

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS FUROS DE CONECTORES PERFOBOND EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE PROFUNDIDADE E CONFINAMENTO DO CONCRETO

Otávio Prates Aguiar

Paulo Estevão Carvalho Silvério

Rodrigo Barreto Caldas

opaguiar@gmail.com

pcilverio@yahoo.com.br

rbcaldas@gmail.com

*Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia de Estruturas
Av. Antônio Carlos, 6627 - Escola de Engenharia - Sala 4215, Belo Horizonte, Brasil*

Resumo. O presente trabalho refere-se a um estudo numérico experimental para desenvolvimento de um novo modelo de cálculo para o conector Perfobond. Este trabalho está sendo empreendido, pois observou-se na literatura que as diferentes disposições geométricas em que se insere o conector do tipo Perfobond têm grande influência sobre seu comportamento mecânico, podendo-se observar variações significativas na ductilidade, capacidade resistente e modo de falha do conector em função da profundidade e nível de confinamento do concreto na região da conexão. Portanto, nesse trabalho optou-se por adotar uma nova geometria de ensaio de cisalhamento, similar a um ensaio de arrancamento, que permite simular o conector tanto em situação superficial quanto profunda. Observou-se que o furo confinado com barra passante apresenta um estágio de resistência secundário onde, após a ruptura localizada do concreto, a barra passante é mobilizada até sua ruptura, o que dá um acréscimo de capacidade resistente e ductilidade ao conector. Esse acréscimo não é observado no conector superficial, cuja capacidade resistente é definida pela falha localizada do concreto, que, devido à ausência de confinamento, imediatamente se espalha para a superfície, causando fissuração e destacamento do concreto. Visando gerar mais dados para a formulação de um novo modelo de cálculo, construiu-se um modelo numérico no software ABAQUS que reproduz a configuração dos ensaios de cisalhamento realizados. O modelo foi capaz de simular com boa precisão ensaios experimentais realizados e será, em seguida, utilizado para extrapolar as configurações físicas e geométricas dos protótipos experimentais.

Palavras-chave: Perfobond, Confinamento, Modelo numérico

Abstract. The present work refers to an experimental and numerical study to develop a new design model for the Perfobond connector. This work is being undertaken as it has been observed that the different geometric arrangements in which the Perfobond connector is inserted have great influence on its mechanical behavior. Significant variations in ductility, strength and failure mode of the connector observed in the literature can be attributed to the depth and level of concrete confinement in the region of the connection. Therefore, in this work it was adopted a new push test geometry, similar to a pullout test, which allows simulating the connector in both superficial and confined situations. It was observed that confined Perfobond holes with perforating rebar show a secondary resistance stage, which occurs after local failure of the concrete dowel, where the perforating rebar resists nearly the totality of the shear force until it fails. This behavior provides a strength and ductility increase to the connector and is not observed in superficial connections, whose resistant capacity is defined by the local failure of the concrete, which, due to the absence of confinement, immediately spreads to the surface, causing

cracking and spalling of the concrete. In order to generate more data for the formulation of a new design model, a numerical model that reproduces the configuration of the performed push tests was built in ABAQUS software. The model was able to accurately simulate performed push tests and will then be used to extrapolate the physical and geometric configurations of the experimental prototypes.

Keywords: Perfobond, Confinement, Numerical model

1 Introdução

Está em andamento na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), uma pesquisa que visa desenvolver um novo modelo de cálculo para conectores tipo Perfobond que consiga prever a capacidade resistente e ductilidade do conector tipo Perfobond para as diversas aplicações de projeto feitas desde sua criação em 1985, dentre as quais, quatro são apresentadas na Figura 1.

Este trabalho está sendo conduzido, pois observou-se na literatura que as diferentes disposições geométricas em que se insere o conector do tipo Perfobond têm grande influência sobre seu comportamento mecânico, podendo-se observar variações significativas na ductilidade, capacidade resistente e modo de falha do conector em função das mesmas. O nível de confinamento do concreto na região do conector, por exemplo, desempenha grande influência em seu comportamento mecânico. Xiao *et al.* [1] observou que conectores situados em regiões mais profundas do elemento de concreto tendem a falhar por ruptura da barra passante, enquanto conectores situados em regiões mais superficiais tendem a apresentar falha por destacamento do concreto na superfície, o que gera grandes diferenças na resistência e ductilidade do Perfobond.

Por esse motivo, busca-se nesse trabalho analisar os diferentes modos de falha de forma sistemática, correlacionando o nível de confinamento do concreto com a capacidade resistente e ductilidade do conector. Além disso, visando obter um modelo de cálculo com aplicação mais abrangente, estão sendo variados uma maior quantidade de parâmetros geométricos, tais como espessura da chapa, diâmetro do furo e diâmetro da barra passante, ao longo de intervalos mais amplos.

Para viabilizar essa análise de maior abrangência, optou-se por basear o trabalho investigativo em ensaios de um só furo, pois, focando a análise em um furo, isto é, no aspecto comum à qualquer aplicação ou variação do conector Perfobond, é possível isolar melhor os mecanismos fundamentais de funcionamento da conexão e os parâmetros físicos e geométricos que os influenciam, reduzindo-se, portanto, o número de parâmetros a exercer influência nos resultados dos ensaios e facilitando análises comparativas. Dessa forma, em se desenvolvendo uma formulação que consiga descrever adequadamente mecanismo do componente fundamental desse tipo de conexão (os furos), será possível, com algumas adaptações, extrapolá-la para prever a resistência de qualquer aplicação ou variação desse conector.

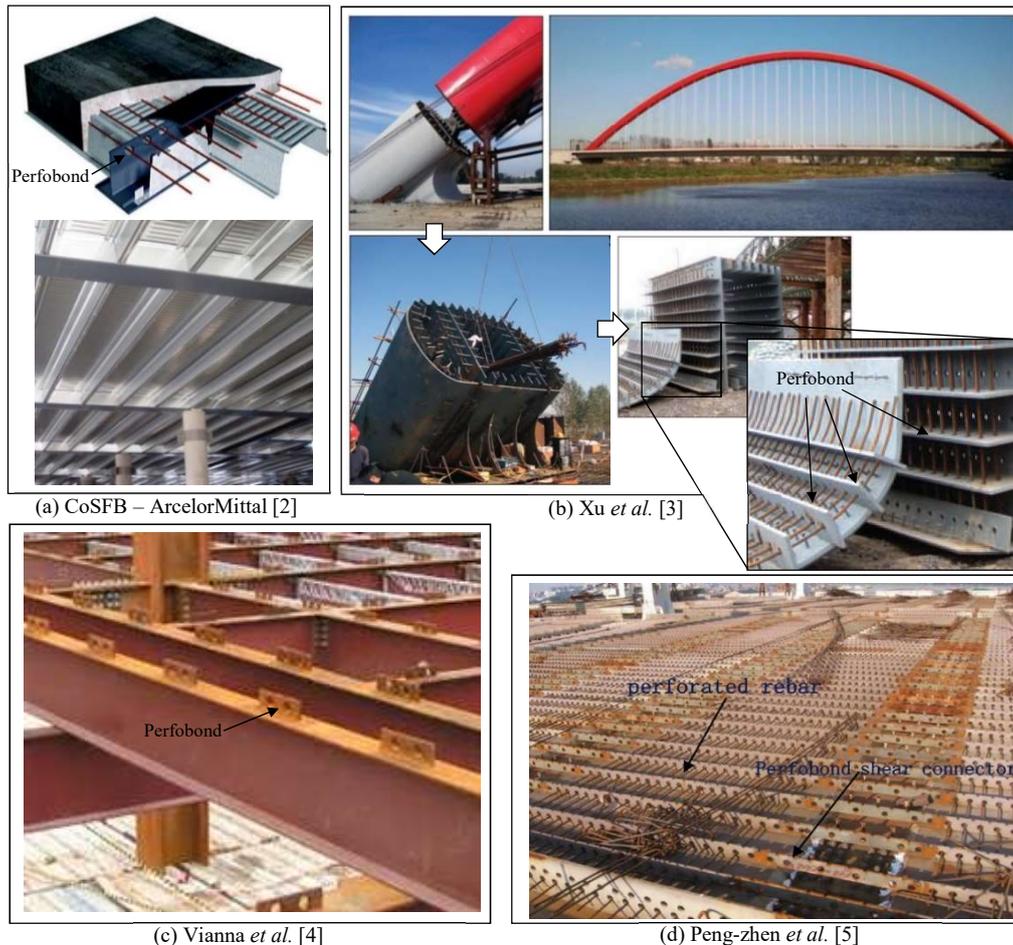


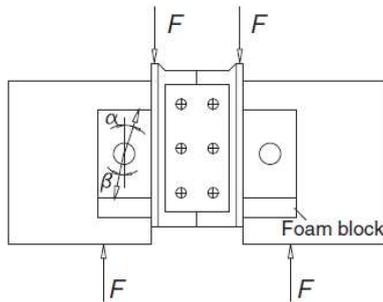
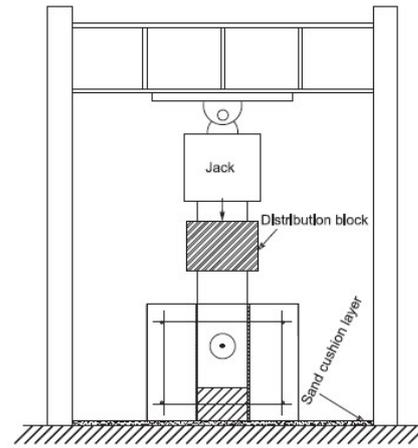
Figura 1. Exemplos de aplicação do Perfobond: (a) vigas tipo slim-floor; (b) transições mistas de pontes; (c) viga mista convencional; (d) deck misto enrijecido de ponte.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ensaios de cisalhamento em conectores Perfobond

Desde o desenvolvimento do conector Perfobond, foram realizadas diversas pesquisas sobre o comportamento dessa conexão em aplicações diversas, sobretudo através de ensaios de cisalhamento, padronizados no Anexo B da norma EN 1994-1-1:2004 [6], referidos como *push-out*. O protótipo para esses ensaios consiste em duas pequenas lajes de concreto conectadas a um perfil metálico por meio dos conectores de cisalhamento. Na etapa de carregamento, é feita a aplicação de força vertical de compressão ao topo do perfil de aço, que desliza em relação às lajes. A partir desse ensaio é possível obter a relação entre a força atuante e o deslizamento relativo entre o perfil de aço e as lajes de concreto.

Su et al. [7] afirma que os ensaios *push-out* causam um ângulo de desvio entre a direção da carga aplicada (vertical) e a resultante de força no conector, devido à excentricidade entre o ponto de introdução da carga e a posição do conector (Figura 2), o que ocasiona o surgimento de uma componente de força de arrancamento do concreto na conexão e o aumento do atrito entre o perfil e a laje. O valor desse ângulo de desvio varia conforme as dimensões do protótipo, sendo um dos motivos pelos quais é comum se observar diferenças entre resultados de ensaios com conectores similares realizados por autores diferentes. Além do mais, como no ensaio as lajes apresentam pequena espessura, os resultados são direcionados a aplicações superficiais, isto é, em que o conector se encontra próximo à superfície do concreto, como o caso geral de vigas mistas.

Figura 2. Ângulo de desvio (Su *et al.* [7]).Figura 3. Ensaio *Plug-in* (Su *et al.* [7]).

Como alternativa ao ensaio *push-out*, Su *et al.* [7] propôs nova configuração de ensaio, denominada *plug-in*, em que o modelo de ensaio é composto por uma única chapa de aço perfurada imersa em um bloco de concreto e o carregamento é aplicado diretamente na extremidade da chapa do conector (Figura 3). Essa configuração de ensaio elimina o ângulo de desvio, permitindo que a totalidade da carga aplicada se converta em esforço cisalhante no conector, uma vez que a carga é centrada e verticalmente alinhada com o conector, e permite simular situações em que o conector se encontra em um ponto mais profundo do elemento de concreto.

2.2 Influência do confinamento em conectores Perfobond

Visando comparar resultados de um mesmo conector para as duas configurações de ensaio de cisalhamento, isto é, *push-out* e *plug-in*, Xiao *et al.* [1] realizaram o estudo apresentado na Figura 4. Xiao *et al.* [1] observaram que nos ensaios *push-out* o conector fica situado em região superficial e a falha se dá por destacamento do concreto, enquanto nos ensaios *plug-in* o conector fica em região profunda e confinada do concreto e a falha ocorre por ruptura da armadura. Por esse motivo, observou-se capacidade resistente 68% maior nos ensaios *plug-in*. Na Figura 4-c nota-se que as formulações de capacidade resistente do Perfobond disponíveis na literatura não captam a influência do confinamento da capacidade resistente do conector e dão previsão mais próxima do resultado dos ensaios *push-out*, uma vez que foram obtidas com base nesse tipo de ensaio. As observações feitas por Xiao *et al.* [1] apontam a necessidade de se desenvolver novo modelo de cálculo que tenha o nível de confinamento como um dos parâmetros da equação.

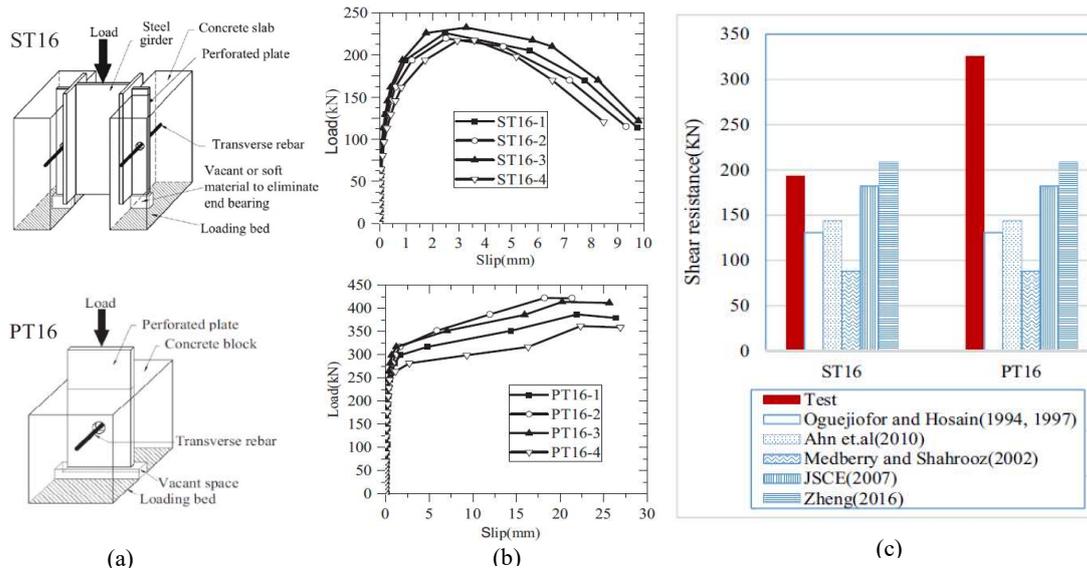


Figura 4. Influência da configuração do ensaio de cisalhamento - *push-out x plug-in*: (a) configuração dos ensaios; (b) curvas força x deslizamento por furo obtida com as duas configurações; (c) comparação do valor de P_{Rk} obtido por ambas configurações com cinco previsões teóricas da literatura (Xiao *et al.* [1] - modificado).

3 Metodologia

Tendo em vista as deficiências dos modelos de cálculo disponíveis na literatura, em especial quanto ao fato de não considerarem a influência das disposições geométricas do entorno, isto é, do nível de confinamento, no comportamento do conector, está sendo realizado um estudo numérico experimental para se propor um novo modelo de cálculo, onde a profundidade da conexão e a taxa de armadura transversal confinante são incluídas como parâmetros para determinação da capacidade resistente do Perfobond. Possibilitando assim dimensionamento mais econômico desse tipo de conexão.

Nesse estudo, foram realizados ensaios de cisalhamento de um furo, similares ao proposto por Su *et al.* [7] onde, além de se variar os parâmetros já contemplados por outros modelos (diâmetro do furo, espessura da chapa e diâmetro da barra passante), foram variados também parâmetros relativos às disposições de entorno da conexão. A partir desses ensaios estão sendo calibrados modelos numéricos no software ABAQUS [8], com os quais se poderá extrapolar as configurações físicas e geométricas dos protótipos experimentais para se realizar um amplo estudo paramétrico, possibilitando-se obter relações entre a capacidade resistente do conector e o valor de seus parâmetros geométricos e de material. Na Tabela 1 são relacionados os parâmetros estudados e faixa de valores dentro das quais eles serão variados no estudo paramétrico. Os parâmetros geométricos podem ser visualizados na Figura 5.

Tabela 1. Parâmetros estudados e intervalos de valores a serem contempladas.

		Parâmetros	Limites		
			Inferior	Superior	
Geométrico	Furo	Diâmetro do furo	D (mm)	20	90
		Espessura da chapa	t (mm)	6	25
		Diâmetro da barra passante	d (mm)	6	20
	Entorno	Profundidade do conector	P (mm)	30	200
Taxa de aço transversal confinante		A_c (mm ² /mm)	0,00	0,65 ($\phi 10c/12$)	
Material	Resistência do concreto	f_c (MPa)	20	50	
	Resistência do aço da barra	f_y (MPa)	350	700	

4 Programa Experimental

4.1 Configuração dos ensaios

Os ensaios realizados têm a configuração de um ensaio de arrancamento, onde uma chapa inserida em um bloco de concreto e conectada a esse por um furo do tipo Perfobond é tracionada através de um atuador hidráulico e o bloco de concreto é restringido pelo topo por uma superfície rígida ancorada na laje de reação. Essa configuração de ensaio é similar à configuração *plug-in* proposta por Su *et al.* [7], diferenciando-se dessa pelo fato de no ensaio *plug-in* a carga ser aplicada na forma de compressão. A configuração típica dos ensaios realizados é mostrada na Figura 5. Nesse trabalho foi adotada essa configuração de ensaio de arrancamento, com a carga sendo aplicada por tração, para se evitar problemas de instabilidade da chapa perfurada quando essa apresenta espessura reduzida.

4.2 Protótipos Experimentais

Duas tipologias de protótipo experimental foram adotadas: a tipologia 1, com armadura confinante (Figura 5.b), e a tipologia 2, com armadura de costura e sem armadura confinante (Figura 5.c). A armadura confinante consiste em uma gaiola que revolve a região da conexão proporcionando confinamento passivo ao concreto. A armadura de costura tem o propósito de resistir apenas ao esforço de separação do elemento de concreto no sentido longitudinal da chapa (tal como ocorre com as lajes em vigas mistas). Suas barras atravessam a chapa por furos preenchidos com isopor de modo a assegurar que as mesmas trabalhem à tração mas não resistam a cisalhamento. A armadura de costura, portanto, não apresenta efeito de pino e não proporciona confinamento ao concreto na região do conector.

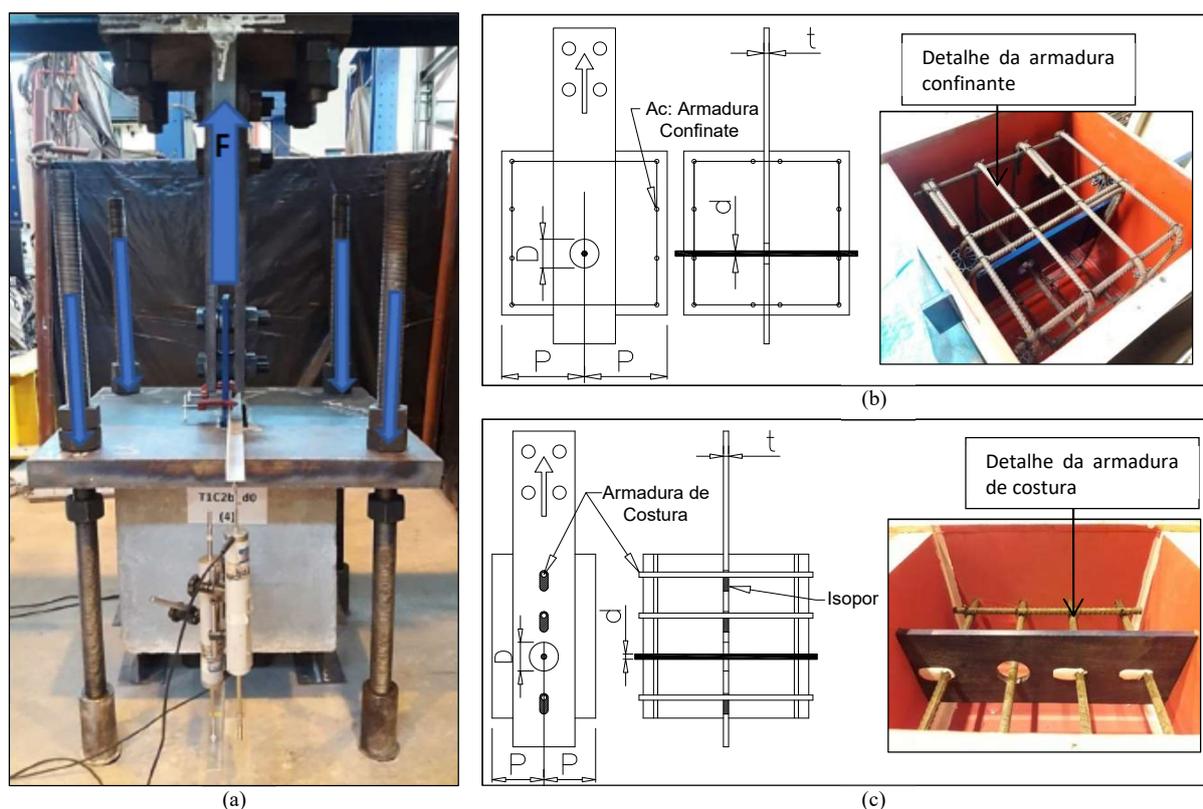


Figura 5. Ensaio experimentais e parâmetros geométricos dos protótipos: (a) configuração dos ensaios; (b) protótipos com armadura confinante (c) protótipos sem armadura confinante.

Foram ensaiados 7 protótipos experimentais, os quais tem suas propriedades geométricas apresentadas na Tabela 2. O protótipo P01 é o protótipo de referência para a tipologia 1. Os protótipos

P02 a P06 apresentam, cada qual, uma ou mais variações nas propriedades geométricas enquanto mantem as demais propriedades geométricas inalteradas em relação às do protótipo de referência. O protótipo P02 é uma variação sem barra passante no interior do furo, P03 e P04 são variações do diâmetro do furo, espessura da chapa e diâmetro da barra. P05 é uma variação da taxa de armadura confinante. P06 é uma variação da profundidade do conector, uma vez que nesse protótipo o bloco apresenta dimensões 25x40x40 cm, enquanto no protótipo referência as dimensões são 40x40x40 cm. O protótipo P07 tem configuração conforme a tipologia 2, isto é, no lugar da armadura confinante, apresenta apenas armadura de costura. Esse protótipo tem, exceto pela configuração da armadura, as mesmas características geométricas do protótipo P06.

Tabela 2. Propriedades Geométricas dos Protótipos.

Tipologia	Protótipos	Propriedades Geométricas (mm)				
		Diâmetro do furo D	Espessura da chapa t	Diâmetro da barra d	Profundidade do conector P	Taxa de Armadura Confinante A_c
1	P01-1	50	12.5	12.5	200	0.65 (ϕ 10 c/12)
1	P01-2	50	12.5	12.5	200	0.65 (ϕ 10 c/12)
1	P02	50	12.5	-	200	0.65 (ϕ 10 c/12)
1	P03	25	7.0	6.3	200	0.65 (ϕ 10 c/12)
1	P04	74	26.0	20.0	200	0.65 (ϕ 10 c/12)
1	P05	50	12.5	12.5	200	0.26 (ϕ 6.3 c/12)
1	P06	50	12.5	12.5	125	0.65 (ϕ 10 c/12)
2	P07	50	12.5	12.5	125	0.00

A tabela 3 mostra as propriedades dos materiais utilizados nos protótipos. Conforme se observa, exceto pelos protótipos P06 e P07 que foram moldados com um mesmo concreto, cada protótipo apresenta propriedades diferentes para o concreto, com f_c variando entre 27,98 e 33,36 MPa.

Tabela 3: Propriedades dos materiais.

Protótipos	Propriedades dos Materiais (MPa)										
	Bloco			Aço da Chapa		Aço da Barra		Aço da Armadura Transversal Confinante		Aço da Armadura de Costura	
	f_c	f_{ct}	E_c	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
P01-1	27.98	2.95	18954.0			537	702	592	741	-	-
P01-2	32.02	3.64	25131.0			537	702	592	741	-	-
P02	33.36	3.79	24127.5			-	-	592	741	-	-
P03	28.84	3.63	23464.5	350	500	609	763	592	741	-	-
P04	33.02	4.07	21555.0			557	685	592	741	-	-
P05	29.15	3.66	24431.5			537	702	619	735	-	-
P06						537	702	592	741	-	-
P07	28.76	3.42	22078.5			537	702	-	-	580	661

4.3 Instrumentação e Carregamento

Foram utilizados 4 transdutores de deslocamentos (DTs) para medição do deslocamento da chapa em relação ao bloco, conforme Figura 6. Os DTs foram fixados em duas faces laterais opostas do bloco de concreto, ficando um par de DTs em cada lado. Os pares de DTs foram posicionados de forma que

um DT mediu o deslocamento do bloco em relação a uma cantoneira fixada em um ponto da chapa acima do bloco (DT Superior) e o outro em relação a um ponto da chapa abaixo do bloco (DT Inferior).

O ensaio foi realizado em duas etapas. Inicialmente foram realizados 25 ciclos de carregamento, oscilando entre 5% a 40% da carga última estimada (ou 10 kN para limite inferior). Em sequência aplicou-se um carregamento monotônico com controle de deslocamento de 0,2 mm/min até atingir a ruptura.

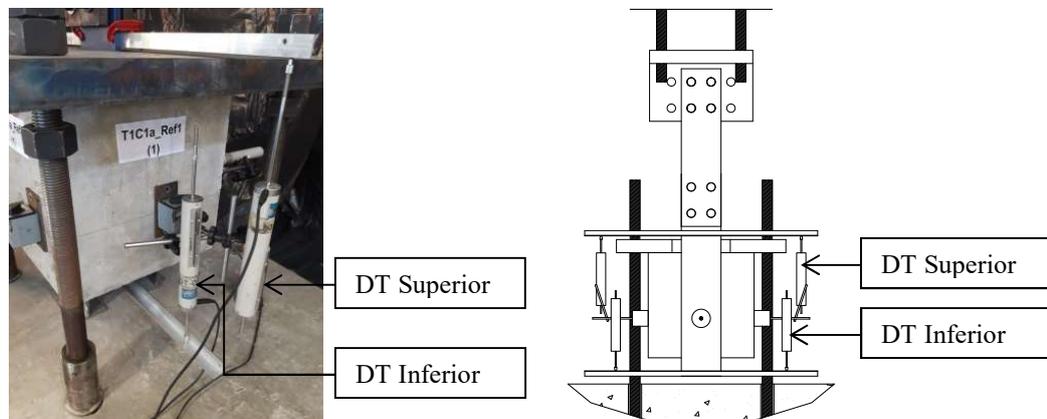


Figura 6. Instrumentação do ensaio. Deslocamento da chapa em relação ao bloco.

4.4 Resultados

A partir dos dados obtidos durante os ensaios foram obtidas as curvas de Força x Deslizamento relativo para cada protótipo, apresentado na Figura 7. Destacam-se 4 pontos principais observados. O primeiro ponto (I) se refere ao início da plastificação do concreto no interior do furo. O segundo ponto (II) se refere à falha localizada do concreto no furo. O terceiro ponto (III) é a carga máxima atingida. E o quarto ponto (IV) destacado se refere ao deslizamento máximo obtido, correspondente à ruptura, ou ao deslizamento atingido a uma carga de 90% da carga máxima obtida. A Tabela 4 resume os pontos destacados para cada protótipo.

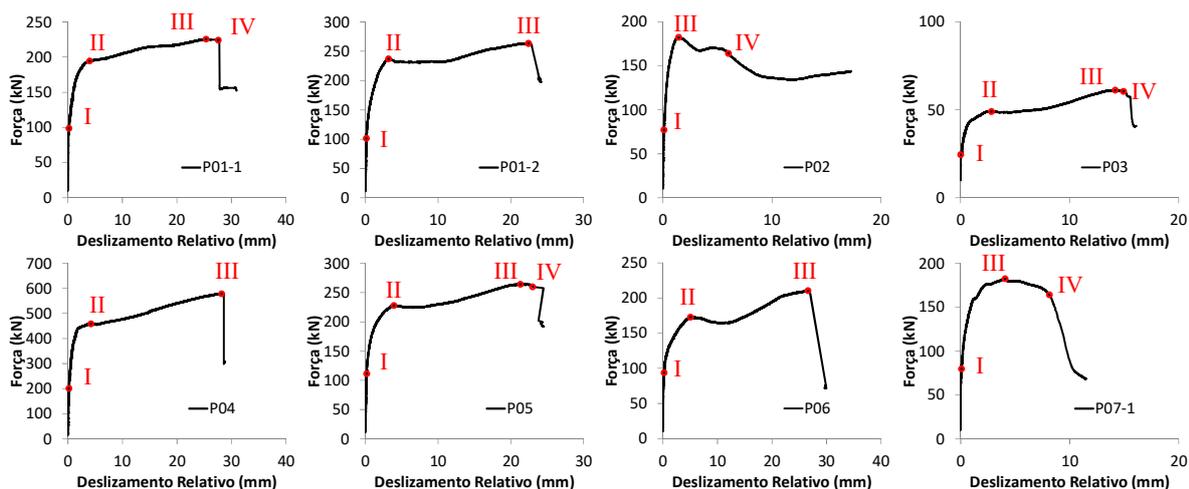


Figura 7. Gráficos Força (kN) x Deslizamento Relativo (mm).

Tabela 4. Valores de força e deslizamento extraídos dos ensaios.

Protótipos	Pontos Principais da curva Força (kN) x Deslizamento Relativo (mm)								Conf.
	I – Início da plastificação no concreto		II - Falha localizada do Concreto		III - Carga máxima		IV - Deslizamento máximo		
	P_E	δ_E	P_y	δ_y	P_R	δ_R	P_u	δ_u	
P01-1	99	0.20	194	3.99	226	25.35	224	27.58	Armadura Confinante (Gaiola)
P01-2	102	0.11	237	3.15	264	22.41	264	22.41	
P02	77	0.09	-	-	182	1.44	164	6.01	
P03	24	0.01	49	2.83	61	14.18	60	14.94	
P04	201	0.17	459	4.21	579	28.20	579	28.20	
P05	111	0.17	228	3.92	264	21.31	260	23.00	
P06	94	0.20	173	5.02	210	26.59	210	26.59	
P07	80	0.07	-	-	182	4.07	164	8.14	Costura

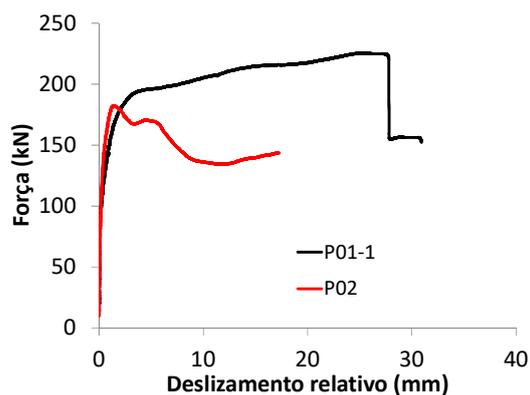
Os resultados obtidos foram sobrepostos conforme apresentado na Figura 8 para possibilitar análises comparativas. Na Figura 8.a, observa-se comparação entre o resultado do protótipo referência P01-1, o qual contém barra passante, e P02, o qual não contém barra passante. Nota-se que em P01 a curva tem acréscimo de resistência após a falha localizada do concreto com a carga máxima só sendo atingida após a ruptura da barra passante, já em P02 a falha localizada do concreto coincide com a carga máxima e a curva passa a decrescer após esse ponto.

Na Figura 8.b apresenta-se comparação entre P01-2, P03 e P04. Cada um desses apresenta valores diferentes de diâmetro do furo (D), espessura da chapa (t) e diâmetro da barra passante (d). Nota-se que a capacidade resistente P_R e a ductilidade δ_u são influenciados por esses parâmetros. A partir desses resultados, será feita análise paramétrica por elementos finitos para se obter correlações entre esses parâmetros geométricos e a capacidades resistente e ductilidade do conector.

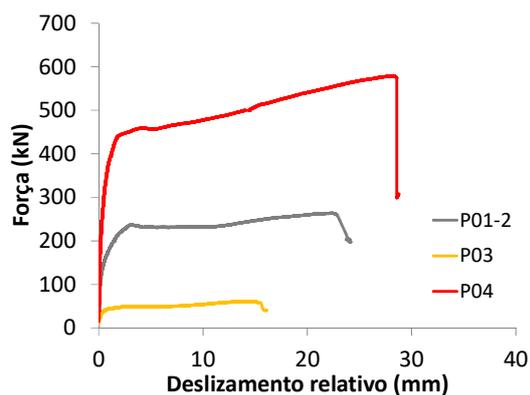
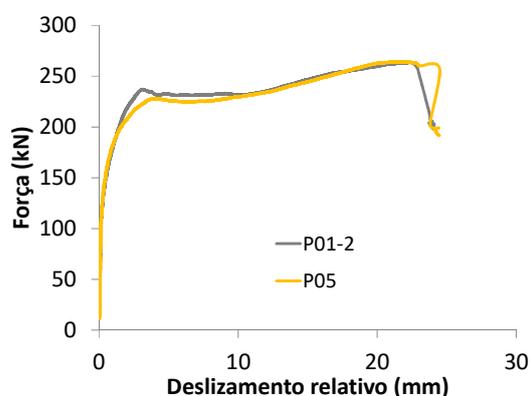
Na Figura 8.c é apresentada comparação entre P01-2 e P05. Esses dois protótipos diferem quanto a taxa de armadura confinante do bloco de concreto. Pode-se observar que para a variação de taxa de armadura realizada não houve mudança significativa no comportamento do conector. Para se observar alguma mudança de comportamento deve ser necessária uma redução mais drástica na taxa de armadura.

Na Figura 8.d, compara-se os resultados dos protótipos P01-1 e P06, os quais diferem quanto a profundidade do conector. Em P06 o bloco apresenta redução em uma de suas dimensões em relação a P01, resultando em uma menor profundidade e, portanto, menor confinamento da conexão. Nota-se em P06 uma redução na capacidade resistente e uma queda mais pronunciada na carga após o atingimento de P_y . Contudo, como ainda há confinamento, a barra passante é acionada e carga ainda volta a subir.

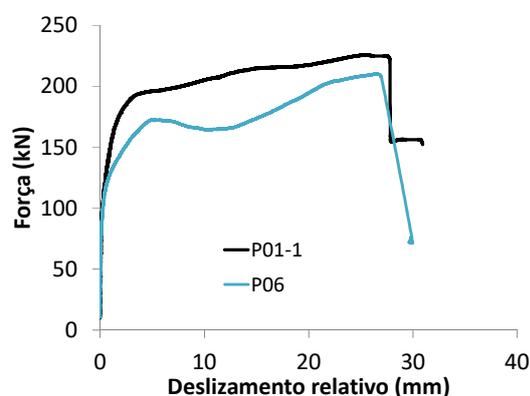
Na Figura 8.e, compara-se o resultado do protótipo P07 (tipologia 2), que não apresenta armadura confinante, com o de P06 (tipologia 1), que tem armadura confinante e apresenta demais propriedades geométricas iguais às de P07. Nota-se que esses protótipos não diferem significativamente quanto a P_y , contudo, como não há armadura confinante em P07, a curva desse modelo não volta a subir após a ruptura do concreto, pois a falha se propaga até a superfície do bloco causando destacamento do concreto. Já P06 não apresenta fissuração na superfície do bloco ao final do ensaio, assim como todos os protótipos da tipologia 1, e falha por ruptura da barra passante. Assim sendo, nota-se que a ausência de armadura confinante causa significativa redução na capacidade resistente e ductilidade da conexão.



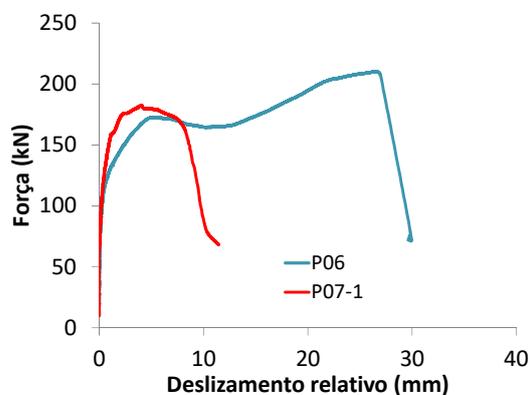
(a) Influência da barra passante

(b) Influência dos parâmetros geométricos do furo (D , t e d)

(c) Influência da taxa de armadura confinante



(d) Influência da profundidade do conector



(e) Influência da presença de armadura confinante

Figura 8. Gráficos comparativos.

5 Estudo numérico paramétrico

Construção dos modelos:

Modelos numéricos 3D de elementos finitos (MEF) foram desenvolvidos utilizando o software ABAQUS [8], visando obter simulação com um bom nível de precisão dos ensaios realizados. Os modelos, portanto, são compostos por uma chapa com furo, barra passante, bloco de concreto, e armadura do bloco, podendo essa ser armadura confinante para tipologia 1 ou armadura de costura para tipologia 2. Foi também modelada a superfície rígida que restringe o deslocamento vertical do bloco de

concreto. Na Figura 9 apresentam-se a geometria dos modelos P01 e P07 e todas as suas partes constituintes. Note que, dada a simetria dos protótipos, modelou-se apenas uma metade dos mesmos, restringindo-se deslocamentos perpendiculares ao plano de simetria.

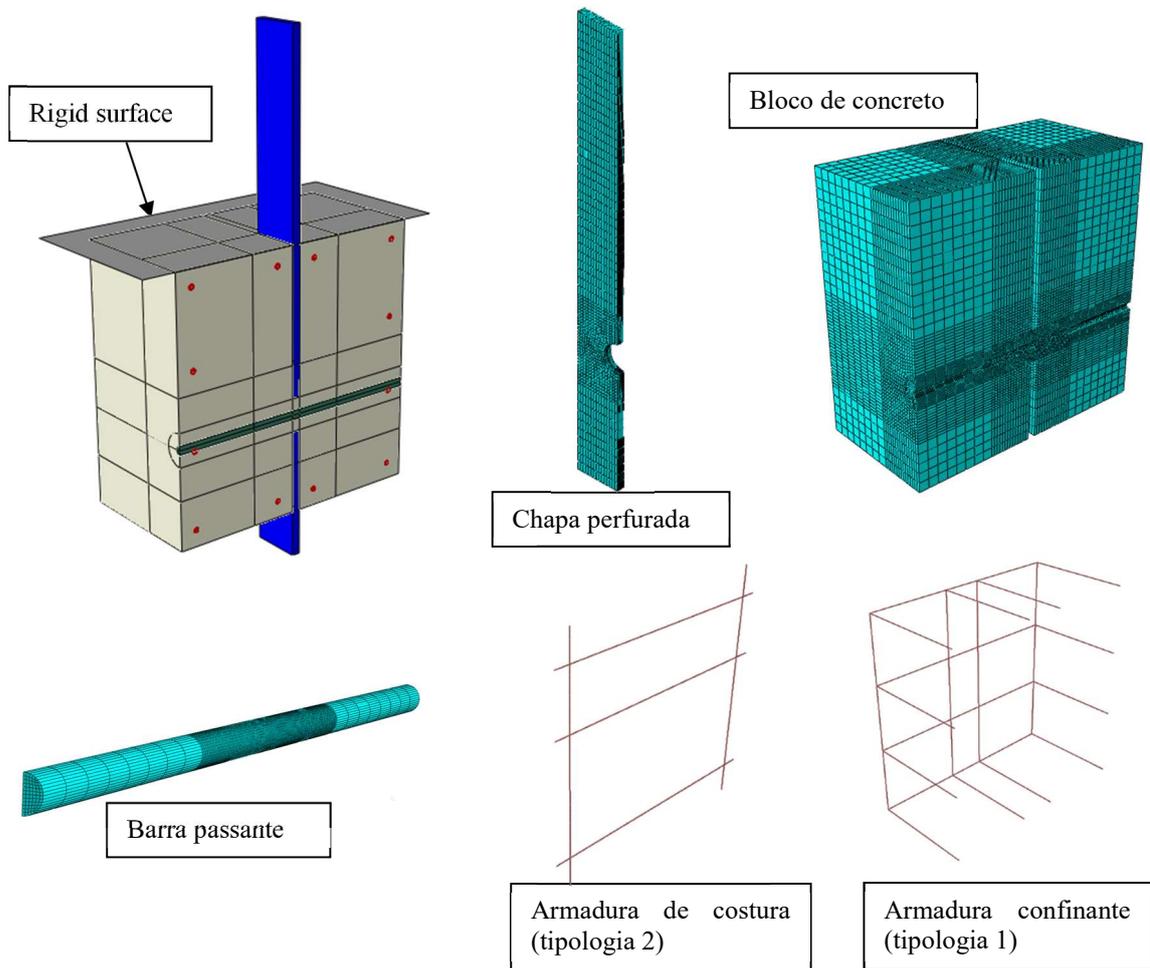


Figura 9. Modelo numérico.

A chapa de aço, a barra passante e o bloco de concreto foram modelados utilizando elementos sólidos C3D8R e a armadura do bloco foi modelada utilizando elementos unidimensionais T3D2. A superfície rígida que restringe o bloco de concreto foi definida como uma superfície indeformável utilizando a ferramenta *Rigid Surface*.

A superfície rígida foi vinculada em todos os seus graus de liberdade a um ponto de referência fixo, da mesma forma, o topo da chapa perfurada foi vinculado a um ponto de referência ao qual se aplicou um deslocamento vertical de 30 mm no sentido do arrancamento da chapa. Pares de contato foram definidos entre a superfície rígida e o topo do bloco de concreto e entre a chapa perfurada e o concreto. Atribuiu-se para esses contatos entre superfícies de aço um coeficiente de atrito de 0,1 no comportamento tangencial e definiu-se como *Hard* o comportamento normal. Um *constraint* do tipo *Tie* foi definido entre a barra passante e o concreto. Um *constraint* do tipo *Embedded Region* foi definido entre a armadura de entorno e o concreto.

O método de análise utilizado foi o *Dynamic, Explicit*, pois este possibilitou alcançar maiores níveis de deformação em relação ao método *Static General*, permitindo obter a curva força x deslizamento relativo até um nível maior de deslizamento. Para garantir que o modelo se comportasse como um problema quase-estático, definiu-se um tempo de aplicação de carga de 1500 s e aplicou-se a função de amplitude *Smooth* para aplicação do deslocamento de 30 mm. Para reduzir o tempo de processamento do modelo foi utilizado o artifício *Mass Scaling* disponibilizado pelo ABAQUS [8]. Ao final do

processamento foi verificado um nível desprezível de forças inerciais, conforme desejável.

O comportamento do concreto foi simulado utilizando o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* onde foram fornecidas curvas para o comportamento à compressão e para o comportamento à tração. Essas curvas foram definidas a partir dos resultados dos ensaios de caracterização do concreto, utilizando a formulação da norma EN 1992-1-1:2004 [9], conforme Figuras 10.a e 10.b. O comportamento dos aços do modelo foi definido a partir de curvas tensão x deformação, conforme as apresentadas nas Figuras 10.c e 10.d.

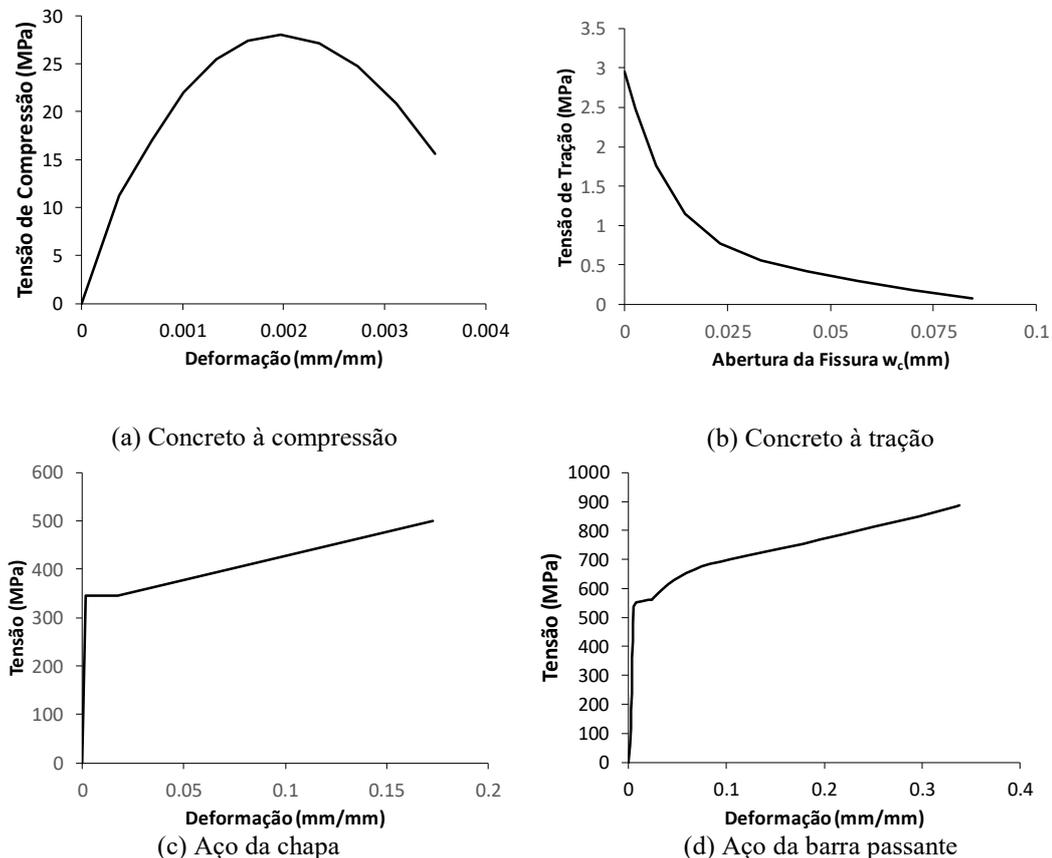


Figura 10. Definição dos materiais.

Calibração dos modelos:

Visando obter boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais, está sendo conduzido um trabalho de calibração dos modelos onde diversos parâmetros internos dos modelos constitutivos dos materiais estão sendo variados buscando a combinação de valores mais adequada para a simulação dos protótipos.

Até o presente momento, conseguiu-se uma aproximação aceitável dos resultados dos protótipos P01 e P07 utilizando o seguinte conjunto de parâmetros para o *Concrete Damaged Plasticity*: *Dilation Angle* = 30; *Eccentricity* = 0,1; $f_{b0}/f_{c0} = 1,16$; $K = 0,9$; *Viscosity Parameter* = 0,00025. Na Figura 11 são apresentadas as curvas numéricas e experimentais sobrepostas dos protótipos P01 e P07 e, na Figura 12, o padrão de fissuração do bloco de concreto obtido numericamente para o protótipo P07 comparado ao observado no ensaio experimental. O mesmo processo de calibração será estendido aos demais protótipos.

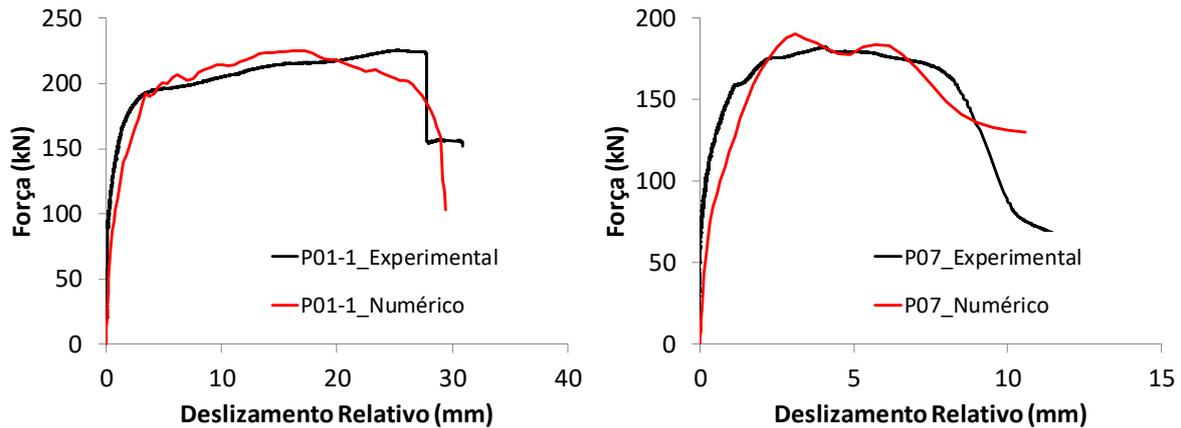


Figura 12. Comparação das curvas força x deslizamento relativo numérica e experimentais.

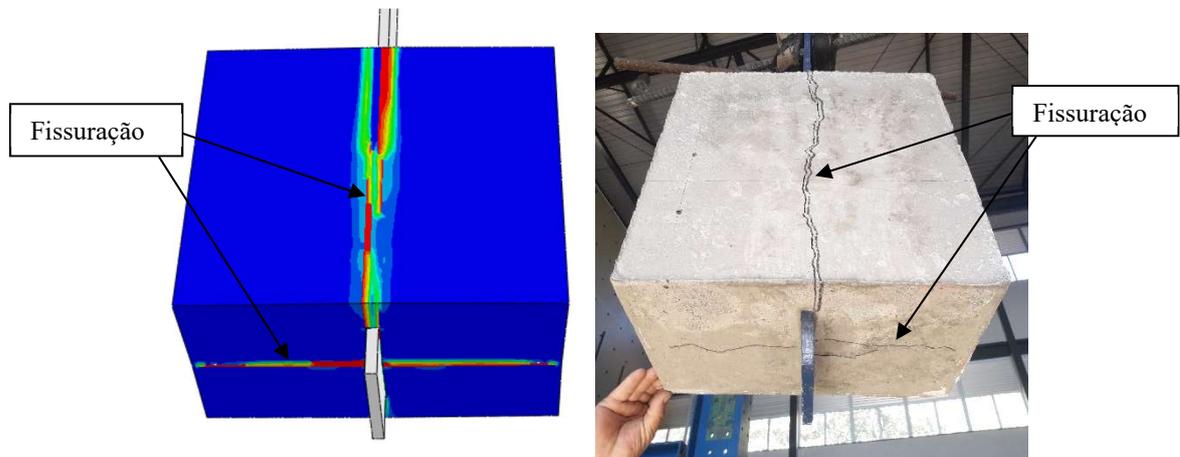


Figura 13. Comparação entre o resultado numérico e experimental quanto ao padrão de fissuração do concreto do protótipo P07.

Estudo paramétrico:

Tão logo a etapa de calibração esteja concluída, os protótipos experimentais terão suas propriedades físicas e geométricas extrapoladas através de modelos em elementos finitos dentro dos intervalos estabelecidos na Tabela 1. Esse trabalho será realizado utilizando programação na linguagem Python. A partir da massa de resultados gerada numericamente, será possível obter curvas detalhadas correlacionando as propriedades físicas e geométricas da conexão com sua capacidade resistente e ductilidade.

Na Tabela 5 são apresentados o conjunto de modelos que se pretende processar no ABAQUS [8] para que se possa isolar a influência do diâmetro do furo (D), da espessura da chapa (t) e do diâmetro da barra passante (d), visto que nos ensaios experimentais (Figura 8.b) esses parâmetros não foram variados individualmente.

Tabela 5. Programa de estudo paramétrico da geometria do furo.

	Modelo	Diâmetro do furo D	Espessura da chapa t	Diâmetro da barra d
1	P01	50	12.5	12.5
2	P01-D25	25	12.5	12.5
3	P01-D30	30	12.5	12.5
4	P01-D40	40	12.5	12.5
5	P01-D60	60	12.5	12.5
6	P01-D70	70	12.5	12.5
7	P01-D75	75	12.5	12.5
8	P01-t6	50	6	12.5
9	P01-t8	50	8	12.5
10	P01-t10	50	10	12.5
11	P01-t16	50	16	12.5
12	P01-t20	50	20	12.5
13	P01-t25	50	25	12.5
14	P01-d6	50	12.5	6
15	P01-d8	50	12.5	8
16	P01-d10	50	12.5	10
17	P01-d16	50	12.5	16
18	P01-d20	50	12.5	20
19	P03	25	7	6.3
20	P03-D30	30	7	6.3
21	P03-D40	40	7	6.3
22	P03-D50	50	7	6.3
23	P03-t8	25	8	6.3
24	P03-t10	25	10	6.3
25	P03-t12.5	25	12.5	6.3
26	P03-d8	25	7	8
27	P03-d10	25	7	10
28	P03-d12.5	25	7	12.5
29	P04	74	26	20
30	P04-D70	70	26	20
31	P04-D60	60	26	20
32	P04-D50	50	26	20
33	P04-t20	74	20	20
34	P04-t16	74	16	20
35	P04-t12.5	74	12.5	20
36	P04-d16	74	26	16
37	P04-d12.5	74	26	12.5

6 Conclusões

A partir dos resultados experimentais foi possível observar a influência do confinamento no comportamento conector. O furo confinado com barra passante apresenta um estágio de resistência secundário onde, após a ruptura localizada do concreto, a barra passante é mobilizada até sua ruptura, o que dá um acréscimo de capacidade resistente e ductilidade ao conector. Esse acréscimo não é observado no conector superficial, cuja capacidade resistente é definida pela falha localizada do concreto, que, devido à ausência de confinamento, imediatamente se espalha para a superfície, causando fissuração e destacamento do concreto.

O modelo numérico construído no ABAQUS [8], embora ainda em calibração, já foi capaz de simular com boa aproximação tanto o conector confinado quanto superficial. O que permitirá, variando a taxa de armadura confinante e profundidade do conector, propor uma relação entre as disposições geométricas do entorno da conexão e sua capacidade resistente e ductilidade. Este estudo paramétrico será de grande utilidade para proposição de um novo e mais abrangente modelo de cálculo para conectores Perfobond.

Referências

- [1] XIAO, L.; LI, X.; MA Z. J. Behavior of perforated shear connectors in steel–concrete composite joints of hybrid bridges. *Journal of Bridge Engineering*, v. 22, n. 4, 2017.
- [2] ARCELORMITTAL EUROPE. Slim Floor – An innovative concept for floors, Design Guide. Retrieved April 24, 2017, from <http://constructalia.arcelormittal.com>.
- [3] XU, F.; ZHANG, Z.; WANG, D.; HULIL, W. Application of a Perfobond Rib Shear Connector Group in a Beam–Arch Hybrid Bridge. *Structural Engineering International*, v. 25, n. 4, 2015; p.414-418.
- [4] VIANNA, J.; COSTA-NEVES, L.; VELLASCO, P.; ANDRADE, S. Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach. *Engineering Structures*, v. 30, n. 9, 2008; p.2381-2391.
- [5] PENG-ZHEN, L.; LIN-FENG, C.; YANG, L.; ZHENG-LUN, L.; HUA, S. Study on Mechanical Behavior of Negative Bending Region Based Design of Composite Bridge Deck. *International Journal Civil Engineering*, v. 16, n. 5, 2018; p.489-497.
- [6] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1994-1-1:2004: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- [7] SU, Q. T.; WANG, W.; LUAN, H. W.; YANG, G. T. Experimental research on bearing mechanism of perfobond rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 95, 2014; p.22-31.
- [8] SIMULIA CORP. Software ABAQUS 6.13, *Dassault Systèmes*, 2013.
- [9] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-1:2004: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.