

DETERMINAÇÃO DE M-K PARA DIMENSIONAMENTO DE ESFORÇOS DE CISALHAMENTO EM LAJES *STEEL DECK*

Determination of M-K for dimensioning shear efforts in Steel Deck Slabs

Keterli Carla Cettolin¹; Rebeca J. Schmitz²; Rodrigo Spinelli³

¹Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. *E-mail*: keterlicettolin@hotmail.com.

²Área de Ciência Exatas e Engenharias, Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. *E-mail*: rschmitz@univates.br

³Área de Ciência Exatas e Engenharias, Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. *E-mail*: rspinelli@univates.br

Data do recebimento: 17/01/2023 - Data do aceite: 11/04/2023

RESUMO: A consideração do comportamento misto das lajes *steel deck* depende do estado-limite dominante, que é o cisalhamento longitudinal, e está diretamente ligado ao comportamento estrutural na interface forma de aço-concreto, que ocorre através da interação com as mossas. Com o objetivo de determinar os valores das constantes m-k para as fórmulas de dimensionamento ao cisalhamento, foi realizado ensaio destrutivo de lajes do tipo *steel deck*. Os ensaios ocorrem após a cura do concreto e com suas extremidades simplesmente apoiadas e sem a ajuda de conectores de cisalhamento, apenas com a atuação das mossas presentes na forma. O ensaio se deu todo com base na norma *EUROCODE 4*, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). Os principais materiais para a realização do ensaio foram: forma de aço, concreto usinado e malha de aço. A aplicação da carga aconteceu por meio de equipamentos hidráulicos com acionamento manual. Durante as realizações dos ensaios foram observadas flechas, deslizamentos relativos de extremidade na interface aço-concreto e deformações para posterior compilação de dados e análise do comportamento e da definição das constantes empíricas. Com o ensaio foi possível determinar as constantes m-k para este modelo de forma de aço e como ela se comporta em relação ao cisalhamento longitudinal, bem como determinar sua capacidade de carga através de análises

reais. Em suma, com a finalização dos ensaios e das equações, pôde-se obter as sobrecargas admissíveis dos protótipos ensaiados a partir de sua análise estrutural, que ficaram dentro das variações permitidas pela norma *EURO-CODE 4*, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).

Palavras-chave: Laje *steel deck*. Parâmetros m-k. Estruturas mistas.

ABSTRACT: The consideration of the mixed behavior of steel deck slabs depends on the dominant limit-state, which is the longitudinal shear and is directly linked to the structural behavior at the steel-concrete shape interface, which occurs through the interaction with the dents. In order to determine the values of the m-k constants for the shear design formulas, a destructive test of steel deck slabs was carried out. The tests take place after the concrete curing and with its ends simply supported and without the help of shear connectors, only with the action of the dents present in the form. The test was entirely based on the EUROCODE 4 standard (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004). The main materials used for the test were: steel formwork, machine concrete and steel mesh. The application of the load took place through hydraulic equipment with manual activation. During the tests, deflections, relative sliding of the extremity in the steel-concrete interface and deformations were observed for later data compilation and behavior analysis and the definition of empirical constants. The constants m-k for this steel form model were determined through this test, and also how it behaves in relation to longitudinal shear, as well as determine its load capacity through real analysis. In short, with the completion of the tests and equations, the admissible overloads of the tested prototypes were possible to be obtained from their structural analysis, which were within the variations allowed by the EUROCODE 4 standard, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004).

Keywords: Steel Deck Slab, m-k parameters, mixed structures.

Introdução

A utilização de lajes com forma de aço incorporada é cada vez mais comum nas construções por ser um sistema de piso que confere economia às obras e, principalmente, agilidade construtiva quando se trata de prédios de múltiplos andares. No Brasil, vem crescendo o uso dessas lajes, as *steel decks*, que são lajes mistas constituídas por um

perfil de chapa dobrada a frio (aço) associado ao concreto. Essas formas metálicas, estão disponíveis no mercado com uma grande diversidade de geometria e tamanhos (CICHINELLI, 2011).

Na superfície dessa forma, existem relevos conhecidos como mossas. Elas influenciam diretamente no comportamento estrutural das lajes, pois propiciam a ligação mecânica por meio do atrito entre o concreto e a forma de aço (DIAS, 2018).

Ao falar sobre comportamento da laje, existe algo que chamamos de comportamento misto. A consideração desse comportamento depende do estado-limite dominante que, no caso das lajes mistas, é o cisalhamento longitudinal, que está associado ao comportamento estrutural da interface forma de aço-concreto e, portanto, depende do padrão de mostras presente na forma, tornando-se necessário proceder uma análise experimental para determinar as variáveis para dimensionamento (SIEG, 2015).

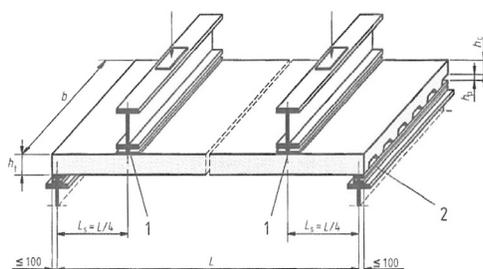
A forma geralmente trabalha na direção longitudinal às nervuras, devendo resistir isoladamente às cargas atuantes na fase construtiva, quando não houver escoramento, e satisfazer os critérios de cálculo para um dimensionamento seguro. Existem dois métodos usualmente adotados para a verificação da resistência desse sistema: o método de interação parcial e o método semiempírico m-k. O método m-k é o estudo que define a resistência ao cisalhamento longitudinal, que é o modo de falha mais comum nesse sistema de lajes mistas, porém, também podem ocorrer falhas por flexão, cisalhamento vertical e punção (FERRAZ, 1999).

O estudo do comportamento das formas incorporados ao concreto é fundamental, para a determinação da eficiência do sistema misto e, dada sua importância, foi analisado nesse trabalho através do método m-k. O método m-k foi desenvolvido por Schuster (1970) e trata-se de um método semiempírico fundamentado por meio da consideração de uma laje, simplesmente apoiada, submetida a duas forças concentradas, de mesma intensidade a uma distância dos apoios, Figura 1.

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho é definir os parâmetros m-k, que são o coeficiente angular (m) e linear (k) de uma reta. Essa reta é construída a partir de uma equação semiempírica que relaciona a resistência nominal à força cortante com

os parâmetros obtidos em ensaio (carga de ruptura e características geométricas das amostras), através da realização de ensaio denominado “*Testing of composite floor slabs*” e, assim, dimensiona o cisalhamento longitudinal ocorrido nas lajes *steel deck* ensaiada e, também, avalia as características que envolvem a ruptura do sistema do “deck” proposto.

Figura 1 - Esquema geral do ensaio, método semi-empírico segundo Schuster (Eurocódigo 4, 2004)



Procedimentos Metodológicos

O procedimento do ensaio adotado neste trabalho, bem como as análises, foi baseado, principalmente, na norma *EUROCODE 4*, (*EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004*). O ensaio realizado é conhecido como *shear bond*: um ensaio de cisalhamento realizado em grande escala com as adaptações necessárias. Os referidos ensaios foram realizados na empresa Tibre Indústria Metalúrgica Ltda, localizada na cidade de Garibaldi, no Rio Grande do Sul.

O aço empregado nas formas é o de ZAR 275, com propriedades mecânicas como limite de escoamento 275 MPa, limite de resistência 373 MPa e módulo de elasticidade de 200.000 Mpa. Esses dados foram retirados do software CFS v. 10.0.4 e a espessura nominal da chapa é de 0,80mm. Para demais características, veja a Tabela I.

Tabela I - Propriedades da forma de aço (Fonte: Software CFS 10.0.4, 2022)

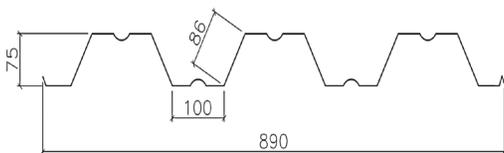
Espessura nominal tn (mm)	Espessura sem a camada de galvanização t (mm)	Altura da forma Steel Deck hf (mm)	Área efetiva Ag (mm ²)	Centro de gravidade à tração ycg (mm)	Inércia I (mm ⁴)	Peso Próprio da forma wf (kN / m ²)
0,8	0,79	75	954,59	36,6	889,222	8,52

Seguindo a premissa de que,

“A superfície da chapa de aço perfilada deve estar na condição ‘como-laminada’, considerando que nenhuma tentativa seja feita para melhorar a aderência, como desengordurar a superfície.” (EUROCODE 4, 1994-1-1:2004, p. 117, tradução nossa¹)

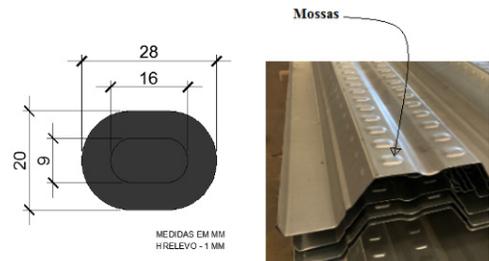
Todas as formas testadas possuíam uma leve camada de galvanização de zinco e estavam com resíduos de óleo provenientes do processo de conformação do perfil, ou seja, para os testes foram usadas formas em seu estado natural, como solicita a norma: elas não foram limpas e nem foram realizados outros processos que pudessem contribuir com o resultado final do ensaio. As formas metálicas utilizadas nos ensaios foram fornecidas pela empresa Tibre Indústria Metalúrgica Ltda.

Todos os protótipos ensaiados possuem a mesma seção transversal da forma metálica, de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Seção transversal - dimensões da forma metálica, medidas em mm

As mostras presentes da superfície da forma têm altura de 1 mm e a distância entre a extremidade de cada uma delas é de 50mm.

Além disso, todas elas possuem dimensão padrão, conforme indica a Figura 3.

Figura 3 - Dimensões das mostras, medidas em mm

A tela soldada, utilizada para evitar retrações causadas no processo de cura do concreto é a CA60 Gerdau, chamada comercialmente de “malha pop” (Q75). As dimensões da malha são de 15 x 15cm, com bitola de 3,8 mm.

Por sua vez, o concreto utilizado é usado, sendo que todos foram curados nas mesmas condições. Foram, também, moldados seis corpos de prova nomeados de CPI à CPVI que, após 28 dias, foram rompidos em laboratório. Eles possuíam uma resistência à compressão média (f_{ck}) de, aproximadamente, 32 MPa e um módulo de elasticidade secante médio (E_{cs}) de 26.865 MPa, calculado de acordo com as Equações 1 e 2, conforme NBR 8800 (ABNT, 2008).

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} \quad (2)$$

Nessas equações, E_{cs} e f_{ck} são expressos em Megapascal, com verificação da estrutura em data igual ou superior a 28 dias.

Já os equipamentos utilizados para a aplicação do carregamento, a medição das forças aplicadas e os deslocamentos foram um atuador hidráulico manual com manômetros, relógios comparadores, pórtico de reação, perfis distribuidores de carga, placas de policloropreno e, também, foram soldadas chapas de aço com dimensões de 100 x 1000 x 12,5 mm como apoios nas extremidades de cada protótipo.

Além das placas de apoio soldadas na extremidade, outro detalhe da montagem do equipamento é que, nas extremidades do protótipo, entre o protótipo e o pórtico de reação, foi criado um esquema de apoio (ligação) por rolo e pino, conforme recomenda a norma *EUROCODE 4*, (*EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004*). Esse detalhe está representado na Figura 4. Cabe destacar que o esquema rolo e pino é independente (solto) do pórtico e dos protótipos.

Figura 4 - Apoio do protótipo em esquema por rolo e pino



O pórtico de reação para aplicação de carga é de montagem própria (ver Figuras 5 e 6, respectivamente) e, devido a isso, antes da realização dos testes efetivos, foi elaborado um teste piloto, também em escala real, que seguia todas as etapas do teste final, a fim de verificar qualquer necessidade de ajuste/correção do equipamento. Após a realização do teste não foi necessário nenhum ajuste no pórtico, pois ele atendeu às funções necessárias para a aplicação da carga. Dessa forma, o protótipo piloto foi descartado após ensaio.

Figura 5 - Esquema 3D de aplicação de carga para ensaio e pórtico de reação

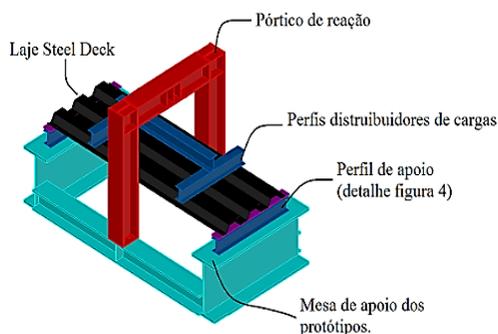


Figura 6 - Preparação para aplicação de carga para ensaio e pórtico de reação



Para a realização do ensaio efetivo, foram moldados seis protótipos a fim de verificar a capacidade de carregamento. Eles foram

numerados de P1 a P6, e divididos em dois grupos de três testes, de acordo com o que solicita a norma *EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)*. As características e dimensões dos seis protótipos utilizados nos testes estão demonstrados na Tabela II.

A primeira fase da realização do ensaio iniciou-se com a confecção das formas para recebimento do concreto (Figura 7a). Em seguida, foi feita a concretagem com a utilização de concreto usinado (Figura 7b). Foram retiradas também as formas de madeira dos protótipos após sete dias da concretagem e eles foram molhados durante o mesmo período (Figura 7c). Por fim, no vigésimo oitavo dia, o ensaio de ruptura ocorreu.

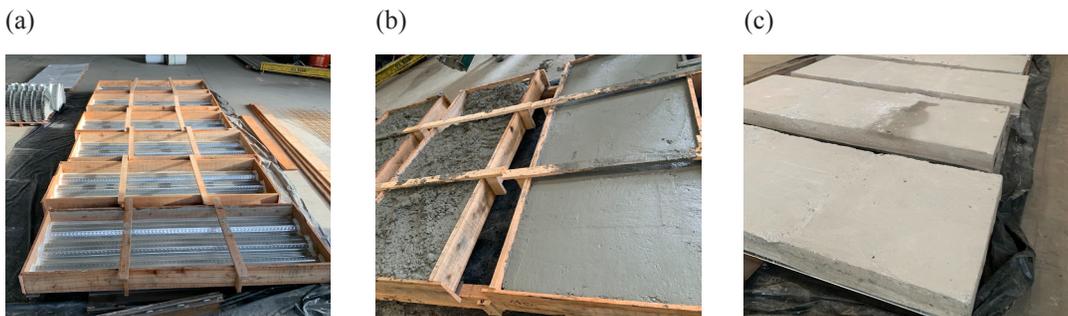
No mesmo dia, foram moldados os corpos de provas para posterior análise da resistência à compressão do concreto em laboratório. Além disso, toda a concretagem ocorreu nesse mesmo dia.

Para a união dos elementos foi considerada somente a atuação das mossas, sem o uso de *stud bolts* ou qualquer outro elemento que pudesse contribuir com a interação aço/concreto. A tela de aço também foi adicionada na fase de concretagem dos protótipos, sendo posicionada a 20mm da face superior da laje. Já para a execução dos testes, os protótipos foram colocados biapoiados sobre um apoio rolo e pino em ambas as extremidades (Figura 4) e, por meio de um atuador hidráulico manual, a carga concentrada foi aplicada até o esgotamento da capacidade do sistema.

Tabela II - Dimensões dos protótipos - Caracterização dos testes

Protótipo	Altura da Laje h_t (mm)	Largura da Laje b (mm)	Vão total L (mm)	Vão Teórico L_f (mm)	Vão de cisalhamento L_s (mm)	Concreto (MPa)	Área do Protótipo (m^3)	E_{cs} (MPa)
P1	140	890	2.000	1.800	450	32,60	0,18	27.332
P2	140	890	2.000	1.800	450	32,60	0,18	27.065
P3	140	890	2.000	1.800	450	32,60	0,18	27.132
P4	150	890	2.500	2.300	575	31,12	0,25	26.451
P5	150	890	2.500	2.300	575	31,12	0,25	26.800
P6	150	890	2.500	2.300	575	31,12	0,25	26.408

Figura 7 - Montagem das formas, antes e depois da concretagem (a) forma (b) concretagem (c) protótipos curados



A força aplicada foi medida através de um manômetro acoplado ao atuador, ao passo que os deslocamentos laterais foram medidos com auxílio de trenas e a flecha no meio do vão, com o uso dos relógios comparadores com precisão de 10 mm. A distribuição dessa carga ocorreu por meio de três perfis metálicos, de bitolas conhecidas e iguais, colocadas sobre a laje. Além disso, dois perfis paralelos entre si foram simetricamente posicionados atendendo à condição de dos apoios, conforme Figura 8.

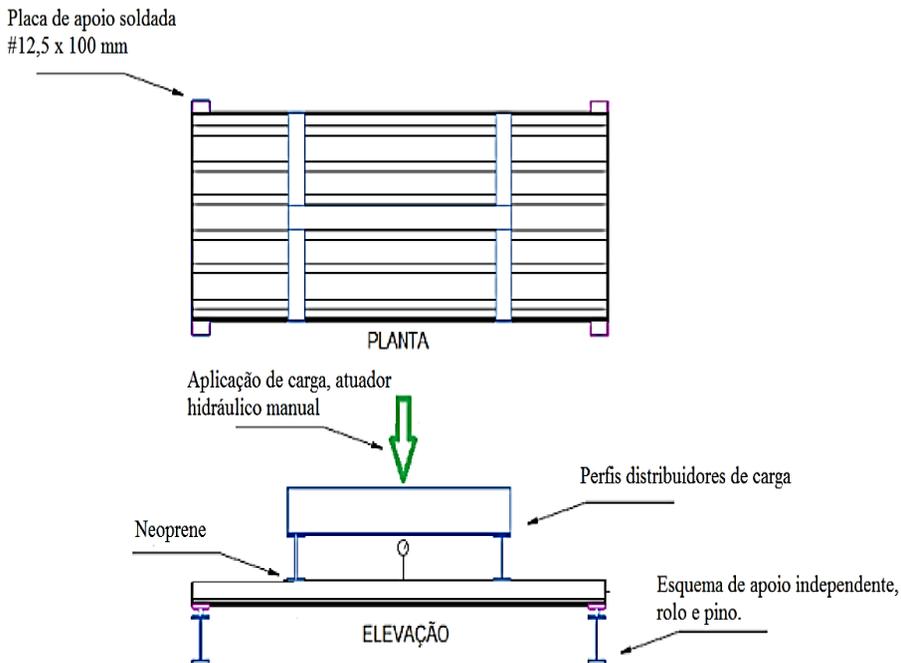
Abaixo desses perfis, entre o perfil e o concreto, foi colocada uma placa de policloropreno com espessura de 10 mm. Em cima desses dois perfis, no sentido perpendicular, foi colocado o terceiro perfil, exercendo a função de receber a carga direta do atuador e distribuir a carga aos outros dois perfis. A Figura 9 apresenta o esquema da aplicação de carga.

Figura 9 - Aplicação de carga



Após o início da aplicação de carga, dois momentos foram observados: aquele em que ocorreu a acomodação do concreto na forma, e o rompimento. Ambos foram anotados e tiveram seus resultados pré-analisados.

Figura 8 - Esquema 2D de aplicação de carga



Após os testes, para determinar as constantes, como demonstrado na Figura 10, também de acordo com a norma *EUROCODE 4*, (*EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004*), as constantes podem ser determinadas experimentalmente a partir da análise linear de um gráfico feito a partir dos dados práticos coletados. Esse gráfico trata da relação entre a área efetiva da forma com o valor representativo experimental da força cortante.

Aqui, “1” é a relação de projeto para resistência ao cisalhamento longitudinal.

Resultados e Discussão

Antes das concretagens, foram feitas três análises da forma de aço: duas para verificação dos requisitos mínimos exigidos pelas normas e uma para análise do comportamento da forma metálica. A primeira análise foi a de estabilidade elástica da forma de aço isolada. Através dessa análise, pode-se observar onde estariam atuando as maiores tensões da

forma. Essa análise foi feita através do software *STRAP (Structural Analysis Program)*, versão 2018.

Através de estudos de elementos finitos, o programa analisa a seção do perfil e demonstra as seções críticas da forma, conforme a Figura 11. As regiões em verde são menos críticas do que as indicadas em amarelo e vermelho, mas, no geral, o comportamento da folha metálica estudada é satisfatório para prosseguimento com o teste prático.

Figura 11 - Tensões atuantes na forma metálica

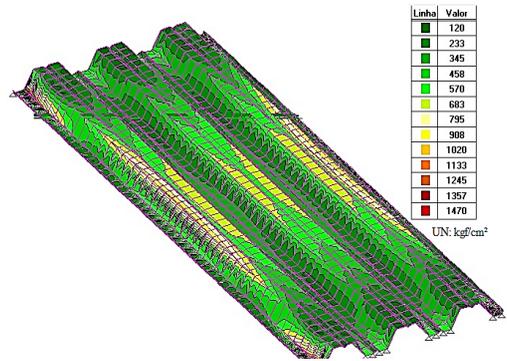
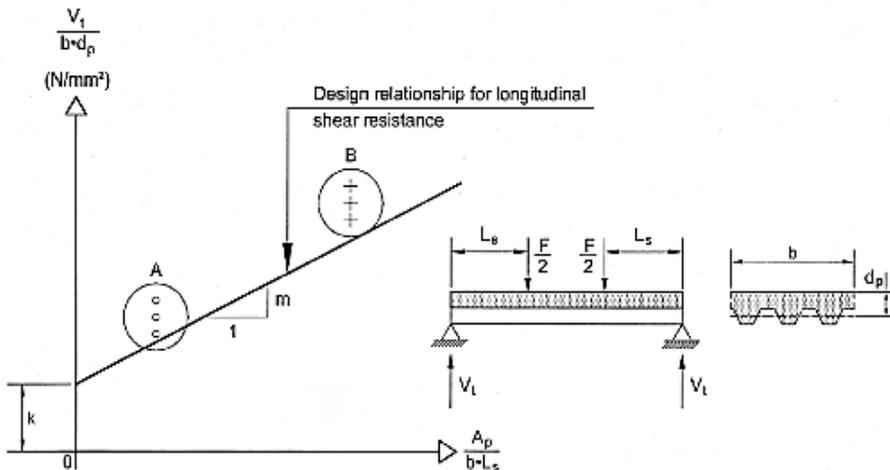


Figura 10 - Determinação experimental gráfica das constantes m-k (Fonte: EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004))



Note: b, d_p and L_s are in mm, A_p is in mm^2 , V_t is in N.

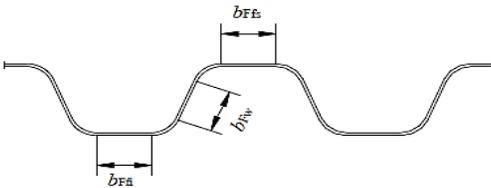
A segunda verificação foi a de flambagem local, de acordo com o item Q.3.1.1.4 da NBR 8800 (ABNT, 2008), em que se deve assegurar que não há flambagem local da forma de aço na fase construtiva preenchida com concreto fresco. Para tal, a largura plana de todos os elementos (Figura 12) deve atender a uma das exigências apresentadas nas Equações 3 e 4:

$$b_F \leq \frac{26,49 \sqrt{\frac{E}{f_y F}}}{(13\alpha - 1)} t_F, \text{ quando } \alpha \geq 0,5 \quad (3)$$

$$b_F \leq \frac{2,4 \sqrt{\frac{E}{f_y F}}}{\alpha} t_F, \text{ quando } \alpha < 0,5 \quad (4)$$

Aqui, é a relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento; t_F é a espessura da forma de aço.

Figura 12 - Largura plana dos elementos da forma



Fonte: NBR 8800, 2008

A relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento (α), da forma em questão, é igual a 0,51. Por este motivo as verificações $b_{Ffi} = b_{Ffs}$ (mesas) e b_{fw} (alma) foram calculadas com a Equação 1, sendo as condições mesas $b_{Ffi} = b_{Ffs} \leq b_f$ e alma $b_{fw} \leq b_f$ atendidas, conforme relação abaixo. A dimensão da seção transversal pode ser verificada na Figura 2, já apresentada anteriormente.

- a) Mesas: $100 \leq 100,43$;
- b) Alma: $86 \leq 100,43$.

O terceiro ponto analisado, também de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008),

item Q.2.2, foi o deslocamento máximo da forma de aço sob seu peso próprio e o peso do concreto fresco (excluindo a sobrecarga de construção), que não deve ser superior a $L_f/180$ ou 20 mm, o que for menor. Para os protótipos P1 a P3, vão $L = 2.000$ mm ($L_f = 1.800/180$ mm), o deslocamento máximo permitido na fase de concretagem resultou em 10 mm. Já para os protótipos P4 a P6 vão $L = 2.500$ mm ($L_f = 2.300/180$ mm), o resultado foi de 12,78 mm de deslocamento máximo permitido na fase de concretagem, sendo adotados esses valores para realizar a análise. Ambos os protótipos ficaram dentro do limite esperado na fase de concretagem, de acordo com a Figura 13.

Os resultados experimentais finais de cada protótipo estão apresentados na Tabela III.

Nesta tabela,

F_{des} é a força aplicada, associada ao início do deslizamento entre o aço e o concreto.

F_{max} é a máxima força aplicada, ou a força correspondente à flecha $L_f/50$.

F_{total} é a máxima força aplicada, acrescida do peso do protótipo concretado, mais os distribuidores de carga, sendo que os protótipos P1 a P3, pesam 515,48 kg e os protótipos P4 a P6 pesam 682,12 kg.

Devido a essa condição, para os protótipos com $L = 2.500$ mm (P4 a P6) acresceu-se +6,17 kN e para os protótipos com $L = 2.000$ (P1 a P3) mm acresceu-se +5,47 kN. O comportamento é considerado como dúctil se $\frac{F_{max}}{v} > 1,1$, caso contrário, o comportamento é frágil.

V_t é o valor da força cortante, representativo dos resultados obtidos nos ensaios. A esse respeito, como todos os protótipos foram classificados como frágeis, V_t é obtido pela equação 5, reduzindo o cortante com um valor de 0,8.

$$V^t = 0,8 * 0,5 * (F_{total}) \quad (5)$$

Tabela III - Resultados experimentais do ensaio com forma de espessura 0,8 mm “*Testing of composite floor slabs*”

Protótipo	F_{des} (kN)	F_{max} (kN)	F_{total} (kN)	$\frac{F_{max}}{F_{desl}}$	Comportamento	V_i (kN)
P1	44,37	44,37	49,42	1	Frágil	19,77
P2	41,83	41,83	46,88	1	Frágil	18,75
P3	40,55	40,55	45,61	1	Frágil	18,24
P4	35,66	35,66	42,35	1	Frágil	16,94
P5	37,64	37,64	44,33	1	Frágil	17,73
P6	35,66	35,66	42,35	1	Frágil	16,94

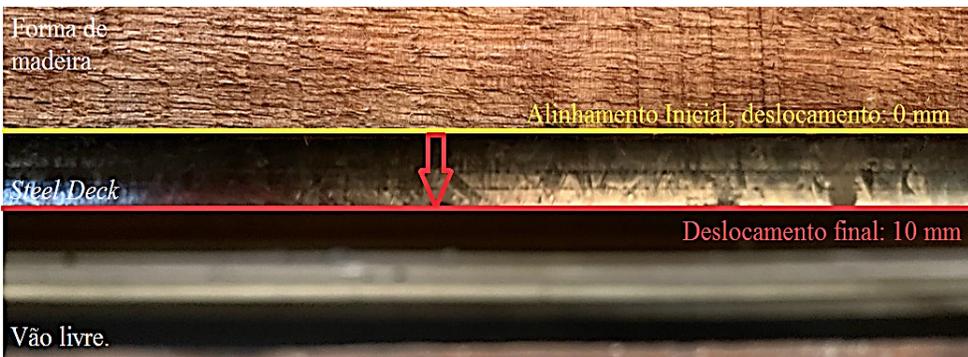
Todas as relações de cálculo e análises feitas acima foram baseadas na análise e nas fórmulas de cálculo da norma *EURO-CODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)*. Os valores de F_{des} e F_{max} são resultados dos ensaios, considerados iguais, pois somente foi relatado um deslizamento significativo no momento em que os protótipos romperam por atingir sua capacidade total. As Figuras 14 e 15 demonstram o registro do teste P5, enquanto para os demais testes todo procedimento e análise deu-se da mesma forma.

Ainda, a Figura 14, indica a aplicação da carga com o uso do atuador hidráulico manual e o início da flecha causado pela carga. O protótipo foi colocado sobre a mesa de apoio, seguindo as medidas para os vãos indicados na tabela 2 e de acordo com o indicado na

Figura 1 para lajes com vão efetivo de 2.500 mm.

Figura 14 - Aplicação de carga nas lajes de 150 mm com vão de $L = 2.500$ mm - P5

Nesta fase de início do ensaio, observa-se que o deslizamento relativo de extremidade é nulo, ou seja, a interação entre a forma de

Figura 13 - Flecha antes da cura, registro do protótipo concretado com vão de $L = 2.500$ mm

aço e o concreto é completa. Essa interação completa é rompida, quando ocorrem os primeiros sinais de deslizamentos relativos do concreto sobre a forma de aço, momento em que a interação dos materiais passa a ser parcial, causando a falha da ligação. Não havendo interação completa dos elementos, o colapso é definido por cisalhamento longitudinal, como detalhado na Figura 15.

O comportamento frágil classificado para todos os protótipos justifica-se pelo fato de, após a ocorrência do deslizamento relativo nas extremidades, a estrutura não suportar mais acréscimo de carga sobre a laje. Ou seja, quando atingiu seu máximo carregamento, foi possível notar no manômetro a redução significativa da última carga aplicada, momento em que era constatado o rompimento do sistema.

As mossas presentes na superfície das formas são as principais responsáveis pelo atrito entre concreto e forma, considerando que, para a realização do experimento aqui detalhado não foram usados quaisquer outros materiais que pudessem ajudar na resistência contra o atrito. O momento do rompimento da ligação entre os materiais é caracterizado quando as mossas perdem a capacidade de impedir o atrito e fazer a transferência ao cisalhamento longitudinal. Isso foi observado

quando o protótipo atingiu sua capacidade máxima de carregamento, momento em que se pôde obter uma melhor visualização do deslizamento lateral (Figura 15a).

No final dos ensaios, observaram-se fissuras de cisalhamento a olho nu na região de aplicação da força (Figura 15b). Nota-se uma certa simetria nas duas fissuras registradas, e suas aberturas foram aumentadas gradativamente, de acordo com a aplicação da carga sobre a laje. As fissuras se prolongam até onde está posicionada a malha de aço inserida no concreto, pois neste ponto tem-se uma menor abertura da fissura.

Do mesmo jeito que foram relatadas fissuras no concreto, houve também danos localizados na região das mesas superiores da forma metálica, e também próximos às regiões de onde as cargas estavam sendo aplicadas. Os danos registrados na forma são de menores proporções se comparados ao concreto, sendo também identificados no momento da máxima aplicação, ou seja, no momento em que o teste se deu por finalizado (Figura 15c).

A Tabela IV apresenta os resultados obtidos por meio da análise estática e o cálculo dos parâmetros do cortante em relação às dimensões da forma. Eles serviram para determinar as constantes m-k graficamente.

Figura 15 - Deslizamento lateral (a), fissuras por cisalhamento (b) e danos a forma de aço (c), ensaio P5

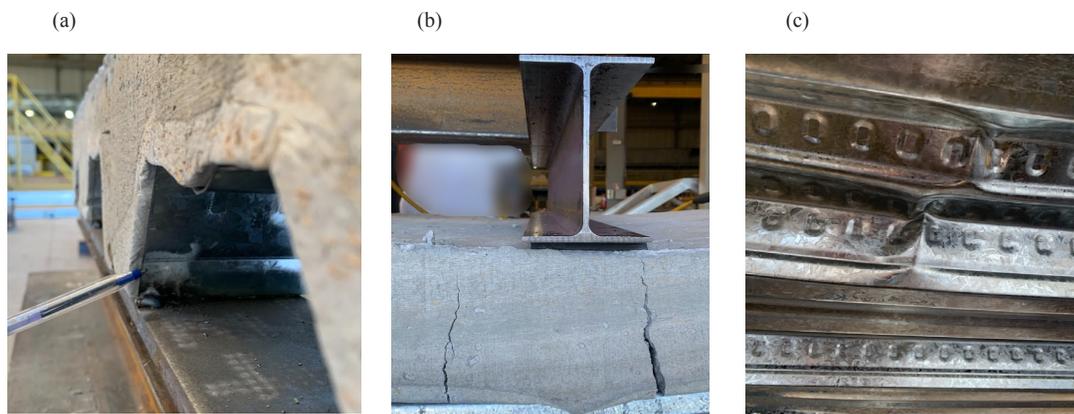


Tabela IV - Análise estática e determinação das constantes m-k

Protótipo	V_t (N)	$\frac{A_{F,ef}}{b_{L,s}}$	$\frac{V_t}{bd_p}$ (N/mm ²)	Análise estática de	$\frac{V_t}{bd_p}$ (N/mm ²)
P1	19.768,15	0,00238	0,21	Média: V_m	0,21
P2	18.752,19	0,00238	0,20	Desvio Padrão: s	0,01
P3	18.242,24	0,00238	0,20	Valor Característico: V_k	0,19
P4	16.938,50	0,00187	0,17	Média: V_m	0,17
P5	17.730,87	0,00187	0,18	Desvio Padrão: s	0,00
P6	16.938,50	0,00187	0,17	Valor Característico: V_k	0,16

Aqui,

V_k é o valor característico inferior correspondente ao quantil de 5%, $V_k = V_m - 1,65.s$.

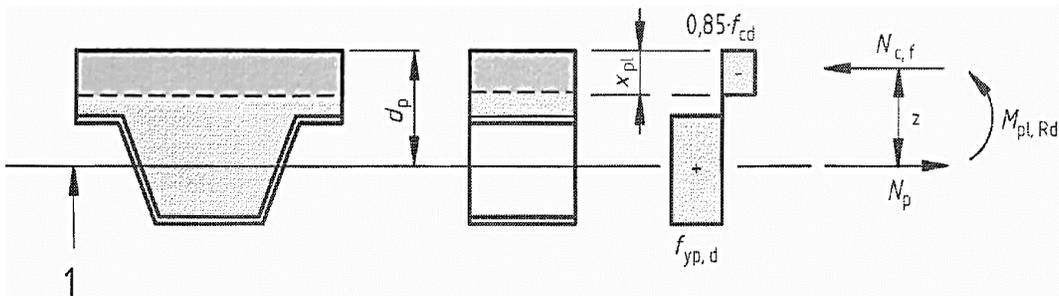
t_n é a espessura da forma metálica (ver tabela 1).

$A_{F,ef}$ é a área da seção efetiva da forma (ver tabela 1).

d_p é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma (ver Figura 16).

b é a largura da laje (ver tabela 1).

L_s é o vão de cisalhamento (ver tabela 2).

Figura 16 - Distribuição de tensão para flexão de flacidez se o eixo neutro estiver acima da chapa de aço (Fonte: EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004))

Nessa figura,

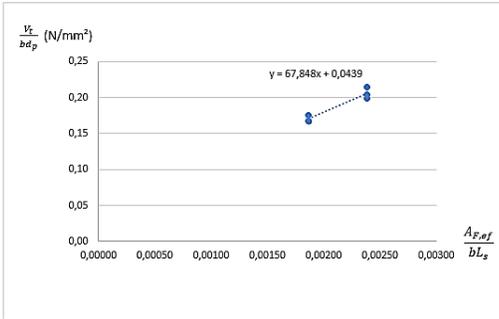
l é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma de aço.

Sendo, d_p para a laje com altura de 140 mm, 103,40 mm e para a laje com altura de 150 mm, 113,40 mm.

Com os dados experimentais da Tabela 4, referente às colunas da força cortante expe-

rimental (coluna 4) e à área da seção efetiva da forma (coluna 3), plotou-se o gráfico da determinação experimental (Figura 8) e foram determinados graficamente, a partir de uma reta, os parâmetros m-k, sendo m o coeficiente angular da reta e k a interceptação com o eixo y. Os valores aproximados encontrados para as constantes são 67,848 para m e 0,0439 para k, conforme dados da Figura 17.

Figura 17 - Determinação das constantes m-k



Com os resultados obtidos, é possível determinar a força cortante resistente de cálculo associada ao cisalhamento longitudinal dos ensaios, através da Equação 5 de cisalhamento longitudinal de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008):

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_f \left[\left(\frac{m \cdot A_{F,ef}}{bL_s} \right) + k \right]}{\gamma_{sl}} \quad (5)$$

onde,

d_f é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da forma.

b é a largura da laje.

L_s é o vão de cisalhamento.

$m - k$ são constantes empíricas, em N/

mm², obtidas através de ensaios realizados conforme *EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)*.

γ_{sl} é o coeficiente de ponderação da resistência, que é igual a 1,25, também de acordo com a *EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)*.

Com os resultados de m-k, foi possível calcular o cisalhamento teórico, e os resultados finais encontrados são expressos pela Tabela V.

Com a determinação de m-k, foi possível determinar o experimental da força cortante, bem como o teórico, sendo que a relação entre ambos não deveria ultrapassar 10% de desvio nos testes feitos. Todos ficaram dentro do permitido, uma vez que para o dimensionamento, ambos os casos, experimental e teórico, foram ponderados com o coeficiente de resistência de 1,25, de acordo com o que solicita a norma *EUROCODE 4, (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)*.

Com os resultados obtidos a partir dos cisalhamentos longitudinais, foram determinados também os momentos solicitantes

Tabela V - Determinação do cisalhamento longitudinal por m-k e comparativo experimental x teórico

Protótipo	Experimental $\frac{V_t}{\gamma_{sl}}$ (kN)	Teórico m-k $V_{l,Rd}$ (kN)	Experimental/Teórico
P1	15,81	15,14	1,04
P2	15,00		0,99
P3	14,59		0,96
P4	13,55	13,76	0,98
P5	14,18		1,03
P6	13,55		0,98

Tabela VI - Determinação do momento e comparativo experimental x teórico

Protótipo	Experimental M_s (kN.cm) (solicitante)	Teórico M_r (kN.cm) (resistente)	Experimental/Teórico
P1	1.111,96	2.169,03	0,51
P2	1.347,81		0,62
P3	1.311,16		0,60
P4	1.217,45	2.385,94	0,51
P5	1.274,41		0,53
P6	1.217,45		0,51

(experimental) e de projeto (resistentes teóricos), conforme Tabela VI.

Por fim, as sobrecargas admissíveis para os protótipos ensaiados, de forma simplesmente apoiada, resultaram em 12,56 kN/m para o vão 2,00 m, com altura de laje de 140 mm e 12,36 kN/m para o vão 2,50 m com altura de laje de 150 mm.

Conclusão

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento e a resistência de um sistema de lajes mistas com foco na resistência da forma metálica após a cura do concreto e durante a aplicação de cargas até o colapso integral da estrutura. Nesse caso, estudou-se o comportamento estrutural na interface forma de aço-concreto, que ocorre através da interação com as mossas, sem qualquer outro elemento que pudesse contribuir com essa interação, como *stud bolts*, por exemplo.

O ensaio, realizado com base na norma *EUROCODE 4* (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004), almejou determinar, através do método semiempírico, os parâmetros m-k a partir de uma regressão linear, observando flechas,

deslizamentos relativos de extremidade na interface aço-concreto e deformações causadas pela aplicação de carga.

Na análise global dos resultados obtidos foi possível observar que, inicialmente, existe uma interação completa entre a forma de aço e o concreto. Além disso, com o aumento da aplicação da carga sobre os protótipos, ocorre a ruptura da aderência da forma com o concreto, rompendo o sistema misto.

Com a determinação dos valores de m 67,848 e k 0,0439, foi possível determinar as resistências ao cisalhamento longitudinal, bem como a capacidade de carga que as lajes ensaiadas resistem, sendo 12,56 kN/m relativo a lajes com altura de 140 mm e vão de 2.000 mm e 12,36 kN/m a lajes com altura de 150 mm e vão de 2.500 mm. Em relação à determinação dos esforços cortantes, experimental e teórico, expresso na tabela 5, pelo método de ensaio realizado m-k, observa-se que os resultados obtidos são muito próximos, o que comprova que os resultados encontrados são confiáveis e seguros.

Considera-se que o objetivo do presente trabalho, bem como os resultados dos testes e os cálculos para este modelo de forma metálica e para as dimensões estudadas fo-

ram atendidos, ficando dentro das variações permitidas pelas normas aqui estudadas. É válido ressaltar que, se ocorrer qualquer variação no tamanho ou nas características da forma estudada, será necessário refazer as verificações, bem como os ensaios para nova

determinação dos parâmetros empíricos, seguindo as premissas das normas e as novas análises de cisalhamento e de determinação das tensões admissíveis para o modelo estudado, visto que qualquer alteração impacta, significativamente, nos resultados obtidos.

NOTAS

¹ The surface of the profiled steel sheet shall be in the ‘as-rolled’ condition, no attempt being made to improve the bond by degreasing the surface.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- CALIXTO, J. M. et al. Estudo Comparativo dos Critérios de Dimensionamento ao Cisalhamento Longitudinal em Lajes Mistas de Aço e Concreto. **Revista Ibracon De Estruturas e Materiais**, v. 2, n. 2, p. 124-141, 2019.
- CICHINELLI, G. Construção Rápida: Sistema misto que dispensa parcial ou totalmente o escoramento, o *steel deck* agiliza a execução e reduz custos. **Revista Téchné**, ed. 179, 2011. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/179/construcao-rapida-sistema-misto-que-dispensa-parcial-ou-totalmente-287917-1.aspx>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- DIAS, G. T.; ABREU, W. de S. **Lajes Steel Deck**. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Evangélica, Anápolis - GO, 2018.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – ECS. EUROCODE 4. EN 1994-1-1: **Design of composite steel and concrete structures**. ICS 91.010.30; 91.080.10; 91.080.40 - The European Union: Edict of Government, 2005.
- FERRAZ, C. B. **Análise do Comportamento e da Resistência do Sistema de Lajes Mistas**. Belo Horizonte, 1999. 168 p Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.
- NETO, A. S. de S. **Análise do Comportamento e da Resistência de um Sistema de Lajes Mistas com Ancoragem de Extremidade com considerações sobre a fôrma de aço isolada e o atrito nos apoios**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2001. 236 p Dissertação (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2001.
- SIEG, A. P. A. **Estudo de um Sistema de Laje com fôrma de aço Incorporada**. 143 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

