

## ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESISTÊNCIA DE CONECTORES DE CISALHAMENTO TIPO *STUD BOLT* EM ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO: ANÁLISE DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

<sup>1</sup>PEDRO IGNÁCIO LIMA GADÊLHA JARDIM, <sup>2</sup>CARLOS HUMBERTO MARTINS, <sup>3</sup>ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

<sup>1</sup>Universidade Federal de Rondônia (UNIR), <sup>2</sup>Universidade Estadual de Maringá (UEM),

<sup>3</sup>Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

<eng.pedrojardim@gmail.com>, <chmartins@uem.br>,

<alchristoforo@ufscar.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v19.3664

**Resumo.** Os conectores de cisalhamento são elementos responsáveis pela transmissão de esforços entre materiais distintos, proporcionando um comportamento de material compósito em estruturas mistas. Os conectores tipo *stud bolt* são frequentemente empregados devido à sua boa ductilidade e eficiente transmissão de esforços na *interface* dos materiais. Diferentes documentos normativos, nacionais e internacionais, apresentam diretrizes distintas para seu dimensionamento, e poucos estudos se dedicaram a comparar esses métodos de dimensionamento de maneira a identificar possíveis contribuições para revisões futuras da norma nacional, a ABNT NBR 8800. O objetivo foi realizar uma análise dos parâmetros de resistência de conectores *stud bolt* abrangendo todas as classes de resistência do concreto e os diferentes diâmetros comerciais dos conectores. A capacidade resistente dos conectores foi verificada pelo uso de métodos de cálculo distintos disponíveis na norma nacional e Europeia. Pelos resultados obtidos, foi possível identificar que a estimativa das propriedades do concreto possui grande variação quando comparados os diferentes métodos de cálculo. Foi identificado que a falha por esmagamento ocorre em elementos com classes de resistência inferiores, comumente adotadas em projetos de edificações de pequeno porte. Ainda, houve pouca variação da resistência à ruptura no conector.

**Palavras-chave:** capacidade resistente; conectores de cisalhamento; conector tipo pino com cabeça; estruturas mistas; eurocode.

## PARAMETRIC ANALYSIS OF THE STRENGTH OF STUD BOLT SHEAR CONNECTORS IN COMPOSITE STEEL AND CONCRETE STRUCTURES: ANALYSIS OF NORMATIVE CRITERIA

**Abstract.** Shear connectors are elements responsible for transmitting stresses between different materials, providing composite material behavior in composite structures. Stud bolt connectors are often used due to their good ductility and efficient transmission of stress at the interface of materials. Different national and international normative documents present different guidelines for their design, and few studies have been dedicated to comparing these design methods to identify possible contributions to future revisions of the national standard, ABNT NBR 8800. The aim was to carry out an analysis of the strength parameters of stud bolt connectors covering all concrete strength classes and the different commercial connector diameters. The strength capacity of the connectors was verified using different calculation methods available in the national and European standards. From the results obtained, it was possible to identify that the estimation of concrete properties varies greatly when comparing the different calculation methods. It was identified that crushing failure occurs in elements with lower strength classes, which are commonly adopted in small building projects. Furthermore, there was little variation in the breaking strength of the connector.

**Keywords:** composite structures; eurocode; resistance capacity; shear connectors; stud bolt connector.

## 1 INTRODUÇÃO

A adoção de estruturas mistas de aço e concreto permite o aproveitamento estratégico da capacidade de ambos os materiais, sendo utilizadas em elementos de lajes, vigas e pilares. Conforme apontado por Fakury, Silva e Caldas (2016) a concepção idealizada desses componentes busca capitalizar a alta capacidade de resistência à compressão do concreto, ao mesmo tempo que supera sua limitação intrínseca na resistência à tração. Nesse contexto, o aço desempenha um papel crucial, absorvendo predominantemente cargas de tração. Vale ressaltar que essa alocação de esforços é uma estratégia de mitigação, especialmente considerando pilares, visando evitar fenômenos de instabilidade.

A transmissão de esforços entre os elementos é realizada por meio de conectores mecânicos, também chamados de conectores de cisalhamento. Existem diversos elementos que podem ser utilizados para essa finalidade, destacando-se o *stud bolt* e o perfil U como os mais frequentemente empregados, sendo os *stud bolts* mais encontrados na literatura por proporcionar boa ductilidade e uma transmissão de esforços eficiente entre o concreto e o aço (Nardin; Debs, 2008), embora outras alternativas tenham sido desenvolvidas para aplicações específicas (Salah; Muteb, 2024; Silveira *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2024). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da ABNT NBR 8800 (2008), e o Comitê Europeu de Normalização (CEN, *Comité Européen de Normalisation*, por meio da EN 1994-1-1 (2004a), apresentam diretrizes para o dimensionamento dos conectores tipo *stud bolt* e o perfil U (laminado ou soldado), com a falha podendo ocorrer por esmagamento do concreto ou por ruptura do conector. Apesar de ambos os documentos apresentarem a mesma previsão de falha, os métodos de cálculo possuem distinções entre si.

Estudos anteriores que se dedicaram a comparar a norma brasileira com outros documentos normativos internacionais já observaram algumas discrepâncias entre esses documentos, em alguns casos, com resultados pouco conservadores obtidos por meio do método presente no documento normativo brasileiro (Cunha; Argôlo, 2021). Ainda assim, observa-se uma carência de pesquisas em que a norma nacional é comparada com normas internacionais visando a comparação dos modelos na estimativa da capacidade resistente de conectores de cisalhamento. Esse tipo de estudo é importante para o desenvolvimento contínuo nas normas brasileiras, identificando possíveis pontos de melhoria e alinhamentos com documentos normativos internacionais.

Sob essa perspectiva, o escopo do presente trabalho se concentrou na realização de um estudo paramétrico e analítico voltado para a capacidade de resistência na interface entre o concreto e o conector de cisalhamento tipo *stud bolt*. Tal análise foi conduzida sob os parâmetros das diretrizes normativas tanto brasileiras quanto europeias, enfatizando a influência das variações na resistência do concreto e na geometria do conector.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

No presente estudo, o método de dimensionamento europeu, presente na EN 1994-1-1 (2004a), foi comparado com o método de dimensionamento brasileiro, ABNT NBR 8800 (2008). Apesar da consideração de documentos normativos distintos, ambas apresentam o mesmo fluxo de cálculo para determinação da capacidade resistente dos conectores, conforme apresentado na Figura 1.

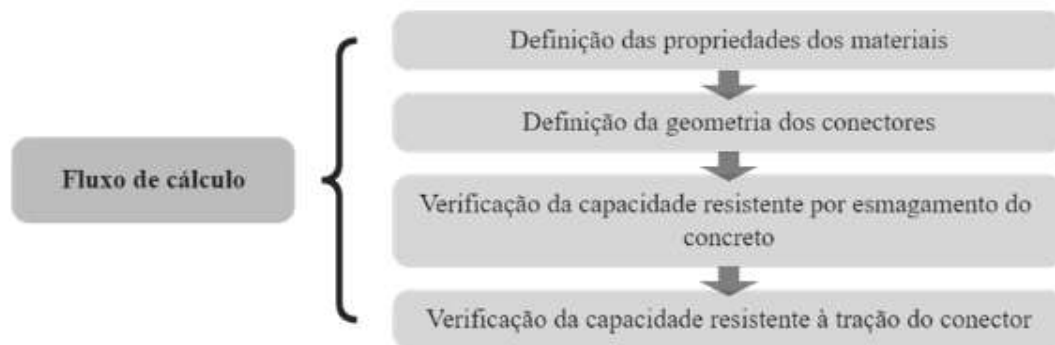
Para a realização do estudo paramétrico, foi considerada uma estrutura mista de aço e concreto composta por uma viga de aço e uma laje de concreto maciça, utilizando *stud bolts* como conector mecânico, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 2. As propriedades mecânicas consideradas para o conector foram obtidas da caracterização realizada por Sales (2014), sendo apresentadas na Tabela 1. Esses valores não foram variados durante o estudo.

**Quadro 1:** Propriedades mecânicas do material.

Propriedade	Valor
Resistência ao escoamento (MPa)	540,98
Resistência à ruptura (MPa)	587,80
Alongamento na ruptura (%)	13,64
Módulo de elasticidade (GPa)	200

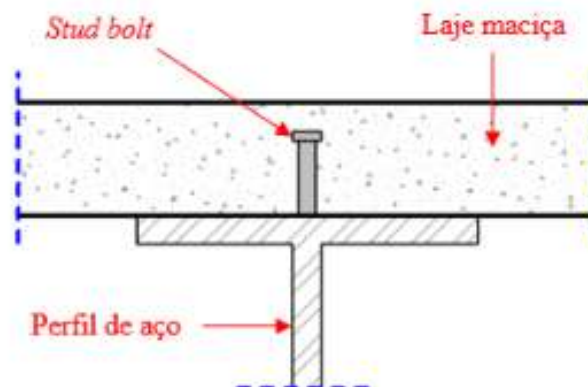
Fonte: Adaptado de Sales (2014).

Figura 1: Fluxo de cálculo para verificação da resistência do conector.



Fonte: Adaptado de EN 1994-1-1 (2004a) e ABNT NBR 8800 (2008).

Figura 2: Representação esquemática do modelo analisado.



## 2.2 Método

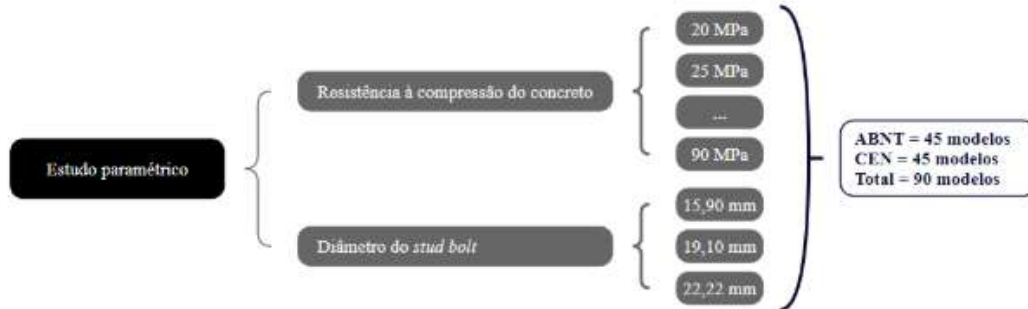
### 2.2.1 Estudo paramétrico

O estudo paramétrico foi realizado considerando a variação da resistência à compressão do concreto  $f_{ck}$  e o diâmetro do conector  $D$ . Para a resistência do concreto, foram considerados os valores presentes nos documentos normativos EN 1992-1-1 (2004b) e ABNT NBR 6118 (2023), entre 20 MPa e 90 MPa, com intervalos de 5 MPa, o que resultou em 15 valores de resistência. Quanto ao diâmetro do conector, foram adotados valores comerciais de 15,9 mm, 19,1 mm e 22,22 mm. Com isso, foram analisadas 45 configurações para cada método de dimensionamento, totalizando 90 modelos. A Figura 3 ilustra a variação de parâmetros adotados neste estudo.

### 2.2.2 Disposições normativas brasileiras

O procedimento adotado para a verificação segundo os documentos normativos brasileiros é baseado nas recomendações da ABNT NBR 6118 (2023) e da ABNT NBR 8800 (2008). Para determinação das características geométricas, deve-se determinar a área dos conectores, assim como a definição de seu diâmetro. Quanto às propriedades dos materiais, além da consideração das propriedades mecânicas do conector (Tabela 1), as propriedades do concreto que devem ser consideradas são: a resistência e o módulo de elasticidade na compressão. Desse modo, considerando os valores de resistência à compressão estabelecidos no estudo paramétrico, o módulo de elasticidade

**Figura 3:** Ilustração dos parâmetros variados.



foi determinado para cada valor de resistência, conforme Equação 1.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$$

Onde o  $E_{cs}$  denota o módulo de elasticidade secante do concreto (em MPa),  $\alpha_i$  representa o coeficiente determinado pela Equação 2 e o  $E_{ci}$  representa o módulo de elasticidade inicial do concreto (em MPa), determinado pela Equação 3.

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1$$

$$E_{ci} = \begin{cases} \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} & \text{para } 20 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} & \text{para } 55 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

Da Equação 3,  $\alpha_E$  denota um coeficiente que considera o tipo de agregado graúdo no concreto. Na presente pesquisa, esse foi considerado igual a 1, que corresponde ao uso de granito como agregado graúdo. Após a obtenção das propriedades mecânicas e geométricas, a verificação da capacidade resistente por esmagamento ( $Q_{Rd,esmagamento}$ ) do concreto é feita por meio da Equação 4.

$$Q_{Rd,esmagamento} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_{cs} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot E_{cs}}{\gamma_{cs}} \quad (1)$$

Onde  $A_{cs}$  é a área da seção transversal do conector (em cm<sup>2</sup>) e  $\gamma_{cs}$  denota um coeficiente de ponderação da resistência do conector, equivalente a 1,25. Nessa equação, os valores da resistência do concreto e seu módulo de elasticidade devem ser informados em kN/cm<sup>2</sup> para que o valor de resistência obtido seja expresso em kN.

A verificação da resistência à ruptura ( $Q_{Rd,conector}$ ) por tração no conector é realizada conforme a Equação 5.

$$Q_{Rd,conector} = \frac{R_s \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (2)$$

Em que  $R_g$  e  $R_p$  representam os coeficientes de efeito de grupo e de posição, respectivamente, sendo ambos iguais a 1 para o caso considerado nesse estudo, e o  $f_{ucs}$  denota a resistência à ruptura do aço do conector (em kN/cm<sup>2</sup>). Por fim, deve-se adotar o menor valor das resistências ao esmagamento e à ruptura por tração no conector para que seja considerado em projeto.

### 2.2.3 Disposições normativas europeias

O procedimento adotado para a verificação segundo os documentos normativos europeus é baseado na EN 1992-1-1 (2004b) e EN 1994-1-1 (2004a). Para determinação das características geométricas, deve-se determinar a área dos conectores, seu tamanho assim como seu diâmetro. Para a determinação das propriedades dos materiais, além da consideração das propriedades mecânicas do conector (Tabela 1), o módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cm}$ ) deve ser obtido por meio da Equação 6.

$$E_{cm} = 22 \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (3)$$

Onde  $f_{cm}$  denota a resistência à compressão média do concreto (em  $MPa$ ). O valor de  $f_{cm}$  equivale ao valor do  $f_{ck}$  acrescido de  $8 MPa$ . Desse modo, a verificação da capacidade resistente por esmagamento do concreto ( $P_{Rd,esmagamento}$ ) é feita por meio da Equação 7.

$$P_{Rd,esmagamento} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot D^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_r} \quad (4)$$

Da Equação 7,  $\alpha$  denota um coeficiente obtido por meio do quociente entre o tamanho do conector ( $h_{sc}$ ) e seu diâmetro (Equação 8), sendo adotado igual a 1 neste estudo,  $D$  representa o diâmetro do conector (em cm) e  $\gamma_r$  é um coeficiente denominado de fator parcial, que equivale a 1,25. Para que a resistência resulte em kN, deve-se informar as propriedades mecânicas do concreto em kN/cm<sup>2</sup>.

$$\alpha = \begin{cases} 0,2 \left( \frac{h_{sc}}{D} + 1 \right) & \text{para } 3 \leq \frac{h_{sc}}{D} \leq 4 \\ 1 & \text{para } \frac{h_{sc}}{D} > 4 \end{cases}$$

A verificação da resistência à ruptura por tração no conector ( $P_{Rd,conector}$ ) é realizada conforme a Equação 9.

$$P_{Rd,conector} = \frac{0,8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot D^2 / 4}{\gamma_v}$$

Onde  $f_u$  denota a resistência última do aço do conector, sendo equivalente ao  $f_{ucs}$ , porém, inferior a 500 MPa. O valor de resistência adotado para o projeto deve ser o menor dos valores encontrados nas Equações 7 e 9.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise da capacidade resistente conforme os documentos normativos brasileiros

O módulo de elasticidade do concreto foi obtido conforme Equação 1, em correspondência a cada valor de resistência à compressão previamente definido no escopo do estudo paramétrico. Na Tabela 2 são apresentados os valores dos módulos de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) e secante ( $E_{cs}$ ) do concreto.

**Quadro 2:** Módulos de elasticidade do concreto conforme sua resistência

$f_{ck}$ (MPa)	$E_{ci}$ (GPa)	$\alpha_i$	$E_{cs}$ (GPa)
20	25,04	0,85	21,29
25	28,00	0,86	24,15
30	30,67	0,88	26,84
35	33,13	0,89	29,40
40	35,42	0,90	31,88
45	37,57	0,91	34,28
50	39,60	0,92	36,63
55	40,63	0,94	38,09
60	41,61	0,95	39,53
65	42,55	0,96	40,95
70	43,44	0,98	42,36
75	44,30	0,99	43,75
80	45,13	1,00	45,13
85	45,93	1,00	45,93
90	46,70	1,00	46,70

Conforme observado na Tabela 2, o módulo de elasticidade secante se aproxima do módulo de elasticidade inicial à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, em função do coeficiente  $\alpha$ , chegando a se tornarem equivalentes para concretos de 80 MPa, 85 MPa e 90 MPa.

Entretanto, o aumento do valor do módulo de elasticidade é percentualmente menor com o acréscimo da resistência do concreto. Enquanto foi observado um acréscimo de aproximadamente 13,4% ao se considerar um  $f_{ck}$  de 25 MPa em comparação a 20 MPa, esse percentual decai para cerca de 1,7% ao se adotar 90 MPa em vez de 85 MPa.

Esse comportamento deve ser considerado em situações em que o modo de falha crítico ocorre por esmagamento do concreto e deseja-se aumentar sua resistência, como, por exemplo, nos pilares mistos analisados por (Xavier *et al.*, 2019). Isso ocorre porque o aumento da classe de resistência do concreto de alta resistência resulta em uma melhoria menos expressiva do módulo de elasticidade quando comparado com concretos de menor  $f_{ck}$ .

Ao avaliar a capacidade resistente considerando os diferentes conectores adotados, seguindo as Equações 4 e 5, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3.

**Quadro 3:** Capacidade resistente dos conectores

$f_{ck}$ (MPa)	A (kN) <i>Esmagamento do concreto</i>	B (kN)	C (kN)	A (kN) <i>Ruptura do conector</i>	B (kN)	C (kN)	Modo de falha crítico
20	51,82	74,78	101,03	65,36	94,31	127,41	Esmagamento do concreto
25	61,71	89,05	120,31	—	—	—	Esmagamento do concreto
30	71,27	102,84	138,93	—	—	—	Ruptura do conector
35	80,57	116,26	157,07	—	—	—	Ruptura do conector
40	89,68	129,41	174,83	—	—	—	Ruptura do conector
45	98,64	142,34	192,30	—	—	—	Ruptura do conector
50	107,48	155,10	209,53	—	—	—	Ruptura do conector
55	114,96	165,89	224,11	—	—	—	Ruptura do conector
60	122,32	176,51	238,45	—	—	—	Ruptura do conector
65	129,58	186,99	252,61	—	—	—	Ruptura do conector
70	136,76	197,35	266,61	—	—	—	Ruptura do conector
75	143,87	207,60	280,46	—	—	—	Ruptura do conector
80	150,91	217,77	294,20	—	—	—	Ruptura do conector
85	156,93	226,45	305,93	—	—	—	Ruptura do conector
90	162,83	234,97	317,43	—	—	—	Ruptura do conector

**Nota.** A = resultados para conectores de 15,90 mm; B = resultados para conectores de 19,10 mm; C = resultados para conectores de 22,22 mm.

Conforme apresentado na Tabela 3, o modo de falha crítico encontrado nessa etapa não teve variação ao se considerar a diferentes diâmetros para o conector. Nos modelos com concreto de 20 MPa e 25 MPa de resistência, o esmagamento do concreto representou a condição crítica, sendo aproximadamente 20,7% e 5,6%, respectivamente inferior à resistência à tração do conector. Para os concretos de 90 MPa, foram obtidos valores aproximadamente 149,1% superiores. Desse modo, para concretos com  $f_{ck}$  iguais ou superiores a 30 MPa, a falha é governada pelo conector de cisalhamento. Situação similar foi encontrada por Marconcin, Machado e Marino (2010) que identificaram que o aumento do diâmetro do conector incrementa a carga limite, assim como o deslocamento vertical e o deslizamento longitudinal na interface laje-viga. Isso justifica a manutenção da capacidade resistente dos conectores estudados por Xavier *et al.* (2019), onde a resistência à compressão média do concreto variou entre 19,7 MPa e 28,7 MPa. Ao variar o diâmetro do conector, foi obtido um incremento tanto para resistência à tração no conector quanto para o esmagamento do concreto de 44,3% ao adotar o modelo de 19,1 mm e 35,1% com o modelo de 22,22 mm. Desse modo, foi observado que alterar o *stud bolt* pode apresentar um efeito mais perceptível em uma situação de projeto ao se considerar o método presente nos documentos normativos brasileiros.

### 3.2 Análise da capacidade resistente conforme os documentos normativos Europeus

O módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cm}$ ) foi determinado por meio da Equação 6. O resultado obtido para cada valor da resistência à compressão do concreto é apresentado na Tabela 4.

**Quadro 4:** Módulo de elasticidade do concreto conforme sua resistência

$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cm}$ (GPa)	$E_{cm}$ (GPa)
20	28	29,96
25	33	31,48
30	38	32,84
35	43	34,08
40	48	35,22
45	53	36,28
50	58	37,28
55	63	38,21
60	68	39,10
65	73	39,94
70	78	40,74
75	83	41,51
80	88	42,24
85	93	42,95
90	98	43,63

Ao considerar o método europeu, foi observado que o incremento no módulo de elasticidade variou entre 5,1%, ao comparar o concreto de 25 MPa com o de 20 MPa, e 1,6%, comparando o concreto de 90 MPa com o de 85 MPa. Novamente, esse comportamento deve ser observado em situações em que o módulo de falha crítico ocorre pelo esmagamento do concreto e deseja-se aumentar sua resistência. Ao avaliar a capacidade resistente considerando os diferentes conectores adotados, seguindo as Equações 7 e 9, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5. Similar ao obtido com o uso da norma nacional, o modo de falha crítico encontrado nessa etapa sofreu alterações

**Quadro 5:** Capacidade resistente dos conectores

$f_{ck}$ (MPa)	Esmagamento do concreto (kN)			Ruptura do conector (kN)			Modo de falha crítico
	A	B	C	A	B	C	
20	45,40	65,52	88,51	63,54	91,69	123,86	Esmagamento do concreto
25	52,03	75,08	101,43				Esmagamento do concreto
30	58,21	84,00	113,48				Esmagamento do concreto
35	64,05	92,43	124,87				Ruptura do conector
40	69,62	100,46	135,71				Ruptura do conector
45	74,94	108,15	146,10				Ruptura do conector
50	80,07	115,55	156,10				Ruptura do conector
55	85,03	122,70	165,76				Ruptura do conector
60	89,83	129,63	175,13				Ruptura do conector
65	94,50	136,37	184,23				Ruptura do conector
70	99,05	142,93	193,09				Ruptura do conector
75	103,49	149,33	201,74				Ruptura do conector
80	107,82	155,59	210,20				Ruptura do conector
85	112,07	161,71	218,47				Ruptura do conector
90	116,22	167,71	226,57				Ruptura do conector

**Nota:** A = resultados para conectores de 15,90 mm; B = resultados para conectores de 19,10 mm; C = resultados para conectores de 22,22 mm.

ao se considerar a variação de diâmetro do conector. Entretanto, a falha pelo esmagamento do concreto foi crítica também ao se utilizar o concreto de 30 MPa, sendo 8,4% inferior à resistência dos conectores, bem como observado por (Xavier *et al.*, 2019). Ao considerar os valores de 25 MPa e 20 MPa, a resistência ao esmagamento do concreto foi, respectivamente, 18,1% e 28,5% inferior. Considerando o  $f_{ck}$  de 90 MPa, a resistência encontrada foi 82,9% superior.

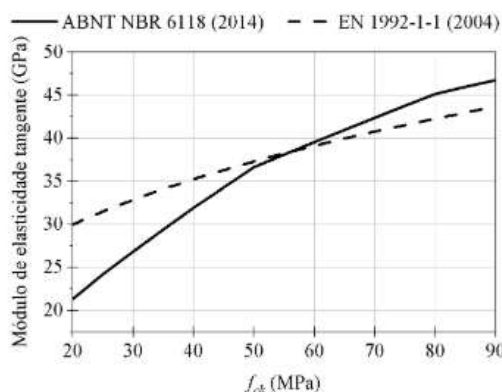
Dessa forma, com a consideração dos documentos normativos europeus, o conector governa a falha ao considerar concretos de resistência à compressão de 35 MPa ou superior. Esse comportamento também foi observado no estudo conduzido por Marconcin, Machado e Marino (2010).

Ao analisar a influência do conector na capacidade resistente, foi encontrado um incremento de 44,3% ao utilizar um conector de 19,1 mm e 35,1% com 22,22 mm. Mesmos valores percentuais foram encontrados ao utilizar o método brasileiro

### 3.3 Comparação dos resultados

Considerando a influência das propriedades do concreto na resistência do conjunto, a Figura 4 apresenta uma comparação da variação do módulo de elasticidade obtido ao se adotar os métodos brasileiro e europeu para cada valor de resistência à compressão do concreto.

**Figura 4:** Variação dos valores de módulo de elasticidade secante determinados conforme documento normativo brasileiro e europeu.



Conforme observado na Figura 4, são encontrados comportamentos distintos na obtenção do módulo de elasticidade do concreto. Para valores de  $f_{ck}$  inferiores a 50 MPa, o método brasileiro se mostrou mais conservador, enquanto para valores acima de 60 MPa o comportamento se inverte. Essa diferença pode resultar em valores irreais em situações de projeto onde não se nota as diferenças entre a metodologia de cálculo.

Observando os valores obtidos pelo método brasileiro, é evidente a alteração na equação de estimativa da propriedade para resistências superiores a 50 MPa (Equação 3), assim como a influência do parâmetro  $\alpha = 1$  nos concretos com resistências de 80 MPa, 85 MPa e 90 MPa.

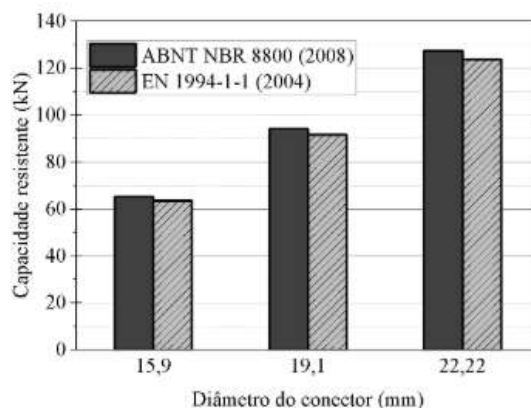
No estudo realizado por Santos *et al.* (2017), ao estudar diferentes agregados graúdos em concretos de 30 MPa, 25 MPa e 20 MPa, foi observado um valor menos conservador ao se utilizar o método europeu em comparação com o brasileiro, similar ao encontrado na Figura 4. Entretanto, ao realizar o estudo experimental, a norma brasileira foi capaz de prever o valor do módulo de elasticidade com boa precisão, indicando que a utilização de documentos normativos de outros países para estimar essas propriedades pode conduzir a resultados equivocados.

A comparação dos valores de resistência à tração nos conectores conforme seu diâmetro é apresentado na Figura 5.

Em relação à resistência à ruptura por tração nos conectores, os valores encontrados para ambos os métodos foram similares, com uma diferença de 2,9% para cada método. Isso ocorre pois ambos possuem formulações similares, com poucas modificações. O documento normativo europeu limita o valor da resistência última do aço em 500 MPa, enquanto essa disposição não é observada no método brasileiro. Como o aço utilizado nesse estudo supera esse valor (500 MPa), a resistência utilizada na Equação 9 é divergente, fator esse que torna o resultado obtido por meio da EN 1994-1-1 (2004a) ligeiramente mais conservador. Outro fator que possui impacto nessa variação de

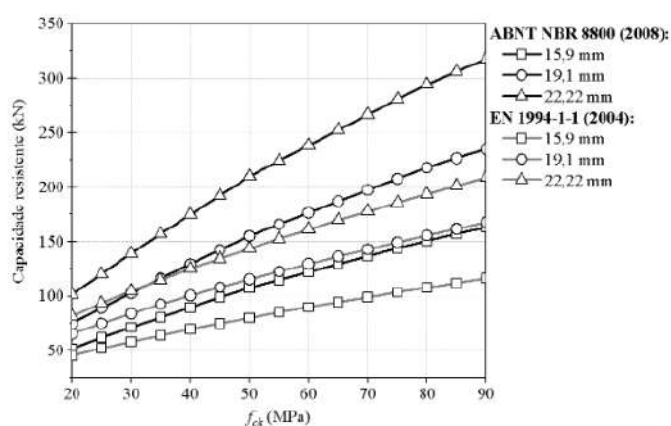


**Figura 5:** Resistência à ruptura por tração nos conectores.



resistência é a consideração dos coeficientes de efeito de grupo e de posição no documento brasileiro (Equação 5). Por se tratar de um modelo com laje maciça de concreto, esses coeficientes não impactaram no resultado, porém, o documento europeu apresenta um fator de 0,8, como pode ser observado na Equação 9, minorando a resistência encontrada. Nesse estudo, o método europeu conduziu a um resultado mais conservador. Considerando que a falha é governada pela resistência à tração no conector para a maior parte dos modelos estudados, a adoção do método europeu se apresenta como uma alternativa possível, e a determinação da capacidade resistente do conector tende a conduzir a resultados a favor da segurança. Ao analisar os valores para resistência ao esmagamento do concreto, foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 6, que ilustra o comportamento dessa propriedade conforme os parâmetros considerados no estudo.

**Figura 6:** Resistência à ruptura por esmagamento do concreto.



Com base nas curvas da Figura 6, pode-se observar que o método europeu resulta em valores mais conservadores se comparado ao método brasileiro, mesmo quando o comportamento obtido para o módulo de elasticidade indica o contrário (Figura 4). A variação entre os resultados encontrados para o mesmo método, variando conforme a resistência do concreto, foi menor no método europeu, com uma variação de 60,9%, enquanto no método brasileiro a variação encontrada foi de 68,2%.

Similar ao observado neste estudo, Sales (2014) notou resultados mais conservadores ao utilizar métodos de cálculo de documentos normativos internacionais, entre eles, o estabelecido pela EN 1994-1-1 (2004a). Entretanto, os resultados mais próximos aos experimentos foram obtidos pelo método de cálculo da norma brasileira (ABNT, 2008).

#### **4 CONCLUSÃO**

Este estudo se dedicou a compreender o efeito de diversos parâmetros relacionados à propriedade do concreto e geometria de um conector tipo *stud bolt* na resistência da conexão concreto-aço de um modelo misto de aço-concreto com laje maciça, comparando os valores obtidos pelo método brasileiro e europeu.

Com fundamento nos resultados encontrados, foi possível observar que a estimativa do módulo de elasticidade do concreto resultou em valores divergentes para cada método. Considerando a diferença entre os materiais utilizados em cada região, recomenda-se um estudo cuidadoso para quando, em uma situação de projeto, seja adotado o método europeu.

Os valores encontrados para a resistência à tração no conector foram similares ao comparar ambos os documentos normativos. Essa falha é considerada crítica para todas as verificações com concreto de resistência superior à 25 MPa no método brasileiro e 30 MPa no método europeu.

Ao analisar a resistência ao esmagamento do concreto, o método brasileiro resultou em valores menos conservadores, sendo mais significativo em concretos com maiores valores de resistência à compressão.

Para estudos futuros, recomenda-se a comparação dos resultados analíticos com testes experimentais e uma investigação numérica do comportamento encontrado. Uma avaliação do método europeu considerando o módulo de elasticidade determinado pelo método brasileiro pode conduzir a bons resultados.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- CEN (European Committee for Standardization). **Eurocode 2**: design of concrete structures — part 1-1: general rules and rules for buildings. Bruxelas: CEN, 2004.
- CEN (European Committee for Standardization). **Eurocode 4**: design of composite steel and concrete structures — part 1-1: general rules and rules for buildings. Bruxelas: CEN, 2004.
- CUNHA, R. N.; ARGÔLO, H. S. D. Análise comparativa das respostas de vibração de pisos mistos de aço e concreto segundo métodos da nbr 8800:2008 e ansi/aisc 360-16. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 57, p. 199, 2021. Disponível em: <https://example.com>.
- FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education, 2016.
- MARCONCIN, L. R.; MACHADO, R. D.; MARINO, M. A. Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, p. 449–476, 2010.
- NARDIN, S. D.; DEBS, A. L. H. C. E. Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 239–247, 2008.
- SALAH, M. S.; MUTEH, H. H. Influence of shear connector type and degree on semi-rigid joints of composite cold-formed steel beam-to-column connections. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 9, n. 2, 2024.
- SALES, M. W. R. **Conector de cisalhamento tipo pino com cabeça para viga mista aço-concreto com laje alveolar**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- SANTOS, A. C.; ARRUDA, A. M.; SILVA, T. J.; VITOR, P. C. P. Estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 281–294, 2017.
- SILVEIRA, E. G.; CALDAS, R. B.; MIRANDA, L. G. J.; CARVALHO, H.; SANTOS, L. R. Análise da influência de parâmetros geométricos e do material no comportamento estrutural do conector de cisalhamento em chapa com recortes regulares retangulares. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 12, n. 1, 2023.
- XAVIER, E. M.; NETO, J. G. R.; SARMAH, A. M. C.; ROQUETE, L.; PAULA, L. G. C. Experimental analysis of bolts employed as shear connectors in circular concrete-filled tube columns. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 337–370, 2019.
- YANG, Y. *et al.* Stiffness and cracking of web-embedded u-shaped steel-concrete composite beam under negative bending moments. **Structures**, v. 65, n. June, p. 106678, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106678>.