

Comparative Study of Longitudinal Shear Design Criteria for Composite Slabs

Estudo Comparativo dos Critérios de Dimensionamento ao Cisalhamento Longitudinal em Lajes Mistas de Aço e Concreto



J. M. CALIXTO ^a
calixto@dees.ufmg.br

G. BRENDOLAN ^b
tecnico@metform.com.br

R. PIMENTA ^c
roberval@codeparsa.com.br

Abstract

ABNT NBR 8800 (2008) prescribes two longitudinal shear design criteria for composite slabs with ribbed decking: m-k method and partial interaction method. The m-k method is considered the worldwide standard method. In this method, the longitudinal resistant shear strength is obtained from linear regression of test results. The partial composite method is an alternative to the m-k method and shall be used only for composite slabs with a ductile behavior. In this scenario, the objective of this paper is to compare these two methods with respect to test results of full size composite slabs employing steel-deck MF 50 manufactured by METFORM. The analysis of the comparative study shows good correlation between the two methods with respect to the prediction of the ultimate strength of the tested composite slabs.

Keywords: composite slabs, ribbed decking, longitudinal shear.

Resumo

AABNT NBR 8800 (2008) permite dois critérios para avaliação da força cortante longitudinal resistente última em lajes mistas de aço e concreto: método m-k e método da interação parcial. O método m-k é o método considerado internacionalmente como padrão para o cálculo dessa força cortante longitudinal resistente. Neste método, a resistência das lajes é obtida por regressão linear dos resultados de ensaios realizados com fôrma de uma mesma espessura. O método da interação parcial, por outro lado, surge como alternativa ao método m-k, para melhor explorar o comportamento dúctil dos perfis de fôrma de aço disponíveis no mercado, os projetos de mossas mais bem elaborados e a utilização de vãos maiores. Dentro deste cenário, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa entre estes dois critérios. Para atingir este objetivo, lajes mistas, em escala natural e com diferentes dimensões de vãos e altura total, foram construídas e testadas, na condição de simplesmente apoiadas. A fôrma de aço incorporada utilizada foi o steel-deck MF 50 fabricado pela METFORM. A análise dos resultados revela valores similares da força cortante longitudinal resistente última entre os dois critérios para a fôrma de aço incorporada utilizada.

Palavras-chave: lajes mistas, fôrma de aço incorporada, cisalhamento longitudinal.

^a Structural Engineering Department, College of Engineering, Federal University of Minas Gerais, calixto@dees.ufmg.br, Av. do Contorno 842 - 2º andar, 30110-060 - Belo Horizonte, MG, Brazil.

^b METFORM S. A., tecnico@metform.com.br, Av. Roberto Bertolotti 851- 12040-470 - Taubaté, SP, Brazil.

^c CODEME S. A., roberval@codeparsa.com.br, BR 381 - Km 421- 32530-000 - Betim, MG, Brazil.

Received 8 January 2009; Accepted 16 March 2009; Published 26 June 2009

1. Introdução

A ABNT NBR 8800 (2008) permite dois critérios para avaliação da força cortante longitudinal resistente última em lajes mistas de aço e concreto: método *m-k* e método da interação parcial. O método *m-k* foi desenvolvido e é considerado internacionalmente o método padrão para o cálculo da força cortante longitudinal resistente. Neste método, essa força cortante longitudinal resistente em lajes mistas é dada por uma equação semi-empírica que relaciona a resistência nominal ao esforço cortante com os parâmetros dos ensaios realizados com fôrma de uma mesma espessura. O método da interação parcial surge como alternativa ao método *m-k*, para melhor explorar o comportamento dúctil dos perfis de fôrma de aço disponíveis no mercado, os projetos de mossas mais bem elaborados e a utilização de vãos maiores. Esse método, apesar de mais trabalhoso que o método *m-k*, permite também que se incluam na análise, armaduras adicionais para auxiliar na resistência ao momento positivo, bem como tirar proveito da presença de conectores de cisalhamento nas extremidades dos vãos da fôrma, utilizados pelas vigas mistas suportes da laje.

Com base neste cenário, o objetivo deste trabalho é fazer uma análise comparativa entre estes dois critérios. Para atingir este objetivo, lajes mistas simplesmente apoiadas, em escala natural e com diferentes dimensões de vãos e altura total, foram construídas e testadas na Universidade Federal de Minas Gerais (Brendolan, 2007). A fôrma de aço incorporada utilizada foi o *steel-deck* MF 50 fabricado pela METFORM. Vale frisar que estudos similares a este foram realizados por Lopes e Simões (2008) e Calixto *et al.* (1998).

2. Critérios de Avaliação da Resistência Última ao Cisalhamento Longitudinal

2.1 Método m-k

Neste trabalho será utilizada a expressão adotada pela ABNT

NBR 8800 (2008) dada pela equação 1.

onde:

$$V_R = b \cdot d_f \cdot \left[\left(\frac{m A_{F,ef}}{b L_S} \right) + k \right] \quad (1)$$

V_R é a força cortante longitudinal resistente, em N, relativa a 1000 mm de largura;

b é a largura unitária da laje, tomada igual a 1000 mm;

d_f é a distância da face superior da laje de concreto ao centro geométrico da seção efetiva da fôrma, em mm;

$A_{F,fe}$ é a área, em mm², da seção efetiva da fôrma, correspondente a 1000mm;

L_S é o vão de cisalhamento, em mm; e

m e k são parâmetros empíricos determinados a partir dos resultados experimentais.

O método consiste em reescrever a equação 1 na forma

$$Y = m \cdot X + k, \text{ onde } X = \frac{A_{F,ef}}{b L_S} \text{ e } Y = \frac{V_{ut}}{b \cdot d_f}.$$

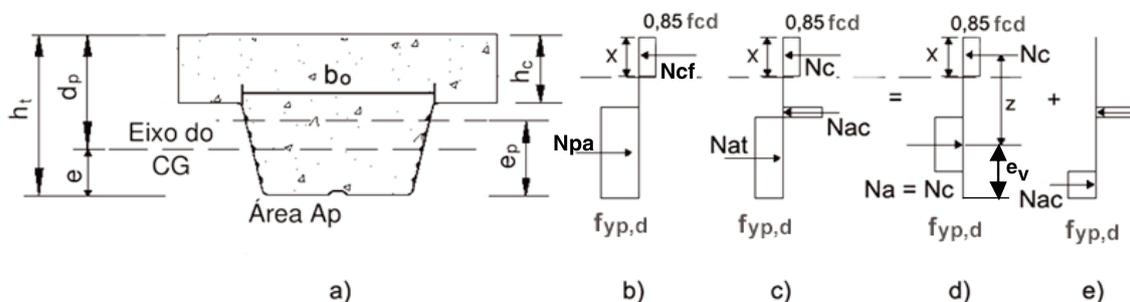
Nesta relação, V_{ut} é a força cortante longitudinal resistente última total obtida nos ensaios, por metro de largura de laje. Com os valores de X e Y faz-se uma análise de regressão linear empregando o método dos mínimos quadrados, obtendo, desse modo, os parâmetros *m-k*. A análise é sempre feita para cada grupo de espessura da fôrma de aço, separadamente.

2.2 Método da Interação Parcial

A ABNT NBR 8800 (2008) permite o emprego do método da interação parcial e sugere que a metodologia utilizada siga as prescrições do EUROCODE 4 (2004). Assim sendo o procedimento apresentado segue estas prescrições.

O modelo analítico utilizado para se verificar a resistência das la-

Figura 1 – Distribuição de tensões normais na seção transversal do módulo típico



N_{cf} = força de compressão no concreto, considerando interação total ao cisalhamento longitudinal
 N_{pa} = força de tração na fôrma de aço, considerando interação total ao cisalhamento longitudinal
 e_p = distância da extremidade inferior da fôrma de aço até a linha neutra plástica (LNP) da fôrma de aço
 e_v = distância da extremidade inferior da fôrma de aço até a força resultante de tração N_a

jes mistas ao momento fletor positivo segue a mesma filosofia do modelo usado para o cálculo das vigas mistas (EUROCODE 4, 2004), considerando a plastificação total da seção transversal de momento máximo. A figura 1 mostra o modelo da laje mista considerada, onde pode se visualizar o módulo típico da seção mista (fig. 1a), a distribuição das tensões no caso de interação total (fig. 1b), a distribuição de tensões para interação parcial (fig. 1c), bem como a aproximação adotada na situação de interação parcial (fig. 1d e 1e).

Nas lajes fabricadas com o *steel-deck* MF 50 ocorre interação parcial entre o concreto e a fôrma de aço. Nessa situação surge um deslizamento relativo horizontal entre esses elementos gerando, conseqüentemente, duas linhas neutras: uma no concreto e outra no *steel-deck*, caracterizando assim a interação parcial do sistema. O diagrama das tensões normais nesse caso está indicado na figura 1.c, onde se pode ver a resultante de força de compressão (N_c) no concreto e as resultantes de compressão (N_{ac}) e de tração (N_{at}) na fôrma de aço. Para melhor visualização e entendimento, a figura 1.c foi dividida em duas, 1.d e 1.e. Nessas figuras, a força de tração na fôrma de aço N_{at} está decomposta nas forças N_a e N_{ac} , onde N_a equilibra a resultante de compressão no concreto N_c , e N_{ac} equilibra a resultante de compressão na região superior da fôrma de aço. Com a superposição dos efeitos nas figuras 1.d e 1.e, o momento resistente nominal pode ser determinado por meio da equação 2.

$$M_{pR} = N_c \cdot z + M_{pr} \quad (2)$$

A figura 1.e mostra que as forças iguais e opostas N_{ac} fornecem a parcela do momento fletor resistente M_{pr} , que é igual ao momento plástico efetivo da fôrma M_{pa} , reduzido pelo efeito da força axial de tração $N_a = N_c$. A relação entre M_{pr}/M_{pa} e N_c/N_{pa} depende da geometria da fôrma sendo, segundo o EUROCODE 4 (2004), representada pela equação 3.

$$M_{pr} = 1,25 \cdot M_{pa} \cdot \left(1 - \frac{N_c}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (3)$$

Na figura 1.d, a força de compressão na laje N_c é menor que N_{cf} ; portanto, a altura do bloco do diagrama de tensão de compressão no concreto é dada pela equação 4.

$$x = \frac{N_c}{b \cdot (0,85 \cdot f_{cd})} \leq h_c \quad (4)$$

O braço de alavanca z é variável e depende da relação N_c/N_{pa} . No caso de situações intermediárias, onde $0 < \frac{N_c}{N_{pa}} < 1$, o braço de alavanca z é calculado pela equação 5.

$$z = h_t - e_v - 0,5 \cdot x \quad (5)$$

onde e_v varia em função de N_c/N_{pa} . O valor de e_v pode ser avaliado por uma aproximação linear expressa pela equação 6.

$$e_v = e_p - (e_p - e) \cdot \frac{N_c}{N_{pa}} \quad (6)$$

Desta forma,

$$z = h_t - 0,5 \cdot x - e_p + (e_p - e) \cdot \frac{N_c}{N_{pa}} \quad (7)$$

Segundo Johnson (1994), esta metodologia tem sido validada por meio de ensaios com o braço de alavanca z dado pela equação 7. Com base nos resultados de cada ensaio realizado pode-se determinar o grau de interação parcial ao cisalhamento η para cada protótipo. Assim é possível calcular a força de compressão N_c ($= \eta N_{cf}$) transferida da fôrma de aço para o concreto ao longo do vão de cisalhamento L' . Desta forma, a tensão resistente de cisalhamento τ_u é determinada pela equação 8.

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf}}{b \cdot (L' + L_0)} \quad (8)$$

onde b é a largura de cada protótipo e L_0 é igual ao comprimento do balanço de cada laje, neste caso igual a 50 mm. Caso o efeito de atrito na região dos apoios seja considerado, o EUROCODE 4 (2004) recomenda que a expressão 8 seja alterada para a equação 9.

$$\tau_u = \frac{\eta \cdot N_{cf} - \mu \cdot V_{ut}}{b \cdot (L' + L_0)} \quad (9)$$

onde V_{ut} é o esforço cortante nos apoios correspondente ao carregamento de ruína de cada ensaio e μ é o coeficiente de atrito tomado igual a 0,5.

Para se determinar o grau de interação parcial ao cisalhamento de cada laje ensaiada é necessário utilizar as dimensões e resistências do concreto e do aço da fôrma medidas nos ensaios realizados. Segundo o EUROCODE 4 (2004), a resistência do concreto a ser empregada pode ser o valor médio, f_{cm} , das resistências medidas de cada grupo avaliado. A magnitude do momento fletor a ser empregada corresponde ao valor último do ensaio na seção transversal sob o ponto de aplicação de carga. O valor desse momento deve incluir a carga última aplicada pelo atuador hidráulico, o peso próprio da laje e o e peso do aparato de aplicação de carga.

Tabela 1 - Características dos protótipos

Série	Protótipo	Espessura do <i>steel deck</i> (mm)	Vão da laje (mm)	Vão de cisalhamento (mm)	Altura total da laje (mm)
A	1	1,25	1800	450	100
	2				
	3				
B	4	1,25	1800	600	120
	5				
C	6	1,25	1800	600	140
	7				
D	8	1,25	3600	900	160

3. Características das Lajes Mistas Ensaçadas

Para este estudo foram ensaiados 8 protótipos, cujas características geométricas estão indicadas na tabela 1.

O perfil de aço utilizado como fôrma incorporada na laje mista foi o *steel deck* MF 50, produzido pela METFORM S. A., cujas dimensões transversais encontram-se na figura 2. É um tipo de fôrma trapezoidal com moças, cuja geometria auxilia no processo de travamento mecânico, fundamental para o desenvolvimento da ação composta

entre o perfil de aço e o concreto da laje. No estudo foi empregada uma espessura nominal de 1,25 mm para o perfil; a área da seção efetiva $A_{F,ef}$ desta fôrma de 1587 mm² por metro de largura. As propriedades mecânicas do aço utilizado na fabricação do *steel-deck* foram avaliadas em laboratório. A resistência média de escoamento foi de 345 MPa e o módulo de elasticidade igual a 200233 MPa.

O concreto utilizado foi fornecido por uma central de concreto, tendo sido especificada uma resistência característica à compressão (f_{ck}) maior ou igual a 20 MPa. Na data de ensaio de cada laje foi determinada a resistência à compressão do concreto, obtendo-se valores acima do mínimo especificado.

Figura 2 - Características do perfil de aço utilizado

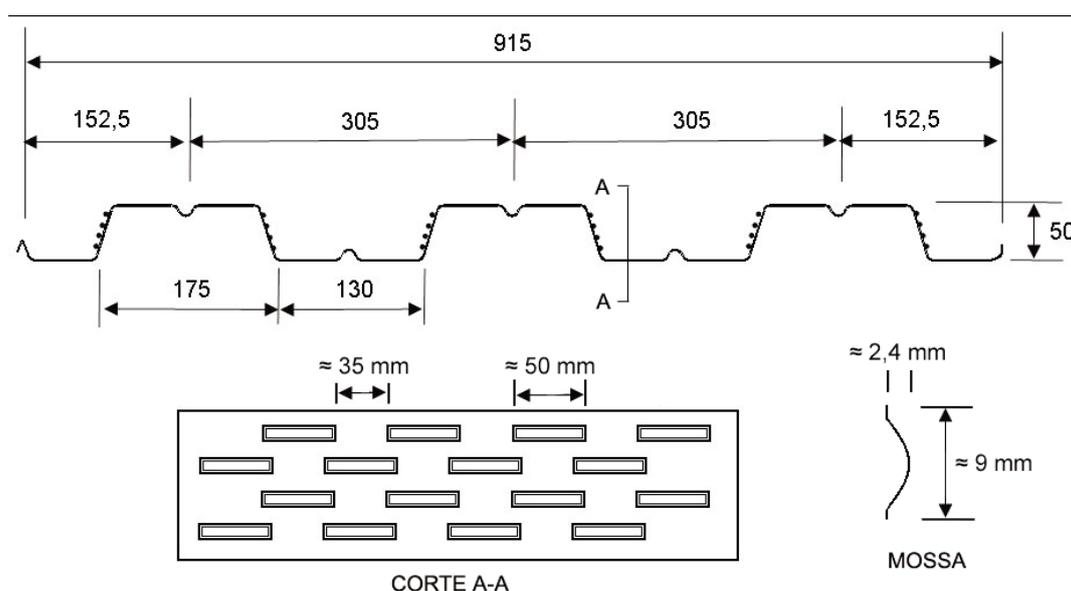


Figura 3 – Esquema de carregamento adotado



4. Procedimentos de Ensaio e Instrumentação

As cargas transmitidas aos protótipos do sistema de laje mista foram aplicadas por um atuador hidráulico preso a um pórtico de reação. Um sistema de vigas metálicas, conforme mostra a figura 3, foi empregado para transmitir as cargas aos protótipos. Esses, por sua vez, se encontravam apoiados em blocos de concreto. Pode-se observar pela figura que cada protótipo foi ensaiado na condição de simplesmente apoiado e submetido a um carregamento que consistia de duas linhas de carga equidistantes dos

Figura 4 – Relação Carga x Flecha no meio do vão

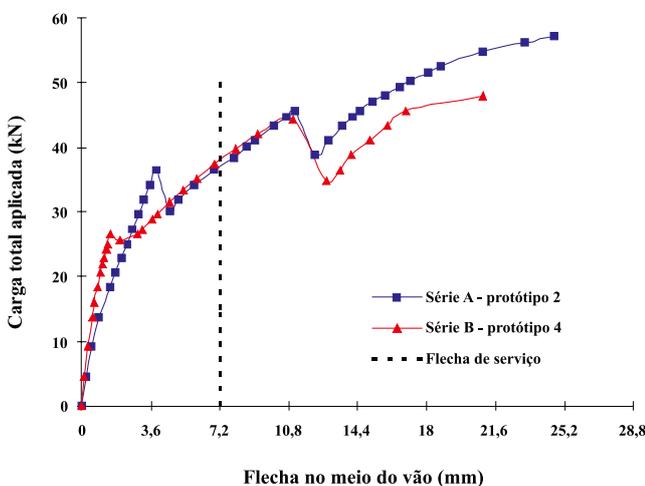
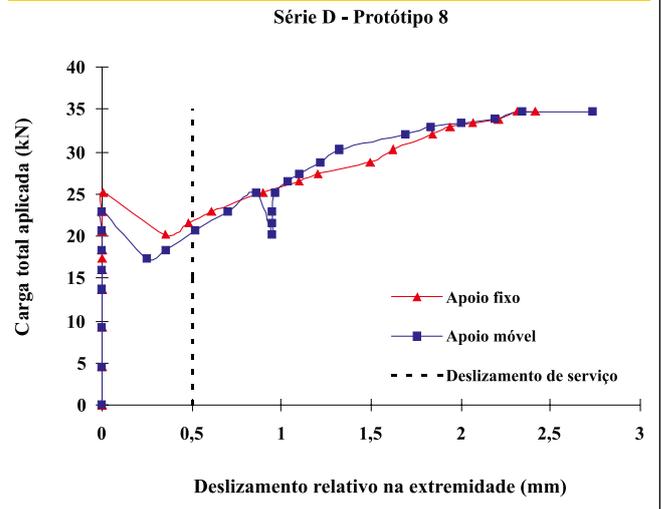


Figura 5 – Série D – Protótipo 8 – Relação Carga x Deslizamento relativo de extremidade



apoios. Sob cada linha de carga foi utilizada uma tira de borracha para distribuir o carregamento o mais uniformemente possível. Assumiu-se que qualquer restrição longitudinal indesejável foi eliminada pelo sistema de apoios móvel e fixo atuando em conjunto com o sistema esférico da unidade de aplicação de carga.

Durante os ensaios foram medidas as cargas aplicadas pelo atuador hidráulico, o deslizamento relativo nas extremidades da laje, a flecha no meio do vão e as deformações na fôrma de aço através de extensômetros elétricos de resistência. A leitura dos sinais enviados pelos extensômetros foi feita por um sistema informatizado de aquisição de dados.

Depois de retirar a pré-carga utilizada para a acomodação do sistema, os ensaios eram iniciados, sendo feitas as primeiras leituras dos deslocamentos e deformações. Logo após, o carregamento era aplicado de forma gradual e crescente. Para valores de carga acima da carga de fissuração, as leituras eram feitas após a estabilização do sistema. O ensaio terminava ao se atingir a carga última do protótipo.

5. Apresentação e Análise dos Resultados

Nos ensaios de todos os protótipos, as primeiras fissuras visíveis formaram-se sempre nas proximidades das linhas de aplicação de carga. A partir daí, até a ruptura, pôde-se constatar fissuração intensa da região compreendida entre as duas linhas de carregamento. A relação carga versus flecha no meio do vão para todas as lajes mistas testadas é exemplificada na figura 4 onde estão apresentados os resultados correspondentes a dois protótipos: série A protótipo 2 e série B protótipo 4. Observa-se inicialmente uma maior rigidez de ambas as lajes. Com o aumento do carregamento ocorre a fissuração do concreto tracionado provocando uma redução da rigidez e por conseqüência um aumento das flechas para os mesmos incrementos de carga. O limite estabelecido pelo EUROCODE 4 (2004) para a flecha de máxima em serviço (1/250 do vão livre) é nesse caso igual a 7,2 mm. A carga medida correspondente a esta flecha foi de aproximadamente 37 kN para ambos os protótipos.

Figura 6 - Série C - Protótipo 5 - Relação Carga x Deformações no steel-deck

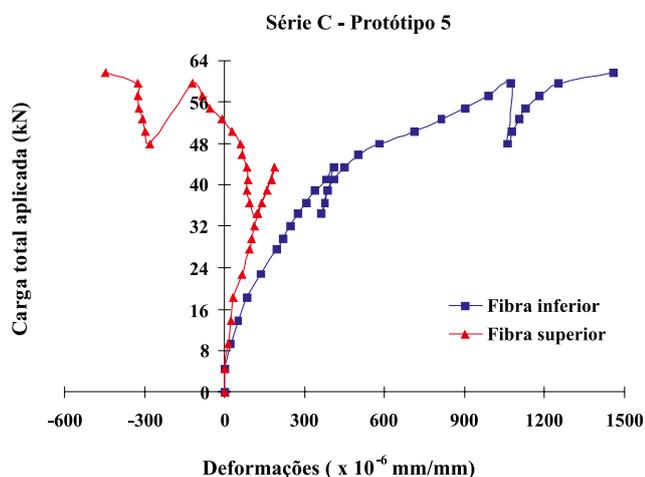


Figura 7 - Série A - Protótipo 2 - Deslizamento relativo observado no final do ensaio



A relação carga versus deslizamento relativo de extremidade para o protótipo 8 da série D está apresentada na figura 5. Nota-se, inicialmente, valores nulos de deslizamento relativo de extremidade, indicando que há interação completa entre os dois elementos constituintes da laje mista, ou seja, ainda não houve perda da aderência química entre o concreto e a fôrma de aço. Portanto, os dois materiais trabalham solidários na tarefa de resistir ao carregamento imposto. Com a fissuração da laje tem-se a interação parcial que ocorre devido ao rompimento da aderência química e à incapacidade da aderência mecânica proporcionada pelas mossas, uma vez acionadas, em transmitir o cisalhamento total entre o perfil de aço e a laje de concreto, gerando um deslizamento relativo entre esses elementos. Esse comportamento é característico desses sistemas de lajes e foi observado em todos os ensaios.

A figura 6 apresenta a relação “carga x deformação no steel-deck” para protótipo 5 da série C. Estas deformações foram medidas na

fibra superior e inferior da fôrma de aço no meio do vão da laje. Na figura, valores de deformação positivos correspondem à tração e negativos a compressão. A deformação na fibra inferior no meio do vão foi sempre de tração como esperado. Por outro lado, para a fibra superior ocorre a inversão da deformação (de tração para compressão) durante o carregamento. A fibra superior do perfil encontrava-se inicialmente tracionada (deformação positiva), passando de tração para compressão com o incremento de carga. Essa compressão na fibra superior da fôrma de aço indica o surgimento de uma segunda linha neutra abaixo do topo do perfil caracterizando a interação parcial e a incapacidade das mossas em transmitir integralmente as tensões de cisalhamento do perfil para a laje, gerando o deslizamento relativo entre o concreto e a fôrma de aço.

Somente um único modo de colapso foi encontrado para todos os protótipos ensaiados, a saber, o colapso por cisalhamento longitudinal (*shear bond*). Esse modo é caracterizado pela falha da ligação entre as mossas da fôrma de aço e o concreto, fazendo com que

Tabela 2 - Resultados dos ensaios dos protótipos

Série	Protótipo	Vão de cisalhamento (mm)	Largura da laje (mm)	Altura útil da laje (mm)	P _{ue} (kN)	P _{p,slab} (kN/m ²)	V _{ut} (kN/m)
A	1	450	949	73,74	53,95	1,93	30,16
	2	450	948	73,04	60,81	1,92	33,80
	3	450	947	73,94	58,98	1,94	32,88
B	4	600	952	93,80	51,67	2,41	29,31
C	5	600	950	112,24	65,38	2,86	36,98
D	6	900	951	134,44	35,68	3,39	24,86
	7	900	954	135,44	39,79	3,41	27,00
	8	900	951	134,94	38,42	3,40	26,32

Tabela 3 – Resultado da análise de regressão linear

Série	Protótipo	X	Y	Resultado da regressão	V_R (kN/m)	V_{ut} (kN/m)	V_R/V_{ut}	Desvio (%)
A	1	3,52	409	m = 139,36 k = -0,051361	32,45	30,16	1,08	-7,59
	2	3,52	463		32,15	33,80	0,95	4,89
	3	3,52	445		32,54	32,88	0,99	1,05
B	4	2,65	312		29,76	29,31	1,02	-1,52
C	5	2,65	329		35,61	36,98	0,96	3,72
D	6	1,76	185		26,13	24,86	1,05	-5,11
	7	1,76	199		26,33	27,00	0,98	2,50
	8	1,76	195		26,33	26,32	1,00	0,36

o concreto da região do vão de cisalhamento perca sua ação composta com a fôrma de aço. Apesar da perda da ação composta, em nenhum instante, o concreto separou-se completamente da fôrma de aço (vide figura 7), ou seja, o mecanismo de transferência de cisalhamento longitudinal, mesmo depois da carga última ter sido alcançada, evitou que o sistema fosse completamente desfeito.

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos protótipos. Na tabela P_{ue} representa a carga máxima total aplicada na laje, PP_{laje} o peso próprio da laje e V_{ut} a força cortante longitudinal resistente última total alcançada nos ensaios, por metro de largura de laje.

Com base nestes resultados dos ensaios, as relações

$$X = \frac{A_{F,ef}}{b L_s} \text{ e } Y = \frac{V_{ut}}{b \cdot d_f}$$

necessárias ao método $m-k$

foram determinadas conforme descrito anteriormente. Por uma regressão linear foram calculados a inclinação m e o ponto de interseção k da reta representada pela equação ($Y = m \cdot X + k$). Substituindo-se os valores determinados de m e k na equação 1, encontra-se o valor calculado da força cortante longitudinal resistente V_R . Este valor deve ser comparado com os medidos nos ensaios V_{ut} para se avaliar sua correlação. A tabela 3 apresenta estes resultados.

O Canadian Steel Sheet Building Institute (CSSBI, 2002) reco-

menda que a razão entre as forças resistentes calculadas V_R e V_{ut} deve estar dentro dos limites 0,85 a 1,15, inclusive. Caso isso não ocorra, os valores de m e k devem ser reduzidos em 5 %.

Como pode ser constatado na tabela 3, os valores encontrados para os protótipos testados ficaram dentro desses limites.

Para aplicação do método da interação parcial é necessário inicialmente determinar a posição da linha neutra e_p e do momento de plastificação M_{pa} da fôrma. Na avaliação destes foi adotado o valor de 30,5 MPa para a resistência média à compressão do concreto, 345,0 MPa para tensão de escoamento f_y e 200.233 MPa para o módulo de elasticidade do aço do "steel-deck". Com base nestes valores, a posição da linha neutra e o momento de plastificação da fôrma de aço foram determinados de acordo com os critérios preconizados pela norma do ABNT NBR 14762 (2001). Uma redução de área da seção, devida às mossas, foi considerada nos cálculos. Os valores encontrados para a posição da linha neutra acima da mesa inferior da fôrma, e_p , e para o momento de plastificação, M_{pa} , foram 25,7 mm e 10,11654 kNm/m, respectivamente.

A tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios dos protótipos bem como os valores do grau de interação parcial ao cisalhamento η e da resistência ao cisalhamento longitudinal τ_u determinados para cada protótipo. Na tabela, V_{ut} corresponde à força cortante longitudinal resistente última total alcançada nos ensaios e M_{ut} é momento fletor último sob a linha de carga alcançado nos en-

Tabela 4 – Resultados da tensão resistente ao cisalhamento longitudinal dos protótipos

Série	Protótipo	V_{ut} (kN)	M_{ut} (kNm)	η	τ_u (MPa)
A	1	28,63	12,6963	0,1039	0,0717
	2	32,04	14,2351	0,1524	0,1156
	3	31,14	13,8281	0,1381	0,1025
B	4	27,90	16,3286	0,1687	0,1047
C	5	35,14	20,5929	0,2342	0,1481
D	6	23,64	19,9734	0,1783	0,0789
	7	25,76	21,8630	0,2105	0,0944
	8	25,03	21,2202	0,1985	0,0885

Tabela 5 – Resultado da análise comparativa do método da interação parcial com os resultados dos ensaios dos protótipos

Série	Protótipo	$V_{ut \text{ ensaio}}$ (kN)	$V_{ut \text{ calculado}}$ (kN)	$\frac{V_{ut \text{ calculado}}}{V_{ut \text{ ensaio}}}$	Desvio (%)
A	1	28,63	31,78	1,110	-10,98
	2	32,04	31,63	0,987	1,30
	3	31,14	31,74	1,019	-1,88
B	4	27,90	27,95	1,002	-0,16
C	5	35,14	32,49	0,925	7,54
	6	23,64	26,15	1,106	-10,62
D	7	25,76	26,36	1,023	-2,35
	8	25,03	26,22	1,047	-4,73

saio. O valor médio desta resistência, τ_u , é igual a 0,1006 MPa, o desvio padrão, σ , igual a 0,0224 MPa e o coeficiente de variação igual a 22,3 %.

A validação do valor médio da resistência ao cisalhamento longitudinal τ_u é feita pela análise comparativa do valor da força cortante longitudinal resistente última calculada com essa tensão em relação ao esforço cortante máximo medido no ensaio de cada protótipo. Para o cálculo da força cortante longitudinal resistente última, a expressão 9 deve ser reescrita como mostra a equação 10.

$$\eta \cdot N_{cf} = N_c = \tau_u \cdot b \cdot (L' + L_0) + \mu \cdot V_{ut} \quad (10)$$

Assim, o momento resistente último é dado pela equação 11.

$$M_{pR} = [\tau_u \cdot b \cdot (L' + L_0) + \mu \cdot V_{ut}]z + M_{pr} \quad (11)$$

onde o braço de alavanca z é avaliado pela equação 7 e M_{pr} pela equação 3. Nessa equação, N_c assume a relação dada na equação 10 e N_{pa} é igual a $A_p \cdot f_y$. A relação entre o momento resistente e a força cortante longitudinal resistente última de cálculo é igual a $M_{pR} = V_{ut} \cdot L'$. Portanto, a força cortante longitudinal resistente última pode ser calculada pela equação 12.

$$V_{ut} = \frac{[\tau_u \cdot b \cdot (L' + L_0)z + M_{pr}]}{(L' - \mu \cdot z)} \quad (12)$$

A tabela 5 apresenta os resultados do estudo comparativo do valor da força cortante longitudinal resistente última, calculada pela equação 12 com o valor médio da resistência τ_u e coeficiente de atrito μ igual a 0,5, em relação ao esforço cortante máximo medido no ensaio de cada protótipo dessas séries. A análise dos resultados revela que a razão entre as forças resistentes calculadas, $V_{ut \text{ calculado}}$ e as medidas nos ensaios, $V_{ut \text{ ensaio}}$ estão dentro dos limites usualmente utilizados (entre 0,85 e 1,15), indicando que os resultados calculados são, portanto, também aceitáveis.

Tabela 6 – Análise comparativa dos valores calculados da força cortante longitudinal resistente

Série	Protótipo	$V_{ut \text{ ensaio}}$ (kN)	$V_{calc. m-k}$ (kN)	$V_{calc. \tau_u}$ (kN)	$\frac{V_{calc. \tau_u}}{V_{m-k}}$
A	1	28,63	30,80	31,78	1,032
	2	32,04	30,48	31,63	1,038
	3	31,14	30,81	31,74	1,030
B	4	27,90	28,33	27,95	0,987
C	5	35,14	33,83	32,49	0,960
	6	23,64	24,85	26,15	1,052
D	7	25,76	25,11	26,36	1,050
	8	25,03	24,94	26,22	1,051

Apresenta-se, a seguir, uma análise comparativa entre os valores calculados pelas metodologias estudadas, método *m-k* e método da interação parcial, dos resultados dos ensaios dos protótipos testados. A tabela 6 mostra os valores obtidos. Os resultados da análise comparativa mostram que o método da interação parcial proporcionou, para a maioria das lajes, valores ligeiramente superiores aos determinados pelo método *m-k*. A diferença média encontrada foi igual a 4 % mostrando que as duas metodologias proporcionam resultados bem semelhantes.

6. Considerações Finais

A análise global dos resultados das lajes mistas fabricadas com *steel-deck* MF-50 revelou que inicialmente existe uma interação completa entre o perfil de aço e o concreto. Com o aumento das solicitações, ocorre a fissuração da laje acompanhada de acomodações de carga, provocando, conseqüentemente, a quebra da aderência química na ligação *deck* – concreto. A partir daí, como as mossas presentes no perfil de aço são incapazes de transferir o cisalhamento total nessa interface, surge um deslizamento relativo entre o *steel-deck* e o concreto, fazendo com que a interação entre esses elementos passe a ser parcial. Em todos os casos, a ruptura deu-se por cisalhamento longitudinal.

Definindo-se esse modo de colapso, foram estudados dois métodos recomendados pela ABNT NBR 8800 (2008) para o cálculo da resistência: método *m-k* e método da interação parcial. Para verificação da força cortante longitudinal resistente última, o método da interação parcial é uma alternativa ao método *m-k*, sendo que a vantagem desse método é poder considerar a existência ou não de conectores, armaduras de extremidade ou de reforço na laje. Com base nos resultados de resistência última, a força cortante longitudinal resistente, avaliada por meio do método da interação parcial, também foi determinada para o *steel-deck* MF-50. Ao compararmos os valores dessa força cortante longitudinal resistente alcançada nos ensaios (V_{ult}) para os métodos *m-k* e interação parcial, observam-se valores muito próximos, comprovando que as duas metodologias proporcionam resultados confiáveis e seguros.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a METFORM e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio e financiamento deste trabalho.

8. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **NBR 8800** – “Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios”, 2008, Rio de Janeiro, Brasil.
- [02] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **NBR 14762** – “Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio”, 2001, Rio de Janeiro, Brasil.
- [03] BRENDOLAN, G. - “Análise do comportamento e da resistência de um sistema de lajes mistas com fôrma de aço incorporada”, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007, Belo Horizonte, Brasil.
- [04] CALIXTO, J. M., LAVALL, A. C., MELO, C. B., PIMENTA, R. J., e MONTEIRO, R. C., “Behaviour and Strength of Composite Slabs with Ribbed Decking”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 46, n. 1-3, p. 211-225, 1998, Londres, Reino Unido.
- [05] CANADIAN SHEET STEEL BUILDING INSTITUTE (CSSBI) – “CSSBI S2-2002: Criteria for the Testing of Composite Slabs”, 2002, Cambridge, Canadá.
- [06] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - **EUROCODE 4** – “Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings”, 2004, Bruxelas, Bélgica.
- [07] JOHNSON, R. P. - “Composite Structures of Steel and Concrete – vol. 1”, Blackwell Scientific Publications, Segunda Edição, 1994, Oxford, Londres, Reino Unido.
- [08] LOPES, E. e SIMÕES, R., - “Experimental and Analytical Behaviour of Composite Slabs”, *Steel and Composite Structures*, v.8, n. 5, p.361-388, 2008, Daejeon, Coréia.