Anais do III Simpósio de Engenharias Integradas
Experiências, Tecnologia e Desafios Reais
Artigo Completo

SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO CHAPA-CONCRETO EM LAJES MISTAS *STEEL DECK* UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS

Autor 1: Wanderson Lacerda dos Santos – Universidade de Brasília (UnB)
242108433@aluno.unb.com

Autor 2: Dr. Raúl Dario Durand Farfán – Universidade de Brasília (UnB)
raul@unb.com

Resumo

Lajes mistas com fôrma de aço incorporada (*steel deck*) são amplamente empregadas devido à rapidez de execução e eficiência estrutural. Entretanto, o cisalhamento longitudinal na interface chapa–concreto constitui um importante desafio de modelagem. Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo numérico usando o pacote computacional *Serendip* para simular diferentes lajes mistas *steel deck* de diferentes autores. O concreto foi representado por elementos sólidos não lineares, a chapa por elementos de casca *elastoplásticos* e a interface por elementos de contato e coesivos. A validação foi realizada com resultados experimentais da literatura, seguida de um estudo paramétrico para avaliar a influência de diferentes parâmetros no comportamento estrutural. As curvas carga–deslocamento apresentaram boa concordância, indicando a capacidade do modelo de representar o comportamento global e os mecanismos associados ao cisalhamento longitudinal.

Palavras-chave: lajes mistas; *steel deck*; elementos finitos; interação aço–concreto; cisalhamento longitudinal.

Abstract

Composite slabs with profiled steel decking (*steel deck*) are widely used due to their fast construction and structural efficiency. However, longitudinal shear at the steel sheet–concrete interface remains a major modeling challenge. In this study, a numerical model was developed using the *Serendip* computational package to simulate composite *steel deck* slabs investigated by different authors. The concrete was represented by nonlinear solid elements, the steel sheet by elastoplastic shell elements, and the interface by contact and cohesive elements. The model was validated against experimental results from the literature, followed by a parametric study to assess the influence of different parameters on structural behavior. The load–displacement curves showed good agreement with the experimental results, demonstrating the model's ability to reproduce the global response and mechanisms associated with longitudinal shear.

Keywords: composite slabs; *steel deck*; finite elements; steel–concrete interaction; longitudinal shear.

1. Introdução

As lajes mistas de aço e concreto com fôrma de aço incorporada (*steel deck*) são amplamente empregadas na construção civil por associarem eficiência estrutural e rapidez construtiva. Durante a execução, a chapa atua como fôrma e, após a concretagem, passa a contribuir para a resistência do sistema, formando uma seção composta com o concreto. A eficiência dessa ação depende, entretanto, da transferência de esforços na interface chapa–concreto (Associação Brasileira de Normas Tĕcnicas 2024).

Segundo (Veljkovic 1996; Marimuthu et al. 2007), a transferência de cisalhamento longitudinal ocorre pela combinação de aderência, atrito e, principalmente, intertravamento mecânico proporcionado pela geometria da chapa. Nesse contexto, parâmetros como a configuração das mossas, a espessura da chapa, as propriedades do concreto e o comprimento do vão de cisalhamento influenciam diretamente a resposta estrutural. O deslizamento relativo entre os materiais constitui, portanto, uma variável importante para caracterizar a evolução da interação e a perda progressiva da ação composta (Loh et al. 2023).

O cisalhamento longitudinal é determinante nos estados limites das lajes *steel deck*, pois rege a degradação da interação chapa-concreto. Embora métodos normativos — como o *m–k* e o da interação parcial — determinem a resistência da conexão, a exigência de ensaios para cada perfil e condição limita a avaliação de novas geometrias e oculta os mecanismos locais de transferência de esforços (Easterling e Young 1992).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) complementa os ensaios experimentais ao modelar em 3D a geometria da chapa, a não linearidade dos materiais e os mecanismos de interface. Dessa forma, reproduz com precisão a resposta carga-deslocamento, o deslizamento relativo e o efeito de variáveis como espessura e atrito (Shamass e Cashell 2019; Loh et al. 2023). Todavia, a formulação de modelos tridimensionais flexíveis a distintas geometrias e aderências parciais é crucial para viabilizar análises paramétricas eficientes, atenuando o alto custo computacional do processamento simultâneo do dano no concreto, da plastificação do aço e da degradação da interface (Shamass e Cashell 2019).

Diante disso, este trabalho desenvolve e valida um modelo numério de elementos finitos para a análise de lajes mistas *steel deck*, considerando a interação parcial chapa–concreto, a não linearidade do concreto e da chapa e o deslizamento na interface. O modelo é validado com resultados experimentais da literatura e, posteriormente, empregado em uma análise paramétrica para verificação da influência do comprimento do vão de cisalhamento, da espessura da chapa, da espessura da capa de concreto, do atrito, da tensão de escoamento e da energia de fratura sobre a resposta estrutural. Ademais, cabe destacar que uma inovação do trabalho é o uso de

elementos coesivos para visualização de fissuras.

2. Referencial teórico

O avanço da simulação de lajes mistas com fôrma metálica incorporada (*steel deck*) busca representar a transferência de cisalhamento longitudinal e a perda da ação composta. A interação aço–concreto depende de três mecanismos: **aderência química**, **atrito interfacial** e **intertravamento mecânico**, promovido pelas mossas (*embossments*) e pela geometria das nervuras (Gholamhoseini et al. 2014; Silva et al. 2024). O deslizamento relativo (*slip*) pode provocar esmagamento local do concreto e afastamento vertical (*uplift*), reduzindo progressivamente a rigidez da interface.

Para representar esses fenômenos, modelos recentes pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) combinam a mecânica do concreto com leis constitutivas de interface (*bond-slip*). O concreto é geralmente discretizado por elementos sólidos, associados a modelos como o Concrete Damaged Plasticity (CDP) ou Menétrey–Willam, enquanto a chapa é representada por elementos de casca elastoplásticos, com comportamento metálico descrito pelo critério de von Mises (Silva et al. 2024).

A interação entre os materiais é modelada principalmente por contato superfície–superfície com atrito de Coulomb ou por conectores e molas com leis de transferência calibrada. A Tabela 1 sintetiza as principais estratégias de modelagem identificadas na literatura recente (2024–2026). Outrossim, é possível perceber pela tabela que nenhum trabalho recente faz uso de elementos coesivos.

Tabela 1: Estado da arte (2024–2026) da modelagem por elementos finitos de lajes mistas *steel deck*.

Referência	Software	Estudo	Modelo Concreto	Modelo Chapa	Interface	Armadura
Silva (2024)	ANSYS	Laje mista / Push-out	Menétrey–Willam	Shell	Mohr–Coulomb / Atrito	Embedded rebar
Mello et al. (2024)	ANSYS	Laje com mossas	SOLID187 (Menétrey–Willam)	SHELL281	TARGE170/CONTA174 (Coulomb)	LINK180 (discreta)
Alali & Tsavdaridis (2024)	ABAQUS	Laje ultra-rasa	Sólido 3D (CDP)	Shell	*Bond-slip* / T3D2	Embedded rebar
Karthiga & Umamaheswari (2024)	ABAQUS	*Steel deck* / CFRP	Sólido 3D (CDP)	S4R	*Bond-slip* / CONN3D2	Rebar + CFRP
Interface Study (2025)	ABAQUS	Agregados reciclados	C3D8R (CDP)	S4R	Superfície–superfície / Friccional	Embedded rebar
Zhang et al. (2026)	ABAQUS/Explicit	Laje profunda / Multiescala	C3D8R (CDP)	S4R	Contato + conectores (CONN3D2)	T3D2 (embutida)

3. Método de Pesquisa

Nesta seção, apresenta-se a metodologia empregada para a simulação tridimensional de lajes mistas *steel deck*, detalhando a formulação constitutiva do concreto, da fôrma de aço, da armadura, dos elementos coesivos e do plano de contato de interface. Adicionalmente, descrevem-se

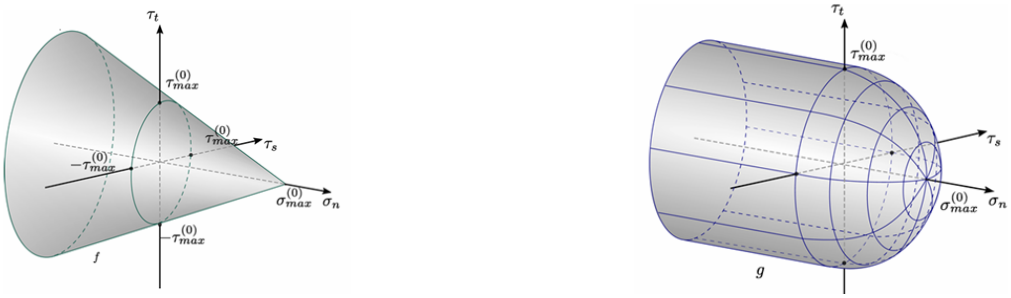
as características das nove lajes analisadas, o arranjo dos ensaios de flexão em quatro pontos e o fluxo de trabalho computacional para o processamento e validação dos modelos numéricos.

3.1. Modelagem do concreto

A modelagem do concreto adota uma abordagem contínua–descontínua, na qual elementos sólidos representam seu comportamento à compressão e elementos coesivos simulam a formação e propagação de fissuras em análises não lineares.
Os elementos coesivos seguem a extensão tridimensional do modelo plasto-coesivo, cuja superfície de escoamento de Coulomb é definida por:

$$f(\sigma, \sigma_{\text{máx}}) = \tau_s^2 + \tau_t^2 + (\sigma_n - \sigma_{\text{máx}}) \tan \varphi = 0 \tag{1}$$

em que σ_n, τ_s e τ_t são as tensões normal e tangenciais, $\sigma_{\text{máx}}$ é a resistência à tração e φ é o ângulo de atrito do material.



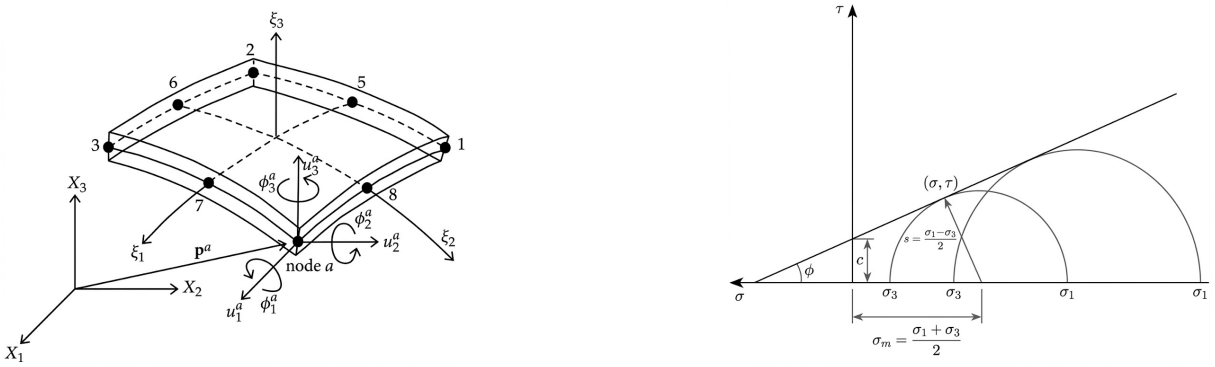
(a) Função de escoamento **(b)** Função potencial plástica

Figura 1: Superfícies do modelo constitutivo (DURAND, 2021).

A Figura 1a apresenta a superfície de escoamento, definida pelas resistências iniciais à tração, $\sigma_{\text{máx}}^{(0)}$, e ao cisalhamento, $\tau_{\text{máx}}^{(0)}$. Já a Figura 1b ilustra a superfície potencial plástica.

3.2. Modelagem da chapa metálica e da interação chapa-concreto

A chapa metálica da laje mista *steel deck* será modelada com *elementos de casca isoparamétricos* (conforme Figura 2a), adotando o critério de Von Mises para o comportamento elástico-plástico da fôrma de aço. A interface com o concreto é representada por modelo de contato com atrito de *Mohr–Coulomb*, permitindo deslizamento e transferência de esforços.



(a) Elemento de casca **(b)** Superfície de Mohr-Coulomb

Figura 2: Representação do elemento de casca e da superfície de plastificação

A interação na interface chapa–concreto é modelada combinando a resposta mecânica do elemento de casca da fôrma metálica com o comportamento do plano de contato regido pelo critério de *Mohr–Coulomb* (ver Figura 2b). Enquanto o elemento de casca representa a rigidez e a plastificação da chapa, a superfície de *Mohr–Coulomb* estabelece o limite de resistência tangencial em função da coesão, do atrito e da tensão normal, permitindo simular a transferência de esforços, a perda de aderência e o deslizamento relativo na interface.

3.3. Modelagem da armadura

A armadura é modelada discretamente por elementos de barra curva quadráticos elastoplásticos perfeitos, com a interação aço–concreto e os efeitos de *bond-slip* representados por elementos de contato barra–volume, conforme a Figura 3. Sua inclusão ocorre apenas no Caso 02.

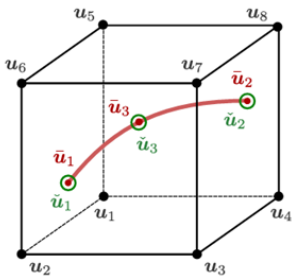


Figura 3: Representação em elementos finitos dos elementos de volume, barra e pontos de controle (DURAND, 2021).

O deslocamento relativo entre a barra e o meio contínuo é calculado a partir dos pontos de controle localizados nas faces do elemento de volume.

3.4. Modelagem dos elementos coesivos

Na modelagem discreta de fraturas, os elementos de volume são conectados entre si por elementos coesivos de espessura nula, inseridos na malha inicial via pré-processamento. Para isso, estendeu-se o algoritmo 2D de (Durand e Silva 2019) para o domínio tridimensional (Figura 4).

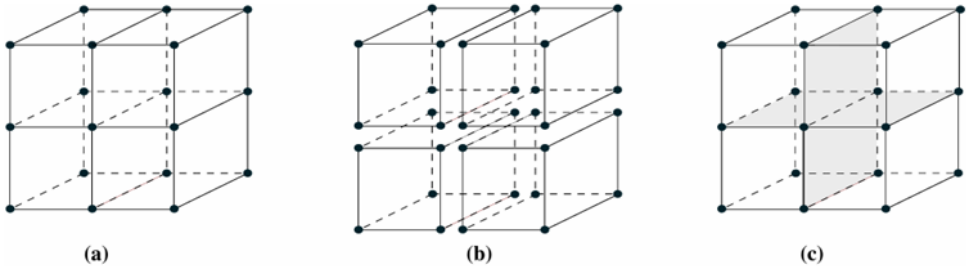


Figura 4: Geração de elementos de interface: a) malha inicial; b) desacoplamento dos elementos; c) malha final com elementos coesivos.

O procedimento consiste em duplicar os nós nodais para desacoplar os elementos de volume e calcular um valor *hash* baseado nas coordenadas das faces. As faces coincidentes (com mesmo *hash*) são então conectadas automaticamente por novos elementos de interface, resultando na malha final atualizada.

3.5. Ensaios de flexão em quatro pontos

Os modelos numéricos foram validados com base em dados de ensaios de flexão em quatro pontos obtidos da literatura, os quais seguem as diretrizes normativas para lajes mistas ao aplicar duas cargas simétricas no vão.

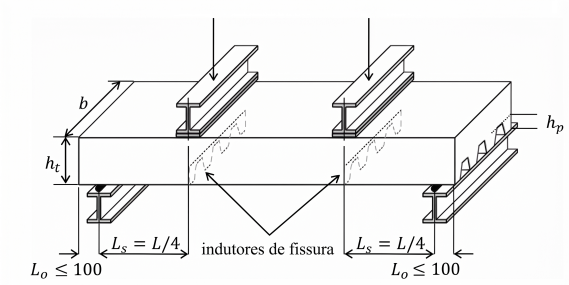


Figura 5: Configuração do ensaio de flexão em quatro pontos segundo o Eurocode 4 (European Committee for Standardization 2026).

As simulações reproduziram de forma monotônica até a ruptura das lajes mistas. Além disso, reproduziu o posicionamento dos apoios, as cargas e o vão de cisalhamento de cada programa

experimental, permitindo a comparação direta entre as curvas numéricas e experimentais de carga–deslocamento.

```
# Apoios
select(model, :element, "casca", :node, (y==0, z==0), tag="apoio1")
select(model, :element, "casca", :node, (y==L, z==0), tag="apoio2")

# Condicoes de contorno
add_bc(stage, :node, "apoio1", ux=0, uy=0, uz=0)
add_bc(stage, :node, "apoio2", uz=0)
add_bc(stage, :edge, (y==Ls, z==H), uz=-0.05)
add_bc(stage, :edge, (y==L-Ls, z==H), uz=-0.05)
```

As condições de contorno foram aplicadas em uma linha de nós na chapa metálica ($z = 0$) para restringir os deslocamentos sem bloquear o deslizamento relativo na interface chapa–concreto. À exceção do Caso 02, referente a uma laje contínua de dois vãos com armadura, os demais modelos foram configurados como biapoiados em flexão a quatro pontos, com o carregamento introduzido via deslocamento prescrito (u_z) na face superior do concreto ($z = H$, em $y = L_s$ e $y = L - L_s$), conforme ilustrado no trecho do código anterior.

3.6. Lajes analisadas

Analisou-se nove lajes mistas *steel deck* de diferentes programas experimentais da literatura, contemplando variadas geometrias de fôrma metálica (nervura aberta e reentrante), espessuras de chapas, vãos e carregamentos, a fim de avaliar a capacidade do modelo numérico em reproduzir os mecanismos de transferência de cisalhamento longitudinal e os modos de ruptura, conforme resumido na Tabela 2.

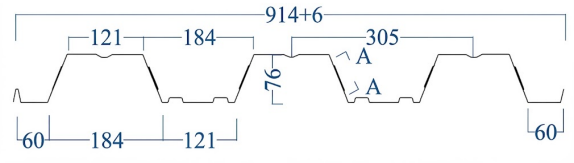
Tabela 2: Características geométricas, mecânicas e de interface das lajes analisadas.

		Propriedades Gerais e Geométricas						**Propriedades do Aço (Fôrma/Casca)**		
Caso	**ID**	L_s **(mm)**	L **(mm)**	b **(mm)**	h_t **(mm)**	h_p **(mm)**	t **(mm)**	f_y **(MPa)**	E_s **(GPa)**	**Carregamento**
01A	CHEN A1	650	2600	914	165	76	0,90	275	200	Estático
01B	CHEN A5	650	2600	914	165	76	0,90	275	210	Estático
02	KF-70	837,5	6900	1200	150	70	0,75	532	203	Estático
03A	P1-2	600	1800	770	75	46	0,90	317	205	Estático
03B	P2-2	600	1800	770	98	46	0,90	317	205	Estático
04A	A51-S-0.8-#A	600	2400	624	180	51	0,80	320	200	Estático
04B	A51-L-0.8-#B	1000	4000	624	180	51	0,80	320	200	Estático
04C	A51-S-1.0-#C	600	2400	624	180	51	1,00	350	200	Estático
04D	A51-L-1.0-#D	1000	4000	624	180	51	1,00	350	200	Estático

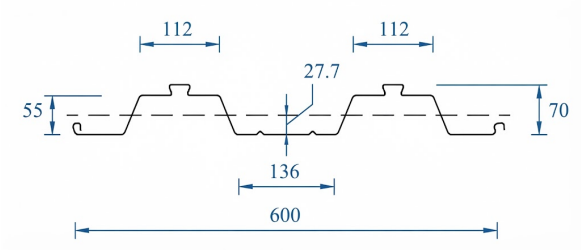
		Propriedades do Concreto				**Parâmetros de Interface (Aço–Concreto)**		
Caso	**ID**	f_{cm} **(kPa)**	E_c **(kPa)**	f_t **(kPa)**	G_F **(kN/m)**	K_n **(kN/m^3)**	K_s **(kN/m^3)**	μ
01A	CHEN A1	$-20,10\times10^3$	$27,133\times10^6$	$1,00\times10^3$	0,35	1×10^8	1×10^8	1,0
01B	CHEN A5	$-20,10\times10^3$	$27,133\times10^6$	$1,30\times10^3$	0,35	1×10^8	1×10^8	1,0
02	KF-70	$-47,90\times10^3$	$33,050\times10^6$	$4,68\times10^3$	0,35	1×10^9	1×10^9	1,0
03A	P1-2	$-22,60\times10^3$	$40,500\times10^6$	$3,44\times10^3$	0,35	1×10^8	1×10^8	1,4
03B	P2-2	$-28,60\times10^3$	$40,500\times10^6$	$4,54\times10^3$	0,30	1×10^9	1×10^9	1,4
04A	A51-S-0.8-#A	$-26,90\times10^3$	$40,000\times10^6$	$4,98\times10^3$	0,30	5×10^9	5×10^9	1,0
04B	A51-L-0.8-#B	$-26,90\times10^3$	$30,000\times10^6$	$3,08\times10^3$	0,10	1×10^8	5×10^8	1,0
04C	A51-S-1.0-#C	$-26,90\times10^3$	$30,000\times10^6$	$1,20\times10^3$	0,25	1×10^8	1×10^6	0,9
04D	A51-L-1.0-#D	$-26,90\times10^3$	$30,000\times10^6$	$2,94\times10^3$	0,25	1×10^8	5×10^5	1,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

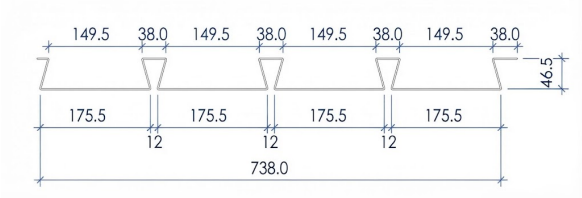
A Tabela 2 sintetiza os parâmetros geométricos, mecânicos e de interface das lajes estudadas por Chen (2003), Gholamhoseini et al. (2014), Marciukaitis et al. (2006) e Soltanalipour et al. (2022). A Figura 6 mostra as fôrmas usadas nos modelos. Para reduzir o custo computacional, as simulações consideraram apenas uma fatia de cada laje, aproveitando sua simetria.
“‘latex



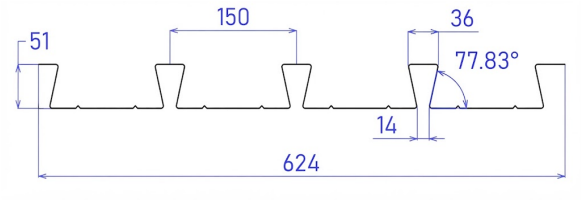
(a) Chen (casos 01A e 01B)



(b) Gholamhoseini et al. (caso 02)



(c) Marciukaitis et al. (casos 03A e 03B)

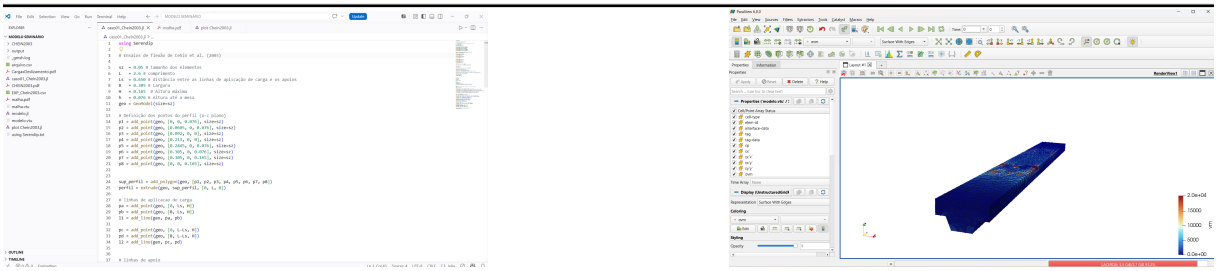


(d) Soutanalipour et al. (casos 04A a 04D)

Figura 6: Geometrias e configurações dos modelos experimentais utilizados na validação numérica.

3.7. Desenvolvimento do modelo

A modelagem e análise das lajes mistas *steel deck* serão realizadas em Julia, utilizando a biblioteca de elementos finitos *Serendip*, disponível no *GitHub*, com suporte a materiais não lineares e elementos sólidos, de casca e conectores. O desenvolvimento será conduzido no *Visual Studio Code*, conforme a Figura 7 a.



(a) VS CODE; **(b)** PARAVIEW;

Figura 7: Ambiente de desenvolvimento e visualização das simulações.

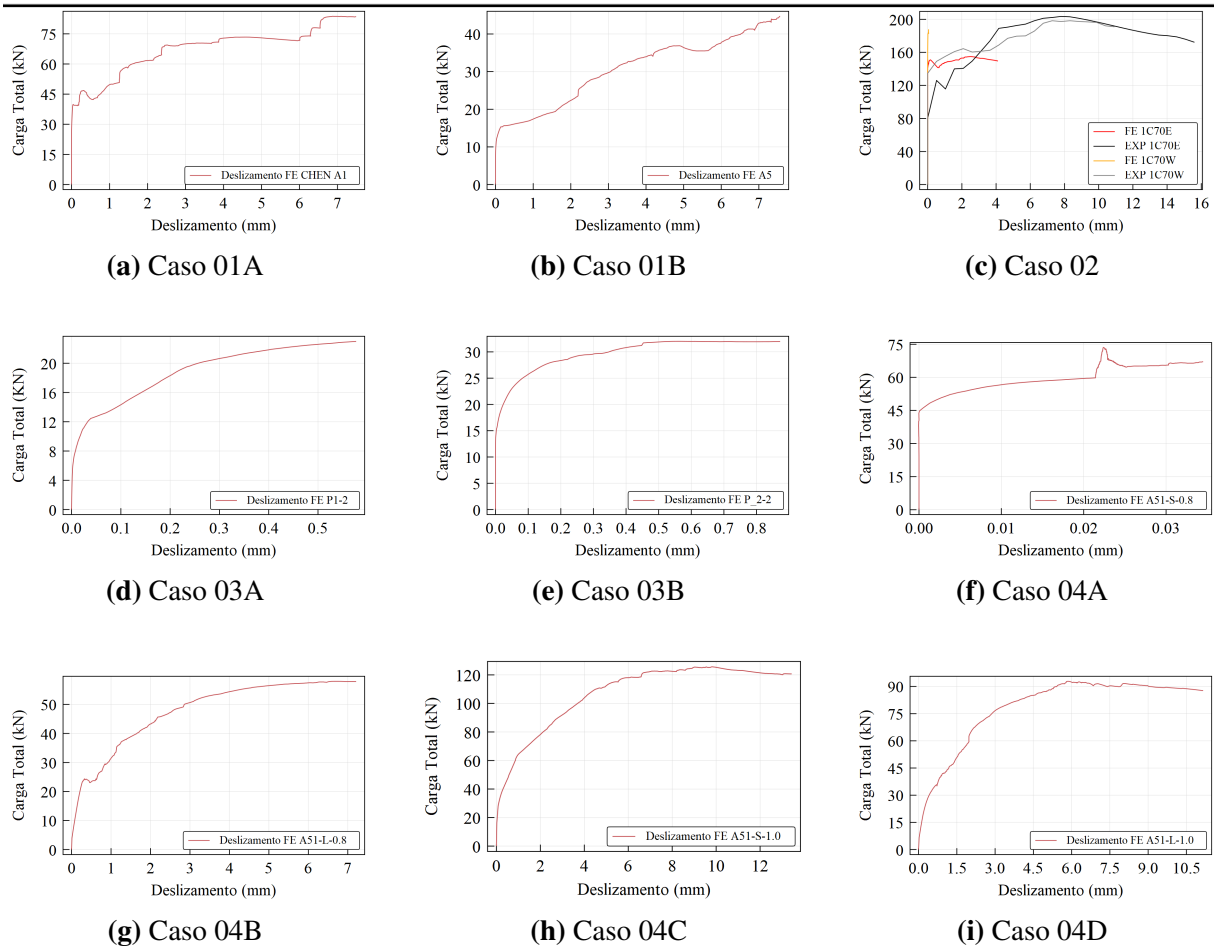
Para a modelagem numérica, utilizou-se o *Gmsh* na geração das malhas e o ParaView (ver Figura 7 b) na visualização e interpretação dos resultados. O concreto foi discretizado por elementos sólidos, a chapa por elementos de casca elastoplástico segundo Von Mises, e a interface aço–concreto por elementos de contato e coesivos, considerando aderência, atrito, *bond-slip* e degradação. Por conta da limitação de espaço do artigo, os dados das simulações estão disponíveis no seguinte link https://lnk.ink/rKdit. Ademais, ferramentas de Inteligência Artificial foram utilizadas apenas como apoio à redação e revisão, sendo a metodologia, implementação, modelagem, análise e conclusões de responsabilidade dos autores.

3.8. Limitações do modelo numérico

As principais limitações do modelo incluem ausência de inclusão de mecânica da fratura e degradação dos materiais, ausência de análise de fadiga e de representação explícita das mossas na interface chapa–concreto, além da idealização dos apoios e da desconsideração de imperfeições geométricas. Adicionalmente, não foi realizado um estudo de sensibilidade de malha, adotando-se um tamanho de elemento uniforme ($sz = 0{,}05$), adequado para permitir um bom refinamento, para todos os modelos.

4. Resultados e Discussão

A Figura 8 apresenta as curvas carga–deslizamento (P–s) das simulações. Apenas o Caso 02 dispõe de dados experimentais de deslizamento, fornecidos por Gholamhoseini et al. (2014); nos demais casos, a análise limita-se aos resultados numéricos. As curvas exibem comportamento bilinear, com perda inicial de aderência seguida pela mobilização do atrito e do intertravamento mecânico das mossas (*embossment locking*). O deslizamento é influenciado pela geometria da fôrma e pelo vão de cisalhamento (L_s), refletindo a degradação da ação composta e a transição para a interação parcial.



(a) Caso 01A **(b)** Caso 01B **(c)** Caso 02

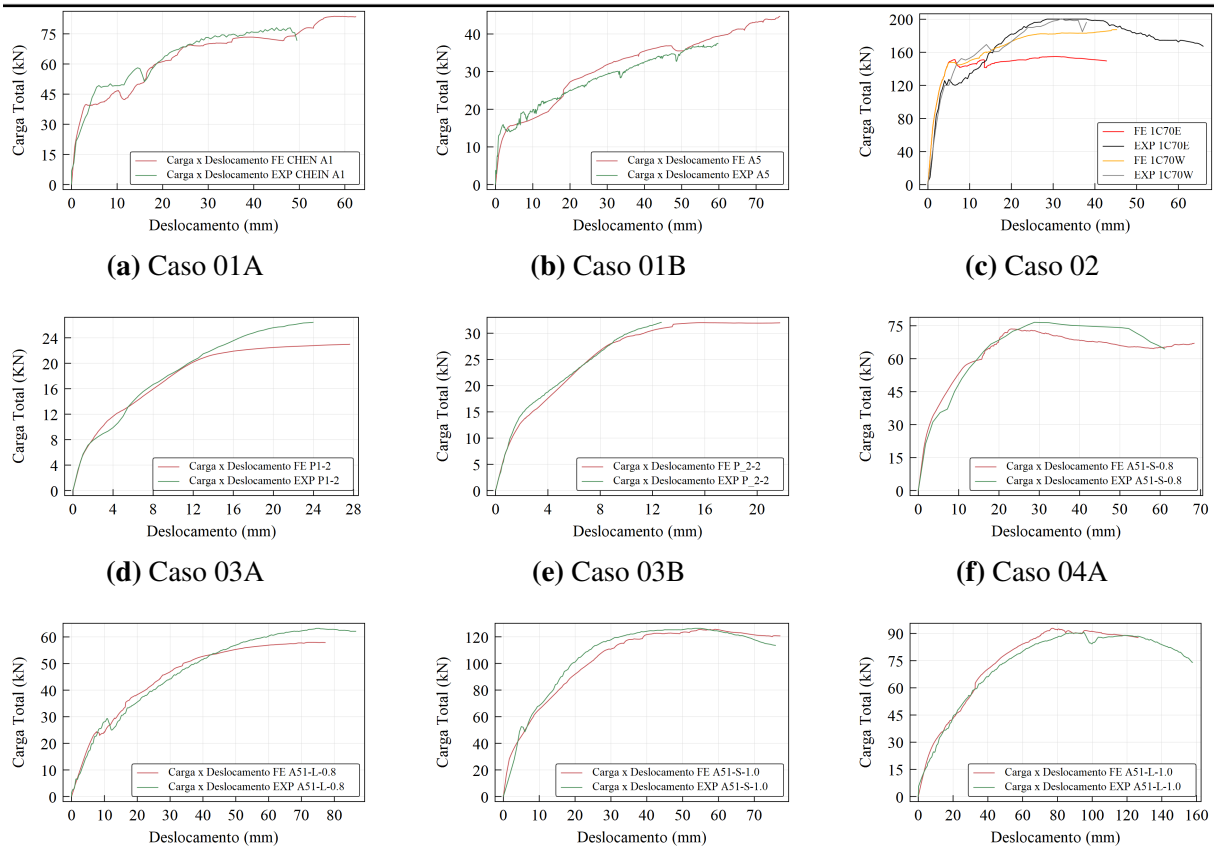
(d) Caso 03A **(e)** Caso 03B **(f)** Caso 04A

(g) Caso 04B **(h)** Caso 04C **(i)** Caso 04D

Figura 8: Curvas carga–deslizamento dos nove casos analisados.

A Figura 9 compara as curvas carga–deslocamento (F–d) numéricas (FE) e experimentais (EXP) dos nove casos. O modelo reproduz adequadamente a rigidez inicial e a primeira fissuração, mas apresenta divergências no regime pós-fissuração e na capacidade última, associadas à representação da interface aço–concreto.

Nos Casos 03A, 04A e 04B, observa-se leve subestimativa da resistência máxima, relacionada à perda de coesão e à representação simplificada do intertravamento das mossas (*embossment locking*). No Caso 02, a subestimativa nos lados Leste e Oeste (1C70E/1C70W) está associada à plastificação do concreto e aos efeitos do momento negativo sobre o apoio central. Já nos Casos 04C e 04D, a concordância pós-fissuração é elevada, indicando boa representação da resposta não linear das fôrmas com espessura de 1,0 mm.



(a) Caso 01A **(b)** Caso 01B **(c)** Caso 02

(d) Caso 03A **(e)** Caso 03B **(f)** Caso 04A

(g) Caso 04B **(h)** Caso 04C **(i)** Caso 04D

Figura 9: Comparação entre as curvas carga–deslocamento dos casos analisados.

Tabela 3: Comparação entre as cargas últimas experimentais e numéricas.

Caso	$P_{u,\mathrm{EXP}}$ **(kN)**	$P_{u,\mathrm{MEF}}$ **(kN)**	**Erro (%)**	$P_{u,\mathrm{MEF}}/P_{u,\mathrm{EXP}}$
01A – Chen A1	78	84	7,69	1,077
01B – Chen A5	40	45	12,50	1,125
02 – KF-70	200	190	5,00	0,950
03A – P1-2	26	23	11,54	0,885
03B – P2-2	32	31	3,13	0,969
04A – A51-S-0.8	76	72	5,26	0,947
04B – A51-L-0.8	62	58	6,45	0,935
04C – A51-S-1.0	126	122	3,17	0,968
04D – A51-L-1.0	90	91	1,11	1,011
Média	–	–	**6,21**	**0,973**

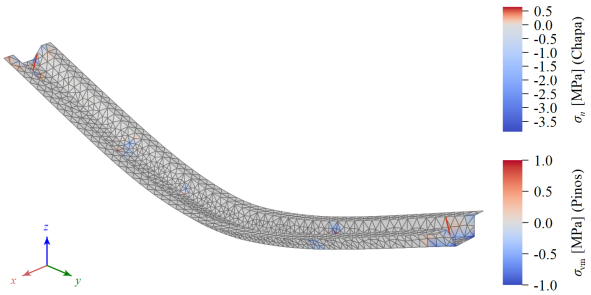
Fonte: Elaborado pelos autores.

A validação foi realizada pelo erro relativo entre as cargas últimas, calculado por $\mathrm{Erro}(\%) = \frac{|P_{u,\mathrm{MEF}} - P_{u,\mathrm{EXP}}|}{P_{u,\mathrm{EXP}}} \times 100$. Conforme a Tabela 3, o erro médio foi de 6,21%, com razão média entre as cargas numéricas e experimentais de 0,973. O maior erro ocorreu no Caso 01B (12,50%), e o menor, no Caso 04D (1,11%). Pode-se afirmar que foram observadas tanto superestimações

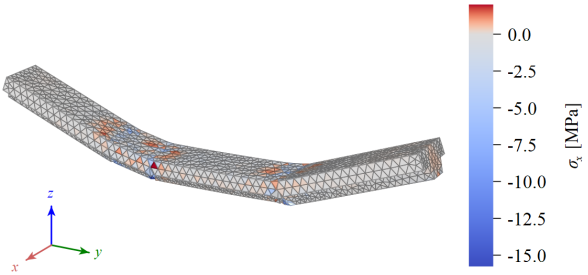
quanto subestimações, mas os resultados indicam que o modelo reproduz satisfatoriamente a capacidade resistente das configurações analisadas, fornecendo uma base para as análises paramétricas subsequentes.

4.1. Tensões no Concreto e na Chapa

Nas figuras a seguir, apresentam-se o deslizamento na fôrma metálica e os estados de tensão no concreto, na armadura e nos conectores, além do padrão de fissuração. Destaca-se que apenas o Caso 01A possui conectores de cisalhamento e o Caso 02 contém armadura superior sobre o apoio central. Por limitação de espaço, ilustram-se apenas os Casos 01A, 02 e 03A.

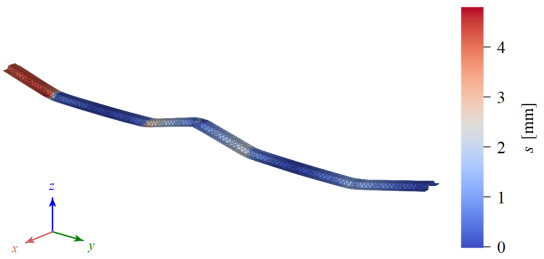


(a) Tensões na chapa (σ_n) e nos pinos (σ_{VM}).

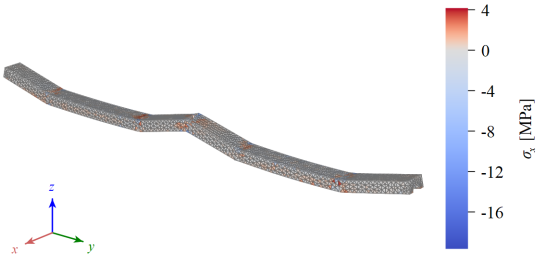


(b) Tensões no concreto (σ_x).

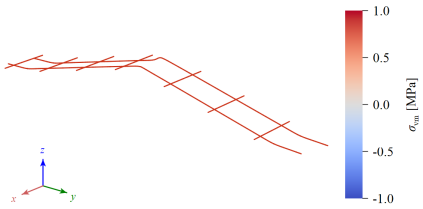
Figura 10: Resultados das simulações numéricas para o caso 01A (laje CHEN A1)



(a) Deslizamento na chapa metálica (s).

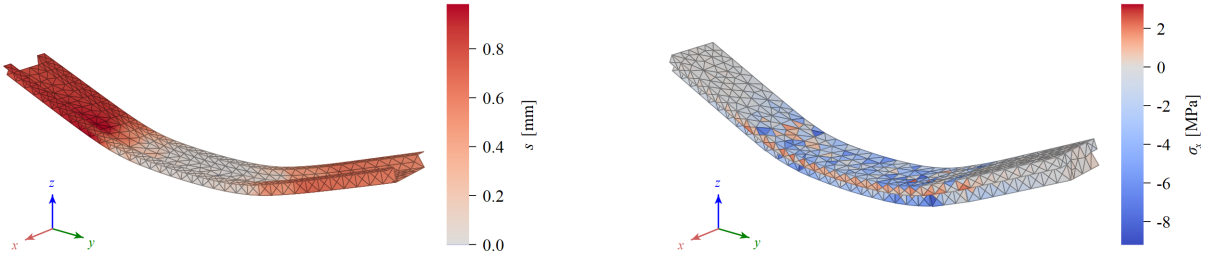


(b) Tensões no concreto (σ_x).



(c) Tensões na armadura (σ_{VM}).

Figura 11: Resultados das simulações numéricas para o caso 02 (Laje contínia de Goulamhoseini et al. (2006).



(a) Deslizamento na chapa metálica (s). **(b)** Tensões no concreto (σ_x).

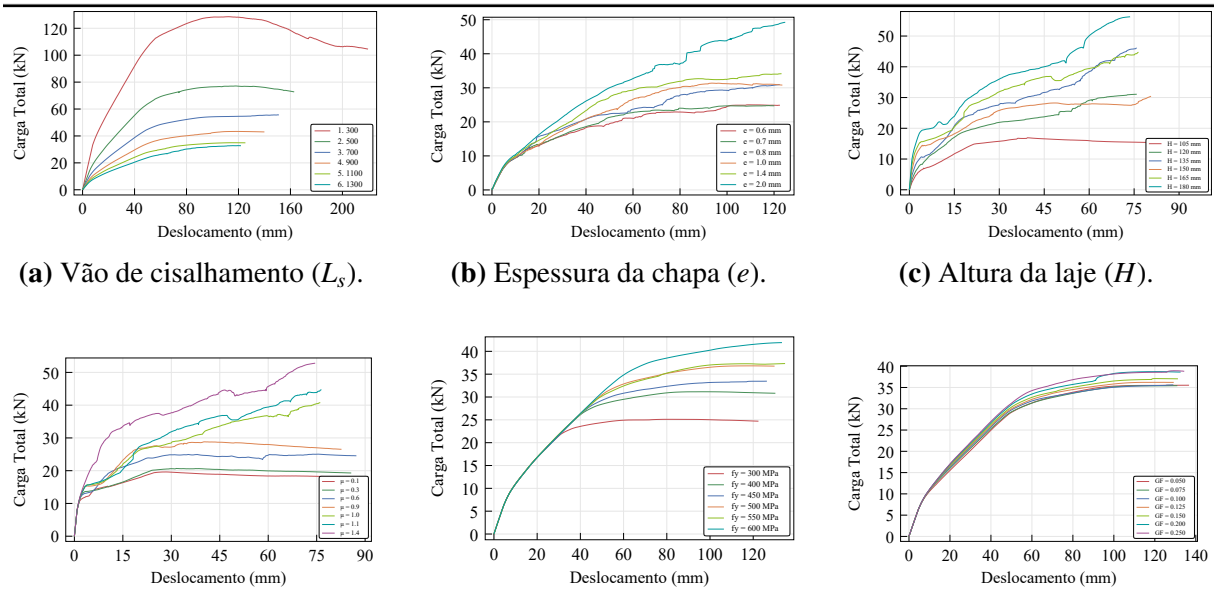
Figura 12: Resultados das simulações numéricas para o caso 03A (Laje P1-2 de Marciukaits et al. (2018).

No concreto, as tensões normais longitudinais (σ_x) evidenciam o comportamento predominantemente fletor, com compressões concentradas na região superior da seção e valores máximos entre $-8{,}0$ e $-24{,}0$ MPa, conforme a geometria e o grau de interação da laje. Nesse contexto, quando a interface chapa–concreto atinge sua capacidade de transferência de cisalhamento, ocorre o escorregamento relativo (s), comprometendo a compatibilidade de deformações e deslocando a linha neutra. Consequentemente, a ação composta é reduzida, limitando o aproveitamento do concreto comprimido.

Além disso, a extensão do vão de cisalhamento (L_s) influencia diretamente a distribuição dos esforços e o deslizamento interfacial. Em geral, menores valores de L_s favorecem a ação composta e elevam a capacidade resistente, enquanto seu aumento pode intensificar o escorregamento e antecipar a redistribuição de σ_x. Assim, esse comportamento é consistente com os resultados reportados por Chen (2003), Gholamhoseini et al. (2014) e Soltanalipour et al. (2022), que destacam a influência da interação chapa–concreto na resistência e nos mecanismos de ruptura das lajes mistas.

4.2. Análise Paramétrica das Simulações

Foi realizada uma análise paramétrica por meio de modelos numéricos de Elementos Finitos (MEF), variando-se individualmente os principais parâmetros do sistema e mantendo-se constantes as demais propriedades de cada modelo. Foram avaliados o comprimento do vão de cisalhamento (L_s), a espessura da chapa (e), a altura total da laje (H), o coeficiente de atrito (μ), tensão de escoamento do aço (f_y) e energia de fratura (G_F). A Figura 13 reúne as curvas carga–deslocamento obtidas para as diferentes análises. Em cada análise, apenas um parâmetro foi variado para a laje escolhida, enquanto os outros permaneceram constantes.



(a) Vão de cisalhamento (L_s). **(b)** Espessura da chapa (e). **(c)** Altura da laje (H).

(d) Coeficiente de atrito (μ). **(e)** Tensão de escoamento (f_y). **(f)** Energia de fratura (G_F).

Figura 13: Curvas carga–deslocamento dos estudos paramétricos: (a) vão de cisalhamento (mm); (b) espessura da chapa (mm); (c) altura da laje(mm); (d) coeficiente de atrito; (e) tensão de escoamento do aço (MPa); e (f) energia de fratura.

A análise paramétrica evidencia que os fatores geométricos de escala e rigidez direta, como a redução do vão de cisalhamento (L_s), o aumento da espessura da chapa (e) e a elevação da altura total (H), exercem a influência mais substancial na capacidade de carga e na rigidez global da laje, pois ampliam diretamente o braço de alavanca interno, a área resistente e a inércia da seção mista. Por outro lado, o aumento do coeficiente de atrito (μ) e da tensão de escoamento (f_y) atua principalmente no ganho de resistência última e na capacidade pós-fissuração, governando a eficiência da transferência de esforços na interface e o nível de escoamento da fôrma metálica. Em contrapartida, a energia de fratura do concreto (G_F) apresenta influência reduzida na resposta global carga–deslocamento, predominando os mecanismos de aderência e atrito longitudinal e o comportamento elastoplástico do aço.

5. Conclusões

- A modelagem via código numérico reduziu o custo computacional.
- A calibração experimental foi essencial para garantir a confiabilidade dos modelos numéricos.
- A capacidade resistente foi influenciada principalmente pela altura da laje, pelo vão de

cisalhamento, pela espessura da chapa, pelo atrito e pela tensão de escoamento; a energia de fratura teve menor influência.

- O aumento da espessura da chapa elevou a rigidez inicial, a ductilidade e a resistência, enquanto o aumento do vão de cisalhamento reduziu a capacidade resistente.
- Foi possível visualizar adequadamente a fissuração do concreto com o uso de elementos coesivos.

6. Referências

Associação Brasileira de Normas Tĕcnicas. *ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações*. Rio de Janeiro, 2024.

DURAND, R.; SILVA, F. H. B. T. d. A coulomb-based model to simulate concrete cracking using cohesive elements. *International Journal of Fracture*, v. 220, n. 1, p. 17–43, 2019.

EASTERLING, W. S.; YOUNG, C. S. Strength of composite slabs. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 9, p. 2355–2370, 1992.

European Committee for Standardization. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN, 2026.

GHOLAMHOSEINI, A. et al. Longitudinal shear stress and bond–slip relationships in composite concrete slabs. *Engineering Structures*, v. 69, p. 37–48, 2014.

LOH, H. et al. Three-dimensional finite element modeling for bending and pull-out tests of composite slabs. *Engineering Structures*, v. 295, p. 116785, 2023.

MARIMUTHU, V. et al. 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*, v. 63, n. 6, p. 791–803, 2007.

SHAMASS, R.; CASHELL, K. A. Experimental and finite element study of ultimate strength of continuous composite concrete slabs with steel decking. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2019.

SILVA, A. R. d. et al. Longitudinal shear strength design of composite slabs by full-scale fe modelling considering the embossments. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 17, n. 5, 2024.

VELJKOVIC, M. Behaviour and resistance of composite slabs. *Structural Engineering International*, v. 6, n. 2, p. 100–105, 1996.