

PROPOSTA DE UMA ROTINA DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE LAJES TIPO STEEL DECK

Emily Savio Mondardo (1); Alexandre Vargas (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)mondardoemily@gmail.com; (2)avargas@unesc.net

RESUMO

O sistema de laje mista de aço e concreto denominado Steel Deck é composto por uma fôrma trapezoidal de aço galvanizado, uma camada de concreto estrutural, uma malha de aço anti-fissuração e, quando necessário, armadura adicional. Usualmente, para o seu emprego, adotam-se como dimensionamento tabelas produzidas pelos fabricantes das fôrmas, onde são definidas faixas de cargas, vãos máximos da laje, espessuras, formato das fôrmas entre outros parâmetros. Para valores intermediários a essas faixas, adota-se o valor superior, acarretando em algumas situações, em desperdício. A rotina de cálculo apresentada neste artigo foi elaborada com base na NBR 8800:2008 e suas recomendações e tem como objetivo otimizar o dimensionamento a partir de uma planilha no Microsoft Office Excel, possibilitando uma maior flexibilização, de forma que o usuário possa criar a partir das seções de fôrmas disponibilizadas, variações de espessuras, cargas e vãos, não ficando limitado as faixas pré estabelecidas. Além do dimensionamento do sistema, o usuário pode verificar o cisalhamento, flambagem local, verificação da fôrma na fase inicial além do deslocamento vertical.

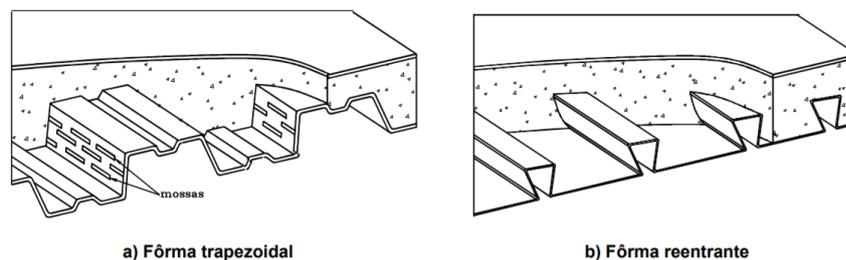
Palavras-Chave: laje; Steel Deck; dimensionamento, planilha.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de laje mista de aço e concreto denominado Steel Deck é composto por uma fôrma de trapezoidal de aço galvanizado, uma camada de concreto estrutural, uma malha anti-fissuração e, se necessário, armadura adicional. De acordo com a NBR 8800 (2008, p. 211): “[...] laje com forma de aço incorporada, é aquela que, na fase final, o concreto atua estruturalmente em conjunto com a fôrma de aço, funcionando como parte ou como toda a armadura de tração da laje.” Este sistema de lajes é extremamente versátil por diversos motivos, pode-se configurar a laje em uma variedade de características a fim de atender a todos os esforços estruturais atuantes nela. Outra vantagem é que além de exercer a função de fôrma para o concreto estrutural, ela também atua como escoramento da laje. Segundo Bragança (2000) “podemos substituir a prática da utilização de fôrmas de madeira e seu

respectivo escoramento por chapas de aço conformadas, que são autoportantes.” Para que a função estrutural desse sistema misto funcione, a forma geométrica da fôrma é de extrema importância para que haja aderência entre os dois materiais. De acordo com Beltrão (2003, p. 35) “a ausência de aderência gera um deslizamento entre os dois materiais fazendo com que ambos trabalhem de forma isolada, além de impossibilitar a transferência de esforços.” A NBR 8800:2008 menciona duas formas para se obter aderência entre o aço e o concreto, uma delas é a ligação mecânica por meio de moças nas formas de aço trapezoidais e também, a ligação por meio do atrito devido ao confinamento do concreto nas fôrmas de aço reentrantes. Para determinar a forma mais adequada para cada situação, devem ser levados em consideração algumas características de projeto. Segundo Cichinelli (2011, p. 1) “A partir do vão e da sobrecarga pretendida, é possível determinar a espessura de chapa mais adequada para o Steel Deck e a espessura total da laje.” A Figura 01 ilustra modelos de fôrmas que podem ser utilizadas.

Figura 01 – Modelos de Fôrmas



Fonte: NBR 8800, 2008, p. 211

Para o dimensionamento das lajes mistas tipo Steel Deck se faz duas considerações principais: o dimensionamento da forma para o concreto fresco considerando as sobrecargas de obra, e a laje como um todo com o concreto endurecido. Segundo a NBR 8800 (2008, p. 211) “Na fase inicial, ou seja, antes do concreto atingir 75% da resistência à compressão especificada, a fôrma de aço suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção.” A partir do momento em que o concreto atinge sua resistência de projeto o sistema misto de aço e concreto começa a funcionar como um sistema monolítico. De acordo com a NBR 8800 (2008, p. 219) “Para os estados-limites últimos de lajes mistas de aço e concreto, deve-se considerar que todo o carregamento é sustentado pelo sistema misto de aço e concreto.” Pela falta de praticidade em realizar o cálculo desse tipo de laje, a prática usual na região de Criciúma/SC para a utilização de lajes tipo Steel Deck é o de

utilizar fôrmas de aço padronizadas e pré dimensionadas pelas empresas fornecedoras do material, e, para o dimensionamento, utilizar tabelas pré-estabelecidas por estas empresas com as características da laje. Silva relata que referências para a especificação do dimensionamento do Steel Deck são as tabelas de cargas disponibilizadas pelos fabricantes, que mesclam dados tais como espessura das chapas, vãos máximos permitidos, peso próprio da laje, espessura da laje, tipo (forro ou piso). Desta forma, esse sistema não consegue obter a sua máxima relação de custo-benefício. A CSSBI S15 (2012, p. 3) menciona que variações na espessura, forma e profundidade do Steel Deck podem ser adotados como meio para atender uma variedade de condições de cargas e vãos, portanto, a fim de viabilizar esta variação nas características de lajes Steel Deck com um melhor custo-benefício foi o que motivou essa pesquisa. O trabalho consiste na criação de uma proposta de rotina de cálculo para lajes Steel Deck, que permite utilizar diferentes tipos e perfis de fôrma, possibilitando variar com maior amplitude, as configurações do sistema. Segundo uma pesquisa realizada pela ABCEM/CBCA (2017) “Quase 90% das empresas produzem somente telha de aço e 10% da amostra pesquisada fabricam Steel Deck. Apenas 1 empresa produz somente Steel Deck.” Tendo em vista que o Steel Deck é uma chapa de aço dobrada, observa-se que o presente estudo pode contribuir para que as empresas que trabalham apenas com telhas de aço tenham a possibilidade de trabalhar com este outro produto, a partir da utilização de materiais adequados e que atendam as normas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado a partir do dimensionamento disponibilizado na NBR 8800:2008. As equações dispostas nesta norma foram replicadas e organizadas em tabelas elaboradas no Microsoft Office Excel a fim de obter todos os dimensionamentos necessários. A partir destas tabelas foi criada a planilha de trabalho final, onde o usuário insere os dados solicitados e, a partir destes, obtém os resultados em tempo real, podendo alterar qualquer dos dados de entrada. A rotina de cálculo é restrita a lajes Steel Deck unidirecionais, bi apoiadas, com cargas uniformemente distribuídas e sem armaduras adicionais. O fato de não ser levado em consideração as armaduras adicionais relaciona-se a flexibilidade em dimensionar a espessura da fôrma de aço necessária para o sistema a ser

dimensionado, não havendo um limite imposto, portanto, não se faz necessária a armadura adicional nesta rotina de cálculo. Não são considerados os materiais dos apoios.

2.1 ROTINA PARA DIMENSIONAMENTO

A rotina para o dimensionamento de lajes Steel Deck é dividida em dados de entrada e de saída. Os de entrada são necessários para o dimensionamento dos esforços, atendendo as necessidades de projeto. Estes são inseridos pelo usuário na planilha, respeitando as unidades de medida especificadas na mesma. Os dados de saída são fornecidos pela rotina de cálculo, de forma que o usuário pode verificar se a laje configurada atende ou não aos esforços solicitantes. Também fornece as verificações necessárias para o dimensionamento de lajes Steel Deck com as características impostas neste dimensionamento.

2.2 DADOS DE ENTRADA

2.2.1. Vão efetivo

O vão efetivo a ser considerado é a distância entre os eixos dos apoios da laje e no sentido das nervuras da fôrma de aço.

2.2.2. Cargas permanentes

De acordo com a NBR 6118 (2014, p. 56) “As ações permanentes diretas são constituídas pelo peso próprio da estrutura, enchimentos e revestimentos, pelos pesos dos elementos construtivos fixos, das instalações permanentes e dos empuxos permanentes.” Para efeito de cálculo desta rotina, será considerado apenas o peso próprio dos elementos constituintes da estrutura da laje, o concreto e a fôrma de aço.

2.2.3. Cargas acidentais

Conforme a NBR 6120 (1980, p. 1) carga acidental “É toda aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais

diversos, veículos etc.).” Para definir qual o valor mais adequado para a ocupação da laje a ser dimensionada consultar a Tabela 2 da NBR 6120:1980.

2.2.4. Tipo de concreto

O tipo de concreto a ser definido segue a necessidade de projeto, logo, pode-se estimar um valor para o dimensionamento e, posteriormente, alterá-lo a fim de se adequar aos resultados desejados pelo usuário. De acordo com a NBR 6118 (2014, p. 1) “A classe C20, ou superior, se aplica a concreto com armadura passiva e a classe C25, ou superior, a concreto com armadura ativa.” Pelo sistema de lajes em estudo estar trabalhando com armaduras frouxas (sem protensão), as mesmas são armaduras passivas. Portanto, os valores de resistência do concreto a serem utilizados para o dimensionamento de lajes Steel Deck devem estar compreendidos entre C20 e C50.

2.2.5. Tipo de aço da fôrma metálica

O tipo de aço da fôrma é definido de acordo com a necessidade do dimensionamento do sistema, de forma que resista ao momento fletor positivo atuante. De acordo com a NBR 14762:2010 os aços com resistência ao escoamento inferior a 250 MPa não são utilizados na prática, o que implica dizer que, a tensão de escoamento do aço deve ser igual ou superior a 250 MPa. A tabela apresentada na Figura 02 é disponibilizada pela NBR 14762:2010 e expressa os tipos de chapas finas de aço e suas especificações.

Figura 02 – Chapas finas de aço especificadas por Normas Brasileiras para uso estrutural

| Especificação | Grau | fy (MPa) | fu (MPa) |
|---|-----------|----------|----------|
| ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono | CF-26 | 260/260 | 400/410 |
| | CF-28 | 280/280 | 440/440 |
| | CF-30 | ---/300 | ---/490 |
| ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica | F-32/Q-32 | 310 | 410 |
| | F-35/Q-35 | 340 | 450 |
| | Q-40 | 380 | 480 |
| | Q-42 | 410 | 520 |
| | Q-45 | 450 | 550 |
| ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica | CFR 400 | ---/250 | ---/380 |
| | CFR 500 | 310/370 | 450/490 |
| ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico ^b | ZAR 250 | 250 | 360 |
| | ZAR 280 | 280 | 380 |
| | ZAR 320 | 320 | 390 |
| | ZAR 345 | 345 | 430 |
| | ZAR 400 | 400 | 450 |

^a A faixa de espessura disponível varia de acordo com o produtor de aço.

^b Graus conforme ABNT NBR 7008.

Fonte: NBR 14762:2010, p. 12.

2.2.6. Geometria da fôrma

A geometria da fôrma de aço deve ser trapezoidal, sendo ela reentrante ou não, conforme Figura 01. Esta forma geométrica permite um maior momento de inércia com menor peso próprio do sistema e também uma ligação mecânica e de atrito. Além da fôrma geométrica, deve-se levar em consideração moedas ou reentrâncias na fôrma para garantir a aderência entre os materiais, de forma a garantir que trabalhem como um sistema misto.

2.2.7. Espessura da fôrma de aço

A espessura da fôrma de aço depende da necessidade do sistema. Quanto maior o momento fletor positivo atuante no sistema, maior a espessura de aço necessária para que resista a estas solicitações. Deve-se consultar as espessuras, fôrmas e dimensões comerciais existentes no mercado.

2.2.8. Espessura da camada de concreto

A espessura da camada de concreto constitui a capa de compressão e contribui para um maior momento de inércia do sistema, ela também depende dos esforços atuantes.

2.3 DADOS DE SAÍDA

2.3.1. Momento fletor atuante

O momento fletor atuante é calculado utilizando-se a Equação 1, por tratar-se de uma laje bi apoiada com carga uniformemente distribuída.

$$Md = 1,4 * \left(\frac{q * l^2}{8} \right)$$

Equação 1

Onde:

q é a carga distribuída;

l é o vão efetivo da laje.

2.3.2. Momento fletor resistente

O momento fletor resistente é calculado conforme duas expressões fornecidas pela NBR 8800:2008. As expressões servem para duas situações, quando a linha neutra se posiciona acima e abaixo da face superior da fôrma de aço, conforme Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$M_{rd} = N_{pa}(dF - 0,5 * \alpha) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

N_{pa} é a força de tração da fôrma de aço, dada por:

$$N_{pa} = A_{f,ef} * f_y, F_d;$$

f_y, F_d é a resistência de cálculo ao escoamento do aço da fôrma;

$A_{f,ef}$ é a área da seção efetiva da fôrma de aço;

dF é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

α é a altura do bloco de compressão do concreto, dada por:

$$\alpha = \frac{N_{pa}}{0,85 * f_{cd} * b};$$

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto à compressão;

b é a largura unitária da laje, igual a um metro.

$$M_{rd} = N_{cf} * y + M_{pr} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

N_{cf} é dado por:

$$N_{cf} = 0,85 * b * t_c * f_{cd};$$

t_c é a altura da laje de concreto acima do topo da fôrma de aço;

y é dado por:

$$y = ht - 0,5 * tc - ep + (ep - e) \frac{N_{cf}}{N_{pa}};$$

ht é a altura total da laje, incluindo a fôrma de concreto;

e é a distância do centro geométrico da área efetiva da fôrma à sua face inferior;

ep é a distância da linha neutra plástica da seção efetiva da forma à sua face inferior;

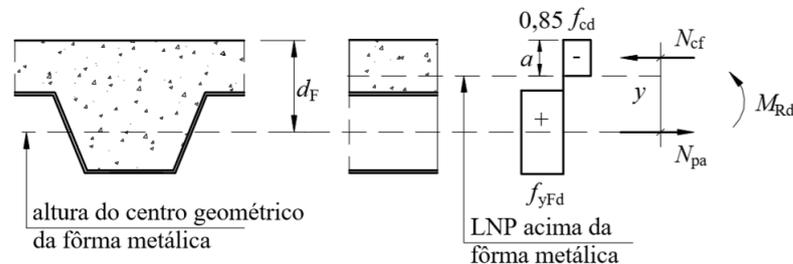
M_{pr} é o momento de plastificação da fôrma de aço, reduzido pela presença da força axial, dado por:

$$M_{pr} = 1,25 * M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa}$$

M_{pa} é o momento de plastificação da fôrma de aço, considerando sua seção efetiva, dividido pelo coeficiente de ponderação da resistência γ_{a1} que é tomado pelo valor de 1,1.

A Figura 03 permite visualizar alguns dados utilizados nas Equações 2 e 3.

Figura 03 – Dados geométricos da forma metálica

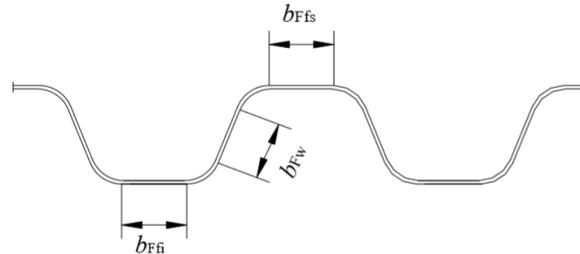


Fonte: NBR 8800, 2008, p. 213

2.3.3. Verificação da flambagem local na fôrma de aço

Para que não ocorra flambagem local na forma da laje Steel Deck, as dimensões das larguras planas inseridas pelo usuário (possuindo ou não mossas) devem atender as calculadas pelas equações fornecidas pela NBR 8800:2008. De acordo com a Figura 04 pode-se visualizar as dimensões que devem atender aos cálculos.

Figura 04 – Dimensões de verificação para a flambagem local



Fonte: NBR 8800, 2008, p. 214

Os valores de b_{Ffi} , b_{Ffw} e b_{Ffs} devem atender aos valores calculados. As expressões 4 e 5 são aplicadas quando o valor de $\alpha \geq 0,5$ e $\alpha < 0,5$, respectivamente.

Quando $\alpha \geq 0,5$

$$bF \leq \frac{26,49 \sqrt{\frac{E}{fyF}}}{(13 * \alpha - 1)} tF$$

Equação 4

Quando $\alpha < 0,5$

$$bF \leq \frac{2,40 \sqrt{\frac{E}{fyF}}}{\alpha} tF$$

Equação 5

Onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

fyF é a resistência ao escoamento do aço da forma;

tF é a espessura da fôrma de aço;

α é a relação entre a largura da parte comprimida e a largura plana do elemento, podendo ser adotados os valores empíricos de 0,5 e 1,0 para a alma e mesa, respectivamente.

2.3.4. Verificação do deslocamento vertical

O deslocamento vertical das lajes Steel Deck não deve exceder o valor resultante da Equação 6.

$$\delta = \frac{LF}{350} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

LF é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

Para a determinação do deslocamento vertical é utilizada a Equação 7:

$$f = \frac{5}{384} * \frac{q * l^4}{E * I} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

q é o valor das cargas variáveis atuantes na laje;

l é o vão teórico da laje na direção das nervuras;

E é o módulo de elasticidade do aço;

I é o momento de inércia da seção.

2.3.5. Verificação do cisalhamento longitudinal

A força cortante longitudinal resistente de cálculo de lajes Steel Deck é calculada por um método semi-empírico, utilizando constantes denominadas m e k que foram retiradas da Eurocode 4 Part 1-1, conforme solicitado pela NBR 8800:2008. O cálculo deve ser feito conforme Equação 8.

$$Vl, Rd = \frac{b * dF \left[\left(\frac{m * AF, ef}{b * Ls} \right) + k \right]}{\gamma sl} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

b é a largura unitária da laje, adotada como um metro;

d_F é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma;

m e k são constantes empíricas retiradas da Eurocode 4 Part 1-1, que podem ser tomadas igual a 8 e 0,8, respectivamente;

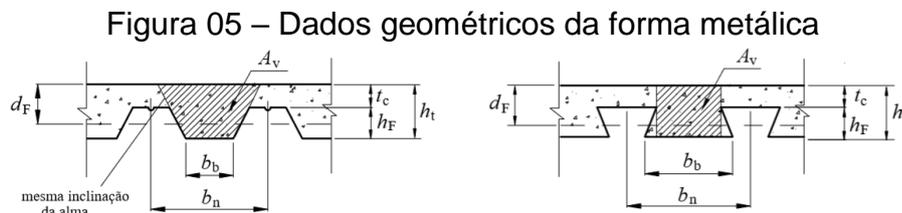
$A_{f,ef}$ é a área da seção efetiva da fôrma de aço;

L_s é o vão de cisalhamento, onde para cargas uniformemente distribuídas pode ser considerado como: $L_s = LF / 4$;

γ_{sl} é o coeficiente de ponderação da resistência, igual ao determinado pela norma ou especificação nos ensaios, que, conforme a Eurocode 4 Part 1-1 é tomado por 1,25.

2.3.6. Verificação do cisalhamento vertical

A força cortante vertical resistente de cálculo de lajes Steel Deck deve ser calculada pela Equação 9. Para melhor entendimento dos valores utilizados para o mesmo, a Figura 05 ilustra os dados.



Fonte: NBR 8800, 2008, p. 215

$$V_{v,Rd} = V_{v,F,Rd} + V_{v,c,Rd} \leq V_{\max}$$

Equação 9

Onde:

$V_{v,F,Rd}$ é a força cortante vertical resistente de cálculo da fôrma de aço incorporada;

$V_{v,c,Rd}$ é a força cortante vertical resistente de cálculo do concreto, que deve ser calculada por:

$$V_{v,c,Rd} = \frac{1000 * \tau_{Rd} * k_v(1,2 + 40\rho) A_v}{b_n}$$

Com:

$$\tau R_d = 0,25 * f_{ctd}$$

k_v é adotado como valor 1,0, levando em conta que não haverá armadura longitudinal de tração;

$$\rho = \frac{A_s}{A_v} \leq 0,02$$

$$f_{ctd} = \frac{\eta * f_{ctk,inf}}{\gamma_c}$$

$$\eta = 0,3 + 0,7 * \left(\frac{\rho_c}{2400} \right)$$

Sendo que:

A_v é a área resistente do concreto;

A_s é a área da armadura longitudinal de tração referente a área A_v ;

b_n é a largura entre duas nervuras consecutivas;

d é a distância da face superior da laje de concreto ao centro da armadura longitudinal de tração;

ρ_c é a massa específica do concreto, não podendo ser tomado um valor superior a 2400kg/m³;

$f_{ctk,inf}$ é a resistência a tração direta característica inferior do concreto, conforme a NBR 6118, igual a $0,21 * f_{ck}^{2/3}$;

γ_c é o coeficiente de ponderação tomado pelo valor de 1,4.

Para o cálculo de V_v, F, R_d , foi utilizado o dimensionamento proposto pela NBR 14762:2010, que apresenta três equações para o dimensionamento, utilizando o parâmetro h/t , onde h é a altura da alma e t é a espessura da mesma:

Para $h/t \leq 1,08(E * k_v / f_y)^{0,5}$ utiliza-se:

$$V_v, F, R_d = \frac{0,6 * f_y * h * t}{\gamma}$$

Para $1,08(E * k_v / f_y)^{0,5} < h/t \leq 1,4(E * k_v / f_y)^{0,5}$ utiliza-se:

$$V_v, F, R_d = \frac{0,65 * t^2 * (k_v * f_y * E)^{0,5}}{\gamma}$$

Para $h/t > 1,4(E * k_v / f_y)^{0,5}$ utiliza-se:

$$V_v, F, Rd = \frac{(0,905 * E * k_v * t^3 / h)}{\gamma}$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do aço;

k_v é o coeficiente de flambagem local por cisalhamento, dado pelo valor de 5,0, sendo que não haverá enrijecedores transversais;

γ é o coeficiente de ponderação tomado por 1,10.

O valor comparativo para o cisalhamento longitudinal e vertical não pode exceder o valor calculado pela expressão da Equação 10.

$$V_{\max} = \frac{1000 * 0,285 * (f_{ck})^{1/2} * A_v}{b_n}$$

Equação 10

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

A_v é a área resistente do concreto;

b_n é a largura entre duas nervuras consecutivas.

2.3.7. Verificação da fase inicial da fôrma de aço

A verificação da fase inicial da fôrma de aço refere-se ao estágio em que o concreto ainda não possui a resistência de projeto. Portanto, para tal verificação ser válida, a fôrma deve resistir a todos os esforços solicitantes sozinha. De acordo com a NBR 8800:2008 as ações que devem ser levadas em consideração na verificação da fôrma na fase inicial são os pesos próprios do concreto fresco, da fôrma de aço e da armadura, a sobrecarga da construção e o efeito de empoçamento. Os cálculos considerados para esta verificação foram a tensão de escoamento do aço e o deslocamento vertical para o concreto fresco e para o efeito de empoçamento.

Para o cálculo da tensão de escoamento do aço foi utilizada a seguinte Equação 11.

$$\tau = \frac{Mk * y}{I}$$

Equação 11

Sendo que:

Mk é o momento fletor atuante de serviço;

y é a altura do centro de gravidade;

I é o momento de inércia correspondente a um metro da seção.

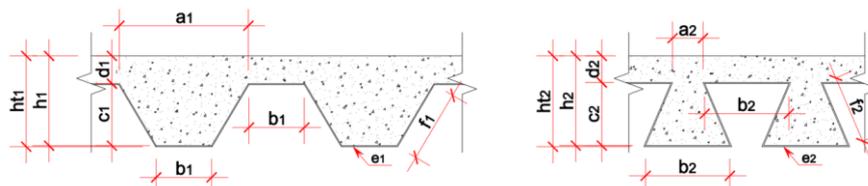
O valor comparativo para o cálculo da tensão de escoamento do aço é o valor adotado pelo usuário.

O cálculo do deslocamento vertical é feito a partir da Equação 7, sendo que o valor da carga “q” refere-se ao peso próprio da fôrma de aço somado ao do concreto fresco, na qual o valor calculado por esta expressão não deve exceder os valores de $LF / 180$ ou 20mm (o que for menor) para o concreto fresco e $LF / 250$ para o efeito de empoçamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das equações apresentadas neste artigo, produziu-se uma planilha no Microsoft Office Excel com dois formatos geométricos de fôrmas pré-estabelecidas. Estes formatos elencados para esta rotina de cálculo são os mesmos que a NBR 8800:2008 menciona.

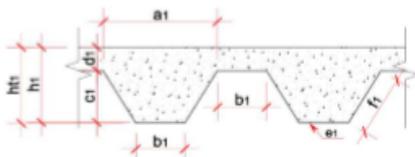
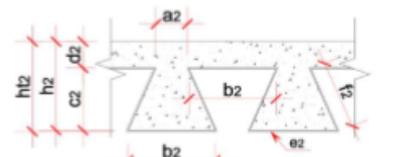
Figura 06 – Formatos geométricos das fôrmas de aço



Os formatos geométricos da Figura 06 constam na planilha. De acordo com esta imagem e suas incógnitas, o usuário define qual valor inserir em cada incógnita para

que o cálculo seja feito. A planilha permite que o usuário faça o dimensionamento para ambos os formatos trapezoidais simultaneamente, tendo assim um comparativo entre os dois tipos de seções geométricas, auxiliando na definição da melhor opção para a situação de projeto. Para o processamento do cálculo e verificações, deve-se inserir os dados de entrada nos valores em vermelho, que se localizam nos campos de cor azul. Os outros valores são gerados automaticamente, que se diferem por estarem em azul e nos campos de cor verde (conforme legenda na planilha). A Figura 07 mostra os dados de entrada na planilha.

Figura 07 – Planilha de cálculo: Dados de entrada

| Dimensionamento de lajes tipo Steel Deck | | |
|---|----------|---|
| Lajes bi apoiadas, com cargas uniformemente distribuídas e sem armaduras adicionais | | |
| Dados inseridos | | Dados calculados |
| Laje tipo 1 | | Laje tipo 2 |
|  | |  |
| DADOS DE ENTRADA (preencher os campos em vermelho) | | DADOS DE ENTRADA (preencher os campos em vermelho) |
| DADOS DA FORMA DE AÇO (medidas internas) | | |
| nomenclatura | valor | unidade |
| a1 | 15,00 | cm |
| b1 | 7,00 | cm |
| c1 | 7,00 | cm |
| d1 | 3,00 | cm |
| e1 (forma) | 0,400 | cm |
| h1 | 10,00 | cm |
| ht1 | 10,400 | cm |
| vão teórico | 6,50 | m |
| fck concreto | 35 | MPa |
| Fy aço | 280 | MPa |
| CARGAS NA LAJE | | |
| Sobrecarga | 300 | kgf/m ² |
| Carga permanente | 100 | kgf/m ² |
| Peso próprio total | 177,836 | kgf/m ² |
| DADOS DA FORMA DE AÇO (medidas internas) | | |
| nomenclatura | valor | unidade |
| a2 | 8,00 | cm |
| b2 | 15,00 | cm |
| c2 | 10,00 | cm |
| d2 | 5,00 | cm |
| e2 (forma) | 0,400 | cm |
| h2 | 15,00 | cm |
| ht2 | 15,400 | cm |
| vão teórico | 6,00 | m |
| fck concreto | 20 | MPa |
| Fy aço | 280 | MPa |
| CARGAS NA LAJE | | |
| Sobrecarga | 300 | kgf/m ² |
| Carga permanente | 100 | kgf/m ² |
| Peso próprio total | 274,9271 | kgf/m ² |

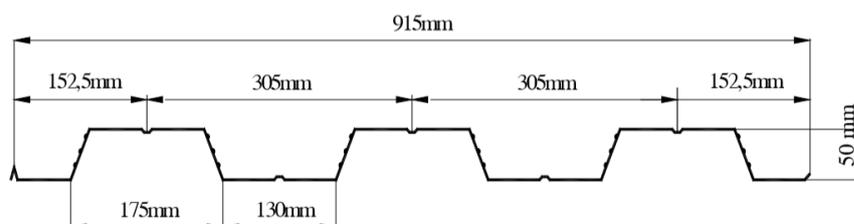
Logo abaixo dos dados de entrada, localizam-se os dados de saída, onde se encontram todas as verificações dos esforços atuantes na laje. Para fácil visualização do atendimento ou não das verificações, foram adotados símbolos de verificação “✓” que significa que atendeu e de xis “X”, para os itens não atendidos. Pode-se observar essa tela na Figura 08.

Figura 08 – Planilha de cálculo: Resultados e Verificações

| CÁLCULO DOS MOMENTOS | | | ✓ | CÁLCULO DOS MOMENTOS | | | ✗ |
|--------------------------------------|------------|--------|---|--------------------------------------|-------------|--------|---|
| Md atuante | 427.237,58 | kgf.cm | ✓ | Mk atuante | 425.204,085 | kgf.cm | ✗ |
| Md resistente | 558.399,23 | kgf.cm | | Md resistente | 329.115,13 | kgf.cm | |
| coeficiente de segurança para MF= | 1,31 | | | coeficiente de segurança para MF= | 0,77 | | |
| VERIFICAÇÕES | | | | VERIFICAÇÕES | | | |
| FLAMBAGEM LOCAL NA ALMA | | | | FLAMBAGEM LOCAL NA ALMA | | | |
| f1 | 8,06 | cm | ✓ | f2 | 10,59 | cm | ✓ |
| bf | 51,49 | cm | | bf | 51,49 | cm | |
| FLAMBAGEM LOCAL NA MESA | | | | FLAMBAGEM LOCAL NA MESA | | | |
| b1 | 7,00 | cm | ✓ | b2 | 15,00 | cm | ✓ |
| bf | 23,60 | cm | | bf | 23,60 | cm | |
| CISALHAMENTO LONGITUDINAL | | | | CISALHAMENTO LONGITUDINAL | | | |
| Vl,Rd | 40.195,49 | N | ✓ | Vl,Rd | 71.237,47 | N | ✗ |
| Vmáx | 97.442,44 | N | | Vmáx | 66.498,72 | N | |
| CISALHAMENTO VERTICAL | | | | CISALHAMENTO VERTICAL | | | |
| Vv,Rd | 46.805,34 | N | ✓ | Vv,Rd | 29.358,10 | N | ✓ |
| Vmáx | 97.442,44 | N | | Vmáx | 66.498,72 | N | |
| DESLOCAMENTO VERTICAL | | | | DESLOCAMENTO VERTICAL | | | |
| fatuante | 0,5905 | mm | ✓ | fatuante | 0,0904 | mm | ✓ |
| flimite | 185,71 | mm | | flimite | 171,43 | mm | |
| VERIFICAÇÃO DA FORMA NA FASE INICIAL | | | | VERIFICAÇÃO DA FORMA NA FASE INICIAL | | | |
| DESLOCAMENTO VERTICAL | | | | DESLOCAMENTO VERTICAL | | | |
| fatuante | 0,2625 | mm | ✓ | fatuante | 0,0621 | mm | ✓ |
| flimite | 20,00 | mm | | flimite | 20,00 | mm | |
| DESLOCAMENTO VERTICAL EMPÇOAMENTO | | | | DESLOCAMENTO VERTICAL EMPÇOAMENTO | | | |
| fatuante | 0,0000 | mm | ✓ | fatuante | 6,2120 | mm | ✓ |
| flimite | 260,00 | mm | | flimite | 240,00 | mm | |
| TENSÃO DE ESCOAMENTO | | | | TENSÃO DE ESCOAMENTO | | | |
| Tatuante | 152,1205 | MPa | ✓ | Tatuante | 36,5411 | MPa | ✓ |
| Tlimite | 280,00 | MPa | | Tlimite | 280,00 | MPa | |

A partir de testes de dimensionamentos utilizando a planilha, pode-se observar que a Laje tipo 02 obteve resultados superiores de resistência aos esforços impostos quando comparados com a Laje tipo 01, em razão da maior área de aço, gerada pelo seu formato geométrico localizada na região inferior da fôrma onde ocorrem os esforços de tração. Em contrapartida, a Laje tipo 02, tem maior facilidade de ocorrência de flambagem local na mesa da forma, dependendo da espessura adotada para o dimensionamento. Foram realizados três comparativos de dimensionamento com a rotina de cálculo proposta por este trabalho e uma tabela de um fabricante de lajes tipo Steel Deck. A fôrma de aço utilizada para estes comparativos possuiu as características demonstradas na Figura 09:

Figura 09 – Fôrma de aço



Fonte: METFORM S. A. 2007, p.3.

Estas especificações são para a largura de um metro. A tensão de escoamento do aço é de 280 MPa e o fck do concreto 20 MPa. Para o primeiro comparativo, foi realizado com os dados destacados em azul na tabela, conforme Figura 10.

Figura 10 – Tabela de dimensionamento de lajes Steel Deck

STEEL DECK MF-50

Tabela de Cargas Sobrepostas Máximas (kN/m²)

Aço ZAR-280 - f_y = 280 MPa

| Espes- sura (mm) | Vãos Máximos Sem Escoramento | | | | Peso Próprio (kN/m ²) | Momento Inércia (10 ⁸ mm ⁴) | Vãos da Laje Mista com Steel Deck MF-50 (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------------|-------|--------|---------|---|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | Simplex | Duplo | Triplo | Balanço | | | 1.800 | 1.900 | 2.000 | 2.100 | 2.200 | 2.300 | 2.400 | 2.500 | 2.600 | 2.700 | 2.800 | 2.900 | 3.000 | 3.100 | 3.200 | |
| 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 2.050 | 2.800 | 2.900 | 900 | 1,85 | 5,25 | 9,31 | 8,14 | 7,14 | 6,28 | 5,54 | 4,89 | 4,32 | 3,82 | 3,38 | 3,18 | 2,99 | 2,63 | 2,32 | 2,03 | 1,78 | 1,54 |
| 0,95 | 2.550 | 3.150 | 3.250 | 1.100 | 1,86 | 5,61 | 11,68 | 10,24 | 9,01 | 7,96 | 7,04 | 6,25 | 5,55 | 4,94 | 4,40 | 4,15 | 3,92 | 3,49 | 3,10 | 2,75 | 2,44 | 2,16 |
| 1,25 | 3.200 | 3.800 | 3.800 | 1.450 | 1,89 | 6,26 | 16,43 | 14,45 | 12,76 | 11,31 | 10,06 | 8,97 | 8,02 | 7,18 | 6,44 | 6,10 | 5,78 | 5,19 | 4,67 | 4,19 | 3,77 | 3,38 |
| 110 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.800 | 2.700 | 2.800 | 900 | 2,08 | 6,89 | 10,56 | 9,23 | 8,10 | 7,13 | 6,29 | 5,55 | 4,91 | 4,34 | 3,84 | 3,61 | 3,39 | 3,00 | 2,64 | 2,32 | 2,02 | 1,76 |
| 0,95 | 2.400 | 3.050 | 3.150 | 1.050 | 2,10 | 7,35 | 13,25 | 11,62 | 10,23 | 9,03 | 8,00 | 7,10 | 6,31 | 5,61 | 5,00 | 4,72 | 4,45 | 3,96 | 3,53 | 3,13 | 2,78 | 2,46 |
| 1,25 | 3.050 | 3.650 | 3.650 | 1.400 | 2,13 | 8,19 | 18,64 | 16,39 | 14,48 | 12,84 | 11,42 | 10,18 | 9,10 | 8,15 | 7,31 | 6,93 | 6,57 | 5,90 | 5,31 | 4,77 | 4,29 | 3,85 |
| 120 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.650 | 2.600 | 2.700 | 850 | 2,32 | 8,85 | 11,81 | 10,33 | 9,06 | 7,98 | 7,03 | 6,21 | 5,50 | 4,86 | 4,30 | 4,05 | 3,80 | 3,36 | 2,96 | 2,60 | 2,27 | 1,98 |
| 0,95 | 2.250 | 2.900 | 3.000 | 1.050 | 2,33 | 9,43 | 14,82 | 13,00 | 11,44 | 10,10 | 8,95 | 7,94 | 7,06 | 6,28 | 5,60 | 5,28 | 4,99 | 4,44 | 3,95 | 3,51 | 3,12 | 2,76 |
| 1,25 | 2.950 | 3.550 | 3.550 | 1.350 | 2,36 | 10,49 | 20,00 | 18,33 | 16,20 | 14,36 | 12,77 | 11,40 | 10,19 | 9,13 | 8,19 | 7,76 | 7,36 | 6,61 | 5,95 | 5,35 | 4,81 | 4,32 |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.490 | 2.500 | 2.600 | 850 | 2,55 | 11,16 | 13,06 | 11,42 | 10,02 | 8,82 | 7,78 | 6,88 | 6,08 | 5,38 | 4,76 | 4,48 | 4,21 | 3,72 | 3,28 | 2,88 | 2,52 | 2,19 |
| 0,95 | 2.050 | 2.800 | 2.900 | 1.000 | 2,57 | 11,87 | 16,39 | 14,37 | 12,65 | 11,18 | 9,90 | 8,79 | 7,81 | 6,96 | 6,20 | 5,85 | 5,52 | 4,92 | 4,38 | 3,89 | 3,46 | 3,06 |
| 1,25 | 2.800 | 3.400 | 3.400 | 1.350 | 2,60 | 13,19 | 20,00 | 20,00 | 17,91 | 15,89 | 14,13 | 12,61 | 11,28 | 10,10 | 9,06 | 8,59 | 8,14 | 7,32 | 6,59 | 5,92 | 5,33 | 4,79 |
| 140 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.350 | 2.450 | 2.500 | 800 | 2,79 | 13,85 | 14,31 | 12,52 | 10,99 | 9,67 | 8,53 | 7,54 | 6,67 | 5,90 | 5,23 | 4,91 | 4,62 | 4,08 | 3,60 | 3,16 | 2,77 | 2,41 |
| 0,95 | 1.850 | 2.750 | 2.800 | 1.000 | 2,80 | 14,72 | 17,96 | 15,75 | 13,87 | 12,25 | 10,85 | 9,63 | 8,57 | 7,63 | 6,80 | 6,42 | 6,06 | 5,40 | 4,81 | 4,27 | 3,79 | 3,36 |
| 1,25 | 2.700 | 3.300 | 3.300 | 1.300 | 2,83 | 16,32 | 20,00 | 20,00 | 19,63 | 17,41 | 15,49 | 13,82 | 12,36 | 11,08 | 9,94 | 9,42 | 8,93 | 8,03 | 7,23 | 6,50 | 5,85 | 5,26 |
| 150 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.250 | 2.300 | 2.450 | 800 | 3,02 | 16,93 | 15,57 | 13,61 | 11,95 | 10,52 | 9,28 | 8,20 | 7,26 | 6,42 | 5,69 | 5,35 | 5,03 | 4,44 | 3,92 | 3,44 | 3,02 | 2,63 |
| 0,95 | 1.700 | 2.650 | 2.750 | 950 | 3,04 | 17,98 | 19,54 | 17,13 | 15,08 | 13,33 | 11,80 | 10,48 | 9,32 | 8,30 | 7,40 | 6,98 | 6,59 | 5,88 | 5,23 | 4,66 | 4,13 | 3,66 |
| 1,25 | 2.600 | 3.200 | 3.250 | 1.250 | 3,07 | 19,90 | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 18,94 | 16,85 | 15,04 | 13,45 | 12,05 | 10,82 | 10,25 | 9,72 | 8,74 | 7,86 | 7,08 | 6,37 | 5,72 |
| 160 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.150 | 2.200 | 2.300 | 800 | 3,26 | 20,45 | 16,82 | 14,71 | 12,91 | 11,37 | 10,03 | 8,87 | 7,84 | 6,95 | 6,15 | 5,78 | 5,44 | 4,81 | 4,24 | 3,73 | 3,26 | 2,84 |
| 0,95 | 1.600 | 2.550 | 2.650 | 950 | 3,27 | 21,69 | 20,00 | 18,51 | 16,30 | 14,40 | 12,76 | 11,33 | 10,07 | 8,97 | 8,00 | 7,55 | 7,13 | 6,35 | 5,66 | 5,04 | 4,47 | 3,96 |
| 1,25 | 2.550 | 3.100 | 3.150 | 1.250 | 3,30 | 23,97 | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 18,21 | 16,25 | 14,53 | 13,03 | 11,69 | 11,08 | 10,51 | 9,45 | 8,50 | 7,65 | 6,89 | 6,19 |
| 170 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,80 | 1.050 | 2.050 | 2.150 | 750 | 3,49 | 24,43 | 18,07 | 15,81 | 13,88 | 12,22 | 10,78 | 9,53 | 8,43 | 7,47 | 6,61 | 6,22 | 5,85 | 5,17 | 4,56 | 4,01 | 3,51 | 3,06 |
| 0,95 | 1.500 | 2.500 | 2.600 | 900 | 3,51 | 25,87 | 20,00 | 19,89 | 17,51 | 15,47 | 13,71 | 12,17 | 10,83 | 9,64 | 8,60 | 8,12 | 7,66 | 6,83 | 6,09 | 5,42 | 4,81 | 4,26 |
| 1,25 | 2.450 | 3.050 | 3.050 | 1.200 | 3,54 | 28,55 | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 20,00 | 19,57 | 17,46 | 15,62 | 14,00 | 12,57 | 11,91 | 11,29 | 10,16 | 9,14 | 8,23 | 7,41 | 6,66 |

Fonte: METFORM S. A. 2007, p.10.

A espessura da capa de compressão possui 5 centímetros, de acordo com a tabela disponibilizada pelo fabricante, a sobrecarga máxima é de 10,06 kN/m², a espessura da fôrma de 1,25 milímetros e o vão máximo de 2200 milímetros. Para o dimensionamento na rotina de cálculo, foram inseridos os dados da fôrma de aço nos dados de entrada e foram obtidos os resultados. Observou-se a seção transversal Laje tipo 01, correspondente a do fabricante, que o dimensionamento pela rotina de cálculo está coerente com a planilha do fabricante. Porém, observou-se que há uma grande distância entre os valores de momento fletor atuante e resistente, permitindo assim, pela rotina de cálculo, configurações diferentes para a mesma seção transversal com estas configurações. De acordo com a rotina de cálculo, pode-se adotar um vão de até 3100 milímetros ou uma capa de compressão de 3 centímetros. Para o segundo comparativo, foram utilizados os dados destacados em verde. A capa de compressão possui 8 centímetros de espessura, a

sobrecarga máxima de 7,81 kN/m², a espessura da fôrma de aço 0,95 milímetros e o vão máximo 2400 milímetros. Para estas configurações, pode-se observar que ocorreu o mesmo do comparativo 1, de acordo com a planilha, permite diferentes configurações, como um vão máximo de 3700 milímetros ou uma capa de compressão de 3 centímetros. No último comparativo, os dados utilizados são os destacados em vermelho. A espessura da capa de compressão possui 12 centímetros, uma sobrecarga de 18,07 kN/m², a espessura da fôrma de aço 0,8 milímetros e um vão máximo de 1800 milímetros. De acordo com a rotina de cálculo, observou-se o mesmo dos comparativos anteriores, as novas configurações permitidas seriam um vão teórico de no máximo 2000 milímetros ou uma capa de compressão de 4 centímetros. Foi observado que nenhuma das configurações atendeu a flambagem local na mesa, este fato se dá pela espessura da fôrma ser muito fina, porém, ao longo dos estudos realizados para a elaboração deste trabalho, constatou-se que nos dimensionamentos para este tipo de laje com o uso de tabelas, a flambagem local não é levada em consideração. Para que atenda a esta verificação com estas características, de acordo com a rotina de cálculo, as fôrmas deveriam possuir no mínimo 2,3 milímetros de espessura.

4. CONCLUSÃO

Criou-se uma rotina de cálculo com interface descomplicada otimizando o dimensionamento de lajes tipo Steel Deck, alcançando assim, o objetivo proposto. Esta planilha permite que o usuário analise os resultados em tempo real e proporciona um comparativo entre os dois formatos geométricos de fôrmas disponibilizadas. A mesma ainda permite que o dimensionamento seja feito para qualquer faixa de carga e variáveis necessárias, proporcionando assim uma maior flexibilidade de trabalho com esse tipo de laje. Os testes comprovaram que as tabelas dos fabricantes deste tipo de laje convergem com os resultados da planilha elaborada no Microsoft Office Excel, em contrapartida, de acordo com a rotina de cálculo, alterando algumas configurações de espessuras e vãos máximos pode-se obter uma maior economia e aproveitamento do sistema.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se continuar este trabalho para outras situações, como cargas concentradas ou lineares, lajes contínuas, conectores de cisalhamento, armadura complementar, outros tipos de formas, entre outros.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA (ABCEM)/ CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA): Cenário dos Fabricantes de Telhas de Aço e Steel Deck, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.** Rio de Janeiro, 1980.

BELTRÃO, Allyson José do Nascimento. **Comportamento estrutural de lajes mistas com corrugações na alma de perfis de chapa dobrada.** 2003. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRAGANÇA, Antônio Carlos. Fôrmas-laje de aço e concreto. **Revista Técnica**, São Paulo: Pini, ano 10, n. 49, não paginado, nov. 2000. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/49/artigo285181-1.aspx>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

CANADIAN SHEET STEEL BUILDING INSTITUTE. **CSSBI S3: Criteria for the design of composite slabs**, Ontário, Canadá, 2008.

_____. **CSSBI S15: Steel Roof Deck & Composite Floor Deck**, Ontário, Canadá, 2012.

CICHINELLI, Gisele. Construção rápida: Sistema misto que dispensa parcial ou totalmente o escoramento, o steel deck agiliza a execução e reduz custos. **Revista Técnica**, São Paulo: Pini, ano 20, p. 1, dez 2011. Disponível em: < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/179/artigo287917-1.aspx>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. The European Union, 2004.

EUROCODE 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. The European Union, 2004.

FILHO, Oswaldo Teixeira Baião. **Estudo comparativo de respostas estruturais antes da cura do concreto de fôrmas metálicas incorporadas às lajes**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

METFORM S. A. **Manual Técnico: Especificações para projeto, manuseio e montagem**. 72 f. 2007. Betim, Minas Gerais.

SIEG, Ana Paula Antonello. **Estudo de um sistema de laje com fôrma de aço incorporada**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

SILVA, Graziela. Com dupla função, steel deck racionaliza e acelera a obra. **AECweb**. Disponível em: < https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/com-dupla-funcao-steel-deck-racionaliza-e-acelera-a-obra_8558_0_1>. Acessado em: 10/12/2018.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; DA MATA, L. A. C. **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: Editora O Lutador, 336p. 2001.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexander Galvão. Estruturas Mistas. Volume 1. **Instituto do Aço Brasil/Centro Brasileiro da Construção em Aço**, Rio de Janeiro, 66 p. 2010.