

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**ESTUDO NUMÉRICO DE CONECTORES DE CISALHAMENTO *MODIFIED-CLOTHOID-SHAPED*  
APLICADO EM PILARES MISTOS PREENCHIDOS COM CONCRETO**

Ana Paula Moura<sup>1</sup>  
Lucas Ribeiro dos Santos<sup>2</sup>  
Hermes Carvalho<sup>2</sup>  
Rodrigo Barreto Caldas<sup>2</sup>  
Ariany Cardoso Pereira<sup>3</sup>

**Resumo**

O presente trabalho apresenta um estudo numérico para simular o comportamento do conector *Modified-Clothoid-Shaped* (MCL) utilizado como dispositivo de transferência de carga em pilares mistos preenchidos com concreto de seções circulares. As análises numéricas foram conduzidas por meio do software ABAQUS e calibradas com resultados experimentais presentes na literatura buscando simular o comportamento de conectores MCL aplicados a PMPC com tubos de aço esbeltos. Tal investigação permitiu ir além do que preconiza a norma brasileira, que limita às seções dos pilares mistos, em compactas. Observou-se que o conector MCL é um dispositivo com bom desempenho para transferência de carga em pilares mistos preenchidos por concreto e o modelo numérico apresentado pode ser utilizado para estudo e projeto dos dispositivos supracitados.

**Palavras-chave:** *Composite Dowels; Modified-Clothoid-Shaped; Conectores de Cisalhamento, Pilares Mistos Preenchidos com Concreto.*

**NUMERICAL STUDY OF MODIFIED-CLOTHOID-SHAPED SHEAR CONNECTORS APPLIED IN  
MIXED PILLARS FILLED WITH CONCRETE**

**Abstract**

The present work presents a numerical study to simulate the behavior of the Modified-Clothoid-Shaped (MCL) connector used as a load transfer device in composite columns filled with concrete with circular sections. Numerical analyzes were conducted using the ABAQUS software and calibrated with experimental results found in the literature, seeking to simulate the behavior of MCL connectors applied to PMPC with slender steel tubes. This investigation made it possible to go beyond what the Brazilian standard recommends, which limits composite column sections to compact ones. It was observed that the MCL connector is a device with good performance for load transfer in composite columns filled with concrete and the presented numerical model can be used for the study and design of the aforementioned devices.

**Keywords:** *Composite Dowels; Modified-Clothoid-Shaped; Shear Connectors, Mixed Pillars Filled with Concrete.*



<sup>1</sup> Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Pós-graduada em Engenharia de Estruturas e em Docência no Ensino Superior, Universidade Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, Teófilo Otoni, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Doutorado em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Professor, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Doutoranda, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas de aço e concreto, como os pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC), são amplamente utilizadas na construção de pontes e edifícios. Esses pilares apresentam várias vantagens, incluindo maior capacidade de carga sem aumento da seção transversal, devido ao confinamento do concreto pelo tubo de aço. Além disso, eles oferecem maior ductilidade, rigidez e menor peso próprio, resultando em menor deformação e vibração levando a melhor desempenho em carregamentos sísmicos. Comparados aos pilares de aço, eles são menos suscetíveis a instabilidades, devido à restrição do núcleo de concreto. Em comparação com pilares de concreto, eles dispensam o uso de formas durante a concretagem [1]-[6]. Embora apresente vantagens, a utilização dos pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC) no Brasil é limitada em comparação a outras soluções estruturais já consolidadas, como estruturas de aço, concreto armado e vigas e lajes mistas de aço e concreto. A viabilidade e competitividade do uso de PMPC estão relacionadas à interação entre o tubo de aço e o núcleo de concreto, bem como à dificuldade de conexão com vigas. A ligação entre os materiais nos pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC) é crucial para garantir o comportamento conjunto dos dois materiais. Sua função é evitar a separação dos materiais, transferir esforços de cisalhamento e limitar o deslizamento relativo. Pode ser feita por aderência natural ou conectores de cisalhamento, sendo que o aumento do deslizamento relativo na interface dos materiais pode romper a aderência, tornando necessário utilizar mecanismos de transferência de carga.

Em virtude da grande influência que a esbelteza local da seção transversal composta ( $\lambda$ ) exerce sobre o comportamento dos PMPC's a norma americana AISC [7] classifica-os em esbeltos, semicompactos ou compactos, sendo  $\lambda$  igual a razão entre o diâmetro (ou lado, para seções retangulares) e a espessura do tubo. No Brasil, o dimensionamento das estruturas mistas é regulado pela norma ABNT NBR 8800:2008 [8], complementada pela ABNT NBR 16239:2013[9], que é específica para o projeto de edificações com perfis tubulares. Os dispositivos de cisalhamento cujo comportamento já foi amplamente estudado são os conectores *stud bolts* e aparafusados [10]-[15]. O Eurocode [16] recomenda o uso de chapa *single plate* com extensão para dentro do núcleo de concreto, permitindo a transferência da força de cisalhamento do perfil de aço para o núcleo de concreto na região de ligação (figura 1a) com mecanismo de transferência via contato direto da região frontal da chapa de ligação. Geralmente, os conectores são soldados ao elemento de aço antes da concretagem e, após a concretagem, o conector é envolto pelo concreto. No caso de ligações com conectores em PMPC, a seção transversal fechada dificulta a montagem interna dos conectores de cisalhamento, exigindo a criação de uma abertura nas paredes do tubo para soldagem das chapas.

Os *Composite Dowels* são uma variação dos conectores *single plate* cuja chapa de aço interna ao tubo possui dentes de aço e concreto chamados *de dowels*. Esses *dowels* são alternados ao longo do comprimento do conector, permitindo a interação entre as aberturas por tensões de contato. O uso está consolidado para vigas mistas, mas a aplicação pra pilares mistos é recente.

O mecanismo de conexão viga-pilar via chapa prolongada com *composite dowels* vem sendo estudado por pesquisadores da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Cardoso [17] realizou 20 ensaios de cisalhamento em PMPC de seções compactas circulares e quadradas empregando conectores Crestbond e *stud bolt*. Em sequência, Pereira [18] e Santos [19] ensaiaram 10 protótipos PMPC com seções esbeltas circulares com conectores Crestbond (CR), *Puzzle* (PZ) e *Modified-Clothoid-Shaped* (MCL). Tais estudos comprovaram a eficiência dos conectores *Composite Dowels* aplicados em PMPC. Esses conectores proporcionam uma transferência de força mais dúctil e resistente devido a presença dos *dowels* de concreto e de aço, bem como a possibilidade de encaixar armadura reforço dentro dos *dowels*

de concreto. Na figura 1b e 1c é ilustrado o uso da *single plate* em combinação com os conectores Crestbond e MCL, respectivamente.

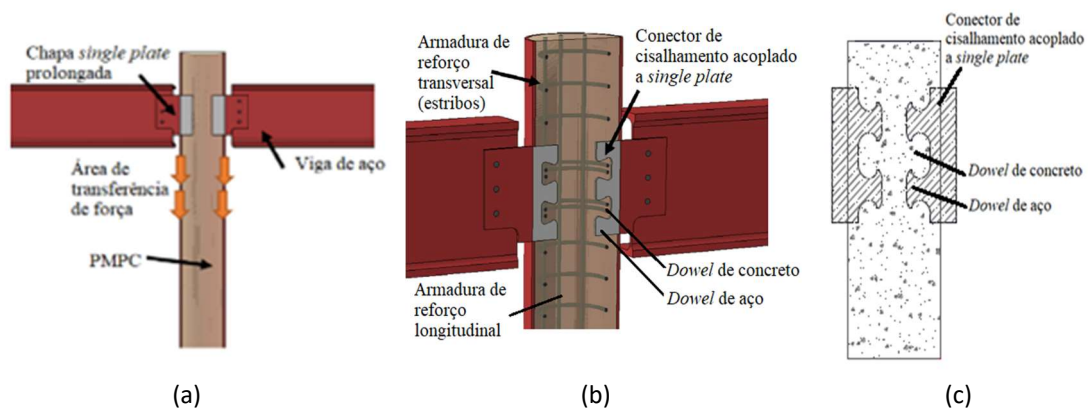


Figura 1: Região de ligação em PMPC: (a) *single plate* prolongada e (b) *single plate* acoplada a conector Crestbond com armadura de reforço (c) *single plate* acoplada a conector MCL. Cardoso *et al.* [18] e Santos [17].

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento do conector *Composite Dowel* com geometria *Modified-Clothoid-Shaped* (MCL) em pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC) de seção transversal circular. A análise será realizada por meio de modelos numéricos validados com os modelos com resultados experimentais de Santos [19]. O estudo busca contribuir para o conhecimento sobre o uso do conector MCL como dispositivo de transferência de forças em pilares mistos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção descreve-se a abordagem adotada para realizar uma análise numérica conduzida utilizando um software ABAQUS com base em modelos de elementos finitos e validada com estudo experimental realizado por Santos [19] sobre conectores MCL aplicados em PMPC. A comparação entre os resultados experimentais e numéricos permitiu validar o modelo utilizado na análise e verificar o comportamento dos conectores MCL.

### 2.1 Programa experimental de Santos [17]

No ensaio realizado por Santos [19] foram utilizados os seguintes materiais: aço para confecção do tubo e do conector de cisalhamento e concreto para preenchimento dos pilares mistos. O tubo de aço foi fabricado com aço SAE J403 1010, com resistência ao escoamento de 350,59 MPa, seção transversal circular de 230x1,50mm, índice de esbelte de 173 e altura de 750mm. O conector de cisalhamento foi fabricado a partir do corte de chapas de aço ASTM A1018, com resistência ao escoamento de 290,09 MPa, espessura nominal de 12,5mm e 2 dowels de aço. O concreto utilizado apresenta resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) igual a 40,97 MPa. Os ensaios foram realizados sem a presença de armaduras longitudinais e transversais e dois ensaios idênticos foram executados para fins de contraprova (modelos G1 e G2).

O método para execução do ensaio segue as diretrizes da norma europeia EN 1994-1-1:2004 para o ensaio de cisalhamento direto (*push-out*) com sistema de montagem adaptado para melhor coerência com os objetivos da pesquisa apresentado na figura 2a e 2b. Esse tipo de abordagem é usual na literatura, conforme demonstrado em estudos anteriores de Xavier *et al.*

[12], Santos *et al.* [14] e Cardoso *et al.* [20]. O ensaio consiste em duas fases cíclica e monotônica, sendo os deslocamentos são medidos a cada incremento de carga.

O sistema de montagem adotado envolveu a aplicação de carga no núcleo de concreto por meio de um atuador de carga com capacidade máxima de 1500 kN. Os conectores foram conectados a duas chapas verticais e, para evitar o movimento horizontal dessas chapas, foram instalados tirantes presos a cantoneiras. A fim de permitir o deslocamento do tubo de aço em relação ao concreto e minimizar a influência da aderência natural e do atrito entre os materiais nos resultados, foi aplicada cera e desmoldante na parte interna dos perfis tubulares. A instrumentação para medição do deslocamento vertical foi realizada usando os tradutores de deslocamento (DT) DT01 a DT04 (figura 2c) e o deslocamento final foi obtido como a média de dois DT's por conexão. Para a medição do deslocamento horizontal durante a fase de carregamento, foram utilizados DT05 e DT06 (figura 2d).

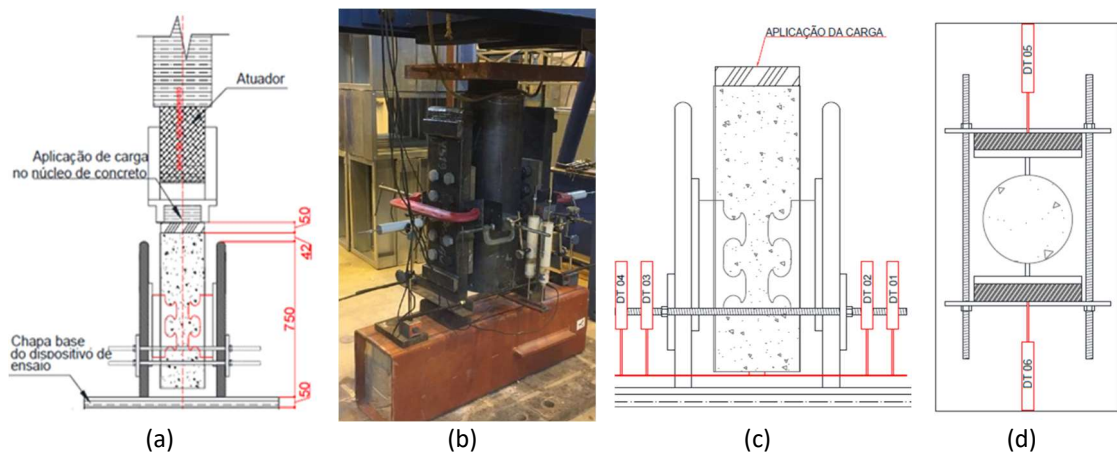


Figura 2: Modelos G1 e G2: (a) concepção do ensaio (b) modelo posicionado no atuador (c) DT's em vista lateral e destaque do tirante e (d) DT's em vista superior. Santos [19].

Em relação aos mecanismos de ruptura, no concreto houve falha por cisalhamento do concreto devido ao deslocamento do conector antes do ensaio (marcação na cor vermelha) e após o ensaio (marcação na cor preta). Observou-se esmagamento da região de concreto frontal ao *dowel* de aço, pelo apoio da chapa do conector do concreto e seguida de uma rachadura longitudinal. Para o aço, visualmente não houveram indícios de falha no aço do conector, mas o tubo de aço apresentou um pequeno ressalto abaulado na região de apoio do conector.

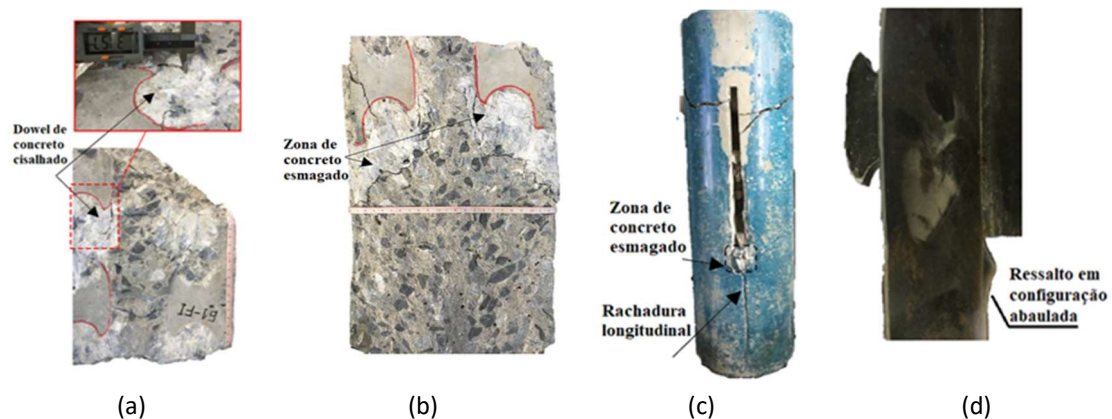


Figura 3: Mecanismo de ruptura: (a) cisalhamento do concreto (b) esmagamento do concreto (c) esmagamento do concreto com rachadura longitudinal (d) ressalto no tubo de aço. Santos [19].

Os modelos foram ensaiados até alcançar um deslizamento na conexão próximos de 35 mm e 10 mm, sendo essa discrepância proposital para avaliar o nível de degradação estrutural da conexão comparando um modelo com deslocamento próximo ao da força máxima e outro com deslocamento próximo do ponto de redução da carga em 20% em relação a carga máxima (critério de parada EN 1994-1-1:2004 [16]). A capacidade resistente total ( $P_{u,exp}$ ) dos modelos G1 e G2 é igual a 951,40kN e 1005,17kN e a razão entre eles 0,947 indicando resultados muito próximos e a média igual a 978,29 kN. A capacidade resistente por dowel ( $P_{u,exp,med}$ ) é igual a 489,14kN e a esperada teórica ( $P_{u,teo}$ ) 359,65kN, a razão entre estes mostra que os resultados experimentais levam a valores em média 1,36 vezes maiores que os teóricos.

## 2.2 Modelo numérico

A análise numérica será conduzida com o software de elementos finitos ABAQUS, versão 6.14. Essa abordagem segue uma sequência de estudos anteriores conduzidos Cardoso [17], Pereira [18] e Santos [19]. Para garantir a consistência, os mesmos parâmetros numéricos utilizados por esses autores serão adotados na concepção do modelo numérico.

### 2.2.1 Geometria e malha do modelo

O presente modelo é composto pela junção de três elementos: o tubo de aço, o conector de cisalhamento e o preenchimento em concreto, cuja visão geral está apresentada na figura 4. Devido a dupla simetria da seção transversal, é possível modelar apenas um quarto da seção transversal, desde que sejam aplicadas as condições de contorno adequadas permitindo otimização do tempo de processamento.

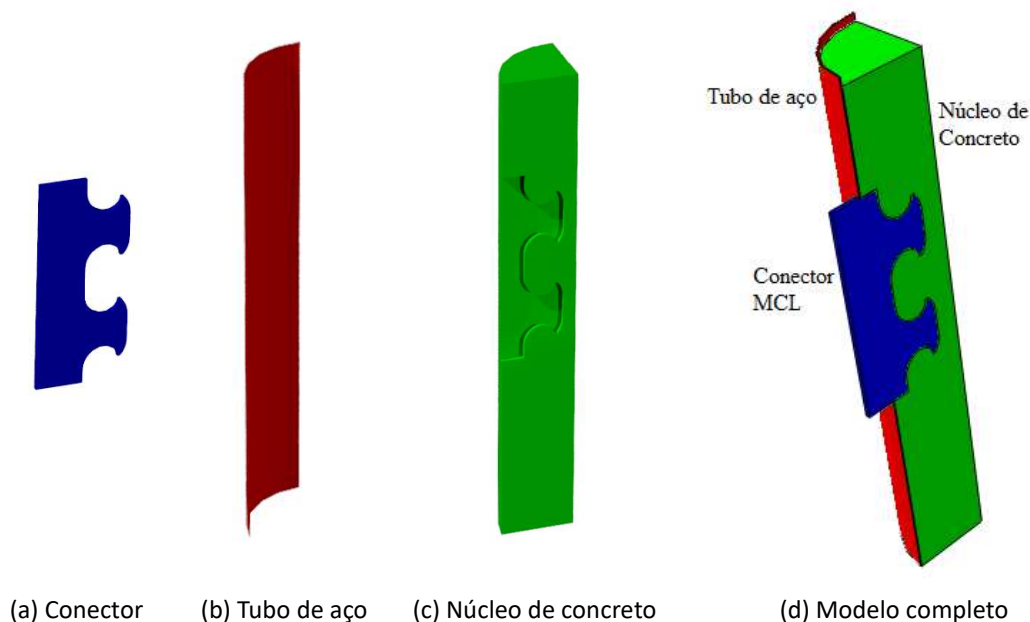


Figura 4: Geometria do modelo

A malha de elementos finitos será criada usando um elemento finito sólido de volume e tridimensional chamado C3D8, com oito nós nos vértices e três graus de liberdade por nó (translações nas direções X, Y e Z). Devido à complexidade do conector, o modelo será dividido em três regiões (figura 5): I) parte superior ao conector, II) região do conector e III) região abaixo

do conector. O teste de sensibilidade de malha foi realizado por Santos [17] sugere que o comprimento varie entre 10mm a 15mm na região I, 8mm na região II e de 10 a 30mm na região III. Os métodos de distribuição de malha adotados foram malha estruturada e malha de varredura.

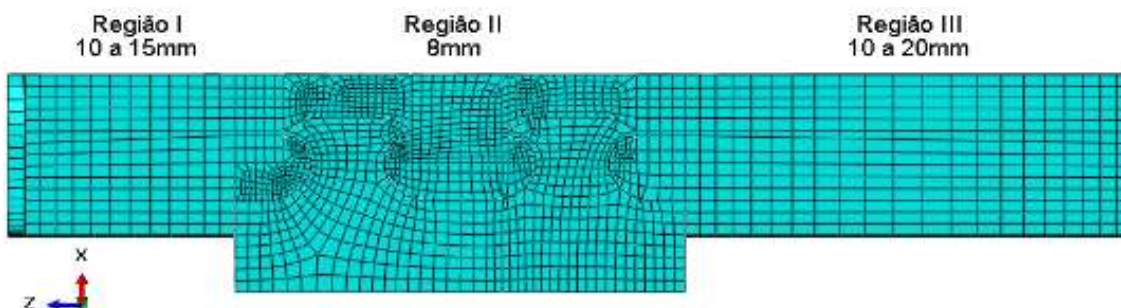


Figura 5: Malha do modelo

## 2.2.2 Relação constitutiva dos materiais

Os modelos constitutivos foram criados no ABAQUS de maneira adequada a descrever o comportamento dos materiais e os pares de tensão deformação foram transformados de valores nominais para valores verdadeiros conforme anexo C do EN 1993-1-5:1993. Foram considerados os mesmos parâmetros de entrada e aproximações para cálculo dos pares tensão deformação utilizados por Cardoso [17] e Santos [19].

Para o aço, considerando que o mecanismo de falha do *dowel* de aço requer uma análise para maiores níveis de deformação, a curva proposta pela norma europeia foi extrapolada de modo a abranger a região das deformações plásticas (figura 6a) utilizando-se o mesmo modelo utilizado por Cardoso [17] apresentado na figura 6b.

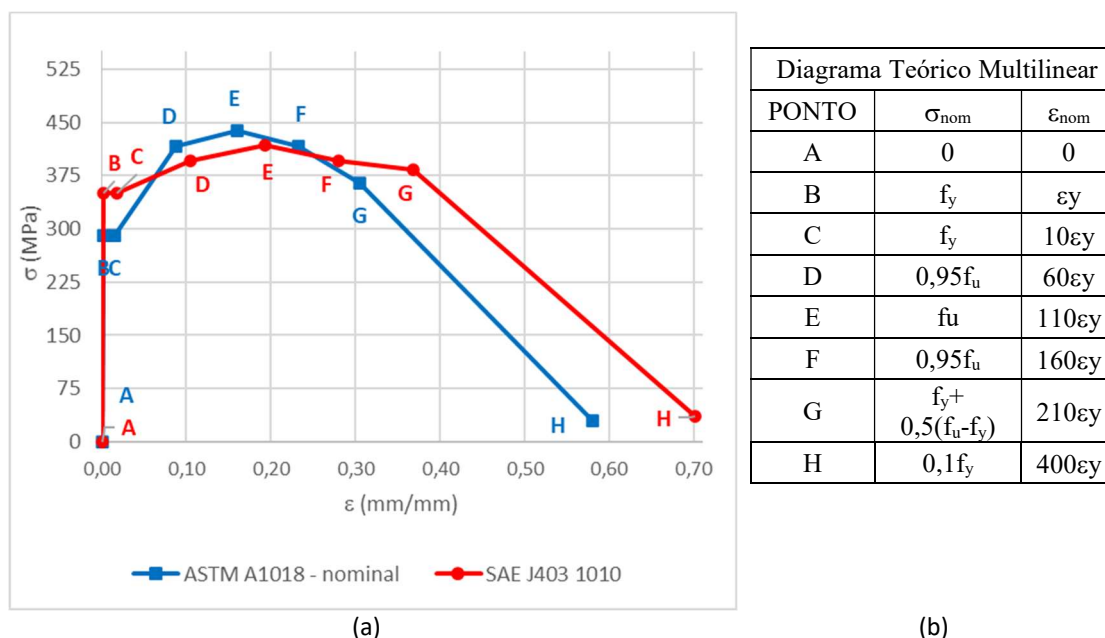


Figura 6: Diagrama tensão versus deformação nominal para o aço

Para o concreto, utilizou-se o modelo constitutivo do ABAQUS Concrete *Damage Plasticity* (CDP) com parâmetros de entrada o ângulo de dilatância  $\psi = 36^\circ$ , excentricidade  $\epsilon = 0,1$ , razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$ , razão entre o segundo invariante de tensão do meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão  $K_c = 2/3$  e viscosidade  $\mu_{vis} = 0,00005$ . Para traçado da curva tensão deformação sob compressão (figura 7) considera-se uma aproximação razoável representar o trecho elástico com comportamento linear de zero até a tensão igual a 40% de  $f_{cm}$  seguida das equações propostas pelo EN 1992-1-1:2004 até atingir a deformação última do concreto. Considerando que o mecanismo de falha por esmagamento do concreto na região dos *dowels* requer uma análise para maiores níveis de deformação, utiliza-se um prolongamento da curva conforme as premissas de Pavlović et al. [21].

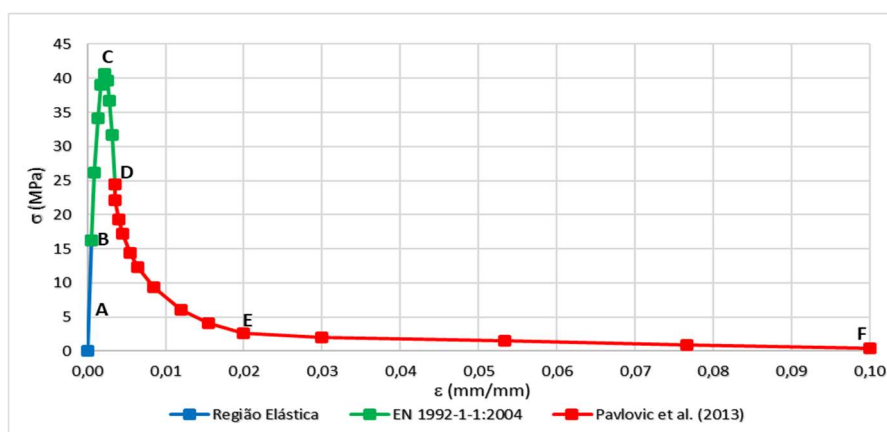


Figura 7: Diagrama tensão *versus* deformação para o concreto sob compressão

Para o concreto tracionado, a relação constitutiva é função da abertura das fissuras no concreto, iniciando-se com comportamento elástico linear até a resistência do concreto a tração e a partir desse ponto, as tensões decrescem devido ao amolecimento do concreto à tração e perda de resistência associada ao processo de fissuração. Os pares tensão deformação são representados pela função polinomial cúbica de Bézier, considerando abertura de fissura crítica ( $w_c$ ) igual a 1,0 mm e último ponto da curva com tensão igual 5% de  $f_{ctm}$ , conforme mostra a figura 8. Por fim, além de fornecer os pares tensão deformação deve ser lançada a resposta ao dano para simulação do comportamento pós pico do concreto utilizando-se as variáveis de dano.

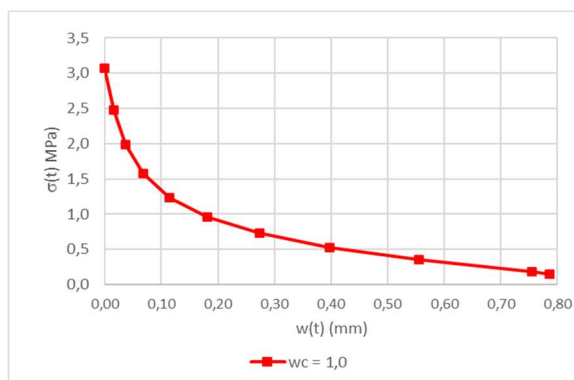


Figura 8: Diagrama tensão *versus* abertura de fissura para o concreto sob compressão adotando-se abertura de fissura crítica igual a 1 mm.

## 2.2.3 Pares de contato

Com base nos estudos de Cardoso [15], Pereira [16] e Santos [17] o contato entre os elementos foi simulado considerando os seguintes coeficientes de atrito estático: 0,5 entre o conector e o concreto, 0,17 entre o tubo e o núcleo de concreto e 1,0 entre o conector e tubo. Nos ensaios, o atrito entre o tubo e o núcleo de concreto foi minimizado devido à aplicação de pintura e desmoldante no interior do tubo. Os pares de contato são encontrados automaticamente pelo ABAQUS por meio do mecanismo *find contact pairs*, gerando interações face a face. Foram encontrados três pares de contato: núcleo de concreto com tubo de aço, tubo de aço com conector e núcleo de concreto com conector. Foram definidos para cada par qual o elemento de maior rigidez (*Master Surface*) conforme figura 9. Em todos os casos o tipo de contato é rígido com o mínimo de penetração entre a superfície dos elementos.

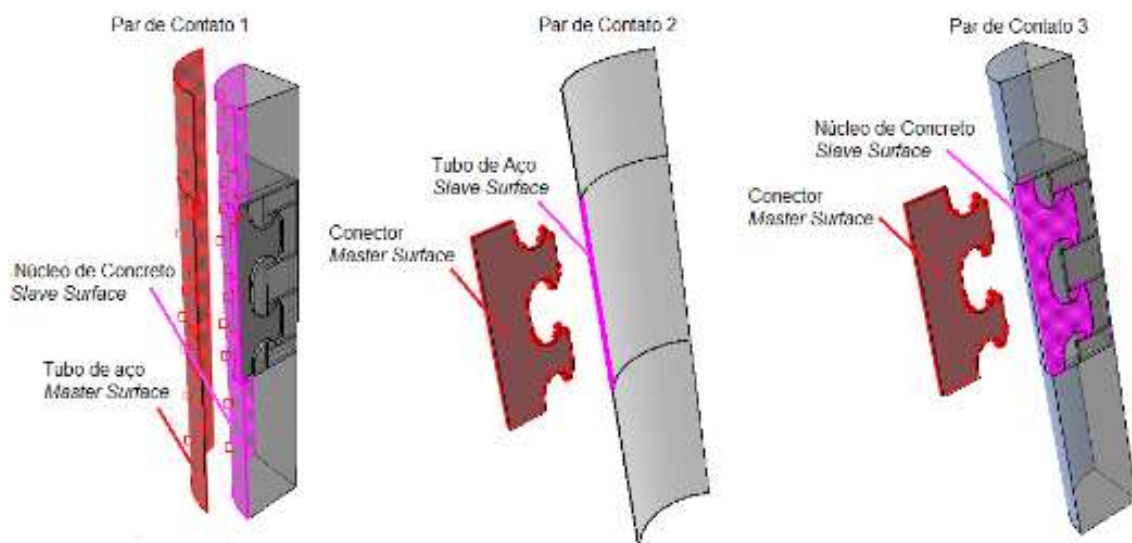


Figura 9: Pares de Contato

## 2.2.4 Etapas (step)

O carregamento monotônico vertical nos modelos numéricos é aplicado controlando os deslocamentos, gerando incrementos de deslocamento e forças de reação correspondentes. Isso permite obter a curva de força versus deslocamento. No software ABAQUS, é possível criar um método chamado "step" no qual o problema é dividido em etapas e incrementos. Com base no estudo de convergência dos métodos de análise conduzido por Cardoso [15] em PMPC, o método *Dynamic Implicit* foi o que apresentou melhores resultados. O autor ainda reporta que para reduzir os ruídos observados nas curvas força deslocamento analisadas recomenda-se o uso da função de pós processamento oferecida pelo programa, criando-se uma amplitude tipo *smooth* variável de 0 a 1. Assim sendo, neste estudo foi criado *step* chamado carregamento do tipo *Dinamic Implicit* quase estático com não linearidade geométrica e amplitude *smooth* variável de 0 a 1. Essas estratégias visam melhorar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos por meio da simulação numérica no Abaqus.

## 2.2.4 Restrições

Para aplicar o carregamento é necessário conectar um ponto de referência chamado *Reference Point* (RP-1) à superfície da face do conector de cisalhamento. Isso é feito por meio de uma restrição do tipo *Coupling*, que associa os graus de liberdade do RP-1 à superfície do conector. À medida que os deslocamentos controlados são incrementados pelo método *step* carregamento, as condições de contorno da superfície do conector acompanham esses deslocamentos, simulando os deslocamentos quase-estáticos aplicados pelo atuador. O ponto de referência e a superfície da face do conector estão apresentados na Figura 10(a). Além disso, para representar a solda entre o conector e tubo de aço, foi criada uma restrição tipo *Tie* conforme mostra a figura 10(b).

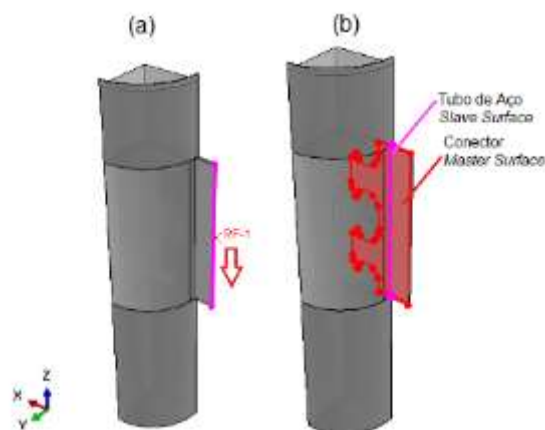


Figura 10: Restrições do modelo: a) representação da solda entre conector e tubo de aço e b) aplicação do carregamento

## 2.2.5 Aplicação do carregamento

No modelo numérico para a aplicação do carregamento é criada uma condição de contorno com o deslocamento final prescrito e zerando-se as demais condições de contorno. Entretanto, no caso destes modelos experimentais, as chapas verticais desempenharam um papel duplo: transmitir o carregamento aplicado pelo atuador às chapas dos conectores e atuar como apoio dos pilares durante o ensaio. Embora os modelos tenham sido travados por tirantes, ainda poderiam ocorrer pequenos deslocamentos horizontais devido à tendência de rotação em torno da conexão. A magnitude desses deslocamentos é difícil de quantificar, pois depende de vários fatores, como atrito entre a chapa e a laje de concreto do piso, atrito entre a chapa e o perfil I vertical, acomodação dos tirantes e do modelo, excentricidades de carregamento, entre outros. Assim sendo, para a face yz do conector, o comportamento será intermediário entre os extremos com e sem restrição. Para simplificar a análise, foram considerados dois cenários extremos em dois modelos numéricos. No primeiro cenário, chamado ModeloG, a chapa é restrita na direção horizontal ( $U_x = 0$  – Figura 11), e um deslocamento final de -37 mm é aplicado ( $U_z$ ), enquanto os demais graus de liberdade ( $U_y$ ,  $U_{Rx}$ ,  $U_{Ry}$ ,  $U_{Rz}$ ) são mantidos em zero. No segundo cenário, chamado ModeloG-L, chapa tem liberdade de movimento na translação horizontal. As condições de deslocamento são as mesmas do ModeloG, exceto pela restrição  $U_x$ , que é definida como Livre.

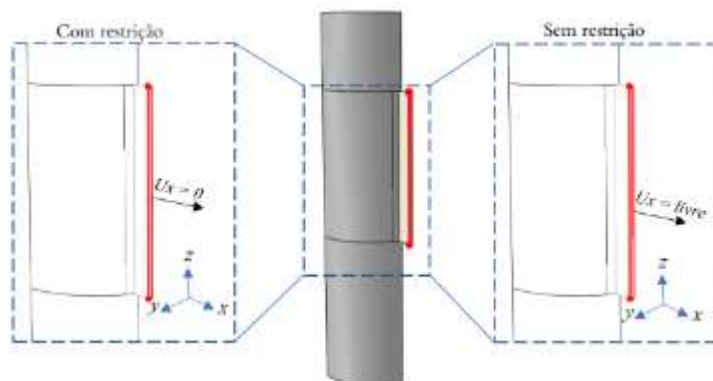


Figura 11: Possíveis restrições para a face da chapa do conector

## 2.2.5 Condições de contorno

Os graus de liberdade dos nós dos elementos são relacionados à translação pelo ABAQUS por meio dos parâmetros U1, U2 e U3, correspondentes às translações e UR1, UR2 e UR3 às rotações dos nós na direção dos eixos 1, 2 e 3 que são associados, respectivamente, aos eixos globais x, y e z. Buscando representar as condições do ensaio experimental, foram consideradas condições de contorno para simetria em relação aos planos xz, simetria em relação ao plano yz e o apoio do pilar pelo núcleo de concreto. Neste trabalho, às condições de simetria se devem a modelagem de apenas um quarto da seção transversal, a seção é considerada duplamente simétrica e por isso os deslocamentos horizontais nas direções x e y devem ser iguais a zero. Para representar as condições de contorno de simetria, o ABAQUS possui opções de criação automática, bastando selecionar as regiões associadas (Figura 12). Para a simetria em relação a toda a região ao plano xz, os parâmetros Ux, URy e URz são iguais a zero e para o plano yz, Uy, URx e URz são iguais a zero. Para reproduzir o apoio do pilar considera-se o deslocamento Uz igual a zero.

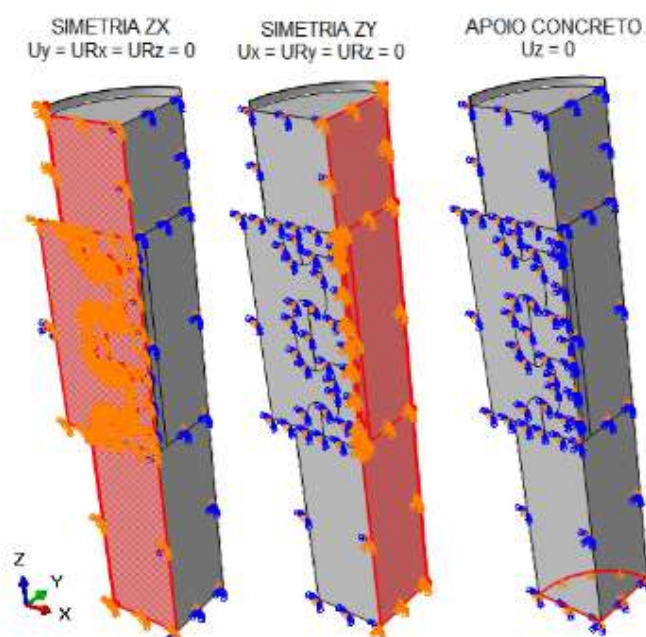


Figura 12 – Condições de contorno

## 2.3 Validação do modelo numérico

No Gráfico 1 estão apresentados os resultados da curva força versus deslocamento dos modelos experimentais G1 e G2 e dos modelos numéricos ModeloG (com restrição) e ModeloG-L (sem restrição). Comparando-se as curvas é possível observar que o modelo experimental G1 se aproxima mais da curva numérica ModeloG (com restrição) e a curva numérica fica abaixo das experimentais para deslocamentos máximos na ordem de 2,5mm e a partir desse ponto fornece resultados acima dos experimentais. Em contrapartida, o modelo experimental G2 está mais próximo da curva numérica do ModeloG-L (sem restrição), para o modelo experimental G1 as curvas se interceptam para deslocamentos máximos na ordem de 5mm, ponto a partir do qual a curva numérica sobrepõe a experimental. Entretanto, quando comparada ao modelo experimental G2 em nenhum ponto os resultados numéricos sobrepõem os experimentais demonstrando um modelo numérico mais conservador do que o experimental. Tais resultados convergem com o mencionado anteriormente, no qual espera-se que a configuração ideal é a de modelos que possuam uma rigidez de conexão intermediária aos extremos.

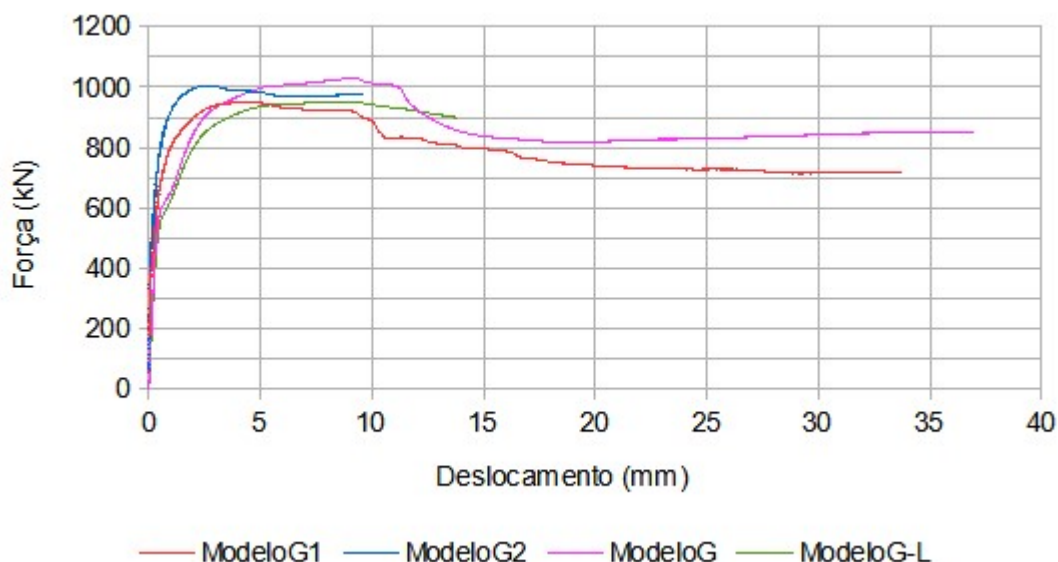


Gráfico 1 – Força versus Deslocamento

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões a respeito dos mecanismos de falha em conectores de cisalhamento verificados nos modelos numéricos desenvolvidos e validados numericamente. O estudo foi realizado com o objetivo de compreender os fatores que influenciam a resistência e a capacidade de carga desses conectores como mecanismo de transferência de carga em PMPC.

Na figura 13 estão apresentados os resultados para a degradação da rigidez do concreto à compressão para o ModeloG (incremento relativo 176 à força máxima 1028.87 kN) e para o ModeloG-L (incremento relativo 143 à força máxima 951.35 kN, além mostrar uma foto do modelo experimental após ruptura em laboratório. Nas imagens apresentadas foram ocultados o conector de cisalhamento e o tubo de aço, para melhor visualização dos resultados para o

concreto. Observa-se que o dano foi muito pronunciado no interior da conexão e que os modelos, apesar de distintos, demonstram padrão de dano similares. Este fato sugere que alterar a vinculação da face da chapa do conector de cisalhamento com deslocamento igual a zero ou livre não interfere de maneira significativa nos resultados de dano a compressão. Além disso, é possível observar boa coerência entre os modelos e o resultado experimental, pois as manchas vermelhas abaixo da região do conector (marcadas em retângulos pretos) são coerentes ao esmagamento observado no modelo experimental.

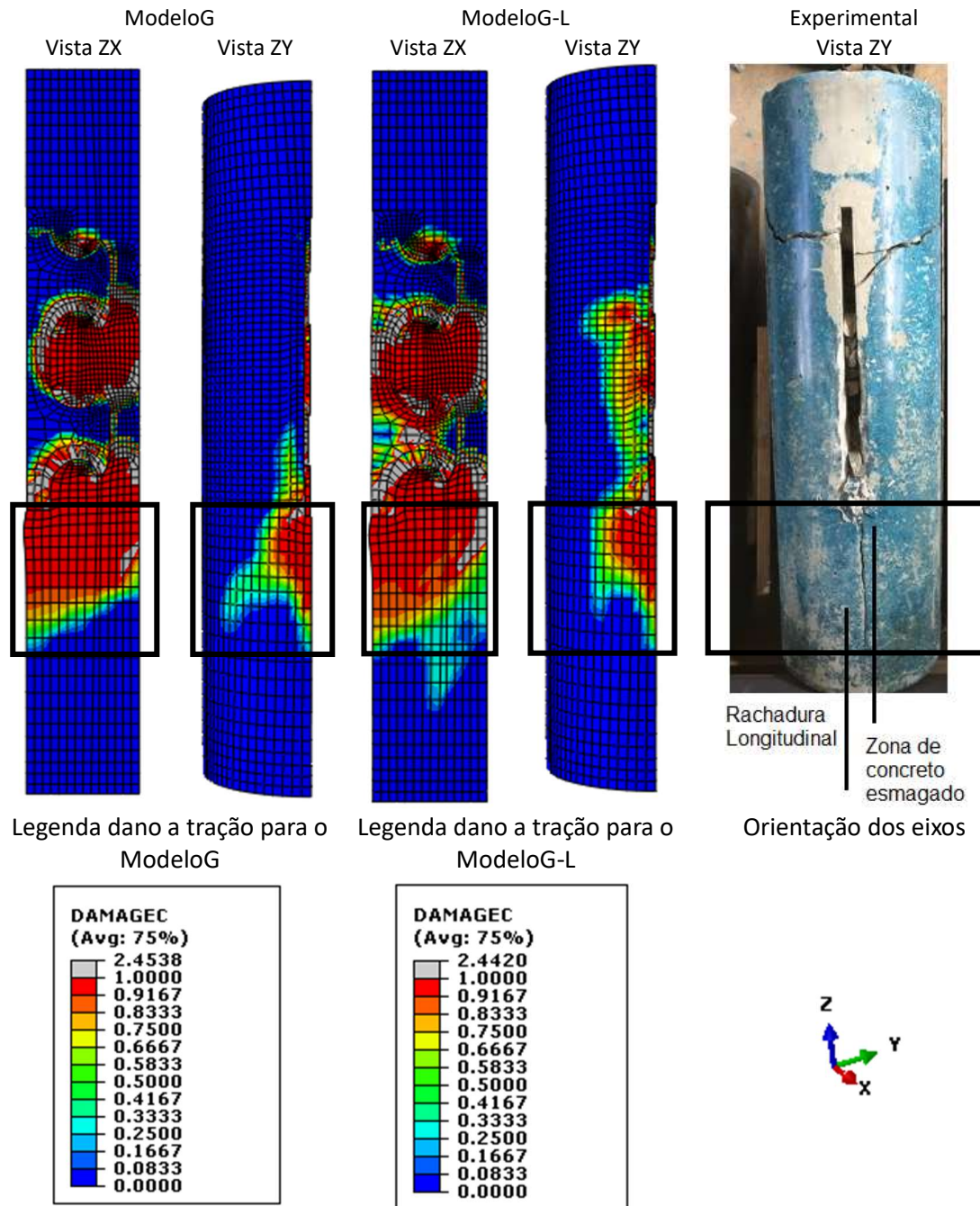


Figura 13 – Dano a compressão no ModeloG e no ModeloG-L

Analogamente, na figura 14 estão apresentados os resultados para a degradação da rigidez do concreto à tração. É possível observar que o dano a tração do concreto é mais pronunciado à frente e abaixo da chapa do conector. Como consequência, forma-se um plano longitudinal que leva ao cisalhamento do concreto. De modo similar ao constatado para o dano a compressão os padrões de dano nos dois modelos numéricos são similares, sugerindo pouca interferência da vinculação da face da chapa do conector nos resultados.

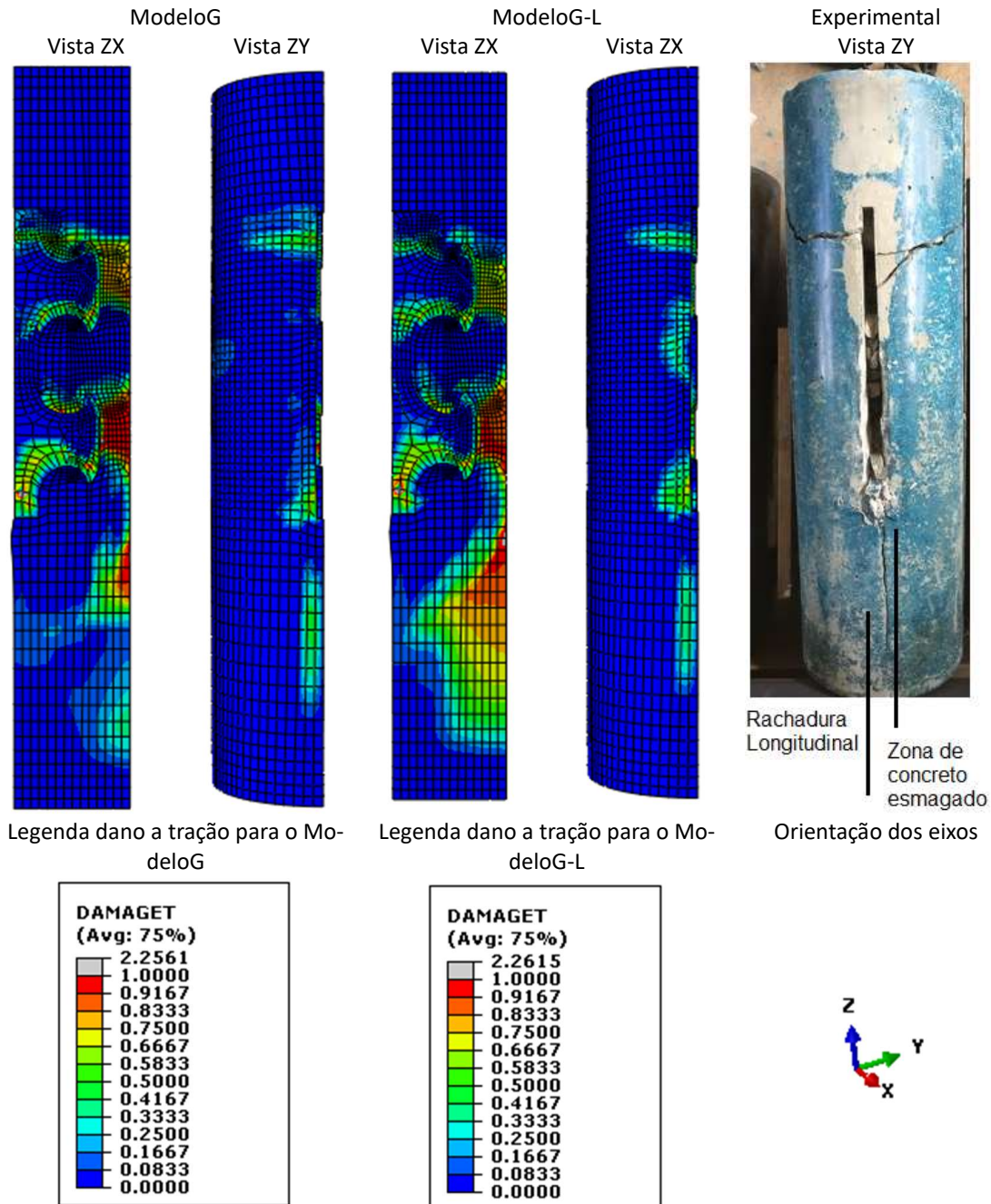


Figura 14 – Dano a tração no ModeloG e no ModeloG-L

A figura 15 apresenta os resultados numéricos do ModeloG e do ModeloG-L com a escala de tensões de *von Mises* limitada ao valor da tensão de escoamento do aço da chapa do conector para o incremento relativo a força máxima e para o incremento relativo ao deslocamento máximo. Nos dois modelos é possível observar o espraiamento das tensões à medida que o deslocamento aumenta para além da força máxima. Para o ModeloG-L a região da extremidade de conexão da chapa do conector apresenta tensões de escoamento mais acentuadas.

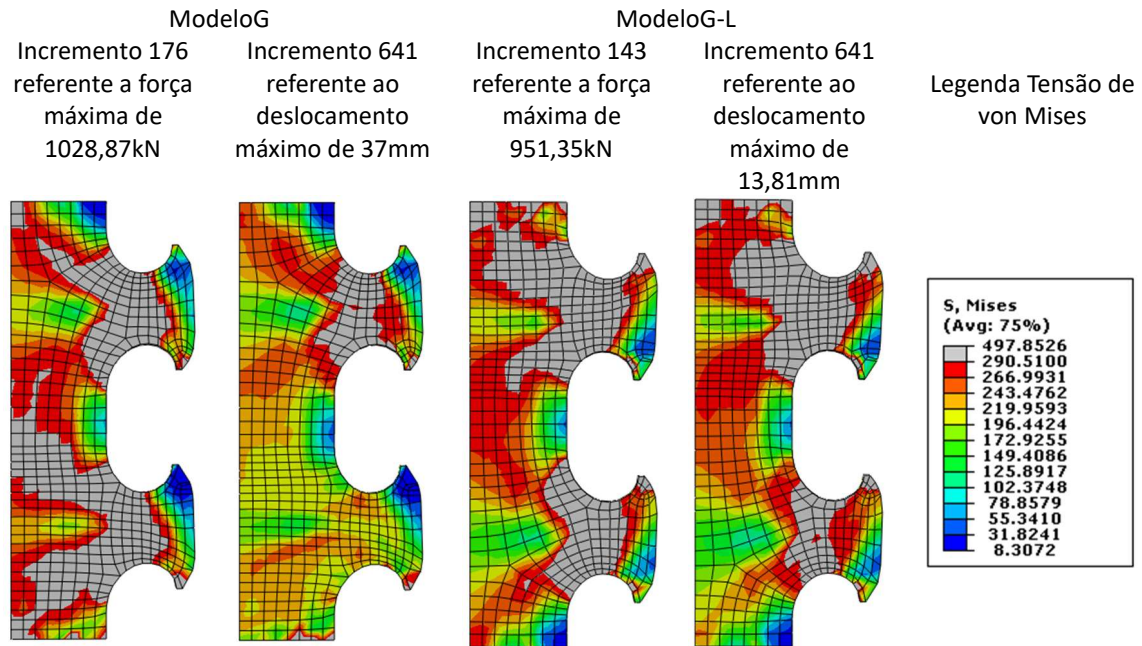


Figura 15 – Configuração deformada do conector MCL no ModeloG e no ModeloG-L

A análise dos resultados revelou que o mecanismo de falha observado é um modo misto de falha. Para o conjunto de dowels ocorreu escoamento da seção crítica do conector e para o concreto cisalhamento com esmagamento na região de base do conector associado a uma trinca longitudinal em direção paralela ao conector.

#### 4 CONCLUSÃO

Em conclusão, este artigo apresentou a validação de um modelo numérico para o cálculo de conectores de cisalhamento tipo MCL aplicados em PMPC de seção esbelta. Os resultados obtidos demonstraram uma concordância satisfatória entre as previsões do modelo numérico e os dados experimentais disponíveis na literatura, demonstrando a aplicabilidade dessa nova solução. Isso indica que o modelo validado é capaz de fornecer boa estimativa da capacidade de carga e do comportamento estrutural dos conectores de cisalhamento tipo MCL aplicados em PMPC. Além disso, o modelo numérico pode ser facilmente adaptado e aplicado a diferentes geometrias e materiais, aumentando sua versatilidade e utilidade prática. No entanto, é fundamental ressaltar que qualquer modelo numérico está sujeito a limitações inerentes às suposições adotadas e às simplificações realizadas. Por fim, destaca-se que a modelagem numérica de um quarto da seção transversal devido á dupla simetria se mostra eficaz e garante economia no tempo de processamento dos modelos, tornando o modelo uma contribuição fundamental para o desenvolvimento de novas pesquisas e posterior desenvolvimento de modelos analíticos.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 Sen, H. K. Triaxial effects in concrete-filled tubular steel columns. Tese de Doutorado, Colégio Imperial de Ciência e Tecnologia, Universidade de Londres, Londres, Inglaterra, 1969.
- 2 Tomii, M.; Sakino, K. Elasto-Plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns. Architectural Institute of Japan, v.280, p.111-122, 1979b.
- 3 Tomii, M.; Sakino, K. Experimental Studies on the Ultimate Moment of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns. Architectural Institute of Japan, v.275, p.55-65, 1979a.
- 4 Schneider, S. P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. Journal of Structural Engineering, v.114, p.1804-1826.
- 5 Bradford, M. A.; Loh, H. Y.; Uy, B. Slenderness limits for filled circular steel tubes. Journal of constructional steel research, v.58, p.243-252, 2002.
- 6 Hu, H. T.; Huang, C. S.; Wu, M. H.; Wu, Y. M.; Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect. Journal of Structural Engineering, v.129, p.1322-1329, 2003.
- 7 American Institute Of Steel Construction (ANSI/AISC 360-16). Specification for structural steel buildings, Chicago. 2016.
- 8 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 8800:2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 16239:2013. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- 10 Cardoso, H. S. (2014). Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2014.
- 11 S. De Nardin and A. L. H. C. El Debs, "Shear transfer mechanism in connections involving concrete filled steel columns under shear forces," Steel Compos. Struct., vol. 28, pp. 449–460, 2018.

- 12 Xavier, E. M.; Neto, J. G. R.; Sarmanho, A. M. C.; Roquete L.; De Paula, L G. C. Experimental analysis of bolts employed as shear connectors in circular concrete-filled tube columns. *IBRACON Structures and Material Journal*, v. 12, n. 2, 2019, p. 337-370
- 13 Santos, L. R; Cardoso, H. S; Caldas, R.. B; Grilho, L. G. Finite element model for bolted shear connectors in concrete-filled steel tubular columns. *Engineering Structures*, v. 203, 2020.
- 14 Santos, L. R, Caldas, R. B; Grilo, L. F.; Carvalho, H; Fakury, R. "Design procedure to bearing concrete failure in concrete filled steel tube columns with bolted shear connectors," *Eng. Struct.*, vol. 232, pp. 1–12, 2021.
- 15 Chaves, M. F. F; Xavier, E. M; Sarmanho, A. M. C; Neto, J. G. R. Study of bolts used as shear connectors in concrete-filled steel tubes, *Engineering Structures*, v 231, 2021.
- 16 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. Bruxelas, Bélgica, 2004
- 17 Cardoso, H. S. (2018). Avaliação Do Comportamento De Conectores Constituídos Por Chapas De Aço Com Recortes Regulares — Ênfase Em Conectores De Geometria Crestbond Aplicados Em Pilares. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2018.
- 18 Pereira, C. P. (2020). Estudo Numérico Dos Conectores Crestbond Em Pilares Mistos Tubulares Circulares De Seção Esbelta. Dissertação De Mestrado - Escola De Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2020.
- 19 Santos, L. R. Conectores Composite Dowels Aplicados a Pilares Mistos de Seção Tubular de Aço Esbelta. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Minas Gerais, Brasil, 2021.
- 20 Cardoso, H.S.; Aguiar, O. P; Caldas, R. B.; Fakury, R. H. Composite dowels as load introduction devices in concrete-filled steel tubular columns. *Engineering Structures*. V.219, 2020
- 21 M. Pavlović, Z. Marković, M. Veljković, and D. Buđevac, "Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests," *J. Construct. Steel Res.*, vol. 88, pp. 134–149, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.003>.