

Resistência ao Cisalhamento de Elementos em Concreto pelo Método de Push-off

Shear Strength of Concrete Members by Push-off Method

Engenharia Civil – Estruturas

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo teórico, por meio da coleta de um banco de dados com resultados de 81 ensaios de cisalhamento direto pelo método de push-off, de 13 diferentes autores, possibilitando uma comparação entre as resistências experimentais e teóricas, obtidas com base nas recomendações do ACI 318 (2019), PCI (2004) e CSA A23.3 (2004). Observou-se que, pelo critério de COLLINS (2001), a norma canadense apresentou o melhor desempenho, bem como menor dispersão e maior proximidade, em média, com os resultados experimentais. No entanto, verificou-se que todas as recomendações apresentam comportamento conservador e com alto índice de dispersão.

Palavras-chaves: Concreto Armado, Cisalhamento, Push-off.

Abstract: This work presents a theoretical study, through the collection of a database with results of 81 direct shear tests by the push-off method, by 13 different authors, allowing a comparison between the experimental and theoretical resistances, obtained based on the recommendations of ACI 318 (2019), PCI (2004) and CSA A23.3 (2004). It was observed that, according to COLLINS (2001), the Canadian standard presented the best performance, as well as less dispersion and greater proximity, on average, with the experimental results. However, it was found that all recommendations have a conservative behavior and a high dispersion index.

Keywords: Reinforced Concrete, Shear, Push-off.

1 Introdução

Elementos de concreto armado submetidos ao cisalhamento estão sujeitos a rupturas frágeis, com baixo nível de fissuração e deslocamento, devido ao comportamento dos materiais nessas condições. Diversos autores e recomendações normativas sugerem a utilização da armadura transversal como a forma mais eficiente de aumentar a ductilidade e resistência ao cisalhamento em estruturas de concreto.

Uma boa alternativa para estudar o comportamento de estruturas de concreto submetidas ao cisalhamento é o ensaio de cisalhamento direto pelo método de push-off, visto que podem ser realizados com espécimes reduzidos, utilizando equipamentos de menor porte e consumindo menos material, quando comparados aos ensaios em vigas, bem como evita uma possível interferência dos efeitos da flexão em vigas.

Alguns autores, como SAGASETA e VOLLUM (2011) e TAPAJÓS (2017), observaram uma boa relação entre seus ensaios em vigas e em espécimes de push-off, sinalizando que é possível realizar tal análise em estruturas de concreto submetidas ao cisalhamento por este tipo de ensaio em modelos reduzidos.

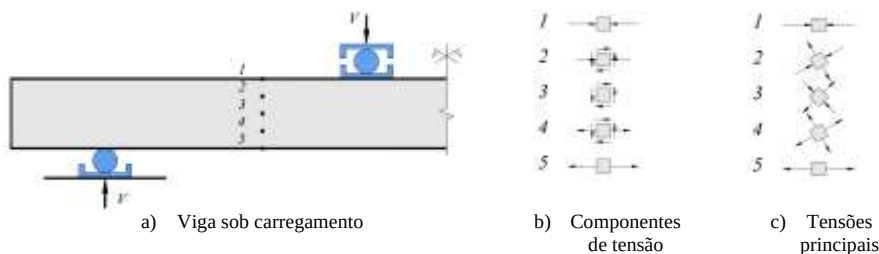
Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo coletar um banco de dados com ensaios em estruturas de concreto pelo método de push-off, comparando seus resultados experimentais com os obtidos teoricamente seguindo as recomendações do ACI 318 (2019), CSA A23.3 (2004) e PCI (2004), possibilitando uma análise quanto à precisão e segurança das referidas recomendações.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Comportamento de vigas sob carregamento

Considerando uma viga sob carregamento, como mostra a Figura 1a, admite-se uma distribuição de tensões linear-elástica ao longo de sua altura. Para esse tipo de distribuição, admite-se somente tensões axiais nas fibras das extremidades da viga, sendo de compressão na extremidade superior (ponto 1) e de tração na inferior (ponto 5), o cisalhamento é nulo nessas regiões. No entanto, nas outras fibras, como no ponto 2 e 4, além das tensões axiais também se tem tensões cisalhantes, sendo máximas na altura da linha neutra (ponto 3), onde nesse mesmo ponto, as tensões axiais são nulas. Esse comportamento é ilustrado nas figuras 1b e 1c, que mostram as componentes de tensão e as tensões principais, respectivamente, admitindo-se o estado plano de tensões.

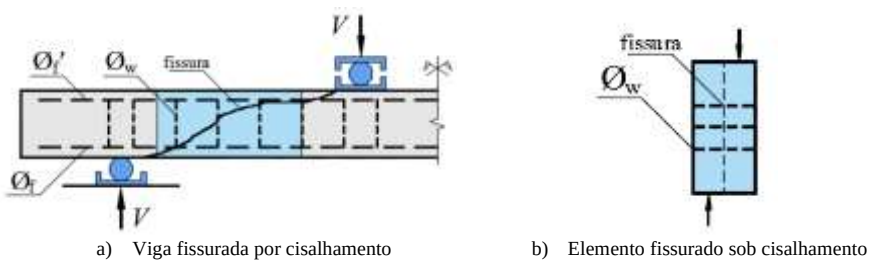
Figura 1 – Distribuição de tensões em uma viga sob carregamento.



Fonte: Tapajós (2017)

A viga mostrada na Figura 2a está sujeita à flexão e cisalhamento, por isso, ensaios de cisalhamento direto são importantes para verificar o comportamento de elementos de concreto armado sem interferência da flexão, como o método de push-off. De forma a representar o comportamento de uma viga ao cisalhamento de forma localizada, considera-se a Figura 2a, que ilustra uma viga com uma fissura de cisalhamento, considerando que essa fissura cruza a linha neutra, onde as tensões de cisalhamento são máximas e não existem tensões de flexão, é possível representar essa área como um bloco sob cisalhamento puro, com um plano de fissuração, como mostra a Figura 2b.

Figura 2 – Idealização do ensaio de push-off



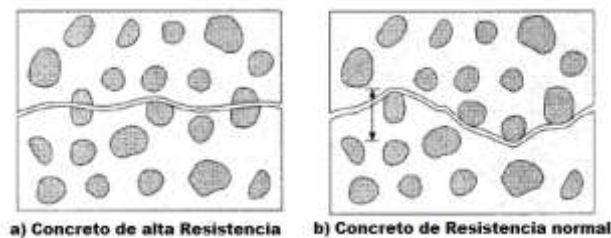
Fonte: Tapajós (2017)

2.2 Resistência ao Cisalhamento Direto

Grande parte das equações utilizadas por autores e recomendações normativas, para estimar a resistência ao cisalhamento direto de elementos de concreto se baseiam na teoria de atrito-cisalhamento. Essa teoria foi desenvolvida por BIKERLAND e BIKERLAND (1966), recebendo diversas contribuições ao longo dos anos, e determina que a resistência ao cisalhamento direto é governada, principalmente, por dois grandes fenômenos: o engrenamento dos agregados e o efeito pino.

O Engrenamento dos agregados ocorre apenas quando surgem as primeiras fissuras por cisalhamento, assim, o concreto consegue continuar a transferência das tensões, mesmo fissurado, por conta do contato entre os agregados. Dessa forma, a resistência e tipo do concreto e agregados utilizados contribuem diretamente para este efeito e, por consequência, com a resistência ao cisalhamento, como mostra a Figura 3.

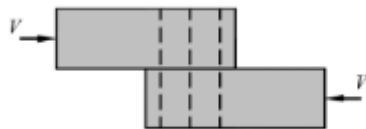
Figura 3 – Engrenamento dos agregados



Fonte: (Adaptado de ALI e WHITE, 1999)

Em relação ao efeito pino, este fenômeno ocorre por conta das armaduras que cruzam a interface concreto-concreto, que tendem a deslizar uma em relação a outra, quando submetidas ao cisalhamento, com maior evidência no cisalhamento direto, como mostra a Figura 4. Dessa forma, a tensão de escoamento e a qualidade da ancoragem das armaduras que cruzam essa interface contribuem diretamente para a resistência ao cisalhamento da peça.

Figura 4 – Efeito pino



Fonte: Autores

2.3 ACI 318 (2019)

O ACI 318 (2019) utiliza a teoria de cisalhamento para estimar a resistência ao cisalhamento direto de elementos de concreto armado, conforme Equação 1, sendo que o valor dessa resistência é limitado pela Equação 2.

Comentado [A1]: As legendas de figuras devem ser posicionadas acima das figuras. Embaixo da figura devem ser indicadas as fontes.

$$V_{ACI} = \mu \cdot \rho_v \cdot f_y \quad (\text{Equação 1})$$

$$V_{ACI} \leq \left[\begin{array}{c} 0,2f_c \\ 3,3 + 0,08f_c \text{ MPa} \\ 11 \text{ MPa} \end{array} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

μ é o coeficiente de rugosidade do concreto, podendo ser adotado 1,4 para concreto monolítico e com agregado graúdo convencional;

ρ_v é a taxa de armadura que cruza a interface concreto-concreto;

f_y é a tensão de escoamento da armadura que cruza a interface concreto-concreto, limitada a 420 MPa;

f_c é a resistência à compressão do concreto.

2.4 PCI (2004)

O PCI (2004) também baseia sua recomendação para estimativa da resistência ao cisalhamento direto na teoria de atrito-cisalhamento, no entanto, diferente do ACI 318 (2019), essa recomendação apresenta dois tipos de equação, considerando a variação de comportamento para maiores taxas de armadura e/ou maiores resistências do aço adotado, como mostra a Equação 3, tendo como limite superior o calculado pela Equação 4.

$$V_{PCI} = \begin{cases} \mu \cdot \rho_v \cdot f_y & \rho_v \cdot f_y < 4.14 \\ \mu \left(\frac{2.07}{\rho_v f_y} + 0.5 \right) \rho_v \cdot f_y & \rho_v f_y \geq 4.14 \end{cases} \quad (\text{Equação 3})$$

$$V_{PCI} \leq \left[\begin{array}{c} 0,3f_c \\ 6,89 \text{ MPa} \end{array} \right] \quad (\text{Equação 4})$$

O valor adotado de μ para concretos monolíticos que utilizam agregados convencionais é igual a 1,4, como o ACI 318 (2019).

2.5 CSA A23.3 (2004)

A norma canadense também se baseia na teoria de atrito-cisalhamento para estimar a resistência ao cisalhamento direto de elementos de concreto armado, conforme mostra a Equação 5, tendo seus limites superiores calculados pela Equação 6.

$$V_{CSA} = 1 + \mu \cdot \rho_v \cdot f_y \quad (\text{Equação 5})$$

$$V_{CSA} \leq \left[\begin{array}{c} 0,25f_c \\ 0,6 \sqrt{\rho_v f_y f_c} \end{array} \right] \quad (\text{Equação 6})$$

Onde o valor do coeficiente de rugosidade é igual a 1,4 para concreto monolítico com agregado graúdo convencional.

3 Banco de Dados

Para avaliar o desempenho das recomendações teóricas apresentadas neste trabalho, coletou-se um banco de dados com os resultados experimentais de 13 trabalhos científicos, totalizando 81 ensaios. A Tabela 1 apresenta um resumo desse banco de dados. Todas as peças ensaiadas foram pré-fissuradas antes de serem submetidas ao carregamento, foram compostas com concreto convencional e possuíam armaduras de cisalhamento cruzando a interface concreto-concreto, com inclinação de 90°.

Comentado [A2]: Corrigir

Tabela 1 – Banco de dados analisado

Autor	Nº Peças	f_{yv} (MPa)	p_{fv}	μ	h (mm)	b (mm)	f_c (Mpa)	N_w
[1]	2	610-676	1,95-2,25	1,4	350	135	23,5	3-8
[2]	5	550	2,34-4,68	1,4	350	135	53,1	4-8
[3]	19	300-530	1,35-13,87	1,4	300	120-150	40,2-106,4	4-12
[4]	4	325	3,63	1,4	300	210	64,7-94	8
[5]	4	483-519	2,21-6,21	1,4	320	210	36,9	2-4
[6]	3	360	3,32-5,54	1,4	340	150	34,5	6-10
[7]	5	443-520	2,38-5,30	1,4	320	210	34,4	2-8
[8]	3	258-408	0,93-3,40	1,4	250	125	35	4-6
[9]	4	414	6,07	1,4	254	76,2	34,1-66,7	4
[10]	12	525	3,35-6,70	1,4	210	150	38,2-73,6	4-8
[11]	5	325	3,62	1,4	300	120	30,9	8
[12]	3	500	0,69-2,07	1,4	340	120	30	2-6
[13]	12	345-363	1,54-9,62	1,4	254	127	26,9-28,8	1-6

[1] TAPAJÓS (2017); [2] SAGASETA e VOLLUM (2011); [3] MANSUR *et al.* (2008); [4] XIAO *et al.* (2014); [5] LIN e GUO (2019); [6] NASERIAN *et al.* (2013); [7] LIN e HUA (2018); [8] RAHAL *et al.* (2016); [9] VALLE (1991); [10] WASEEM *et al.* (2016); [11] XIAO *et al.* (2016); [12] JAYAPRAKASH *et al.* (2016); [13] MATTOCK *et al.* (1976)

Fonte: Autores

Com intuito de comparar o desempenho das estimativas teóricas foi adotado o critério de COLLINS (2001), apresentado na Tabela 2. Esse método tem como objetivo aplicar penalidades em diferentes faixas, penalizando rigorosamente resultados considerados perigosos, por causa da segurança, penalizando também valores conservadores, por serem antieconômicos, assim, quanto maior a pontuação obtida pela recomendação avaliada, menor é o seu desempenho, de acordo com o critério.

Tabela 2 – Critério de COLLINS (2001)

Experimental/Teórico	Situação	Penalidade
< 0,5	Extremamente perigoso	10
[0,5-0,65[	Perigoso	5
[0,65-0,85[	Baixa segurança	2
[0,85-1,30[	Segurança apropriada	0
[1,30-2,00[	Conservador	1
≥2,0	Extremamente conservador	2

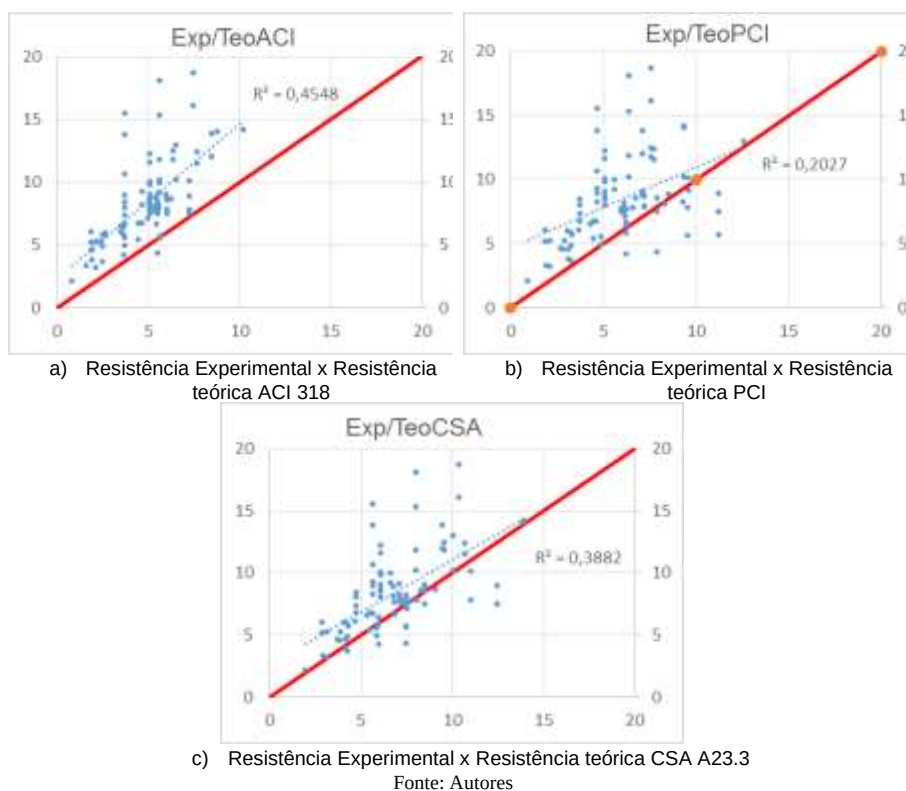
Fonte: Autores

Comentado [A3]: Escrever sem abreviações ou colocar legenda no final da tabela

4 Resultados

Com base nas recomendações estudadas neste trabalho, foi possível estimar a resistência ao cisalhamento direto pelo ensaio de push-off do trabalho dos autores coletados no banco de dados, comparando suas resistências teóricas e experimentais, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Comparação das resistências teóricas e experimentais



Como mostra a Figura 5, poucos resultados são contra à segurança, com um comportamento bem conservador de todas as recomendações estudadas, assim como um alto nível de dispersão. A fim de auxiliar na visualização desses resultados, a Tabela 3 mostra o critério de COLLINS (2001) aplicado ao banco de dados coletados.

Tabela 3 – Critério de Collins aplicado ao banco de dados

Faixa de Penalidade	ACI 318		PCI		CSA A23.3	
	Peças	Penalidade	Peças	Penalidade	Peças	Penalidade
<0,5	0	0	0	0	0	0
[0,5-0,65[	0	0	0	0	0	0
[0,65-0,85[	0	0	0	0	1	2
[0,85-1,30[	5	0	27	0	44	0
[1,30-2,00[	51	51	39	39	31	31
≥2,00	25	50	15	30	5	10
Total	81	101	81	69	81	43

Fonte: Autores

Comentado [A4]: Escrever sem abreviações ou colocar legenda embaixo da tabela

Comentado [A5]: Escrever sem abreviações ou colocar legenda embaixo da tabela

Comentado [A6]: Escrever sem abreviações ou colocar legenda embaixo da tabela

De acordo com a Tabela 3, a norma canadense apresenta a menor pontuação de penalidade, dessa forma, pelo critério apresentado, esta seria a equação mais adequada para projetos. Para auxiliar na análise, a Tabela 4 apresenta os valores de resultados contra à segurança e o grau de dispersão dos resultados obtidos.

Tabela 4 – Resultados contra à segurança e dispersão

	ACI	PCI	CSA
MÉDIA	1,88	1,66	1,33
Desvio padrão	0,5590	0,5255	0,3673
Coefficiente de variação	30%	32%	28%
Experimental/Teórico <1	0	3	10
Experimental/Teórico ≥1	81	78	71

Fonte: Autores

Comentado [A7]: Escrever sem abreviações

Comentado [A8]: Escrever sem abreviações

Além de apresentar a menor penalidade, a norma canadense também apresentou a menor dispersão entre as recomendações analisadas, porém com o maior número de resultados contra à segurança. Vale ressaltar que, apesar dos resultados contra à segurança, a maioria destes se encontram na faixa de segurança apropriada pelo critério de COLLINS (2001), por isso não prejudicou a pontuação do CSA.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou algumas recomendações do ACI 318 (2019), PCI (2004) e CSA A23.3 (2004) para estimativa da resistência ao cisalhamento direto de elementos de concreto armado, possibilitando uma análise e comparação de seu desempenho, quando confrontadas com as resistências experimentais do banco de dados coletados neste artigo, contendo 81 ensaios de 13 diferentes autores.

Para o universo amostral estudado, verificou-se que a norma canadense apresentou o melhor desempenho, dentro dos critérios adotados, como o Demérit Points Classifications (DPC), de COLLINS (2001), média mais próxima de 1, na relação experimental/teórico, e menor grau de dispersão.

Contudo, vale ressaltar que, de maneira geral, todas as normas apresentaram um padrão conservador e com alto índice de dispersão, podendo dificultar a estimativa de resistência ao cisalhamento direto de elementos de concreto, quando ensaiados pelo método de push-off. É possível que parte disso seja porque as recomendações analisadas derivam da teoria de atrito-cisalhamento, não levando em conta alguns aspectos que podem influenciar na resistência, como tipo de armadura e eficiência da ancoragem.

Dessa forma, apesar de já existirem diversos ensaios disponíveis na literatura envolvendo o método de push-off, foi possível verificar que ainda existe campo para este tipo de pesquisa, envolvendo ensaios com diferentes tipos de armadura e ancoragem, bem como é possível realizar análises computacionais e numéricas, a fim de propor equações que possam representar o comportamento estrutural de maneira mais precisa. Além disso, estudos deste tipo podem contribuir para propostas de recomendações brasileiras para tratar do tema.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio a esta e a outras pesquisas à Universidade Federal do Oeste do Pará e ao Campus de Itaituba.

Referências

ACI committee 318. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19)**. American Concrete Institute; 2019.

BIRKELAND, P.W.; BIRKELAND, H. W. **Connections in precast concrete construction**. J Am Concr Inst, 1966.

COLLINS, M.P. **Evaluation of shear design procedures for concrete structures**. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design, 2001.

CSA. **Design of Concrete Structures (CAN/CSA A23.3-04)**. Canadian Standards Associations, 2004.

JAYAPRAKASH, J.; SAMAD, A.A.A.; ABBASVOCH, A.A. **Experimental Investigation on Shear Capacity of Reinforced Concrete Precracked Push-off Specimens with Externally Bonded Bi-Directional Carbon Fibre Reinforced Polymer Fabrics**. Modern Applied Science, V.3, N.7, 2009.

LIN, F. HUA, J. **Shear transfer of concrete strengthened with externally bonded CFRP strips inclined to shear plane**. Construction and Building Materials, V.179, 2018.

LIN, F.; GUO, J. **Shear Transfer of Concrete Strengthened using bolted steel plates**. Construction and Building Materials, V. 212, 2019.

MANSUR, M.A.; VINAYAGAM, T.; TAN, K-H. **Shear Transfer across a Crack in Reinforced High-Strength Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, V.20, N.4, 2008.

MATTOCK, A.H.; LI, W.K.; WANG, T.C. **Shear transfer in lightweight reinforced concrete**. PCI Journal, 1976.

NASERIAN, R.; HOSSEINI, A.; MAREFAT, M.S. **Assessment of shear transfer capacity of non-cracked concrete strengthened with external GFRP strips**. Construction and Building Materials, V. 45, 2013.

Prestressed Concrete Institute. **PCI Design Handbook**, sixth ed., PCI, Chicago, 2004.

RAHAL, K.N.; KHALEEFI, A.I.; AL-SANEE, A. **An experimental investigation of shear-transfer strength of normal and high strength self-compacting concrete.** Engineering Structures, V. 109, 2016.

SAGASETA, J.; VOLLUM, R. L. **Influence of Aggregate Fracture on Shear Transfer through Cracks in Reinforced Concrete.** Magazine of Concrete Research. V. 63, N. 2, 2011.

TAPAJÓS, L.S. **Cisalhamento em Elementos de Concreto Armado com Estribos Desconectados.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

VALLE, M.O. **Shear transfer in fiber reinforced concrete.** Master's thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1991.

WASEEM, S.A. **Shear transfer strength of normal and high-strength recycled concrete – An experimental investigation.** Construction and Building Materials. V. 125, 2016.

XIAO, J.; LI, Z.; LI, J. **Shear Transfer across a Crack in Reinforced High-Strength Concrete after Elevated Temperatures.** Construction and Building Materials, V.71, 2014.

XIAO, J.; SUN, C.; LANGE, D.A. **Effect on joint interface conditions on shear transfer behavior of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, V. 105, 2016.