



XIV Congresso Brasileiro  
de Pontes e Estruturas

## Avaliação da Resistência de Lajes Mistas com Fôrma de Aço Incorporada por Meio do Método Dos Elementos Finitos

Juçara Mello<sup>1</sup>, Guilherme Alencar<sup>2</sup>, Hermano Cardoso<sup>3</sup>, Rodrigo Lameiras<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil / Universidade de Brasília /  
j.hingrid2@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Universidade de Brasília / guilherme.alencar@unb.br

<sup>3</sup> Global R&D Brazil/ ArcelorMittal Brasil / hermano.cardoso@arcelormittal.com.br

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Universidade de Brasília / rmlameiras@unb.br

### Resumo

A laje com fôrma de aço incorporada, comumente conhecida pelo termo em língua inglesa *steel deck*, é um elemento estrutural misto composto por concreto e aço, e pode ser utilizada como tabuleiro de pontes rodoviárias metálicas e mistas aço-concreto. Das inúmeras pesquisas experimentais realizadas, sabe-se que o modo de ruptura mais comum nas lajes mistas é por cisalhamento longitudinal. Esse modo de ruptura consiste na perda de aderência na interface do sistema composto e ocorre, frequentemente, antes de o sistema atingir sua capacidade total à flexão. Assim, o dimensionamento desse sistema construtivo é determinado pelo valor da resistência ao cisalhamento longitudinal, sendo esse valor obtido através de duas metodologias: método *m-k* ou método da interação parcial. Ambos os métodos são embasados no ensaio de flexão em quatro pontos proposto pelo EN 1994-1-1(2011) e pela ABNT NBR 16421 (2015). A simulação computacional por meio do método dos elementos finitos é uma maneira alternativa de simular esse tipo de ensaio. Assim, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de simular numericamente o efeito dos parâmetros relevantes para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal na interface concreto-aço de lajes mistas com concreto tradicional utilizando a fôrma metálica Polydeck 59s comercializada pela ArcelorMittal Brasil. Foi realizada uma adaptação de uma metodologia numérico-computacional para simulação de ensaios de flexão de lajes mistas em quatro pontos da literatura com produtos e materiais do mercado brasileiro, utilizando o programa computacional ANSYS, baseado no Método dos Elementos Finitos juntamente com a linguagem de programação APDL (*ANSYS Programming Design Language*). Futuramente, poderá haver calibrações desse trabalho com ensaios experimentais, contudo essas simulações apresentam valores coerentes com a literatura considerando os valores encontrados por outros autores. Com relação ao modo de ruptura por cisalhamento longitudinal, as simulações numéricas realizadas apresentaram resistências últimas com bom desempenho.

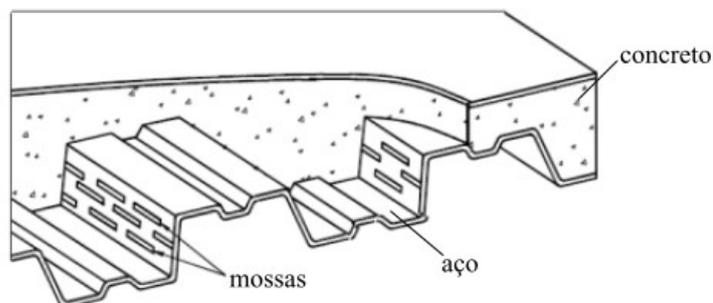
### Palavras-chave

Laje mista; *steel deck*; cisalhamento longitudinal; simulação numérico-computacional; elementos finitos.

### Introdução

A utilização de estruturas mistas na construção civil surgiu através da necessidade de proteger a construção dos danos decorrentes de incêndios. A princípio não era o objetivo tornar o uso do aço com o concreto armado um elemento estrutural, entretanto ao verificar a utilização desses materiais em conjunto, pôde-se encontrar um método construtivo eficiente, econômico e sustentável para essa finalidade. A laje *steel deck* (Figura 1), também chamada de laje com fôrma de aço incorporada é um

elemento estrutural misto composto por concreto e aço. Na fase final do seu processo construtivo, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, e esta pode substituir em parte ou completamente a armadura de tração da laje. Já na fase inicial, ou seja, antes de o concreto atingir 75% da resistência à compressão especificada, a fôrma de aço, comumente chamada de telha-fôrma metálica, suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção, conforme apresentado na ABNT NBR 8800 (2008).



**Figura 1- Modelo de laje *steel deck* (Grossi, 2016).**

O comportamento misto da laje depende da capacidade em resistir aos esforços de cisalhamento presentes na interface aço-concreto. Basicamente, três mecanismos são responsáveis pela capacidade resistente dessa interface, são eles: a aderência inicial de natureza química, a ligação mecânica (mossas) e o atrito. Além disso, outras variáveis influenciam no comportamento mecânico apresentado pelas lajes mistas, os principais são: a geometria da fôrma, a espessura da chapa metálica, a resistência da capa de concreto armado e o comprimento do vão de cisalhamento (Santos & Malite, 2019).

A verificação deste tipo de laje pelo Método dos Estados-Limites considera os possíveis modos de falha associados às condições em que as solicitações de cálculo como momento fletor, cisalhamento longitudinal, cisalhamento vertical ou punção ultrapassam a resistência de cálculo das lajes. Contudo, a falha por cisalhamento longitudinal é a mais frequente nas lajes mistas. Esse modo de ruptura consiste na perda de aderência na interface do sistema composto e ocorre antes de o sistema atingir a sua capacidade total a flexão. O dimensionamento recomendado através dos modelos normativos existentes propõe o uso de dois métodos de cálculo, a saber, o método dos coeficientes  $m-k$  e o método da interação parcial. Para a obtenção das resistências de projeto a partir destes métodos, torna-se necessário a realização de ensaios experimentais de flexão de quatro pontos. Esse ensaio encontra-se descrito no EN 1994-1-1(2011), e é normalmente executado pelo fabricante da fôrma metálica para obtenção dos coeficientes  $m-k$ .

Por conseguinte, a realização desse ensaio se torna onerosa partindo do princípio da necessidade de variação de parâmetros e, conseqüentemente, na diversidade de protótipos para obtenção de um resultado satisfatório. Assim, o uso da análise numérica, baseada em resultados experimentais, após calibrada e validada pode ser uma alternativa à realização de mais ensaios (Shobaki, 2000). Assim, este trabalho propõe o estudo do modo de falha por cisalhamento longitudinal em lajes mistas a partir da realização de análises numéricas com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) com a consideração do comportamento não-linear físico e geométrico dos materiais. Nesse contexto, este trabalho propõe-se a combinar e adaptar uma metodologia desenvolvida na Universidade Politécnica da Catalunha (Soltanalipour *et al.*, 2022) para realização de simulações em elementos finitos de ensaio de flexão em 4 pontos de lajes mistas com telha-fôrma metálica incorporada, com modelação explícita da geometria das mossas.

Para este fim, com o objetivo de regionalizar esta metodologia de simulação em elementos finitos com produtos e materiais disponíveis no mercado da construção civil do Brasil, foi escolhida para modelação numérica uma telha-fôrma metálica denominada Polydeck 59s, comercializada

nacionalmente pela ArcelorMittal Brasil S.A./Perfilor S.A. Construções, Indústria e Comércio. Uma vez consolidada a metodologia numérica para esta laje em específico, estudos paramétricos futuros permitirão o estudo aprofundado do comportamento misto das lajes.

### Dimensionamento de lajes mistas ao cisalhamento longitudinal através do método $m-k$

O método  $m-k$  é um método semiempírico apresentado pela ABNT NBR 8800 (2008) e o EN1994-1-1 (2011) para verificar a resistência ao cisalhamento longitudinal das lajes mistas que relaciona a resistência nominal ao esforço cortante através de parâmetros de ensaio. Ou seja, para se verificar a resistência ao cisalhamento longitudinal utiliza-se a sollicitação de corte vertical. De acordo com essas recomendações normativas, o modo de falha ao cisalhamento longitudinal é verificado se o máximo esforço sollicitante de corte de cálculo,  $V_{Sd}$ , for menor que o esforço resistente de cálculo ao corte da laje,  $V_{\ell,Rd}$ , que pode ser calculado da seguinte forma:

$$V_{Sd} \leq V_{\ell,Rd} = \frac{bd_F \left[ \left( \frac{mA_{F,ef}}{bL_s} \right) + k \right]}{\gamma_{s\ell}} \quad (1)$$

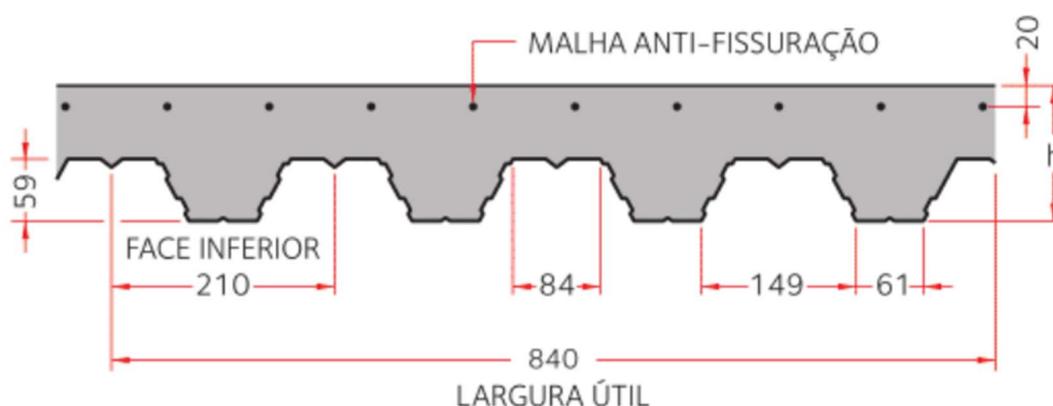
onde:

- $V_{Sd}$  Força cortante sollicitante de cálculo;
- $V_{\ell,Rd}$  Resistência de cálculo ao corte (modo de falha: cisalhamento longitudinal);
- $d_F$  é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma, expressa em milímetros;
- $b$  é a largura unitária da laje;
- $L_s$  é o vão de cisalhamento, expresso em milímetros;
- $m$  e  $k$  são constantes empíricas, em Newtons por milímetros quadrado (N/mm<sup>2</sup>), obtidas por meio de ensaios realizados conforme o EN1994-1-1 (2011);
- $\gamma_{s\ell}$  é o coeficiente de ponderação da resistência, sugerido pelo EN1994-1-1 (2011), igual a 1,25;
- $A_{F,ef}$  é a área da seção efetiva da fôrma.

Os coeficientes  $m-k$  são obtidos por meio de regressão linear simples dos resultados do ensaio de flexão de quatro pontos, na forma  $Y = m \cdot X + k$ , em que  $Y = V_{l,u,FEM} / (b \cdot d_F)$  e  $X = A_{F,ef} / (b \cdot L_s)$ .

### Metodologia

Esse trabalho foi desenvolvido utilizando a metodologia de simulação numérico-computacional com base no programa de elementos finitos ANSYS, versão 2021R2, juntamente com a linguagem de programação APDL (*ANSYS Programming Design Language*). Usou-se como base a metodologia apresentada no artigo de Soltanalipour *et al.* (2022) com adaptação para os materiais do mercado da construção civil no Brasil, de modo a incluir a geometria de uma telha-fôrma metálica presente no mercado brasileiro, a Polydeck 59s (Figura 2), considerando a normativa nacional com utilização das disposições das normas NBR 6118 (2014), NBR 8800 (2008), NBR 14762 (2010) e ABNT NBR 6120 (2019).



**Figura 2 - Características geométricas do Polydeck 59S (CATÁLOGO TÉCNICO POLYDECK 59S, 2016) (medidas em milímetros).**

### Chapa perfilada

O modelo constitutivo para o aço da chapa perfilada adotado é bilinear isotrópico, inicialmente como linear elástico, e em seguida como perfeitamente plástico, isto é, modelo elastoplástico perfeito, tanto em tração quanto em compressão.

**Tabela 1 – Características da chapa perfilada**

<b>Modelo constitutivo</b>	Bilinear isotrópico
<b>Módulo de Young do aço</b>	200 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,3
<b>Tensão de escoamento nominal</b>	280 MPa
<b>Densidade</b>	7850 kg/m <sup>3</sup>
<b>Crítério de plasticidade</b>	Von Mises
<b>Tensão de ruptura</b>	Não definida

O elemento finito da chapa perfilada adotado nas modelagens foi o SHELL281 (*ANSYS Element Reference*, 2013), que se trata de um elemento finito com função de forma quadrática com 6 graus de liberdade por nó (translações e rotações nas três direções cartesianas) e é bastante apropriado para chapas muito finas que sofrem grandes rotações e deformações em regime não-linear, sendo o caso da telha-fôrma metálica ao fim do ensaio de flexão em quatro pontos. Para a região das mossas, que possui uma geometria complexa, foi utilizada sua forma triangular, com 6 nós, enquanto para a região afastada das mossas, a sua forma retangular mais simples com 8 nós é utilizada. As espessuras dos elementos finitos são as mesmas espessuras efetivas da telha-fôrma metálica, descontando-se o revestimento galvanizado. Por exemplo, comercialmente o Polydeck 59s é disponibilizado nas espessuras nominais 0,80, 0,95 e 1,25 milímetros. Entretanto, a espessura efetiva para fins estruturais deve descontar o revestimento galvanizado, que para o ZAR 280 com revestimento Z275, é da ordem de 0,02 milímetros por face. Portanto, as espessuras efetivas a serem utilizadas para estes elementos serão 0,76, 0,91 e 1,21 milímetros.

### Concreto

O modelo constitutivo adotado para o comportamento não-linear do concreto foi o de Menétrey-Willam (Menétrey, 1994), que é baseado na teoria da plasticidade e na superfície de ruptura de Willam & Warnke (1975). Este modelo é capaz de representar muitos comportamentos mecânicos importantes do concreto, por exemplo: resistência à tração diferente da resistência à compressão, endurecimento não-linear, amolecimento e dilatância.

**Tabela 2 – Características do concreto**

<b>Modelo constitutivo</b>	Menétrey-Willam
<b>Módulo de Young do concreto*</b>	33,6 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,2
<b>Resistência de compressão característica (<math>f_{ck}</math>)</b>	40 MPa
<b>Resistência a compressão média (<math>f_{cm}</math>)*</b>	41 MPa
<b>Densidade</b>	2400 kg/m <sup>3</sup>
<b>Resistência última à tração uniaxial (<math>f_t</math>)</b>	$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$
<b>Resistência à compressão biaxial</b>	1,2 $f_{cm}$
<b>Ângulo de dilatação</b>	13 graus
<b>Funções de amolecimento</b>	Desconsideradas

\*Valor obtido experimentalmente através do trabalho de Silva (2018).

O elemento finito adotado para o concreto foi o elemento finito sólido quadrático SOLID187, com 10 nós, com três graus de liberdade por nó (translação nas três direções cartesianas), apropriado para modelagem e discretização de geometrias bastante irregulares. A utilização deste elemento finito é necessária em razão da geometria complexa de interface entre a chapa metálica e o volume de concreto na região das mossas.

### **Contato entre chapa perfilada e o concreto**

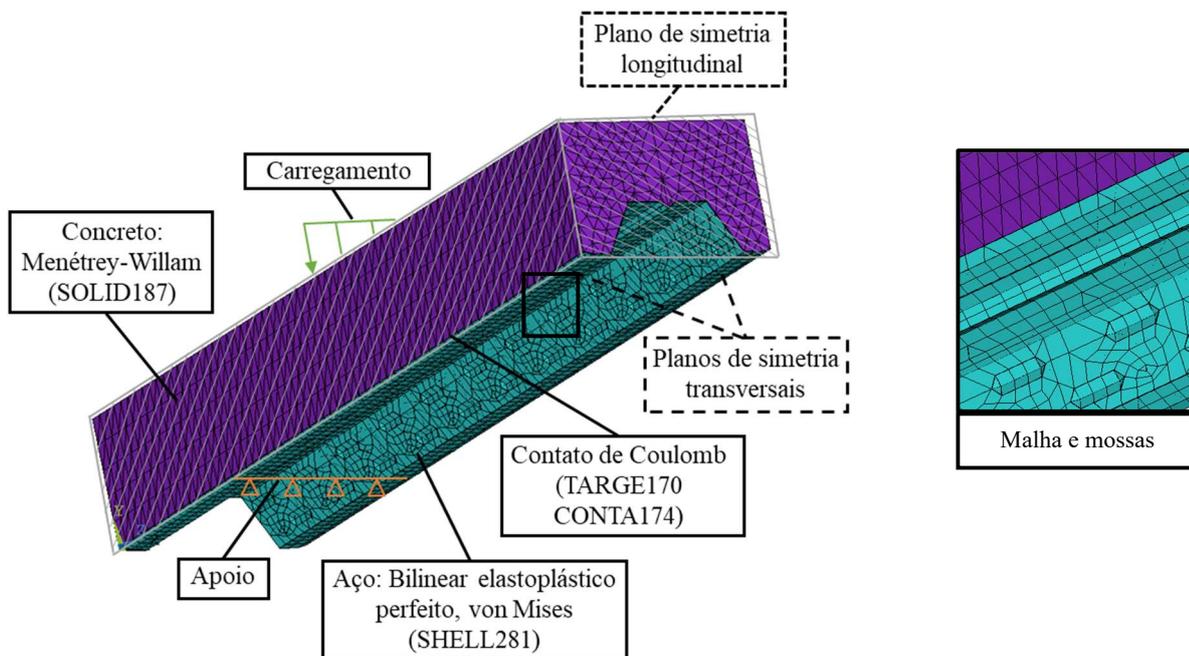
O contato entre o concreto e a fôrma é modelado com base em uma abordagem realística tridimensional, ou seja, a geometria das mossas é representada ao detalhe de modo a reproduzir a interação mecânica real entre os materiais e as mossas. A interface entre o aço e o concreto foi simulada face-a-face através de elementos de contato, que é a abordagem usual no ANSYS. Uma das superfícies é definida como “*target*” (“alvo”), neste caso o concreto, e a outra superfície é definida como “*contact*” (“contato”), neste caso o aço. Para as primeiras superfícies adota-se o elemento finito TARGE170 (*ANSYS Element Reference*, 2013), o qual descreve o limite de um corpo deformável. Para as segundas superfícies (“*contact*”) associam-se os elementos CONTA174. O contato ocorre quando os elementos de contato CONTA174 penetram um dos elementos alvos (“*target*”) definidos pelo TARGE170. A pressão normal se iguala a zero se ocorre algum tipo de separação.

O modelo de atrito adotado entre as superfícies após entrarem em contato é baseado na lei de Coulomb. O coeficiente de atrito é definido como isotrópico e estático (devido à baixa velocidade de aplicação do carregamento no ensaio da laje mista), ou seja, independente da direção de tendência de deslizamento durante o contato, com a lei de Coulomb comportando-se da mesma maneira. O valor utilizado para o atrito entre chapas galvanizadas e o concreto é de 0,2.

### **Método computacional para solução da análise não linear, carregamento, malha e simetria**

O ensaio de flexão em 4 pontos é simulado no ANSYS por meio de análises estáticas incrementais (monotônica) em regime não-linear. Foi utilizado o algoritmo de Newton-Raphson (VAZ, 2011) e para a malha foi adotado um tamanho de 13 milímetros. Também foi utilizado um carregamento controlado por meio de um deslocamento prescrito.

Foram utilizadas três condições de simetria, conforme apresentado na Figura 3, onde tem-se um plano de simetria transversal e dois planos de simetria longitudinal presentes na lateral do menor módulo necessário para a modelagem geométrica. Dessa forma, foi possível espelhar o módulo em relação ao centro da laje e repetir um em cada lado, totalizando um protótipo com três nervuras na largura.



**Figura 3- Modelo computacional em elementos finitos.**

### Simulações iniciais

Tendo realizado todas as definições com as propriedades de cada material, modelos constitutivos, elementos finitos, contato entre materiais, malha e simetria no presente artigo, que é apenas uma prévia do trabalho que está sendo desenvolvido, foi escolhido um valor mínimo em relação ao vão de cisalhamento, que no caso é 1,80 metros, frequentemente utilizado em projetos típicos de pavimentos com lajes mistas, e vãos máximos biapoiados permitidos em catálogo para a altura considerada. Assim, foram realizadas cinco simulações com altura dos protótipos de 15 centímetros, vãos de cisalhamento variando entre 1,80, 2,50 e 2,80 metros e espessuras entre 0,8, 0,95 e 1,25 milímetros conforme apresentado na Tabela 3.

### Resultados e Conclusões

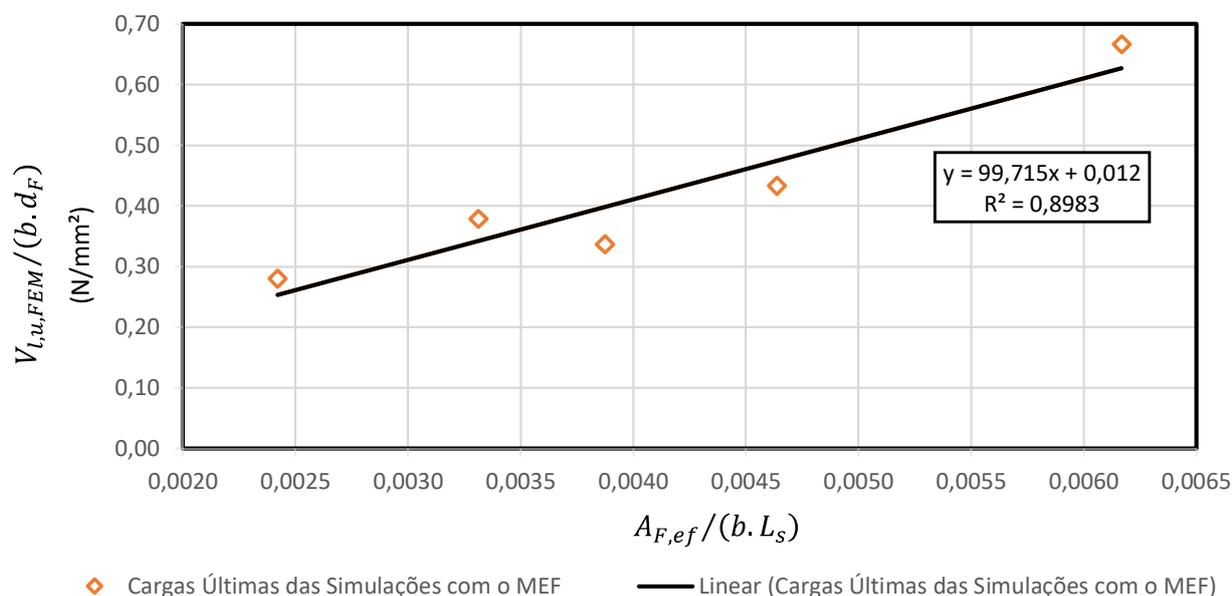
Após a realização das simulações, obtiveram-se os resultados de carga última ( $P_{u,MEF}$ ) para as análises corridas conforme apresentado na Tabela 3. Dessa forma, foi possível utilizar tais resultados de carga e obter o gráfico de regressão linear (Gráfico 1) para obtenção dos coeficientes  $m$  e  $k$  conforme apresentado na Tabela 4. Assim, conclui-se que a reta de tendência apresenta bom desempenho por apresentar valor de correlação linear ( $R$ ) igual a 0,95, sendo a relação entre o eixo Y explicado em 90% pelo eixo X ( $R^2=0,90$ ).

**Tabela 3 – Resultado das análises**

Identificador	t (mm)	L (mm)	L <sub>s</sub> (mm)	$P_{u,MEF}$ (kN)	$V_{\ell,u,MEF} = P_{u,MEF}/2$ (kN)
<b>Análise 1</b>	0,80	1800	450	49,91	24,96
<b>Análise 2</b>	0,80	2800	700	41,52	20,76
<b>Análise 3</b>	0,95	1800	450	64,20	32,10
<b>Análise 4</b>	0,95	2500	625	56,09	28,05
<b>Análise 5</b>	1,25	1800	450	98,76	49,38

**Tabela 4 – Coeficientes  $m$  e  $k$  em Newtons por milímetros quadrado (N/mm<sup>2</sup>)**

$m$	99,71
$k$	0,012



**Gráfico 1 – Regressão linear dos resultados obtidos nas simulações numéricas.**

**Tabela 5 – Alguns valores de  $m$  e  $k$  encontrados na literatura**

Modelo	Altura (mm)	Largura (mm)	Tipo de moesa	$m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k$ (N/mm <sup>2</sup> )	Autor
	46	900	Chevron a 90°	107,53	0,040	Wright <i>et al.</i> (1987)
	76	914	Chevron a 0°	84,67	0,022	Chen (2003)
	55	820	Retangular	87,96	0,032	Marimuthu <i>et al.</i> (2007)
	60	820	Inclinada	98,32	0,080	O Feliz (2011)
	52	830	Retangular	81,95	0,046	Hedao <i>et al.</i> (2012)
	61	820	Tipo "I"	95,69	0,022	Soltanalipour <i>et al.</i> (2020)

É possível verificar também que os resultados encontrados para os valores dos coeficientes  $m$  e  $k$  nessa simulação em elementos finitos está dentro dos padrões de resultados apresentados nos trabalhos citados na Tabela 5.

Por conseguinte, é importante ressaltar que antes de maiores conclusões serem extraídas dos resultados das análises numéricas, os modelos em elementos finitos precisam ser calibrados com resultados experimentais. Também se ressalta que esse trabalho está sendo desenvolvido no contexto de uma dissertação de mestrado e que, futuramente, em uma próxima etapa da pesquisa haverá a realização de mais simulações em elementos finitos para explorar a variação de todos os parâmetros envolvidos nas análises.

Por fim, em agradecimento, este trabalho foi possível pelo apoio do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da ArcelorMittal Brasil.

## Referências

- ABNT NBR 16421. (2015). *Telha-fôrma de aço colaborante para laje mista de aço e concreto - Requisitos e ensaios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6118. (2014). *Projeto de estruturas de concreto -Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6120. (2019). *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 8800. (2008). *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 14762. (2010). *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANSYS Element Reference. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*.
- CATÁLOGO TÉCNICO POLYDECK 59S. (2016). *12ª Ed.*
- CHEN, S. (2003). *Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints*. Journal of Constructional Steel Research, 59(3), 385–403. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00034-2)
- EN 1994-1-1. (2011). *Projeto de estruturas mista de aço-betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios* (p. 130). CEN.
- O FELIZ. (2011). *Manual De Utilização Do Software H60 Calculator*. Laje Mista (p. 59).
- GROSSI, L. G. F. (2016). *Sobre o Comportamento Estrutural e o Dimensionamento de Lajes Mistas de Aço e Concreto com Armadura Adicional*. Universidade de São Paulo.
- HEDAOO, N. A., GUPTA, L. M., & RONGHE, G. N. (2012). *Design of composite slabs with profiled steel decking: a comparison between experimental and analytical studies*. International Journal of Advanced Structural Engineering, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/2008-6695-3-1>
- MARIMUTHU, V., SEETHARAMAN, S., ARUL JAYACHANDRAN, S., CHELLAPPAN, A., BANDYOPADHYAY, T. K., & DUTTA, D. (2007). *Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic (m - k) values of the embossed profiled sheet*. Journal of Constructional Steel Research, 63(6), 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.07.009>
- MENÉTREY, P. (1994). *Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures*. EPFL.
- SANTOS, C., & MALITE, M. (2019). *Análise numérica de lajes mistas de aço e concreto*. *Construmetal Latinoamericano Da Construção Metálica*, 1–28.
- SHOBAKI, I. (2000). *The Behaviour of Profiled Steel Sheet/Concrete Composite Slabs* Ph D. Thesis Salford (UK): University of Salford.
- SOLTANALIPOUR, M., FERRER, M., & MARIMON, F. (2022). *Experimental and numerical study of the ductility of open-rib and reentrant composite slabs*. Engineering Structures, 256(March 2021), 113984. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113984>
- SOLTANALIPOUR, M., FERRER, M., MARIMON, F., HOLOMEK, J., BAJER, M., MELCHER, J., & KARMAZÍNOVÁ, M. (2020). *Shear transfer behavior in composite slabs under 4-point standard and uniform-load tests*. Journal of Constructional Steel Research, 164. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105774>
- SILVA, P. C. S. (2018). *Resistência à tração de diferentes tipos de ancoragens embutidas em elementos de concreto armado*. Universidade de Brasília Universidade de Brasília (p. 147).
- Vaz, L. E. (2011). *Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas*.
- WRIGHT, H. D., EVANS, H. R., & HARDING, P. W. (1987). *The use of profiled steel sheeting in floor construction*. Journal of Constructional Steel Research, 7(4), 279–295.