



## ANÁLISE NUMÉRICA DE FLAMBAGEM DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO EMPREGADOS EM LAJES NERVURADAS MISTAS

## NUMERICAL BUCKLING ANALYSIS OF COLD FORMED STEEL PROFILES EMPLOYED IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE RIBBED SLABS

Daniel Carvalho de Moura Candido (1); André Palmiro Storch (2); André Vasconcelos Soares Gomes (3); Lucas Fadini Favarato (4) Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani (5)

(1) Engenheiro Civil, PPGEC - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(2) Engenheiro Mecânico, Arcelor Mittal, Serra - ES, Brasil

(3) Engenheiro Civil, PPGEC - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(4) Graduando de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(5) Dra. Profa., PPGEC-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil

Email para Correspondência: danielcandido89@gmail.com; (P) Daniel Carvalho de Moura Candido

**Resumo:** No contexto das estruturas mistas em concreto e aço, observa-se o início da utilização de lajes nervuradas mistas, onde as vigotas pré-fabricadas de concreto armado, comumente utilizadas em lajes nervuradas, são substituídas por perfis de aço formados a frio, que trabalham como fôrma para o concreto e a armação, além de servirem como armadura positiva adicional. No entanto, as características mecânicas de sistemas dessa natureza não são conhecidas a ponto de se aproveitar ao máximo a contribuição das fôrmas de aço. Faz-se necessário então, pesquisas adicionais acerca do comportamento dessas estruturas. Na fase de construção em especial, onde o perfil de aço e os elementos inertes utilizados nessas lajes resistem aos esforços sozinhos, é fundamental compreender o comportamento mecânico do conjunto desses materiais. Sendo assim, a presente pesquisa tem como objetivo principal, observar se existe contribuição significativa dos materiais inertes para os modos e momentos críticos de flambagem dos perfis de aço na fase de construção. Para tanto, executa-se uma bateria de simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) com auxílio do *software* ANSYS 18.0 *Academic Research*. Nessa pesquisa, analisa-se o perfil de aço Ue 100 x 40 x 17 x 1,2. Primeiramente o perfil é simulado sem a presença do material inerte. A peça é submetida à momentos unitários em suas extremidades e é feita uma parametrização do comprimento do perfil, de 1 a 3 metros em incrementos de 20cm. Em seguida, os materiais inertes são modelados, em contato com as mesas do perfil. Em adição à variação de comprimento previamente mencionada, os modelos com elementos inertes são analisados para elementos de enchimento com módulos de elasticidade longitudinal de 2,7MPa (EPS13) e 4,8MPa (EPS28). Observa-se um aumento considerável na magnitude do momento crítico de flambagem do perfil em contato com os elementos inertes, e a eliminação da incidência de flambagem lateral com torção.

**Palavras chave:** lajes mistas nervuradas; perfil formado a frio; análise de flambagem; simulação computacional.

**Abstract:** In the context of steel-concrete composite structures, the employment of composite ribbed slab systems has begun to stand out. In these systems, the reinforced concrete pre-cast girders usually utilized are substituted by a cold formed steel profile, serving as formwork for the concrete and the rebar, as well as additional positive rebar. However, systems of this nature are currently designed as if composed exclusively of reinforced concrete, since the structural behavior of systems of this nature is not entirely known, to the point in which the full contribution of the steel profile can be taken advantage of. Hence, there is a clear demand for additional research on the mechanical behavior of such structures. During the construction phase, loads pertaining to this phase are resisted only by the profile and additional inert filling elements; therefore, it is imperative to comprehend how these materials work together mechanically. Herein, the main objective of this research is to determine the contributing effect of inert elements in the critical buckling modes and loads of cold



formed steel profiles during the construction phase of composite ribbed slabs. For such purpose, a Finite Element analysis is conducted by means of the ANSYS 18.0 academic software. The present research analyses the Ue 100 x 40 x 17 x 1.2 steel profile. Initially, the steel element is analyzed without the inert materials. Unitary moments are applied to the edges of the profile, and a parametrical analysis of length is performed from 1m to 3m, with increments of 20cm. The inert elements are then introduced, in contact with the profile flanges. In addition to the variation in length previously mentioned, the analyses are performed for two values of longitudinal elasticity modulus of the inert materials, 2.7MPa (EPS 13) and 4.8MPa (EPS 28). In comparison with the analysis performed on the steel profile alone, a considerable increase in the magnitude of the critical buckling load can be observed in all subsequent models, as well as the elimination of the incidence of lateral torsional buckling for the models in contact with the inert elements.

***Keywords: cold formed steel profile; composite ribbed slabs; buckling analysis; computer simulation.***



## 1 INTRODUÇÃO

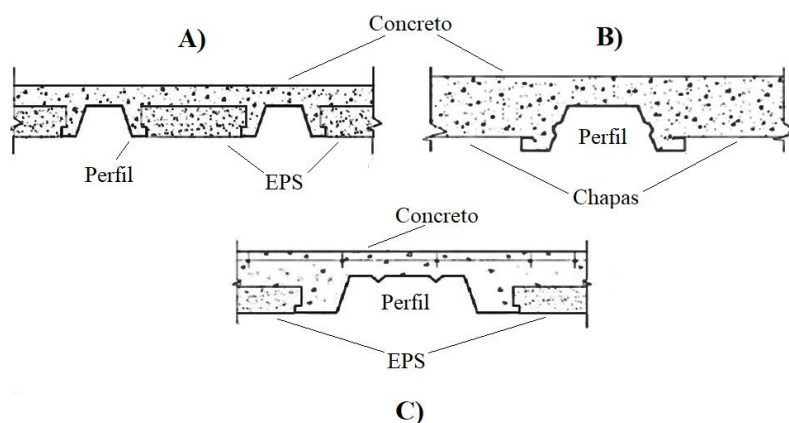
Atualmente, nota-se o crescimento do uso de sistemas mistos de aço e concreto devido às diversas vantagens tanto com a redução de tempo e gasto de recursos, quanto no ganho de eficiência estrutural. Esses sistemas, em muitos casos, apresentam-se mais vantajosos que aqueles exclusivamente de concreto armado ou de aço. Em comparação às estruturas de concreto armado, a estrutura mista possibilita a dispensa de fôrmas e escoramentos; redução de peso próprio e volume da estrutura e o aumento da precisão dimensional no processo de construção. Se tratando das contrapartidas em aço, há redução considerável do consumo de tal material, bem como a uma possível redução de gastos com proteções contra incêndio e corrosão (Queiroz; Pimenta; Mata, 2001; Johnson, 2004). É natural, portanto, que apareçam novas propostas da utilização eficiente de sistemas com essa natureza.

Para o caso das lajes mistas, em especial, observa-se o início da utilização de lajes nervuradas dessa natureza, onde as vigotas pré-fabricadas de concreto armado, comumente utilizadas em lajes nervuradas de concreto armado, são substituídas por perfis de aço formados a frio. Estes, por sua vez, trabalham como fôrma para o concreto e como armadura positiva, eliminando à necessidade da pré-fabricação e, portanto, reduzindo a incidência de patologias oriundas da interação entre concretos de idades distintas (de Souza; Ripper, 2009). No entanto, as características mecânicas de sistemas dessa natureza não são conhecidas a ponto de se aproveitar ao máximo a contribuição das fôrmas de aço, sendo esses tipos de laje atualmente dimensionados como lajes nervuradas ou treliçadas em concreto armado, onde o perfil é considerado como fôrma perdida. Faz-se necessário então, pesquisas adicionais acerca do comportamento dessas estruturas. Na fase de construção em especial, onde o perfil de aço e os elementos inertes utilizados nessas lajes resistem aos esforços sozinhos, é fundamental compreender o comportamento mecânico do conjunto desses materiais. Sendo assim, a presente pesquisa tem como objetivo principal, observar se existe contribuição significativa dos materiais inertes para os modos e momentos críticos de flambagem dos perfis de aço na fase de construção.

## 2 LAJES NERVURADAS MISTAS

Lajes mistas geralmente se apresentam na forma de lajes de concreto armado com uma fôrma de aço incorporada, que resiste a esforços de tração e cisalhamento no elemento carregado. É comum a utilização de lajes mistas cuja fôrma cobre toda a área inferior do elemento, e existe abundância de estudos de sistemas dessa natureza. Todavia, nos últimos anos vêm sendo apresentadas propostas de sistemas que não utilizam a fôrma metálica contínua em toda a superfície inferior da laje, e perfis metálicos uniformemente espaçados são introduzidos, com os espaços entre eles sendo preenchidos pela superposição de perfis distintos ou por elementos inertes, de maneira análoga ao sistema de lajes nervuradas. Essa configuração foi apresentada inicialmente por Takey (2001), que constatou que o sistema por ele introduzido, que faz uso de conectores auto-atarrachantes nos perfis e de blocos EPS como elementos inertes (Figura 1-a), aumenta a eficiência estrutural e diminui custos em relação às lajes lisas e pré-fabricadas com vigotas em concreto. Essa pesquisa foi utilizada como base para propostas subsequentes de sistemas similares com chapa incorporada como exposto por Beltrão (2003), que substituí o EPS e os conectores por chapas galvanizadas e corrugações na alma do perfil,

respectivamente (Figura 1-b). Beltrão (2003) conclui que tais substituições eliminam gastos de tempo com a fixação dos conectores e problemas oriundos do manuseio dos blocos de EPS, e, portanto, superam a proposta de Takey (2001) quanto a trabalhabilidade. Outra proposta foi feita por Vianna (2005), onde a seção do perfil é drasticamente alterada e os blocos de EPS são reintroduzidos no sistema (Figura 1-c). Esta configuração apresenta maior eficiência mecânica em relação à proposta de Beltrão (2003), e supera o sistema de Takey (2001) nos quesitos tempo de execução e consumo de aço (Vianna,2005).



**Figura 1. Sistemas de lajes propostos.**

**Fonte: (Sieg, 2015).**

Ressalta-se que o escopo de análise dos sistemas de lajes nervuradas mistas citados, adotados pelos respectivos pesquisadores proponentes, tiveram foco no estudo experimental do comportamento mecânico dos diferentes perfis formados a frio desenvolvidos, bem como no comportamento estrutural do sistema de laje após cura do concreto. Em outras palavras, as pesquisas citadas não englobam análises da contribuição mecânica dos elementos inertes para resistência do sistema durante a fase de construção.

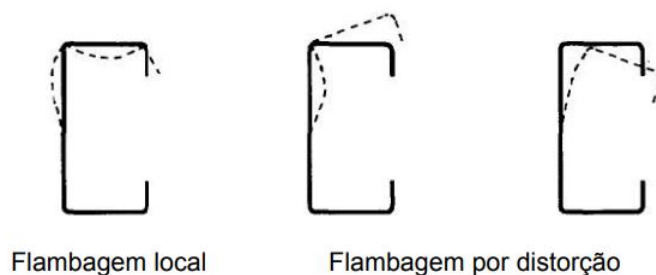
### **3 COMPORTAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO**

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010, perfis formados a frio são peças de aço fabricadas a partir do dobramento de chapas com espessura de até 8mm. Apesar dessa definição existem perfis de chapas mais espessas que também se enquadram nessa definição, portanto, podem ser dimensionados com os mesmos critérios (Vianna,2005). Elementos dessa natureza apresentam grande versatilidade de aplicação, uma vez que a ductilidade das chapas permite seu dobramento em inúmeras seções transversais diferentes, a fim de atender demandas para aplicações específicas (Silva; Pierin; Silva, 2014).

A análise de perfis formados a frio pode ser complexa, pois sua pequena espessura e características geométricas os tornam suscetíveis à problemas de instabilidade e deformações excessivas. Essas mesmas características tornam perfis dessa natureza suscetíveis também ao fenômeno do empenamento, que acarreta no surgimento de esforços internos além dos

comumente observados em estruturas carregadas e que podem ser difíceis de compreender e quantificar (Silva; Pierin; Silva, 2014).

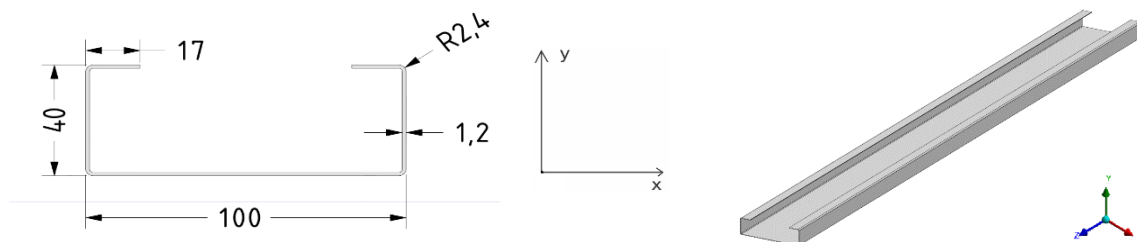
Quanto aos modos de flambagem, além das instabilidades local e global, há ocorrência de flambagem distorcional nesses elementos, caracterizada pela rotação e/ou translação de elementos da seção transversal, de maneira que a mesma perde sua forma original (Chodraui; Malite, 2007). A Figura 2 mostra uma comparação entre as flambagens local e distorcional em um perfil U enrijecido.



**Figura 2. Flambagens local e distorcional.**  
Fonte: (Silva; Pierin; Silva, 2014).

#### 4 ANÁLISE VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O escopo da presente pesquisa se limita à análise numérica de flambagem do perfil Ue 100 x 40 x 17 x 1,2 padronizado conforme ABNT NBR 6355:2012. Sua seção transversal e vista isométrica são representadas na Figura 3.

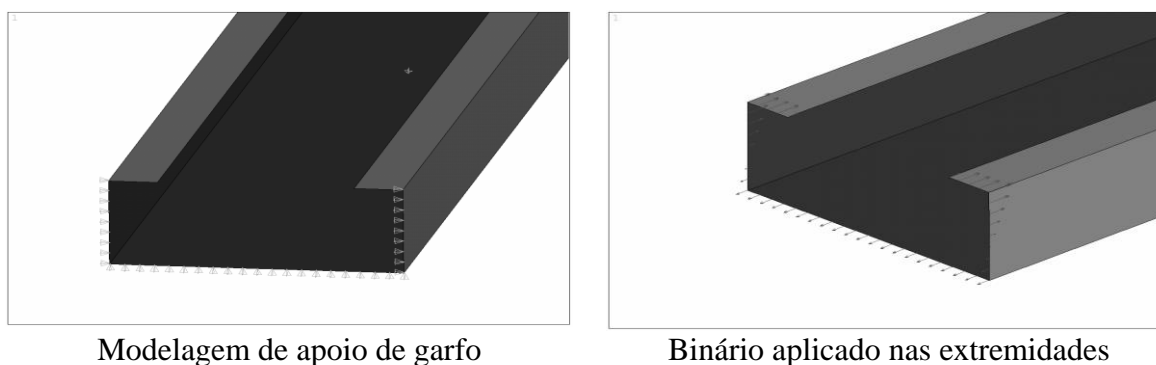


**Figura 3. Perfil Ue 100x40x17x1,2. Dimensões em mm.**

Para modelagem do perfil, foi utilizado o elemento SHELL 181, adequado para análise de cascas de paredes esbeltas. Trata-se de um elemento quadrangular de quatro nós, onde cada nó possui seis graus de liberdade: translação nas direções x, y e z, bem como rotação em torno desses eixos (ANSYS, 2018). As propriedades geométricas desse perfil foram retiradas das tabelas fornecidas por Carvalho (2014). Quanto ao material, foram estipulados módulos de elasticidades longitudinal e transversal de 20000 e 7700 kN/cm<sup>2</sup>, respectivamente. O coeficiente de Poisson foi definido como 0,3, em conformidade com a ABNT NBR 14762:2010.

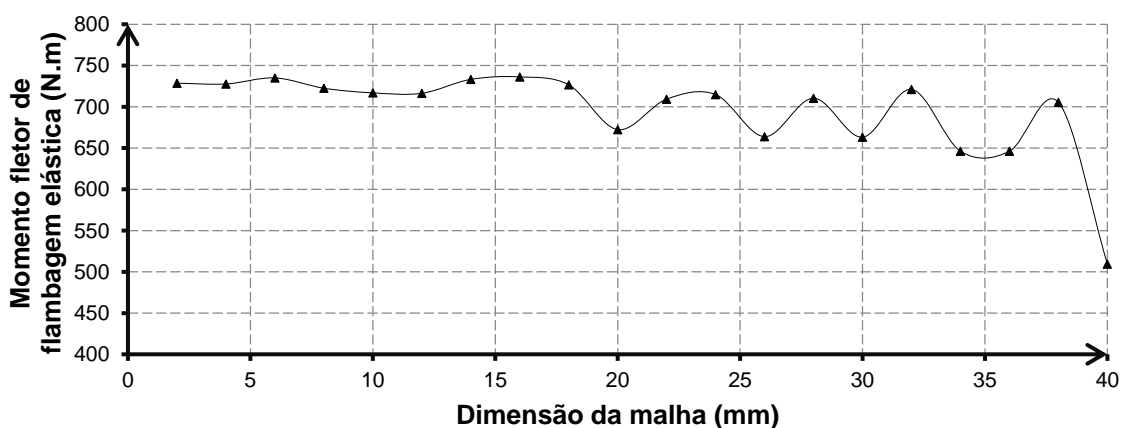
##### 4.1 Estudo de malha

Primeiramente foi executado um estudo de malha para constatar um grau de refinamento que não mais influencie os resultados de maneira expressiva. Para tanto, um modelo de perfil de dois metros de comprimento foi submetido à uma análise de flambagem onde o perfil é submetido à momentos unitários, modelados na forma de um binário em suas extremidades, por sua vez vinculadas por apoios de garfo, onde foram impedidas translações em torno do plano x-y, bem como a rotação em torno do eixo z. As condições de contorno e aplicação do carregamento como executados no ANSYS 18.0 são postos na Figura 4.



**Figura 4: Condição de contorno e carregamento no modelo**

O refinamento foi efetuado variando a largura do elemento no plano da seção transversal, e o comprimento do elemento na direção longitudinal do perfil é fixado como o triplo dessa largura. O valor do momento crítico correspondente ao primeiro modo de flambagem foi extraído para cada refinamento, sendo considerada convergente a malha que retornou um valor de momento igual ou inferior a 0,5% do momento crítico oriundo da malha testada anteriormente. A análise de convergência da malha é posta na Figura 5.



**Figura 5. Análise de convergência.**

Pelo critério adotado, foi constatada convergência na malha cujos elementos apresentam largura de 2mm e, portanto, comprimento de 6mm. Essa dimensão corresponde a um total de 89 elementos quadrangulares distribuídos ao longo da seção transversal.

## 4.2 Calibração do modelo numérico

Para calibração do modelo numérico, foi feita uma análise de flambagem do perfil via ANSYS 18.0, onde foram extraídos os esforços críticos,  $N_{cr}$  e  $M_{cr}$ , correspondentes aos modos de flambagem para duas situações de carregamento respectivamente, compressão pura e momento fletor uniforme (aplicado de maneira análoga ao demonstrado na Figura 4). Os valores foram calculados para comprimentos de 1m a 3m, em incrementos de 20cm. Os resultados numéricos de carga crítica  $N_{cr}$  foram comparados com a equação de Euler enquanto os valores de momento crítico  $M_{cr}$  à flambagem lateral com torção (FLT), à flambagem distorcional (FD) e à flambagem local (FL) foram confrontados com as formulações da ABNT NBR 14762:2010. Adicionalmente, os momentos críticos de FD e FL também foram comparados com os resultados do programa CUFSM, que emprega como formulação de cálculo o método das faixas finitas.

Por fim, foram calculados os desvios percentuais para cada comprimento e computada uma média simples. A métrica de desvio percentual adotada é posta na Eq.(1). As variáveis,  $V_{ref}$  e  $V_{ansys}$ , correspondem aos valores calculados pela referência e pelo *software*, respectivamente.

$$desvio \% = \left( \frac{V_{ref}}{V_{ansys}} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

Os tipos de análises efetuadas bem como seus erros percentuais em relação à cada formulação de referência podem ser observados de forma resumida na Tabela (1). Ressalta-se que todas as análises foram efetuadas em torno do eixo x, por este apresentar menor inércia.

**Tabela 1. Desvios percentuais de esforços críticos de flambagem.**

| Tipos de análise       | Desvio médio (%) |       |
|------------------------|------------------|-------|
|                        | EULER / NBR      | CUFSM |
| Compressão Simples     | 2,68             | N/A   |
| FLT                    | 4,03             | N/A   |
| Flambagem distorcional | 22,90            | 1,4   |
| Flambagem local        | 71,44            | 4,61  |

Deve-se ressaltar que tanto a equação de Euler quanto a formulação da norma para  $M_{cr}$  (FLT) foram desenvolvidas considerando-se a teoria de barras, levando em conta a hipótese de manutenção da forma da seção transversal, enquanto os modelos numéricos adotam elementos de placas. A análise numérica evidencia o fenômeno da distorção da seção transversal e promove diminuição nos valores calculados de esforços críticos o que reflete no pequeno desvio observado para os esforços  $N_{cr}$  e  $M_{cr}$  (FLT).

Repara-se que as análises de flambagem distorcional e local, as análises numéricas exibiram pouca divergência entre si. Porém, devido as abordagens de cálculo da ABNT NBR 14762:2010, observa-se grande discrepância de resultados entre a norma e a análise por elementos finitos do perfil. Portanto, como parâmetro de calibração adicional, foi verificado o

desvio padrão dos percentuais de erros para cada comprimento. Esses resultados são postos na tabela 2.

**Tabela 2. Desvio padrão.**

| Tipo de análise | Desvio padrão (%) |       |
|-----------------|-------------------|-------|
|                 | EULER / NBR       | CUFSM |
| $N_{cr}$        | 0,34              | N/A   |
| $M_{cr}$ (FLT)  | 0,42              | N/A   |
| $M_{cr}$ (FD)   | 1,73              | 0,51  |
| $M_{cr}$ (FL)   | 0,09              | 0,06  |

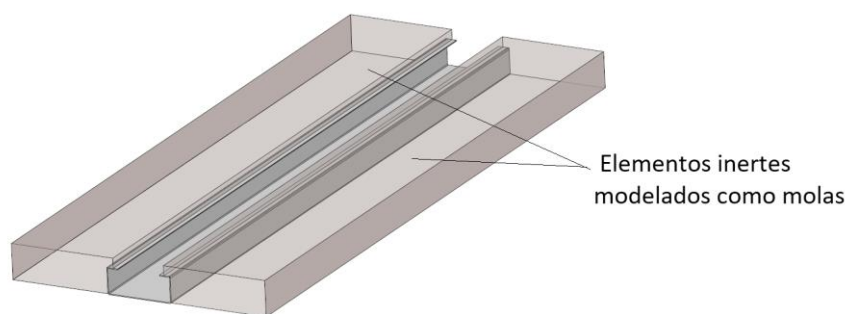
Os valores de desvio padrão computados indicam consistência na medida de erro entre os valores de referência e os valores obtidos via método dos elementos finitos.

### 4.3 Primeira bateria de simulações – Somente perfil de aço

Na primeira bateria de simulações, o perfil é modelado sem a presença do material inerte, com suas extremidades longitudinais contidas por apoios simples. A peça é submetida à momentos unitários em suas extremidades e é feita uma análise de flambagem (*buckling analysis*) com parametrização do comprimento do perfil, de 1 a 3 metros em incrementos de 20cm.

### 4.4 Segunda bateria de simulações – Contribuição de elementos inertes

Na segunda bateria de simulações o tipo de análise, carregamento e as condições de contorno nas extremidades do perfil são análogas à primeira bateria. Nessa etapa, porém, é introduzida a contribuição mecânica dos elementos inertes, representados pelo acoplamento de elementos de mola ao longo das duas superfícies laterais de todo o perfil. O procedimento é reproduzido para duas rigidezes de mola distintas, e para cada rigidez, é efetuada uma parametrização do comprimento idêntica à discriminada na primeira bateria de simulações. O perfil “U” enrijecido contido pelo material inerte é representado na Figura 6.



**Figura 6. Representação de elementos inertes acoplados ao perfil.**

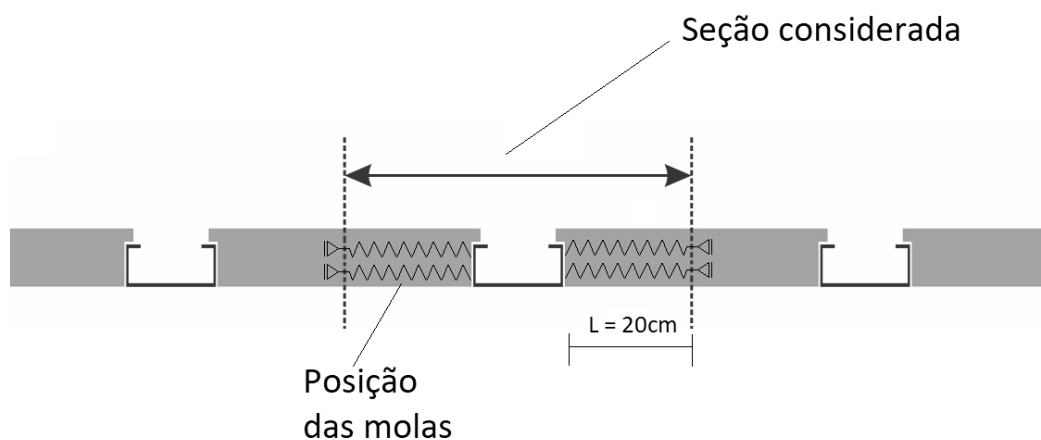


Para a modelagem das molas no ANSYS 18.0, utilizou-se o elemento COMBIN40, caracterizado por apenas um grau de liberdade, na direção x, tomada como perpendicular à alma do perfil (ANSYS, 2018). As molas têm uma de suas extremidades acopladas aos nós dos elementos no perfil, a outra extremidade tem o deslocamento na direção x impedido. A rigidez  $k$  é calculada a partir do módulo de elasticidade do material inerte escolhido, no caso, o poliestireno expandido (EPS). A formulação adotada para o cálculo de  $k$  é exposta nas Eq.(2).

$$k = \frac{EA}{L} \quad (3)$$

Onde  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal,  $L$  é o comprimento equivalente da mola e  $A$  corresponde a área de seção transversal equivalente.

Em um sistema de lajes mistas nervuradas real, o vão transversal ao comprimento do perfil é formado por uma sequência de diversos elementos inertes encaixados entre perfis de aço formados a frio. Como o modelo em análise contempla somente um perfil, foi considerado como largura dos elementos inertes (e portanto comprimento  $L$  das molas) metade da largura de uma peça de EPS corriqueiramente implementada em lajes nervuradas unidirecionais, o que corresponde a 20cm. Uma representação da orientação das molas, bem como seu comprimento é posta na Figura 7.



**Figura 7. Orientação das molas e seção considerada para análise.**

Tal escolha do comprimento da mola parte da premissa de que o EPS recebe dos perfis de aço à ele adjacentes, solicitações de mesma intensidade porém de sentidos opostos, havendo equilíbrio de forças na linha de centro do material, que delimita a região considerada na presente análise.

A área utilizada para o cálculo da rigidez de mola é tomada como a área de influência atribuída a cada nó de elemento, correspondente à um retângulo de aresta horizontal e vertical iguais à metade da distância horizontal e vertical entre nós, respectivamente.

Por fim, definiram-se as rigidezes de mola equivalente dos materiais inertes selecionados. Para tanto, utilizou-se do trabalho de Chen et al (2015), que determina o módulo de elasticidade longitudinal dos EPS 13 e 28 (denominados tais devido as suas densidades), como sendo 2,7

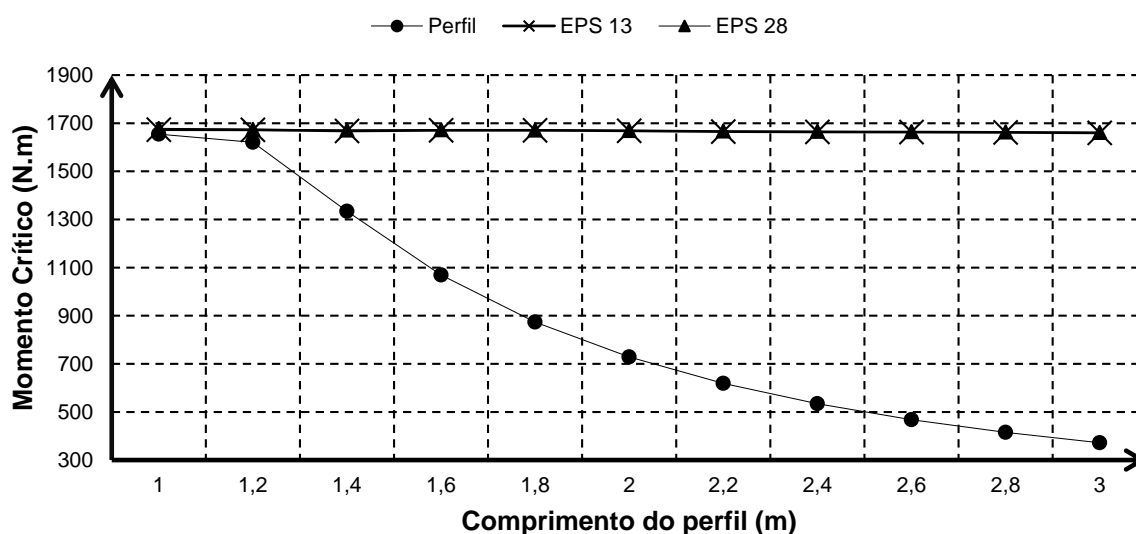
MPa e 4,8 MPa, respectivamente. As rigidezes são calculadas conforme Eq.(2). A Tabela 3 resumi os dados utilizados para modelagem dos elementos inertes a partir de molas de rigidez equivalente.

**Tabela 3. Dados para modelagem dos elementos inertes.**

| Material | Propriedades Geométricas |                      | Propriedades do material |          |
|----------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------|
|          | L (mm)                   | A (mm <sup>2</sup> ) | E (MPa)                  | k (N/mm) |
| EPS 13   | 200                      | 12                   | 2,7                      | 0,162    |
| EPS 28   |                          |                      | 4,8                      | 0,288    |

## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para se obter uma visão geral da influência dos materiais inertes, foram extraídos os esforços críticos correspondentes ao primeiro modo de flambagem para todos os comprimentos de cada modelo analisado. Foram extraídas também, plotagens dos perfis deformados para que se pudesse classificar o tipo de flambagem previsto pelo *software*. A parcela quantitativa da análise é feita com base no gráfico da Figura 8.



**Figura 8. Momento Crítico vs. Comprimento do perfil.**

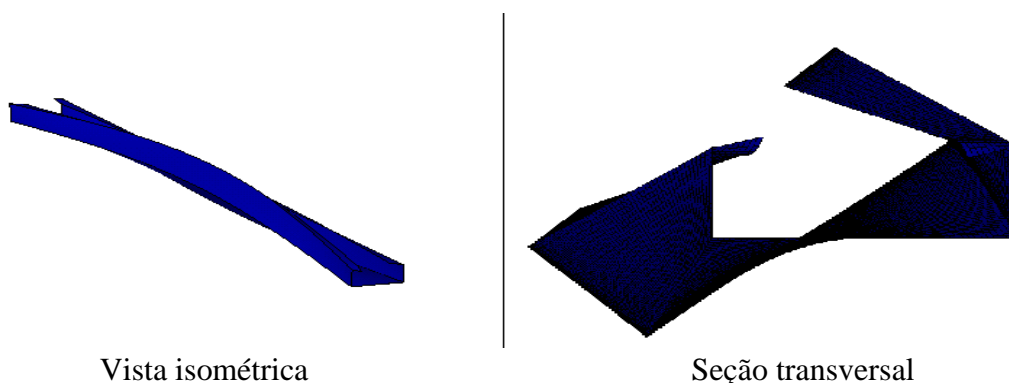
Pelo gráfico observa-se que a inclusão das molas nas laterais do perfil aumenta drasticamente o valor dos momentos críticos de flambagem em relação ao modelo inicial do perfil. Essa influência se demonstra pronunciada para comprimentos superiores à 1,2m. O gráfico também indica que houve pouca variação de resultados nos modelos que incluem o material inerte, tanto em relação ao comprimento da peça quanto em relação a parametrização da rigidez das molas representativas dos materiais inertes. Além do valor numérico desses esforços, a inclusão das molas também afeta os modos de flambagem qualitativamente. Os

modos de flambagem predominantes observados nas plotagens geradas via ANSYS 18.0 são resumidos na Tabela 4.

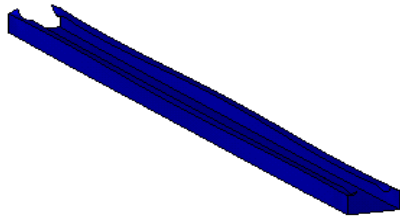
**Tabela 4. Análise qualitativa do primeiro modo de flambagem.**

| Comprimento (m) | Somente perfil | Modo de flambagem    |                      |
|-----------------|----------------|----------------------|----------------------|
|                 |                | Perfil com EPS13     | Perfil com EPS 28    |
| 1,0             | Distorcional   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 1,2             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 1,4             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 1,6             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 1,8             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 2,0             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 2,2             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 2,4             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 2,6             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 2,8             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |
| 3,0             | Global (FLT)   | Local e distorcional | Local e distorcional |

Ao contrário do modelo composto somente pelo perfil “U”, nos modelos de perfil contidos por molas não há incidência de FLT no primeiro modo de flambagem dentro da faixa de comprimentos analisada, indicando que a presença dos elementos inertes colabora para resistência da peça à incidência de flambagem global. A diferença no tipo de flambagem pode ser visualizada pelas Figuras 9 e 10, que ilustram os modos extraídos do ANSYS 18.0 para um perfil de 1,4m sem molas e com molas representativas do EPS 13, respectivamente.



**Figura 9: Primeiro modo de flambagem. L=1,4m, sem molas.**



Vista isométrica



Seção transversal

**Figura 10: Primeiro modo de flambagem.  $L=1,4m$ , EPS 13.**

Devida a proximidade de resultados e semelhança do modo de flambagem, apenas o perfil deformado contido por molas representativas do EPS 13 é exposto. Observa-se claramente pelas figuras a incidência da flambagem lateral com torção no perfil modelado sem presença do material inerte, enquanto os perfis com molas exibem modos de flambagem local com pequeno grau de distorção da seção transversal. Esse comportamento, como indicado na Tabela 4, se repete para todos os comprimentos acima de 1,2m nos três modelos. Ressalta-se que a baixa variação dos valores no momento crítico dos perfis modelados com contenção de mola para todos os comprimentos é condizente com a predominância do modo de flambagem distorcional, uma vez que o esforço crítico que o ocasiona depende exclusivamente das características da seção transversal e do material.

## 6 CONCLUSÕES

Na presente pesquisa, a validação do modelo numérico exibiu, de forma geral, comportamento aderente com previsões efetuadas a partir de outros métodos de cálculo. E apesar da constatação da consistência do modelo através do desvivo padrão de resultados, o mesmo ainda exibe uma discrepância considerável com recomendações normativas mais conservadoras. Com base nessa análise, as conclusões apresentadas não necessariamente representam de forma fiel a realidade.

Após as análises efetuadas, observa-se que, proveniente que o modelo numérico adotado represente a realidade de maneira fidedigna, a presença dos elementos inertes nas extremidades laterais do perfil têm impacto considerável quanto a incidência de modos de flambagem globais. O aumento de resistência mecânica oferecido pelo acoplamento das molas elimina a flambagem lateral com torção em comprimentos de um a três metros. Tal observação indica que a possível resistência oferecida pelo contato dos elementos inertes com o perfil tem potencial de ocasionar ganhos operacionais como economia de tempo e dinheiro com escoramento dos perfis durante a fase de construção por exemplo, já que o aumento da resistência à um estado limite diretamente relacionado com o comprimento da peça, permite, proveniente que parâmetros do estado limite de serviço sejam obedecidos, que sejam utilizadas menos escoras por metro.



Em outra nota, a análise qualitativa dos primeiros modos de flambagem serve apenas parcialmente como uma descrição do comportamento da estrutura quando contida lateralmente por material inerte. A observação de apenas um tipo de flambagem nesses modelos indica que seria prudente uma parametrização do comprimento do perfil com escopo mais abrangente. Adicionalmente, a proximidade dos valores de momento crítico entre ambos os modelos contidos lateralmente sugere que seria de interesse aumentar também o escopo da parametrização das rigidezes das molas em contato com o perfil de aço.

Em suma, apesar de incertezas acerca do modelo numérico e de algumas limitações no escopo da pesquisa, a análise efetuada apresenta indicativos de que os elementos inertes utilizados como enchimento entre perfis de aço em sistemas de lajes mistas nervuradas, podem contribuir para a resistência mecânica da laje durante a fase de construção. Porém, pela presente pesquisa se tratar de uma investigação puramente numérica, análises experimentais são recomendadas para determinar a acurácia das conclusões apresentadas.



## REFERÊNCIAS

- ANSYS, 2018. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. Canonsburg, Pa: ANSYS, Inc.
- ANSYS®: *Academic Research. Multiphysics. Release 18.0*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. *NBR 6355: 2012 Perfis Estruturais de Aço Formados a Frio - Padronização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010. *NBR 14762: 2010 Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio*. Rio de Janeiro, 2010.
- Beltrão, A. J. N., 2003. *Comportamento Estrutural de Lajes-mistas com Corrugações na Alma de Perfis de Chapa Dobrada*. Rio de Janeiro, 2003. 124p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio.
- Carvalho, P. R. M., Grigoletti, G., Barbosa, G. D., 2014. *Curso básico de perfis de aço formados a frio*. 3ª edição, 370p. Porto Alegre: [s. n.].
- Chen, W. et al., 2015 Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene. *Materials & Design*, [s.l.], v. 69, p.170-180.
- Chodraui, G. M. B., Malite, M., 2007. Flambagem por Distorção da Seção Transversal em Perfis de Aço Formados à Frio Submetidos à Compressão Centrada e Flexão. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 9, n. 37, p.27-47.
- Souza, V. C. M., Ripper, T., 2009. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo, Editora Pini.
- Johnson, R. P., 2004. *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing.
- Queiroz, G., Pimenta, R. J., Mata, L. A. C., 2001. *Elementos das Estruturas Mistas Aço-Concreto*. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 336p.
- Sieg, A. P. A., 2015. *Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada*. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Silva, E. L.; Pierin, I.; Silva, V. P., 2014. *Estruturas Compostas por Perfis Formados à Frio: Dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e Aplicação Conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil.
- Takey, T. H., 2001 *Sistemas de Laje Mista para Edificações com Uso de Perfis de Chapa de Metálica*. Dissertação de Mestrado, 164p. Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Vianna, J. C., 2005. *Sistema de Laje Mista para Edificações Residenciais com o uso de Perfis Embossados de Chapa Dobrada*. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



# XIII SIMMEC

Simpósio de Mecânica Computacional

29 de Outubro a 1º de Novembro de 2018  
UFES - Campus Goiabeiras - Vitória, ES

