Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72817

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO FORMADOS A FRIO

NUMERICAL SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF COLD-FORMED SHEAR CONNECTORS

Lívia Cristina Lopes Sousa [1]
Jerfson Moura Lima [1]
Gregório Sandro Vieira [2]
Jorge Bonilla [3]
Paulo Henrique Roberto Moura [3]
Eric Mateus Fernandes Bezerra [3]

Resumo: O conector de cisalhamento é um dispositivo aplicado na interface aço-concreto de elementos estruturais mistos, com a função de transferir os esforços entre o elemento de aço e o elemento de concreto, e vice-versa. O conector de cisalhamento U constituído por perfil formado a frio é um conector alternativo de baixo custo, entretanto, mais estudos para entendimento do seu comportamento mecânico precisam ser desenvolvidos. Nesse sentindo, esse trabalho tem como objetivo simular numericamente o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento em U constituído por perfil formado a frio. O modelo numérico desenvolvido foi validado com ensaios experimentais da literatura. Os resultados obtidos foram satisfatórios e condizentes com os resultados experimentais, indicando que o modelo desenvolvido é capaz de simular o comportamento de conectores de cisalhamento em U com perfil formado a frio.

Palavras-chaves: Conector de cisalhamento; Perfil formado a frio; Modelagem numérica; ABAQUS.

Abstract: *The shear connector is a device applied to the steel-concrete interface of composite structural elements, with the function of transferring efforts between the steel element and the concrete element, and vice versa. The U shear connector made up of a cold-formed profile is a low-cost alternative connector, however, more studies to understand its mechanical behavior need to be developed. In this sense, this work aims to numerically simulate the mechanical behavior of U-shaped shear connectors consisting of a cold-formed profile. The numerical model developed was validated with experimental tests from the literature. The results obtained were satisfactory and consistent with the experimental results, indicating that the developed model is capable of simulating the behavior of U-shaped shear connectors with a cold-formed profile.*

Keywords: *Shear connector; Cold formed profile; Numerical modeling; ABAQUS.*

[1] *Universidade Federal do Ceará, Campus Russas – Brasil, e-mail: liacristina2002@alu.ufc.br, jerfson.lima@ufc.br*
[2] *Universidade Federal de Uberlândia – Brasil, e-mail: gregorio.eng@gmail.com*
[3] *Universidade de Brasília – Brasil, e-mail: jbonillarocha@gmail.com, phmoura035@gmail.com, eric_mateusjes@hotmail.com*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

1 Introdução

O emprego de vigas mistas leva a soluções econômicas para o emprego em estruturas de edifícios e pontes, por exemplo, devido a ação combinada entre a viga aço e a laje de concreto, proporcionando rigidez e resistência à flexão maior do que quando considera-se o trabalho isolado dos materiais. Contudo, por se tratar de dois materiais com diferentes comportamentos, são necessários dispositivos mecânicos que sejam capazes de garantir que seus elementos trabalhem em conjunto. Tais dispositivos são denominados conectores de cisalhamento, cuja função é resistir aos esforços horizontais que se desenvolvem na interface aço-concreto, evitando a separação física desses componentes e garantindo sua ação conjunta.

O *stud bolt* é o conector de cisalhamento mais usado mundialmente. Entretanto, a necessidade de equipamentos de alto custo para a sua instalação tem feito os projetistas repensarem o seu uso. Consequentemente, nos últimos anos diversos estudos foram realizados objetivando o desenvolvimento de conectores de cisalhamento alternativos de baixo custo e de fácil instalação. O conector em U com perfil formado a frio é um exemplo desse tipo de conector de cisalhamento. Apesar de estudos anteriores (SILVA, 2006; DAVID, 2007) afirmarem a eficiência do conector U com perfil formado a frio, ainda existe a necessidade de mais pesquisas para investigar o seu comportamento mecânico.

A análise do comportamento mecânico de um conector de cisalhamento é feita a partir da execução do ensaio *push-out*, normatizado Eurocode-4 (2004). Outra possibilidade é a utilização da modelagem numérica. Inúmeros pesquisadores usaram a modelagem numérica para o estudo do comportamento de conectores de cisalhamento e obtiveram resultados satisfatórios (LIMA, *et al.* 2020, LIMA *et al*., 2022, BEZERRA *et al.,* 2018; KIM *et al.*, 2017; NGUYEN e KIM, 2009).

Contudo, esse trabalho tem como objetivo simular numericamente o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento em U constituído por perfil formado a frio. Para isso, foi usado o *software* ABAQUS (2014), baseado no Método dos Elementos Finitos.

2 Ensaios *push-out* (NETO *et al.* 2020)

Os resultados experimentais de Neto *et al*. (2020) foram usados para calibração e validação do modelo numérico. Neto *et al*. (2020) executou 3 ensaios *push-out* idênticos com conectores de cisalhamento constituído por perfil U formado a frio (U 76 mm x 36 mm x 4,75 mm). Todos os ensaios foram executados conforme as recomendações do Eurocode-4 (2004). A Fig. 1 apresenta a geometria dos modelos experimentais.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

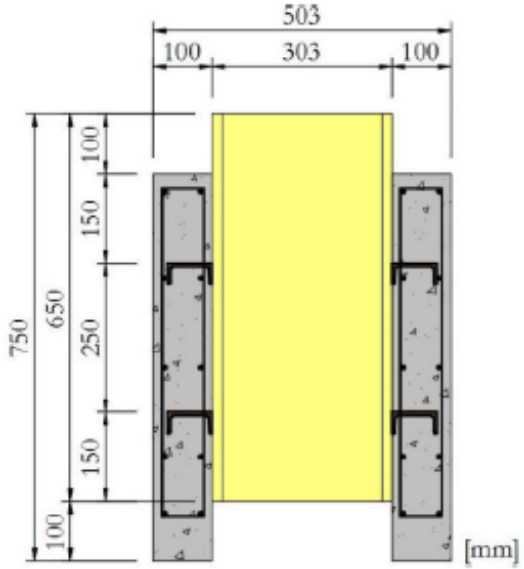


Figura 1. Geometria dos modelos push-out experimentais
Fonte: Neto *et al.* (2020).

O ensaio *push-out* consiste em apoiar as duas lajes de concreto em uma base rígida e aplicar uma carga crescente na seção transversal do perfil de aço I localizado entre as lajes, fazendo com que os conectores sejam os responsáveis por transmitir os esforços de cisalhamento longitudinal entre os componentes do modelo. O perfil de aço I adotado foi o W 310 x 21. Para mensurar a magnitude do carregamento aplicado foi utilizado uma célula de carga. O deslizamento longitudinal (*slip*) entre o perfil de aço I foi mensurado com LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). As informações de carregamento e *slip* foram coletados e armazenados durante toda a execução do ensaio pelo sistema de aquisição de dados. Para mais informações sobre os ensaios experimentais, consultar Neto *et al.* (2020).

3 Modelo de Elementos Finitos

Baseado na experiência de modelagens numéricas similares (LIMA, *et al*. 2020, LIMA *et al.,* 2022, BEZERRA *et al*., 2018; KIM *et al*., 2017; NGUYEN e KIM, 2009), o modelo de Elementos Finitos (EF) foi desenvolvido usando o *software* ABAQUS (2004). Os conectores U formado a frio, lajes de concreto, perfil de aço I e armadura da laje foram modelados separadamente, considerando as interações entre todos os componentes do modelo. A não linearidade dos materiais e contato foram consideradas.

3.1 Geometria

A geometria do modelo EF foi baseado nos modelos experimentais push-out com conector U formado a frio de Neto *et al*. (2020) (Fig. 1). Com intuito de reduzir o custo computacional, apenas um quarto do modelo foi simulado, aproveitando-se da simetria do ensaio push-out. Para isso, condições de contorno de simetria foram aplicadas.

3.2 Malha, elementos finitos e condições de contorno

A malha adotada para a o modelo EF pode ser visualizada na Fig. 2. Nota-se que a malha foi composta por 3 tipos de elementos finitos disponíveis na biblioteca do ABAQUS (2014): C3D8R (*8-node hexadecimal three-dimensional element with reduced integration*),

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

C3D4 (*4-node tetrahedral three-dimensional element*) e T3D2 (*2-node truss three-dimensional element*). Os conectores e perfil de aço, por apresentarem geometria regulares, foram modelados com elementos C3D8R. O tamanho dos elementos dos conectores foi de 5 mm. Para o perfil de aço, o elemento possui tamanho de 25 mm nas regiões afastadas dos conectores, e 5 mm nas regiões da conexão conector-perfil de aço. Ou seja, um refinamento da malha de elementos finitos foi feito nessa região, para uma adequada simulação da conexão. Para a laje foi utilizado elementos C3D4 devido a complexa geometria na região dos conectores. O tamanho dos elementos finitos que constituem a laje varia de 5 mm a 35 mm. Na região ao redor dos conectores a malha foi refinada devido os altos valores de tensões no concreto. O reforço da laje foi modelado com elementos de treliça (T3D2), com tamanho de 5 mm.

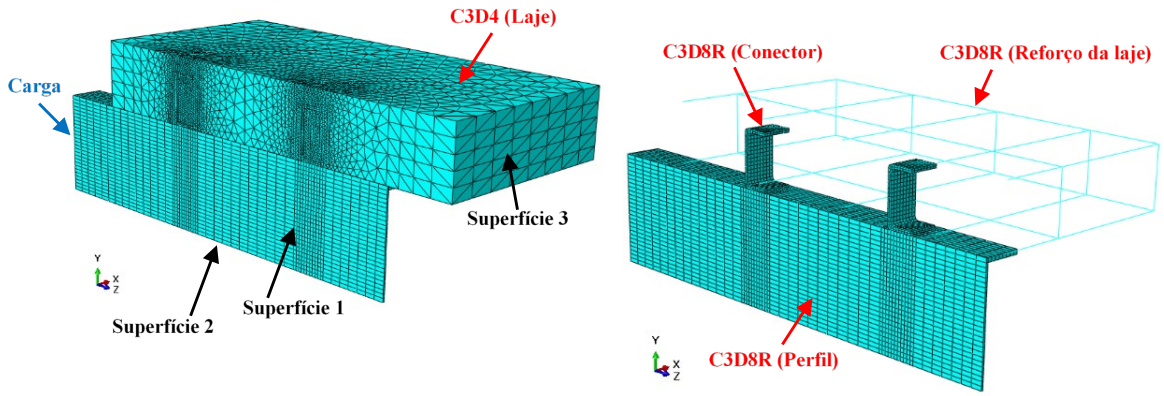


Figura 2. Malha de elementos finitos e condições de contorno.
Fonte: Próprios autores (2024)

Para prevalecer a simplificação da geometria do modelo e a simulação do ensaio *push-out* condições de contorno foram aplicadas. As condições de contorno de simetria consistiram em restringir os deslocamentos dos elementos das superfícies 1 e 2 nas direções X e Y, respectivamente. Quanto as condições de contorno do ensaio push-out, os deslocamentos da superfície 3 foram restritos na direção Z. A carga foi aplicada distribuída uniformemente na seção transversal do perfil de aço. A Fig. 2 mostra as condições de contorno consideradas no modelo.

3.3 Restrições e contatos

Para a interação entre os componentes dos modelos, restrições e contatos foram aplicados. A conexão conector-perfil de aço foi modelada com a restrição do tipo *Tie*, ou seja, não ocorre deslizamento entre as superfícies. A interface conector-concreto também foi simulada com a restrição do tipo *tie*. Apesar de ser evidente que deslizamentos entre a superfície do conector e do concreto ocorram, essa simplificação gerou resultados satisfatórios. Já na interface entre a base da laje de concreto e a mesa superior do perfil, foi utilizado uma interação de contato. Como característica da referida interação de contato, adotou-se um comportamento normal *hard* (a superfície de concreto não penetra na superfície de aço e vice-versa) e um comportamento tangencial sem atrito, de modo que os conectores de cisalhamento sejam os responsáveis em transferir os esforços longitudinais entre a laje de concreto e o perfil de aço. As barras de reforço da laje foram consideradas embutidas no concreto, com a aplicação da restrição *embedded*.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

3.4 Método de Análise

Neste estudo, o método de análise dinâmico explícito foi aplicado. Apesar de ser um método dinâmico, pode ser aplicado em análises de modelos estáticos, desde que os efeitos de inércia sejam controlados com a lenta aplicação de carga. Vários pesquisadores aplicaram este método para simulação do *push-out* e obtiveram resultados satisfatórios (BEZERRA *et al.,* 2018; KIM *et al.,* 2017; NGUYEN e KIM, 2009; QURESHI e LAM, 2012). Neste estudo, a taxa de aplicação de carga foi escolhida de modo que durante a análise os efeitos da inércia fossem mínimos.

3.5 Modelos Constitutivos

3.5.1 Concreto

Na modelagem do concreto foi utilizado o *Concrete Damage Plasticity Model* (CDPM), presente na biblioteca de materiais do ABAQUS. Este modelo constitutivo é adequado para materiais que possui distintas resistência à tração e compressão, além do mais, vincula a teoria da plasticidade com a mecânica do dano, sendo capaz de simular numericamente a degradação da rigidez e falha do concreto. Inúmeros pesquisadores que simularam numericamente o ensaio *push-out* adotaram o CDPM como modelo constitutivo para o concreto (LIMA *et al.,* 2020; LIMA *et al*., 2022; BEZERRA *et al*., 2018; KIM *et al.,* 2017; NGUYEN e KIM, 2009; QURESHI e LAM, 2012). Para utilização deste modelo na simulação do comportamento do concreto, o software exige como dados de entrada os parâmetros plásticos, as curvas tensão x deformação uniaxiais de compressão e tração do concreto. Para mais informações dos dados de entrada do CDPM, consultar Lima *et al.* (2020) e Lima *et al*. (2022). A Tabela 1 é apresenta as propriedades do concreto consideradas no modelo FE, provenientes dos ensaios de caracterização de Neto et al. (2020)

Tabela 1 - Propriedades do Concreto

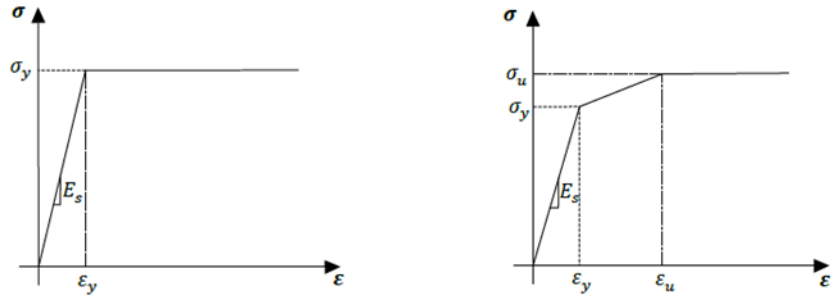
Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
33,87	3,17	33,40

Fonte: Próprios autores (2024)

3.5.2 Aço

Neste estudo, um modelo constitutivo elástico-plástico foi utilizado para simular o conector U formado a frio, perfil de aço e reforço da laje. Este modelo constitutivo está presente na biblioteca de materiais do ABAQUS com a denominação PLASTIC. O modelo PLASTIC adota o critério de escoamento de *Von Mises*, com regra de fluxo associativa, ideal para a modelagem de materiais dúcteis como o aço. O comportamento uniaxial implementado no modelo, consistiu da relação tensão-deformação bi-linear (Fig. 3a) para o perfil de aço e armadura da laje, e devido a maior importância no modelo, a relação tri-linear (Fig. 3b) foi utilizada para o conector U formado a frio. A Tabela 2 é apresenta as propriedades do aço consideradas no modelo FE, provenientes dos ensaios de caracterização de Neto *et al.* (2020).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817



(a) Bi-linear (b) Tri-linear

Figura 3. Comportamento uniaxial para o aço.
Fonte: Próprios autores (2024)

Tabela 2 - Propriedades do aço

Componente	*Tensão de escoamento – fy (MPa)*	*Tensão última – fu (MPa)*	*Deformação última (%)*
Conector U formado a frio	235	420	30
Perfil	411	528	30

Fonte: Próprios autores (2024)

4 Resultados Numéricos

Com o modelo MEF desenvolvido e simulações numéricas processadas, os seguintes resultados numéricos foram extraídos: curvas carga x deslizamento, carga última, distribuição de tensões e modos de ruptura dos conectores U formado a frio. Com o intuído de verificar a eficiência do modelo MEF desenvolvido, os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais de Neto *et al*. (2020).

A Fig. 4 mostra as curvas carga por conector x deslizamento obtidas pelos ensaios *push-out* de Neto *et al*. (2020) (CD21, CD22 e CD23) e pelo modelo MEF desenvolvido nesse estudo. Pode-se observar uma boa correspondência entre as curvas experimentais e a curva numérica, tanto para baixos níveis de carregamento quanto para os níveis de carga de ruptura. A Tabela 3 apresenta detalhadamente as cargas últimas dos conectores U formado a frio obtidas pelos push-out experimentais (P_{exp}) e pela análise de elementos finitos (P_{MEF}). A maior diferença entre os resultados experimentais e numéricos foi de 5,68%. Esses resultados evidenciam a eficiência do modelo de elementos finitos proposto em simular a capacidade resistente dos conectores U formado a frio

Tabela 3 - Cargas últimas dos conectores U formado a frio

Modelo	P_{exp} (kN)	P_{MEF} (kN)	P_{exp}/P_{MEF}
CD21	87,60	87,57	1,000
CD22	82,60		0,943

Fonte: Próprios autores (2024)

.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

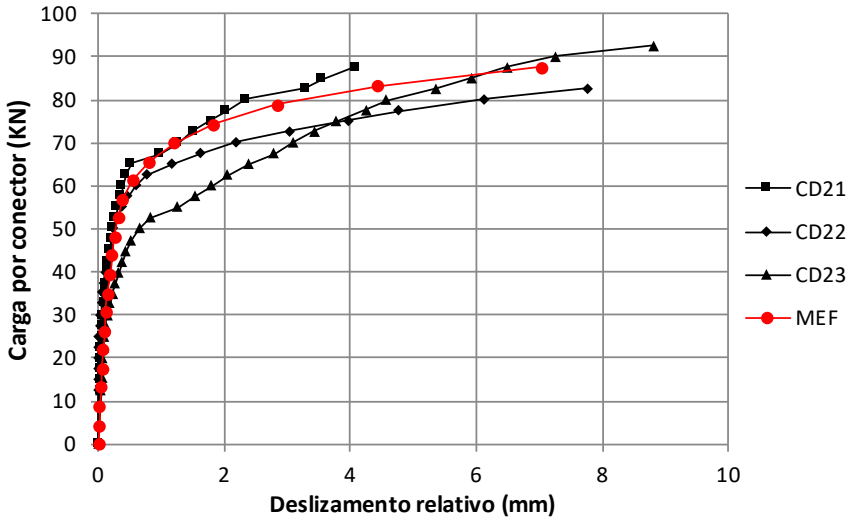


Figura 4. Curvas carga por conector x deslizamento relativo.
Fonte: Próprios autores (2024)

A Fig. 5 apresenta a distribuição das tensões de Von Misses nos conectores formado a frio no instante da carga última do modelo. Os resultados indicam que o conector formado a frio sofre ruptura na sua base proveniente do escoamento do aço, ou seja, as tensões são superiores a tensão de escoamento (f_y = 235 MPa). Além da concentração de tensões na base do conector, observa-se também o escoamento do aço na região de interseção entre a alma e a mesa do conector

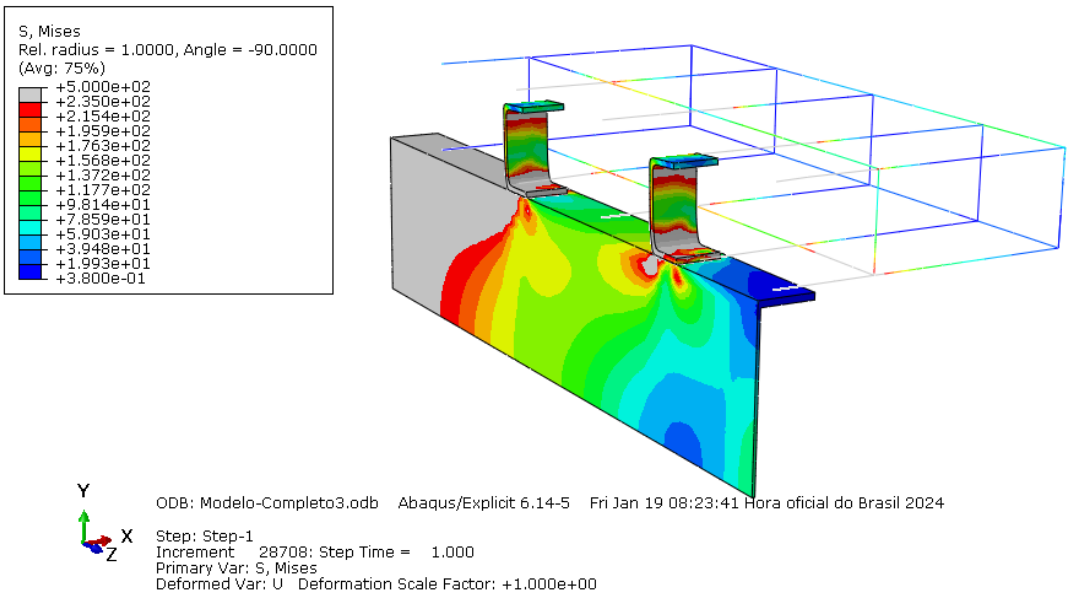


Figura 5. Distribuição das tensões de Von Misses nos conectores formado a frio no instante da carga última do modelo
Fonte: Próprios autores (2024)

Na Fig. 6 é apresentado a distribuição de tensão na laje no instante de carga última do modelo. Na região da laje próxima a base dos conectores o concreto sofre esmagamento, pois os níveis de tensão são superiores a resistência à compressão do concreto. Também é observado um esmagamento do concreto na região próxima ao canto superior do conector. Com esses

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

resultados, pode-se afirmar que a ruptura do modelo push-out com conectores em U formado a frio analisado sofreu ruptura pela associação do escoamento do conector e esmagamento do concreto.

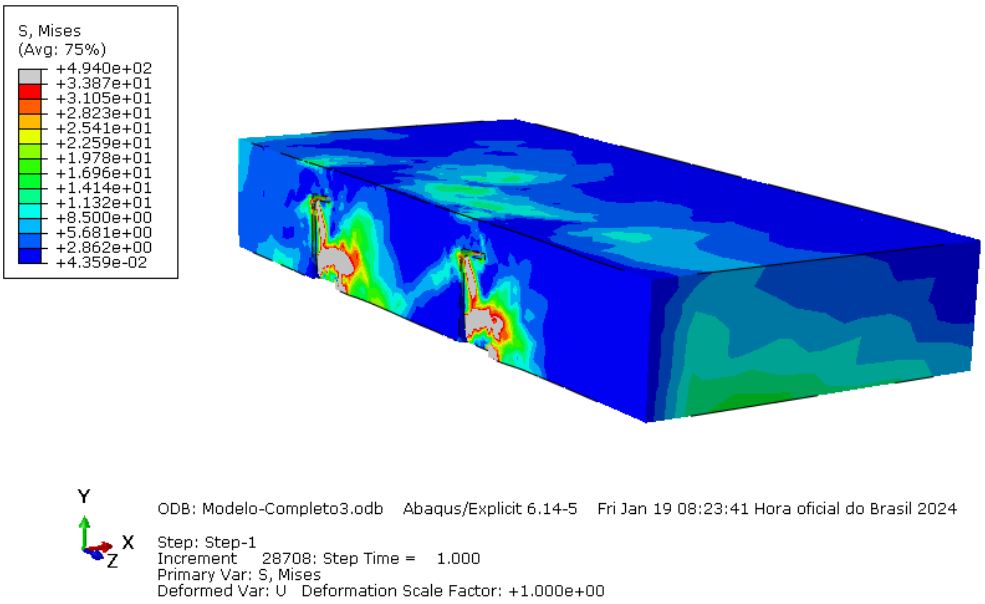


Figura 6. Distribuição de tensão na laje no instante de carga última do modelo
Fonte: Próprios autores (2024)

4 Conclusões

Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo numérico *push-out* para simular o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento U constituído por perfil formado a frio. A não-linearidade dos materiais (aço e concreto) e de contato foram consideradas. O modelo desenvolvido foi validado com os resultados experimentais de Neto et al. (2020). Os resultados numéricos obtidos (carga última e curva carga x deslizamento) foram condizentes com os resultados experimentais de Neto et al. (2020), confirmando a eficiência do modelo. Além disso, com a análise de distribuição de tensões nos conectores e na laje foi verificado que o modo de ruptura do modelo ocorreu pela associação do escoamento do conector e esmagamento do concreto na região próxima a base dos conectores. Contudo, o modelo proposto nessa pesquisa pode ser aplicado em futuros estudos para avaliar a influência de parâmetros inerentes a conexão aço-concreto de elementos mistos no comportamento do conector U com perfil formando a frio.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para esta pesquisa.

Referências

ABAQUS, **User's Manual**, Version 6.14-4, Dessault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2014.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/ revtecnol.v33i1.72817

BEZERRA, L. M.; BARBOSA, W. C. S.; BONILLA, J.; CAVALCANTE, O. R. O. Truss-type shear connector for composite steel-concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 757–767, 2018.

DAVID, D. L. (2007). **Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas.** Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

European Committee for Standardization**. Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings**. Eurocode 2004;4.

KIM, S. H.; PARK, S.; KIM, K. S.; JUNG, C. Y. Generalized formulation for shear resistance on Y-type perfobond rib shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 245–260, 2017.

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; BARBOSA, W. C. S. Study of the behavior and resistance of right-angle truss shear connector for composite steel concrete beams. **Enginnering Structures**, v. 235, p. 113778, 2022.

LIMA, J. M.; BEZERRA, L. M.; BONILLA, J.; SILVA, R. S. Y. R. C.; BARBOSA, W. C. S. Behavior and resistance of truss-type shear connector for composite steel-concrete beams. **Steel and Composite Structures**, v. 36, n. 5, p. 569–586, 2020.

NETO, J., G., R.; VIEIRA, G. S.; ZOCCOLI, R. O. Experimental analysis of the structural behavior of different types of shear connectors in steel-concrete composite beams. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 13, n. 6, e13610, 2020.

NGUYEN, H. T.; KIM, S. E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shear connectors. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, n. 10–11, p. 1909–1920, 2009.

QURESHI, J.; LAM, D. Behaviour of Headed Shear Stud in Composite Beams with Profiled Metal Decking. **Advances in Structural Engineering**, v. 15, n. 9, p. 1547–1558, 2012.

SILVA, P. H. M. (2006). **Conector de cisalhamento em perfil formado a frio: Análise via modelagem computacional**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Goiás, Goiânia, 2006.