



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CONEXÕES MISTAS POR CHAPAS PERFURADAS PREENCHIDAS COM CONCRETO

NUMERICAL SIMULATION OF COMPOSITE CONNECTIONS WITH PERFORATED PLATES FILLED WITH CONCRETE

Paulo Estevão C. Silvério (1); Otavio Prates Aguiar (2) (P); Rodrigo Barreto Caldas (3);
Gabriel Adilson Silva (4)

(1) Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil.

(2) M.Sc. Engenheiro Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil.

(4) Graduando - Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, Brasil.

Email para Correspondência: pcilverio@yahoo.com; (P) Apresentador

Resumo: Vários estudos estão sendo realizados sobre conectores de cisalhamento do tipo chapas com furos preenchidas com concreto. Sua aplicação é encontrada em diversas situações de projeto, como vigas e pilares mistos, decks enrijecidos, e grandes estruturas como pontes híbridas. Contudo, ainda não há um consenso sobre o comportamento dessas conexões. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo numérico para as conexões de chapas com furos preenchidos com concreto baseado em um novo tipo de ensaio de cisalhamento, proposto por Su *et al.* (2016). Este ensaio, denominado “*plug-in*”, proporciona maior simplicidade de execução, configuração mais genérica, e possibilita uma análise mais isolada do comportamento mecânico da conexão. Neste trabalho serão desenvolvidos vários modelos numéricos via elementos finitos utilizando o software *Abaqus*. Serão reproduzidas as configurações físicas e geométricas adotadas por diferentes autores que utilizaram o ensaio “*plug-in*”. Espera-se conseguir validar o modelo numérico frente aos resultados experimentais para que este possa ser utilizado em estudos futuros.

Palavras chaves: *Perfobond; Conector; push-out; mista; MEF.*

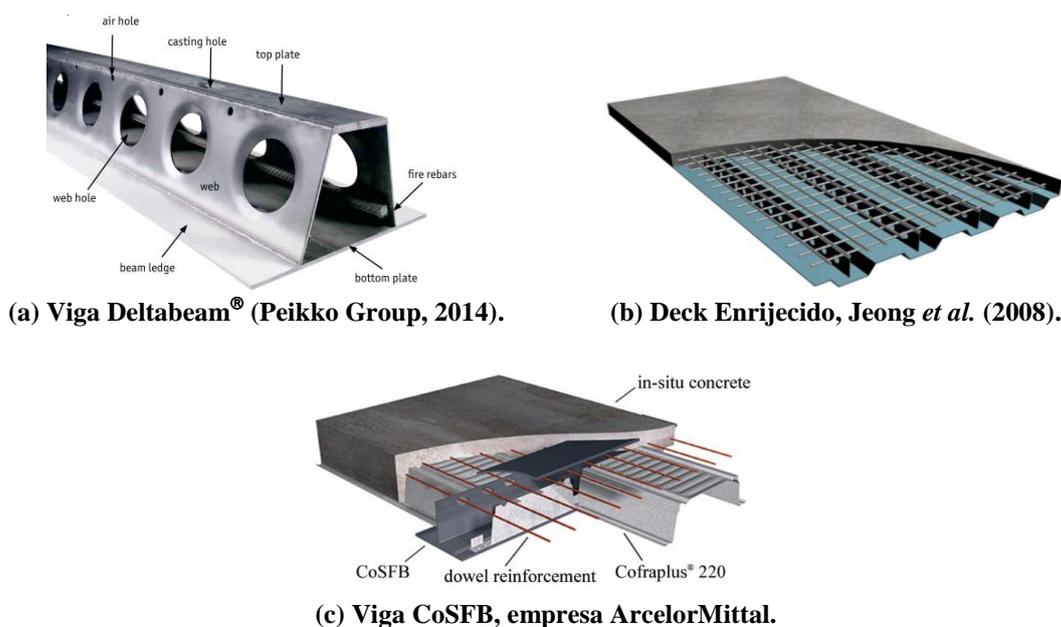
Abstract: Many studies are being done about perforated plates shear connectors filled with concrete. Its application is found in several design situations, such as composite beams and pillars, stiffened decks and big structures as hybrid bridge girders. However, there is no consensus on the behavior of these connections. The objective of this work is to develop a numerical model for these connections based on a new type of shear connection test proposed by Su *et al.* (2016). This test, denominated “*plug-in*”, provides more simplicity in the execution, more generic configuration, and enables a more isolated analysis of the mechanical behavior of the connection. In this work will be developed several numerical models via *finite elements modeling* (FEM) using the software *Abaqus*. We will reproduce the physical and geometric configurations adopted by different authors who used the “*plug-in*” test. It is hoped to be able to validate the numerical model against the experimental results so that it can be used in future studies.

Keywords: *Perfobond; Connector; push-out; Composite; FEM.*

1 INTRODUÇÃO

Em estruturas mistas de aço e concreto a conexão entre as partes é de fundamental importância para o funcionamento do sistema como um todo. São através dos conectores de cisalhamento que os esforços são transmitidos entre as partes. Vários autores recentemente apresentam estudos relacionados aos conectores de cisalhamento do tipo *perfobond*, chapas com furo preenchidas por concreto com ou sem barra transversal de reforço no furo. Essa conexão é inicialmente apresentada por Leonhardt *et al.* (1987). Atualmente, vários ensaios experimentais estão sendo desenvolvidos com o intuito de avaliar o comportamento da ligação das chapas com furos preenchidas com concreto (CFPC).

Algumas aplicações já são propostas para a utilização da conexão CFPC. Algumas dessas aplicações são as vigas *Deltabeam*, desenvolvida pela empresa Peikko, as vigas *CoSFB*, desenvolvida pela ArcelorMittal, e estudos sobre decks enrijecidos.



(a) Viga Deltabeam® (Peikko Group, 2014).

(b) Deck Enrijecido, Jeong *et al.* (2008).

(c) Viga CoSFB, empresa ArcelorMittal.

Figura 1. Exemplos de configurações desenvolvidas utilizando as chapas com furos preenchidas com concreto (CFPC).

Os estudos feitos para o desenvolvimento dessas aplicações visaram apenas às utilizações específicas propostas e não apresentam uma caracterização genérica da resistência ao cisalhamento de apenas um furo isoladamente.

Outros estudos realizados, porém, tiveram como objetivo avaliar a resistência da ligação quanto ao cisalhamento, formulando e propondo equacionamentos que caracterizam a resistência individual do furo preenchido com concreto. Entre eles destacam-se aqui o estudo de Xiao *et al.* (2016) e Nakajima *et al.* (2016).

Para avaliar o comportamento da conexão podem ser utilizadas duas configurações de ensaio, o ensaio *push-out* padrão, já comumente utilizado para outros conectores, e o *push-out* modificado, ou *plug-in* que foi proposto especificamente para esse conector.

Xiao *et al.* (2016) em seu trabalho realizou ambas as configurações de ensaio para efeito de comparação. O esquema desses ensaios é apresentado na Figura 2.

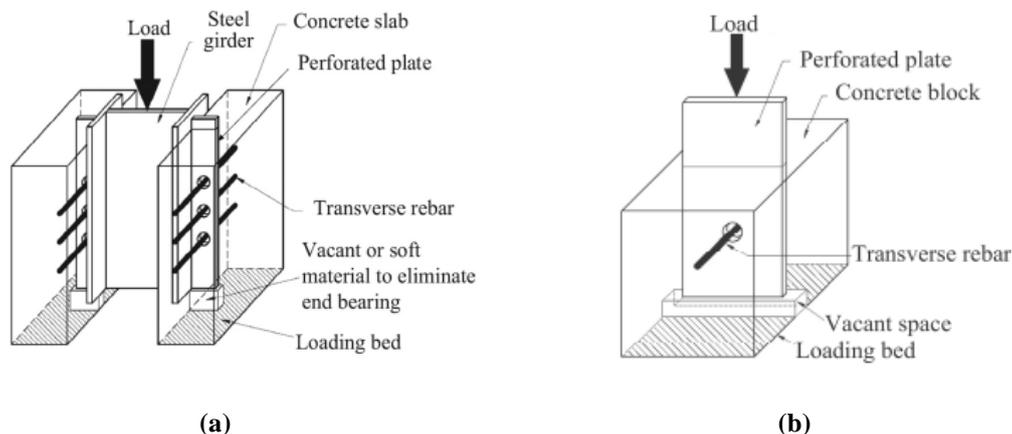


Figura 2. Arranjo dos ensaios estudados, *push-out* (a) e *push-out* modificado, ou *plug-in* (b).
 Fonte: (Xiao *et al.*, 2016).

Nota-se que no ensaio *push-out* padrão há uma excentricidade entre o centroide da carga aplicada e a região de introdução de carga nos conectores. Essa excentricidade faz surgir um momento fletor adicional na ligação. Dessa forma surge um binário resultante de reação que comprime o concreto contra o perfil na parte superior e traciona a conexão na parte inferior, fazendo surgir uma componente de arrancamento no concreto, induzindo a falha a se dar por deslocamento da superfície.

A nova metodologia de ensaio proposta, o ensaio *plug-in*, não apresenta tal excentricidade. Dessa forma, o comportamento mecânico da conexão quanto ao cisalhamento é analisado de forma isolada. Além disso, o novo ensaio proposto é mais simples de ser executado e possibilita variar a posição da conexão no interior do bloco de concreto, podendo estudá-la tanto de forma superficial quanto de forma confinada, diferentemente do ensaio *push-out* padrão que permite apenas o posicionamento superficial da conexão e, o qual para configurações de maior confinamento apresentará consequentemente uma maior excentricidade no protótipo ensaiado.

2 MODELOS EXPERIMENTAIS

2.1. Considerações iniciais

Foram desenvolvidos modelos numéricos parametrizados utilizando o software ABAQUS® (Simulia Corp., 2013) baseados na nova metodologia de ensaio proposta, *plug-in*. Para realização desse estudo numérico, foram adotados como referência os ensaios experimentais realizados por Xiao e Nakajima, os quais realizaram ensaios com conectores CFPC nesta nova configuração. Com os resultados experimentais obtidos por esses autores foi calibrado um modelo numérico parametrizado que consiga



reproduzir adequadamente a situação dos ensaios do tipo *plug-in*. Esse modelo numérico será utilizado posteriormente para simular o conector CFPC em diferentes situações de projeto.

São vários os fatores que influenciam a resistência final do conector CFPC quanto ao cisalhamento. Xiao *et al.* (2016) estudaram a influencia da espessura da chapa perfurada, a resistência à compressão do bloco de concreto, e a profundidade do conector no interior do bloco. Já Nakajima *et al.* (2016) avaliaram os parâmetros diâmetro do furo, diâmetro da barra transversal, largura e espessura da chapa perfurada.

Para esse estudo numérico inicial foram desenvolvidos 2 (dois) modelos. Um dos modelos é baseado no protótipo experimental “PT-16”, desenvolvido por Xiao, e outro baseado no protótipo experimental “D60T12R10” desenvolvido por Nakajima, chamado aqui de “NAK-01”.

2.2. Características Físico-Geométricas dos modelos

Os protótipos são constituídos pelas partes bloco de concreto, chapa com furo, barra transversal e armadura do bloco, conforme Figura 3 e 4, abaixo. As barras da armadura do bloco foram modeladas com elementos de barra (B31), os demais elementos foram modelados com elementos sólidos (C3D8R). Conforme modelos experimentais na parte inferior da chapa com furo foi feito um vazio no bloco de concreto para possibilitar que a chapa deslize verticalmente.

As propriedades geométricas dos elementos sólidos para os protótipos de referência estão relacionados abaixo na Tabela 1. As propriedades dos materiais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros geométricos dos elementos principais para os protótipos, em (mm).

Protótipo	BLOCO			CHAPA			FUROS e BARRAS					
	A	B	H	L	T	Hc	D	d	Px	Py	ex	ey
PT-16	600	400	450	300	20	520	60	16	200	200	150	150
NAK-01	500	500	450	150	12	500	60	10	250	240	75	210

Tabela 2. Principais parâmetros dos materiais, em (N/mm²).

Protótipo	BLOCO		CHAPA		BARRA	
	f_c	f_t	f_y	f_u	f_y	f_u
PT-16	52,1	3,0	345	-	335	-
NAK-01	31,1	2,8	361	439	409	548

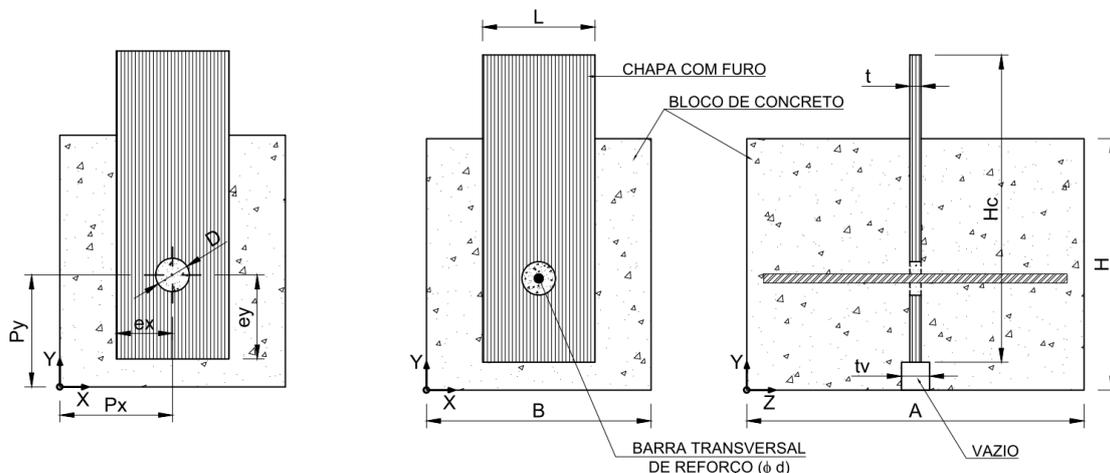


Figura 3. Elementos principais dos modelos.

A armadura do bloco é composta de estribos distribuídos na altura do bloco (chamados aqui de Estribos Y, pois são distribuídos ao longo do eixo y); 4 barras verticais, uma em cada quina do bloco; estribos distribuídos na largura do bloco (Estribos X); estribos distribuídos na profundidade do bloco (Estribos Z).

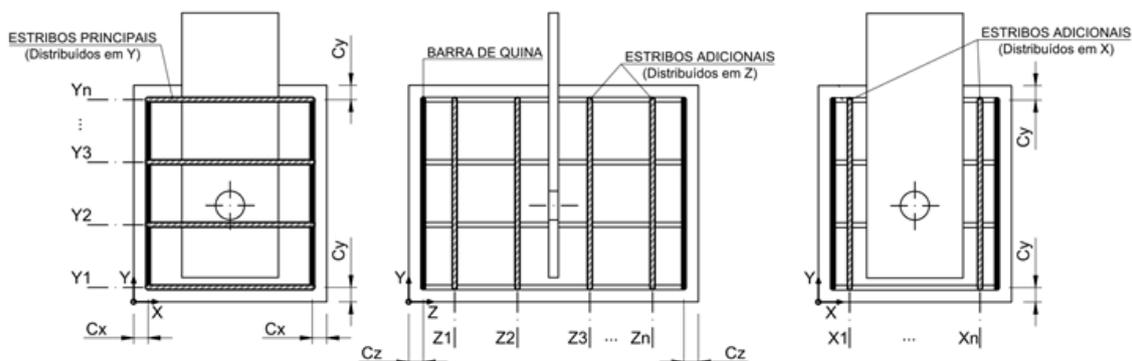


Figura 4. Armadura do bloco de concreto.

3 MODELO NUMÉRICO PARAMETRIZADO

3.1. Considerações iniciais

Nos modelos numéricos desenvolvidos os resultados foram obtidos utilizando o método *Dynamic Explicit*, que permitiu uma melhor convergência em relação aos métodos *Static*, *General* e *Dynamic Implicit*.

O modelo foi parametrizado utilizando a linguagem de programação *Python* em função dos parâmetros apresentados nas Tabelas 1 e 2.

3.2. Condições de contorno

Foram aplicadas 2 (duas) condições de contorno ao modelo. Condição de Simetria, no plano de simetria, restringindo o deslocamento U_3 , e apoio da base, aplicado à base do bloco restringindo os deslocamentos U_2 .

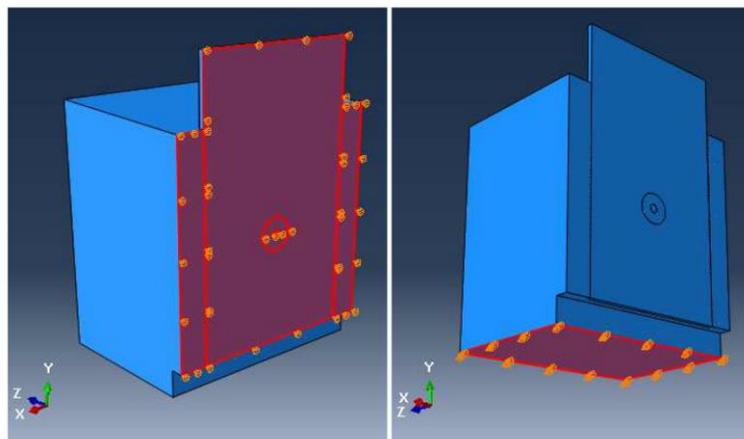


Figura 5. Condições de contorno (Modelo “PT-16”).

3.3. Carregamento

A carga do atuador foi aplicada à superfície do topo da chapa na forma de deslocamentos. Isso foi feito impondo uma limitação (*constraint*) do tipo corpo rígido (*Rigid Body*) na superfície do topo da chapa, e aplicando os deslocamentos a um ponto de referência (*Reference Point*) localizado no centroide dessa superfície. À esse *Reference Point* foi imposta outra restrição, impedindo o deslocamento em U_1 , e todas as rotações (UR_1 , UR_2 , UR_3).

Um *Step* de carga foi criado utilizando *Dynamic Explicit*. A esse *Step* foi associado uma nova condição de contorno (*Boundary Condition*), impondo deslocamentos no ponto de referência na direção vertical (U_2), adotando um deslocamento máximo de 30 mm.

3.4. Interações entre as partes

Foi adotada uma interação entre as partes do tipo contato (*contact*), com propriedades mecânicas tangencial do tipo *Penalty*, com coeficiente de atrito de 0,4, e uma condição de penetração mínima para o contato normal (“*Hard*” *Contact*).

Às barras da armadura foi imposta uma limitação (*constraint*) do tipo embutido no concreto (*embedment*). Além disso, para um trecho da barra transversal, nas regiões mais afastadas do furo foi adotado uma condição de contato do tipo *Tie*, para reproduzir a ancoragem da barra no concreto.

3.5. Modelo Constitutivo dos Materiais

Material Aço

Os modelos apresentam 3 (três) aços distintos, o aço da chapa, da barra transversal e da armadura do bloco. O modelo constitutivo utilizado para caracterizá-los foi o de Park & Paulay (1975), apresentado na Figura 6.

O módulo de elasticidade adotado para os aços em ambos os modelos foi de 200 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3, e densidade de $7,86 \times 10^{-9}$. Foram adotadas propriedades mecânicas elásticas e plásticas, utilizando três pontos para definição da região plástica.

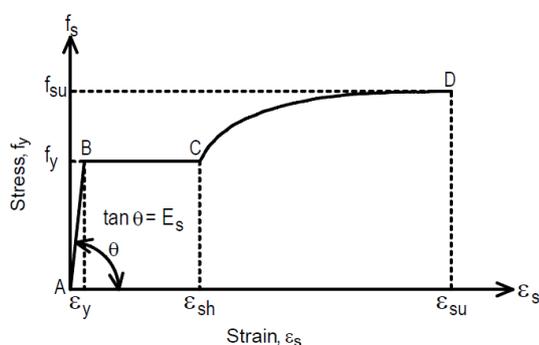


Figura 6. Caracterização do Aço.
 Fonte: (Park & Paulay, 1975).

Material Concreto

Um material elasto-plástico também foi criado para o concreto, utilizando o modelo de *Concrete Damaged Plasticity*, adotando os seguintes valores para os parâmetros conforme Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades elásticas e plásticas do concreto.

Modelo	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity Parameter
PT-16	33862,00	0,2	26	0,1	1,16	0,667	0,00025
NAK-01	29221,00	0,2	26	0,1	1,16	0,667	0,00025

Para caracterização do concreto foi adotada a curva conforme Cardoso (2018), a qual é composta por um trecho conforme norma europeia EN 1992-1-1:2004, e um trecho complementar devido ao amolecimento do concreto proposto por Pavlović *et al.* (2013), apresentada na Figura 7.

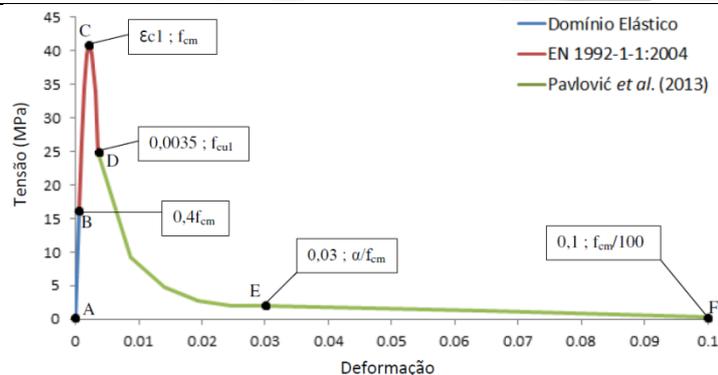


Figura 7. Caracterização do Concreto.
Fonte: (Cardoso, 2018).

Para caracterização da curva da região plástica definida pela norma europeia (trecho BC-CD) foram adotados 10 (dez) pontos. Também foram adotados 10 (dez) pontos para caracterização do trecho de amolecimento do concreto (trecho DE-EF).

3.6. Malha de Elementos Finitos

Na região do furo, onde há grandes concentrações de tensões, no pino de concreto formado no interior do furo, na barra transversal e na chapa, foi adotada uma malha mais refinada de elementos finitos, com dimensões de até 3,0 mm. À medida que se afastava da região do furo foi adotada uma malha com elementos de dimensões superiores (de 8,0mm até 20,0mm), pois são regiões que não influenciam significativamente nos resultados a serem analisados.

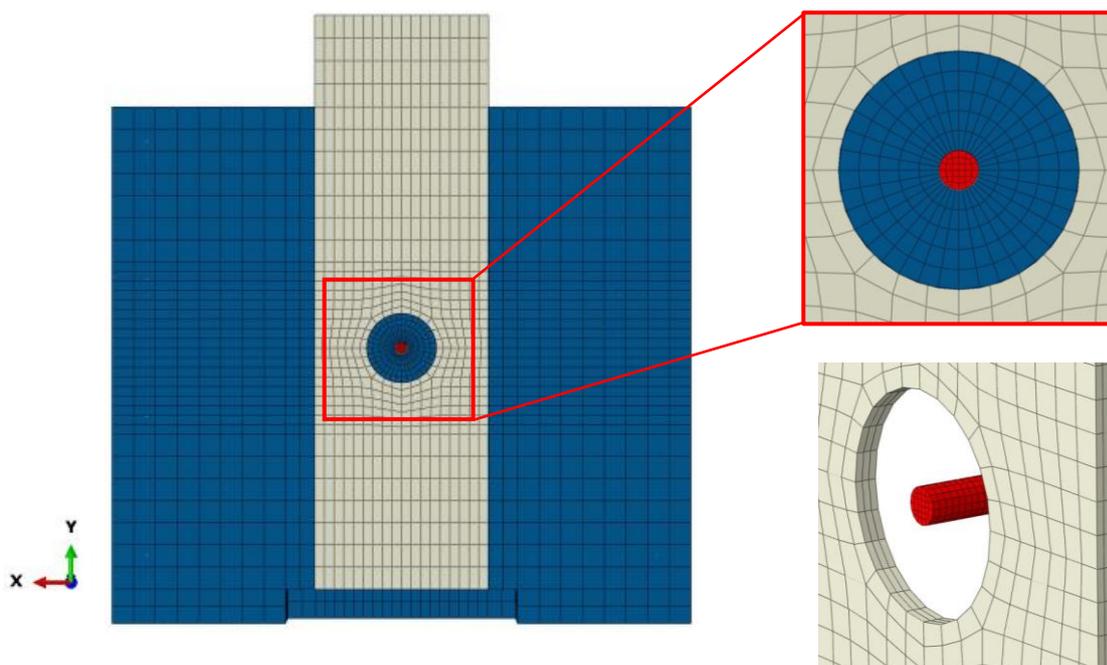


Figura 8. Malha de Elementos Finitos (Modelo “NAK-01”).

Foram criadas várias partições no modelo para possibilitar uma melhor distribuição da malha gerada pelo software, assim como uma melhor transição entre as regiões. Duas técnicas de distribuição de malha foram empregadas, *Structured*, para as regiões mais bem delineadas, e *Sweep*, para a região próxima ao furo.

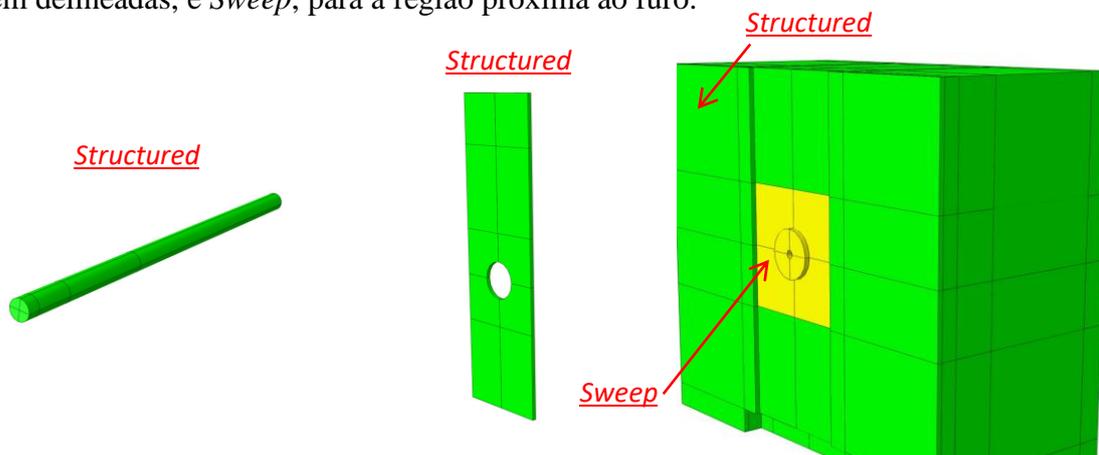


Figura 9. Técnica de Malha empregada nos elementos sólidos.

4 RESULTADOS

Curvas Força x Deslizamento relativo

Nos ensaios experimentais de referência, através de instrumentação com transdutores de deslocamento (DT's) posicionados de forma alinhada como as barras transversais, foi possível obter o deslizamento relativo das barras transversais em relação ao bloco de concreto durante o ensaio. Foi plotado, portanto, as curvas de Força em relação ao deslizamento relativo das barras, conforme apresentado na Figura 8 e 9.

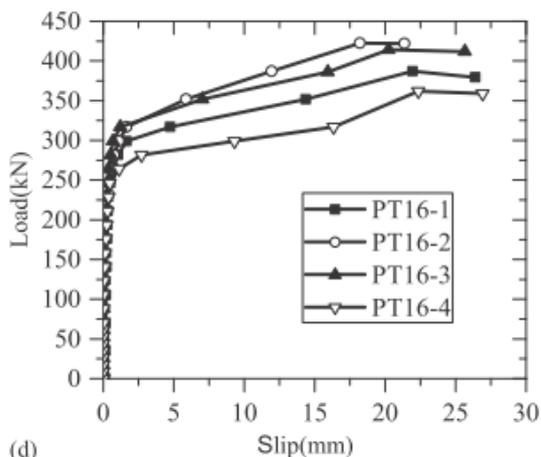


Figura 8. Força x Deslizamento Relativo. Resultado Experimental “PT-16”.
Fonte: (Xiao *et al.*, 2016).

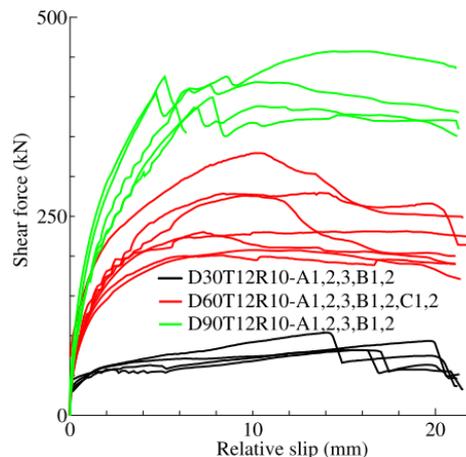


Figura 9. Força x Deslizamento Relativo. Resultado Experimental “NAK-01”.
Fonte: (Nakajima *et al.*, 2016).

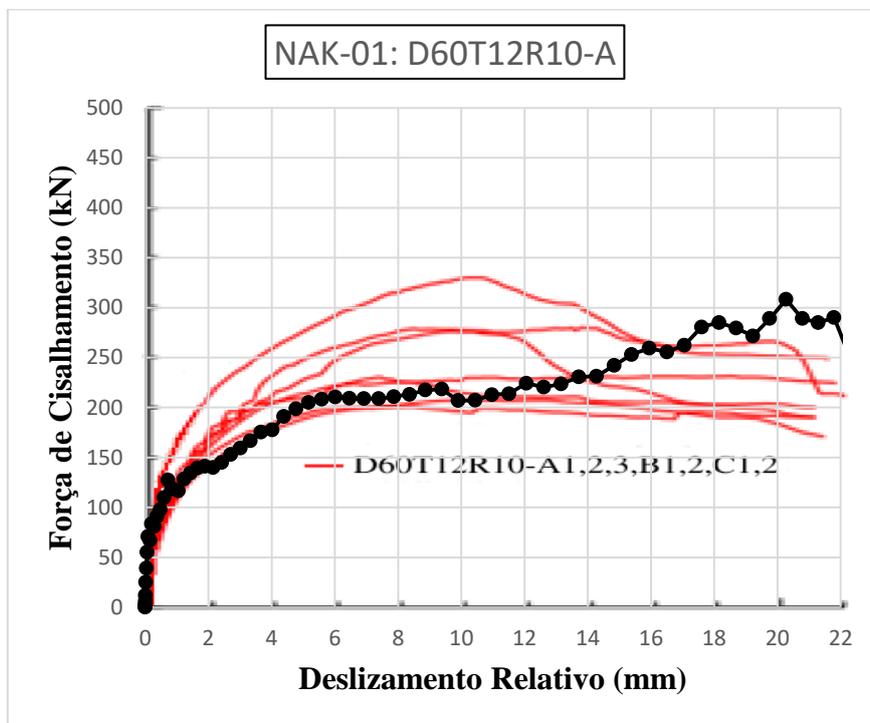


Figura 10. Força x Deslizamento Relativo. Modelo Numérico “NAK-01”.

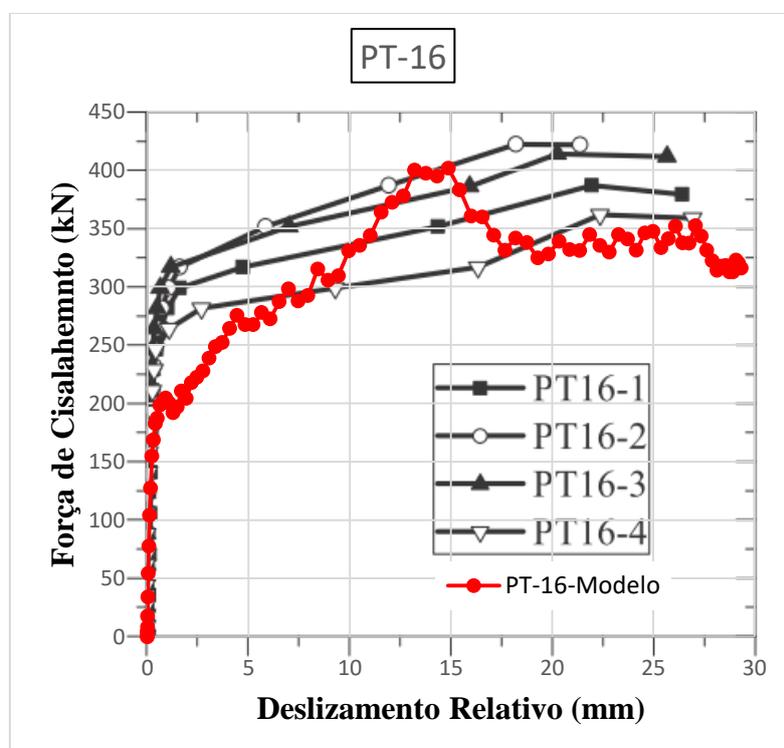


Figura 11. Força x Deslizamento Relativo. Modelo Numérico “PT-16”.

As curvas obtidas pelos modelos numéricos “NAK-01” e “PT-16” estão apresentadas na Figura 10 e 11, respectivamente.

Conforme Figura 9, para uma variação no diâmetro do furo, de 60 mm (*D60T12R10*) para 30 mm (*D30T12R10*) houve uma grande variação da força máxima obtida, de aproximadamente 350 kN para 120 kN. A fim de verificar a consistência do modelo numérico foi realizado um terceiro modelo (“NAK-02”) apenas modificando o diâmetro do furo para 30 mm, conforme protótipo *D30T12R10*. A curva obtida de Força x Deslizamento relativo é apresentada na Figura 12. O modelo apresentou um resultado consistente, ou seja, apresentando uma redução no nível e carga da mesma forma que o ensaio experimental. Porém, ainda há uma dificuldade de convergência e o processamento é interrompido, não atingindo os 22 mm de deslizamento. Alguns ajustes na malha e nos parâmetros do concreto ainda estão sendo analisados para melhorar o processamento.

Também no modelo NAK-01, indicado na Figura 10, a curva Força x Deslizamento relativo apresenta boa aproximação da curva experimental até aproximadamente 14 mm. A partir desse ponto nota-se um acréscimo de carga incompatível com o resultado experimental.

Para o modelo “PT-16” foi adotado módulo de Elasticidade do concreto conforme norma europeia EN 1992-1-1:2004, pois seu valor não é informado no artigo de referência. O modelo apresenta uma aproximação razoável da curva experimental, contudo apresentou um pico de acréscimo de carga em 15 mm de deslizamento que não é observado no ensaio experimental.

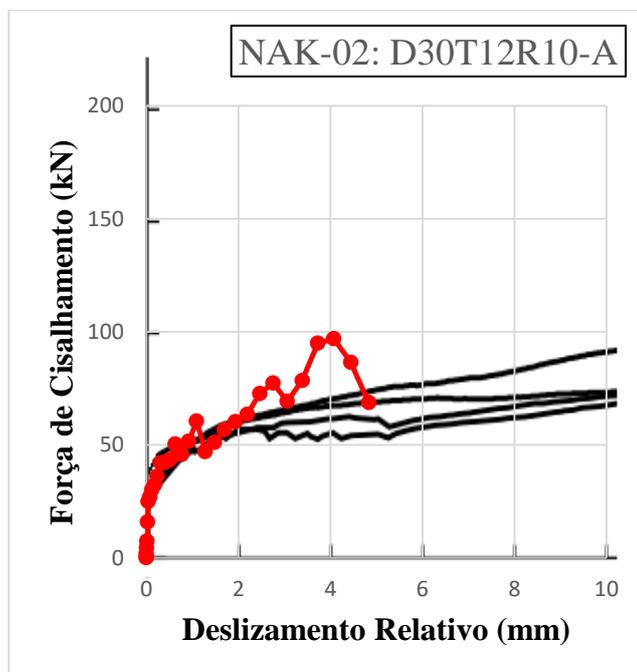


Figura 12. Força x Deslizamento Relativo. Modelo Numérico “NAK-02”.

Modo de Falha e Deformações

Nos experimentos realizados por Xiao *et al.* (2016), pela nova metodologia proposta, *plug-in*, o principal modo de falha observado foi a ruptura da barra transversal. Sua configuração deformada pode ser observada na Figura 15, abaixo.

Nota-se que ocorreu uma grande deformação por flexão da barra, e a sua ruptura se dá pela ação combinada de tração e cisalhamento. Foram observadas no bloco de concreto apenas pequenas fissuras verticais na lateral da chapa com furo. Na Figura 16 abaixo é apresentada a deformada da barra transversal obtida pelo modelo numérico, para efeito de comparação qualitativa.

Nos protótipos experimentais de Nakajima *et al.* (2016) é possível observado ao final dos ensaios dano no concreto entre a barra e a borda pressionada da chapa, além da formação de um vazio na borda oposta, conforme Figura 13 e 14, abaixo.



Figura 13. Região do furo (Protótipo D60T12R16-C2).
Fonte: (Nakajima *et al.*, 2016).

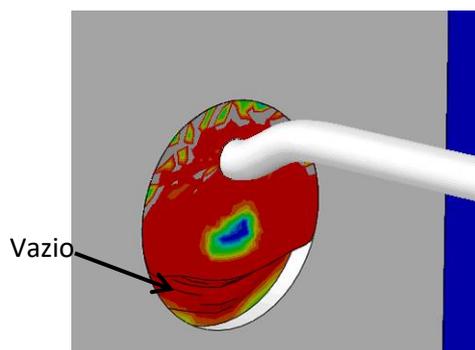


Figura 14. Região do furo. NAK-01-Modelo (D60T12R10-A).



Figura 15. Ruptura da Barra transversal. PT-16.
Fonte: (Xiao *et al.*, 2016).

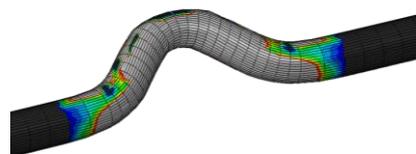


Figura 16. Deformada da Barra transversal. PT-16-Modelo.

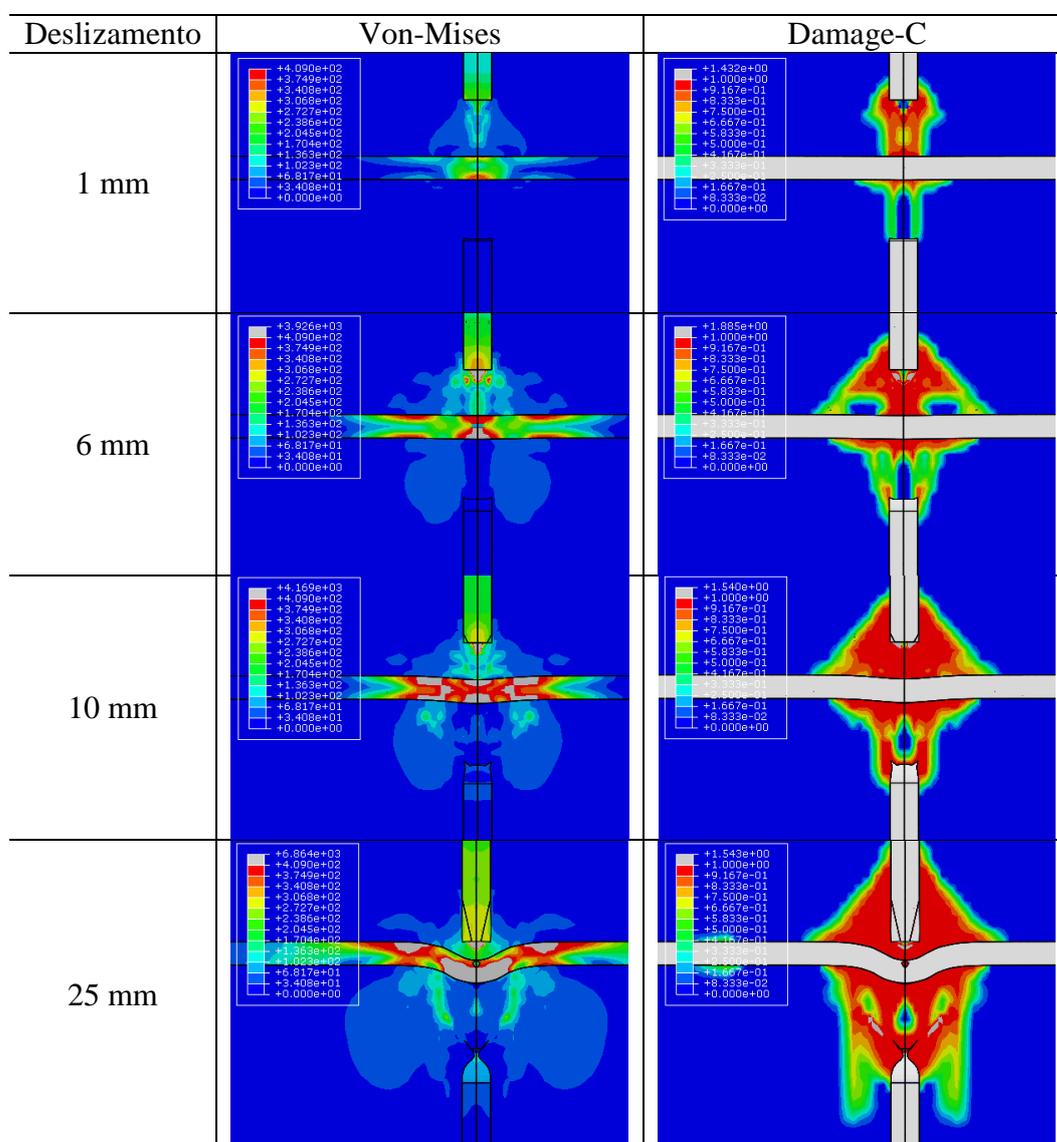
Análise das Tensões

Na Tabela 4 são apresentadas as tensões de Von-Mises e o Dano no concreto para as respectivas etapas de deslizamento indicadas. Para as tensões de Von-Mises as regiões escoadas são identificadas pelas regiões em cinza nas figuras. Já o dano no concreto é identificado pelas regiões em vermelho.

Observa-se que há um início de formação de rótula plástica na parte central da barra à 6 mm de deslizamento, acompanhado por dano no concreto entre a barra e a borda comprimida do furo. À 10 mm de deslizamento nota-se a propagação do escoamento com a formação de novas rótulas plásticas na barra. Nesse ponto a barra inicia uma deformação mais pronunciada, e passa a apresentar maior esforço de tração.

Ao final observa-se a deformação da barra e a propagação do dano no concreto tanto na parte superior quanto na parte inferior à barra.

Tabela 4. Análise das tensões na Barra e dano no Concreto (Modelo “NAK-01”).





5 CONCLUSÃO

O modelo numérico apresentou um resultado próximo dos resultados experimentais, com curvas Força x Deslizamento Relativo e deformadas similares às observadas nos trabalhos de referência. Contudo, é necessário ainda ajustar propriedades do concreto para se chegar a um modelo que possa satisfatoriamente reproduzir o comportamento da conexão. Ensaios experimentais realizados por outros autores serão também simulados para melhorar a calibração do modelo numérico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais por disponibilizar o laboratório de simulação computacional e ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ArcelorMittal Europe. Slim Floor – An innovative concept for floors, Design Guide. Disponível em: http://constructalia.arcelormittal.com/en/documents_library. Acesso em: 24/04/2017.
- Cardoso, H.S. Conectores crestbond aplicados em pilares tubulares de aço preenchidos com concreto. 2018. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- European Committee For Standardization - EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels, 2004.
- Jeong, Y.J.; Kim, H.Y.; Koo, H.B. Longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs with perfobond shear connectors, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 65, p. 81-88, 2009.
- Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.P.; Harre, W. Neues, vorteilhaftes verbundmittel für stahlverbund-tragwerke mit hoher dauerefestigkeit, *Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften*, p. 325-331, 1987.
- Nakajima, A.; Nguyen, M.H. Strain behaviour of penetrating rebar in perfobond strip and its evaluation of shear resistance, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, v. 71, n.1, p. 99-112, 2015.
- Park, R. and Paulay, T. *Reinforced Concrete Structures*. Canada: John Wiley and Sons, Inc., 1975.
- Pavlović, M.; Marković, Z.; Veljković, M.; Buđevac, D. (2013). Bolted shear connectors vs. headed studs behavior in push-out tests, *Journal of Constructional Steel Research*, v.88, p. 134-149, 2013.
- Peikko group. *Deltabeam Composite Beam, Technical Manual*, 2014.



Simulia Corp. Software ABAQUS 6.13, Dassault Systèmes, 2013.

Su, Q.; Yang, G.; Bradford, M.A. Bearing Capacity of Perfobond rib shear connectors in composite girder bridges, ASCE Journal of Bridge Engineering, v. 21, n.4, 2016.

Xiao, L.; Li, X.; Ma, Z.J. Behavior of Perforated Shear Connectors in Steel–Concrete Composite Joints of Hybrid Bridges, ASCE Journal of Bridge Engineering, v. 22, n.4, 2016.