al. (2024). Além disso, o modelo

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

do NZAMBI et al. (2024) é o único a levar em conta a influência da espessura da cabeça do pino em ordem de $t_h^{0,22}$ para o concreto com adição de fibras de aço, segundo os autores, a capacidade resistente ao arrancamento tende a aumentar com o aumento de t_h, revelando que t_h atua como fator de escala nos resultados. Porém, observaram que o efeito escala diminuía com valor elevado de k, ou seja, tornando as previsões menos conservadores, menos dispersas e mais precisas, como notaram com os valores de k =16,8 no modelo do FUCHS et al. (1995). A resistência ao arrancamento de acordo com método CCD é calculada pela seguinte equação:

$$N_u = k \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1.5} \quad (1)$$

Em que k é o coeficiente de ajuste de acurácia dos modelos do método CCD, com valores apresentados na Tabela 1; f_c é a resistência à compressão do concreto; h_{ef} é a altura efetiva de ancoragem. O modelo modificado (NZAMBI et al., 2024), considerando a adição da fibra de aço é calculada pela expressão:

$$N_u = 20 \cdot t_h^{0,22} \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1.5} \quad (2)$$

Em que t_h é a espessura da cabeça do pino, f_c é a resistência à compressão do concreto e h_{ef} é a altura efetiva de ancoragem.

Tabela 1 - Valores do k para os modelos da literatura do método CCD

Autor	k	θ **(graus)**
ACI 318 (2019)	10,0	34 ($r \sim 1{,}5 \cdot h_{ef}$)
CEB 233 (1996)	9,0	
De Vries *et al*. (1999)	9,7	
fib Bulletim 58 (2011)	11,0	
Fuchs *et al*. (1995)	16,8	
Nzambi *et al*. (2024)	20,0	

Nota: θ = ângulo da superfície de ruptura; r = raio.

2 Programa experimental

2.1 Materiais e características dos blocos

Foram moldados 9 (nove) blocos de concreto com dimensões de (600 x 600 x 300) mm, sendo 3 (três) de referência, 6 com adição de fibras de aço (onde 3 blocos foram com a taxa volumétrica (V_f) de 0,5% e 3 de 1,0% de fibra). Todos os blocos continham apenas um pino isolado ancorado centralmente à altura efetiva (h_{ef}) de 50 mm. As hastes de pino foram confeccionadas em barras de aço nervurado tipo CA-50 (ABNT NBR 7480: 2023) de diâmetro (d_s) de 12,5 mm e as cabeças dos pinos foram produzidas utilizando chapa de aço SAE 1045 cortada em diâmetro (d_h) de 40 mm e espessuras (t_h) variando de 5,0; 8,0 e 12,5 mm. O comprimento total dos pinos (l_s) foi de 800 mm, e a ligação haste-cabeça foi consolidada por soldas aplicadas nas superfícies superior e inferior das cabeças. A resistência à compressão do projeto foi de 25 MPa, tanto para o concreto convencional e fibroso. A fibra utilizada para o concreto reforçado de fibra de aço (CRFA) foi do tipo C (ABNT NBR 15530: 2019; NZAMBI et al., 2021b), ondulada ou *Crimped*, tinha como comprimento (l_f) de 38 mm, diâmetro equivalente (d_f) de 1,28 mm e fator de forma (l_f/d_f) de 30. A Tabela 2 apresenta as características dos blocos.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

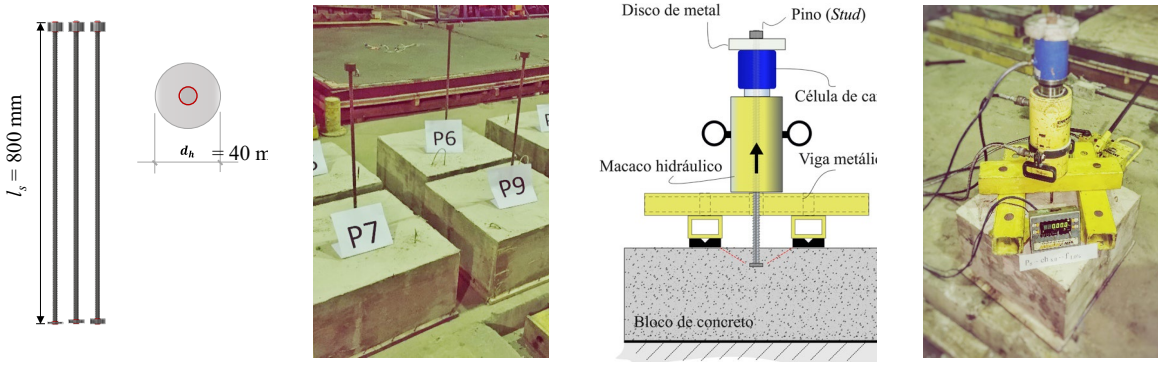
Tabela 2 - Características dos blocos

Bloco	d_h (mm)	t_h (mm)	d_s (mm)	h_{ef} (mm)	l_s (mm)	f_{ys} (MPa)	V_f (%)	f_c (MPa)
$P_{5.0REF}$	40	5,0	12,5	50	800	554	0,0	27,1
$P_{8.0REF}$		8,0						26,1
$P_{12.5REF}$		12,5						27,9
$P_{5.0F0.5}$		5,0					0,5	24,4
$P_{8.0F0.5}$		8,0						25,4
$P_{12.5F0.5}$		12,5						25,4
$P_{5.0F1.0}$		5,0					1,0	22,4
$P_{8.0F1.0}$		8,0						28,1
$P_{12.5F1.0}$		12,5						22,4

Nota: d_h = diâmetro da cabeça do pino; t_h = espessura da cabeça; d_s = diâmetro da haste; h_{ef} = profundidade efetiva de embutimento; l_s = comprimento total do pino; f_{ys} = resistência de escoamento da haste; V_f = fração volumétrica de fibras; f_c = resistência à compressão do concreto.

2.2 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio de arrancamento foi composto por 3 (três) vigas de reação, sendo duas dispostas de forma diagonal e apoiadas em placas metálicas, com afastamento da superfície de ruptura ($3{,}0 \cdot h_{ef} + d_h$), que serviram de distribuição dos esforços de reação ao bloco de concreto; a terceira apoiada ortogonalmente em relação as demais vigas, servindo de apoio para o cilindro hidráulico (Enerpac) e da célula de carga ambas com capacidade de carga de 1.000 kN. O mecanismo de travamento da cabeça do pino foi feito com um disco metálico e aplicação de carga foi feita com uma bomba hidráulica manual. Em todos os blocos foi aplicada uma carga inicial de 0,5 kN para eliminar folgas. As Figuras 2a, 2b, 2c e 2d mostram, respectivamente, a dimensão dos pinos, a preparação dos corpos de prova e os detalhes do sistema de ensaio utilizado para o ensaio de arrancamento.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2. Preparação dos corpos de prova e sistema de ensaio

3 Resultados e discussões

3.1 Cargas e modo de ruptura

A Tabela 3 apresenta os resultados experimentais: dos valores da carga de ruptura (N_u), das cargas de ruptura normalizadas ($N_{u,n}$), calculada pela equação (3), dos ganhos de resistência

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

ao arrancamento, da carga de escoamento do aço (N_{ys}), da relação N_u / N_{ys}, do modo de ruptura e dos maiores ângulos de ruptura. Observou-se ganhos de resistências entorno de 50% e 60%, respectivamente, para V_f = 0,5% e V_f =1,0%. A carga de escoamento do aço foi utilizada para definir os modos de ruptura (OLIVEIRA et al., 2019; NZAMBI et al., 2021a; NZAMBI et al., 2021b); todos os blocos romperam por cone de concreto com ângulos da superfície de ruptura de 22º, 26º e 28º, respectivamente, para V_f = 0,0%, V_f = 0,5% e V_f =1,0%. A Figura 3 mostra o padrão de ruptura observado. Salientando que no projeto de dimensionamento de um sistema de ancoragem sob os esforços axiais de tração, espera-se que a carga de escoamento do aço (haste) seja alcançada antes da ruptura por cone de concreto, ruptura dúctil, permitindo assim que haja tempo hábil para eventual intervenção de reforço.

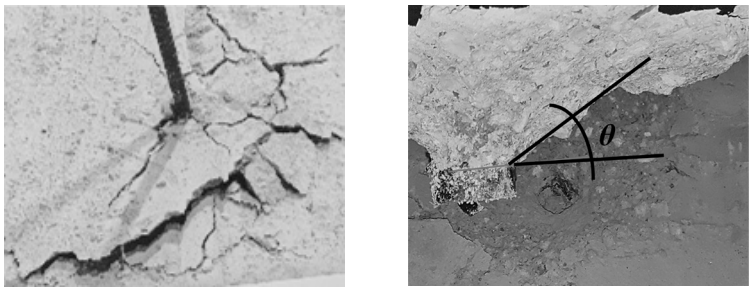
Tabela 3 - Resultados das cargas de ruptura

Bloco	N_u **(kN)**	$N_{u,n}$ **(kN)**	**Ganho (%)**	N_{ys} **(kN)**	$N_{u,n}/N_{ys}$	**Modo de ruptura**	θ **(graus)**
$P_{5.0REF}$	36,8	36,8	-	68,0	0,54	Cone de concreto	22
$P_{8.0REF}$	38,3	39,0	-		0,57		
$P_{12.5REF}$	41,2	40,6	-		0,60		
$P_{5.0F0.5}$	41,3	41,9	14		0,62		26
$P_{8.0F0.5}$	59,4	59,0	51		0,87		
$P_{12.5F0.5}$	60,3	59,9	48		0,88		
$P_{5.0F1.0}$	42,2	44,0	20		0,65		28
$P_{8.0F1.0}$	60,8	56,5	45		0,83		
$P_{12.5F1.0}$	61,5	64,1	58		0,94		

Nota: $N_{ys} = A_s{\cdot}f_{ys}$ = 68 kN.

$$N_{u,n} = N_u \cdot \left(\sqrt{\frac{f_{c,M}}{f_c}} \right) \qquad (3)$$

Em que $f_{c,M}$ é a resistência média à compressão do concreto.



(a) (b)

Figura 3. Padrão de ruptura

3.2 Comparação de resultados

A Tabela 4 e a Figura 4 apresentam a comparação dos resultados experimentais com as previsões da literatura. Todos os modelos apresentaram coeficiente de variação de 5% para o concreto convencional e de aproximadamente 20% para o concreto com adição de fibra de aço, exceto o modelo proposto por NZAMBI et al. (2024) que apresentou a variabilidade no entorno de 10%, devido a consideração do efeito da espessura da cabeça do pino com valor do k = 20. Ficou evidente a influência da fibra comparando os gráficos de V_f = 0,0% e V_f = 0,5%, assim

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

como a influência da espessura da cabeça com o gráfico de V_f = 1,0%, corroborando com as observações feitais por NZAMBI et al. (2024).

Tabela 4 - Comparação dos resultados experimentais e teóricos

Autor	$N_u/N_{u,0}$								
	V_f = 0,0%			V_f = 0,5%			V_f = 1,0%		
	Méd.	DP	CoV	Méd.	DP	CoV	Méd.	DP	CoV
ACI (2019)	2,11	0,10	0,05	3,02	0,54	0,18	3,16	0,61	0,19
CEB 233 (1996)	2,34	0,11	0,05	3,36	0,60	0,18	3,51	0,68	0,19
De Vries *et al*. (1999)	2,17	0,10	0,05	3,12	0,56	0,18	3,25	0,63	0,19
fib Bulletim 58 (2011)	1,92	0,09	0,05	2,75	0,49	0,18	2,87	0,56	0,19
Fuchs *et al*. (1995)	1,32	0,06	0,05	1,89	0,34	0,18	1,97	0,38	0,19
Nzambi *et al*. (2024)	1,05	0,05	0,05	0,95	0,10	0,11	1,00	0,09	0,09

Nota: Méd.= média; DP = desvio padrão; CoV = coeficiente de variação.

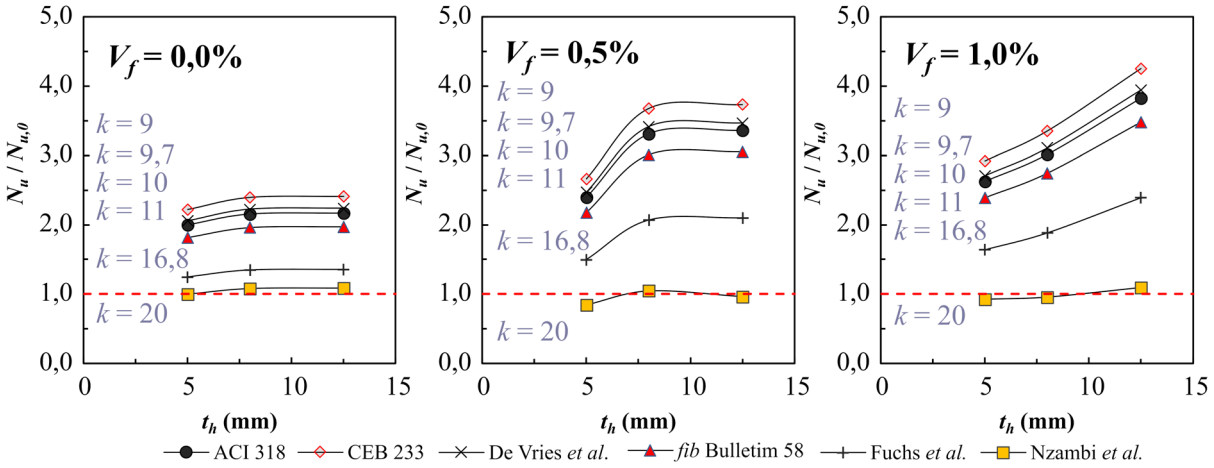


Figura 4. Influência da espessura da cabeça do pino e da fibra de aço

4 Conclusões

A avaliação dos resultados experimentais e teóricos da capacidade resistente de pinos isolados embutidos em blocos de concreto de fibra de aço demostraram que o efeito da fibra de aço e da espessura da cabeça do pino acima de 5 mm proporcionaram ganhos consideráveis da carga de ruptura em torno de 50% e 60%, respectivamente, para adição de fibra de 0,5% e 1,0%, para a resistência à compressão do concreto de 25 MPa e o embutimento do pino de 50 mm. Ademais, o método CCD dos modelos normativos e da literatura, para previsão da capacidade resistente do concreto sob os esforços axiais de arrancamento de pinos, tende a ser extremamente conservador para o valor do k inferior a 16.8. O mais conservador dos modelos, foi o CEB 233 (1996), com k = 9, enquanto a equação proposta por NZAMBI et al. (2024), com k = 20, foi a mais precisa. Assim, a espessura da cabeça, além de proporcionar a aderência mecânica, mostrou-se ser um parâmetro intrínseco para o dimensionamento otimizado e econômico de sistema de ancoragem pelo método CCD.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318: Building code requirements for structural concrete and commentary**. Farmington Hill, MI, 2019.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72109

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2019.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB bulletin d'information 233: Design of fastenings in concrete—Design guide—Parts 1–3**. London: Thomas Telford, 1996.

DE VRIES, R. A.; JIRSA, J. O.; BASHANDY, T. Anchorage capacity in concrete of headed reinforcement with shallow embedments, **ACI Structural Journal**, v. 96, pp. 728–736, 1999.

FARHAT, M.; ISSA, M.; PRADO, B. F. J. Pull-out behavior of headed anchors used in a totally prefabricated counterfort retaining wall system, **PCI Journal**, v. 64, n. 1, 2019.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **Fib Bulletim 58: Design of anchorages in concrete**. Lausanne, Switzerland, 2011.
FUCHS, W.; ELIGEHAUSEN, R.; BREEN, J. E. Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete, **ACI Structural Journal**, v. 92, n. 1, pp. 73–94, 1995.

NZAMBI, A.; OLIVEIRA, D. Pull-out tests of handcrafted studs embedded in concrete with red mud synthetic coarse aggregate, **Structural Concrete**, 2024.

NZAMBI, A. K. L. L., OLIVEIRA, D. R. C., NASCIMENTO, H. M. ; AZEVEDO, E. P. Effect of the failure surface inclination of punching with studs as shear reinforcement, **Practice Periodical on Structural Design and Construction,** v. 28, n. 2, p. 05023002, 2023.

NZAMBI, A. K. L. L.; NTUKU, J. B.; OLIVEIRA, D. R. C. Effect of adhesive through pilot pull-out tests on handcrafted headed studs post-installed in steel fiber concrete, **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 26, n. 4, p. 05021005, 2021.

NZAMBI, A. K. L. L.; OLIVEIRA, D. R. C.; OLIVEIRA, A. M.; PICANÇO, M. S. Pull-out tests of ribbed steel reinforcing bars embedded in concrete with steel fibres, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings**, v. 174, n. 3, pp. 181–189, 2021.

NZAMBI, A. K. L. L.; OLIVEIRA, D. R. C.; MORAES, H. D. S. Effect of headed stud thickness embedded in steel fiber concrete on pull-out strength, **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 29, n. 2, p. 05024001, 2024.

OLIVEIRA, D. R. C.; OLIVEIRA, A. M.; COSTA, V. G. Pull-out tests on handcrafted headed studs, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings**, v. 172, n. 9, pp. 625–631, 2019.

THOMPSON, M. K.; JIRSA, J. O.; BREEN, J. E.; KLINGNER, R. E. Anchorage Behavior of Headed Reinforcement in CCT Nodes**. Research Report** 1855-2, Center for Highway Research, University of Texas at Austin, Texas, 2003.