

DETERMINATION OF STRENGTH OF A COMPOSITE SLAB SYSTEM OF STEEL AND CONCRETE BY SEMI-EMPIRICAL M-K METHOD

Rafael Oliveira Sena

Rodrigo Sernizon Costa

rafael_sena2002@hotmail.com

rodrigo.sernizon@ufba.br

Department of Construction and Structures

Federal University of Bahia.

Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação - Salvador, CEP 40210-910, Bahia, Brasil

Armando Cesar Campos Lavall

lavall@dees.ufmg.br

Department of Structural Engineering

Federal University of Minas Gerais.

Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha - Belo Horizonte, CEP 31270-901, Minas Gerais, Brasil

Renata Gomes Lanna da Silva

rglanna.silva@gmail.com

Department of Civil Engineering

Federal Center for Technological Education of Minas Gerais.

Av. Amazonas, 5.253, Nova Suíça, Belo Horizonte, MG, Brasil. CEP: 30.421-169, Minas Gerais, Brasil

Abstract. In this work the results of an experimental study of the behavior and strength of a composite slab system, after the cure of the concrete, are presented. The steel deck consists of trapezoidal profile with embossments in V-shape. Tests were carried out on a series of twelve composite slab models, simply supported, submitted to bending. Different thicknesses of the steel deck, heights of composite slabs and shear spans, were employed in the manufacturing of the models, according the EN 1994-1-1:2004 and ANSI/ASCE 3-91:1992. During the tests deflections, end slips and strains of the steel decks were measured, allowing the analysis of the behavior of the composite slab system and the determination of its failure mode. The semi empirical “*m-k*” method, according ABNT NBR 8800:2008, were used for the determination of the longitudinal shear strength of the composite slab system of steel and concrete. In order to illustrate the use of the longitudinal shear strength obtained by the *m-k* method, an example of practical application will be made.

Keywords: *Composite slabs, m-k method, longitudinal shear.*

1 Introdução

Os sistemas de lajes mistas de concreto e aço, conhecidos também como lajes mistas com fôrma de aço incorporada, são amplamente utilizados em regiões como América do Norte e Europa, e apresentam crescente uso no Brasil. Contudo, o sistema construtivo ainda apresenta um vasto campo a ser estudado, devido aos vários fatores que o compõem e contribuem para sua resistência.

Sua estrutura é composta por uma fôrma de aço que, posteriormente, após o lançamento e cura do concreto, formam o sistema misto de aço-concreto. A laje mista, assim como os demais sistemas mistos, utiliza-se de mecanismos de transmissão de esforços a fim de solidariza-los em sua estrutura como um todo.

O formato do perfil, o desenho e a profundidade das mossas são exemplos de mecanismos influentes na determinação da resistência de um sistema de laje mista. Assim, modelos com diferentes configurações dos diversos mecanismos citados e variações de suas combinações são produzidos e ensaiados com a finalidade de estudar seus desempenhos, e determinar parâmetros de resistência para projetos.

São objetivos deste trabalho apresentar às análises do comportamento e da resistência de um sistema de laje mista composto por steel deck com mossas em “V” através do método semiempírico “*m-k*”, com base nos resultados de ensaios realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas - LAEES - do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG.

Dessa forma, o presente trabalho traz essas análises de comportamento e resistência do sistema de lajes mistas, utilizando a fôrma de aço denominada P-75, conforme procedimentos indicados pelo EN 1994-1-1 [1] e ANSI/ASCE 3-91 [2], variando a espessura da fôrma de aço, altura de laje e vãos de cisalhamento, de modo a obter valores de referência sobre a resistência para diversas configurações, além do conhecimento de seu comportamento quando sujeito ao carregamento de uso.

Para a determinação da resistência do sistema estudado, foi utilizado, conforme preconiza a ABNT NBR 8800 [3], o método semiempírico “*m-k*”. A aplicação do método se dá após o tratamento de dados experimentais por meio de regressão linear, obtendo retas características de suas resistências para os parâmetros determinados, conforme ANSI/ASCE 3-91 [2]. Estes valores obtidos serão utilizados posteriormente para a resolução de um exemplo elaborado de modo a ilustrar sua aplicação.

2 Programa de Ensaios

O programa de ensaios é necessário para estudos de novos modelos de lajes mistas dada a complexidade de análise de seu comportamento por vias puramente teóricas. Composta por diversos mecanismos de resistência, a laje mista necessita ser estudada de maneira semiempírica, adequando seus ensaios às necessidades da pesquisa e impondo condições análogas às de projeto, a fim de manter confiabilidade em sua utilização.

Contudo, é possível, também, estudar as lajes mistas tendo em foco determinados fatores componentes, adequando seus ensaios para isso. Também é necessário frisar que o tratamento de dados obtidos em laboratório deve ser feito utilizando o método que possibilite melhor adequação às condições impostas.

A saber, para os protótipos aqui estudados e para as características de ensaio às quais foram submetidos, como a disposição das lajes de maneira simplesmente apoiada e respeitando as distâncias de aplicação do carregamento de flexão, o modo de falha dos sistemas apresentados foram por cisalhamento longitudinal (*shear bond*). Para as condições descritas, o método semiempírico “*m-k*” apresenta-se como o mais adequado além de, conforme Melo [4], o método, é mundialmente consolidado na quantificação da resistência ao cisalhamento longitudinal de lajes mistas. O mesmo é prescrito pelos principais normas relacionados ao tema, tais como a EN.1994-1-1 [1] e ABNT NBR 8800 [3].

Portanto, o programa de ensaios tem por finalidade caracterizar o comportamento e a resistência resultantes da utilização do modelo de fôrma deste trabalho, buscando respeitar os principais procedimentos de ensaio e representar condições usuais de execução e utilização.

2.1 Fôrma de Aço

A fôrma de aço é o principal objeto de estudo na composição do sistema de laje mista. Devido à sua versatilidade, sua composição em aço permite a construção de diversos modelos, combinando diferentes fatores como: desenho e espessura do perfil, a impressão de mossas e a fixação de conectores de cisalhamento, ou demais mecanismos de resistência a serem elaborados. Durante a execução das lajes mistas, devido ao seu funcionamento como diafragma rígido, dispensa escoramentos, reduzindo custos e trazendo maior liberdade ao canteiro de obras. Após a cura do concreto, a fôrma de aço incorporada trabalha como armadura positiva da laje, dispensando o uso de barras extras em grande parte dos projetos.

O modelo de deck ensaiado, P-75 apresenta largura e comprimento nominal, respectivamente, com valores de 880 mm e 2800 mm, e conta com protótipos de duas diferentes espessuras nominais, sendo estas com valores de $t = 0,65$ mm, com mossas de profundidade média igual a 1,43 mm, e $t = 0,95$ mm, com mossas de profundidade média igual a 1,29 mm. As mossas possuem forma de “V”, e são estampadas horizontalmente na alma da fôrma (Fig. 3). A Fig. 1 a apresenta a geometria da fôrma de aço em estudo.

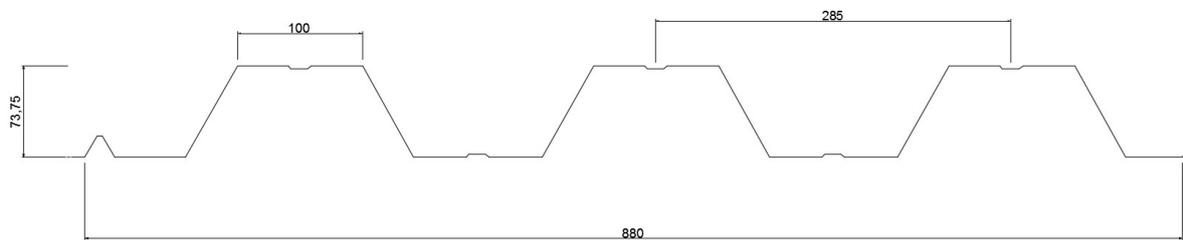


Figura 1. Geometria do perfil da fôrma P-75

Na confecção das fôrmas, utilizou-se aço tipo ZAR 280, com resistência de escoamento $f_y = 333$ MPa, resistência última $f_u = 415$ MPa e módulo de elasticidade nominal igual a 200 GPa, com tratamento protetivo por pintura de zinco em sua superfície.

Por mais que a utilização do aço forneça elevada precisão dos elementos produzidos, estes, ainda assim, podem apresentar pequenas diferenças em relação ao projeto. Portanto, foram tomadas as medidas reais das peças a serem ensaiadas, apresentadas na Tab. 1, a fim de apresentar os resultados mais precisos possíveis. Nessa Tab. 1 também são representados os valores médios aferidos em que t é a espessura nominal, t_e é a espessura da fôrma sem a camada de galvanização, b é a largura nominal, h_f é a altura total da fôrma, $A_{F,ef}$ é a área efetiva de aço na seção da fôrma, y_{cg} é a altura do centro de gravidade até a face inferior da fôrma, I_{sf} é o momento de inércia da seção transversal e pp_f é o peso próprio da fôrma.

Tabela 1. Propriedades geométricas da fôrma

Steel Deck	t (mm)	t_e (mm)	b (mm)	h_f (mm)	$A_{F,ef}$ (mm ²)	y_{cg} (mm)	I_{sf} (mm ⁴)	pp_f (kN/m ²)
P-75	0,65	0,614	878,67	74,23	774,35	37,12	690.084	0,0682
	0,95	0,914	878,94	74,53	1.132,15	37,27	1.084.438	0,0997

2.2 Concreto

Segundo Gomes [5], a escolha entre a utilização do concreto convencional ($\rho = 2400$ kg/m³) ou do concreto leve ($\rho = 1800$ kg/m³) pouco interfere na resistência ou funcionamento dos sistemas de lajes mistas, contanto que este garanta resistência à compressão requerida em projeto. Dessa forma, por questões práticas, para a confecção dos protótipos, foi adotado o concreto convencional, produzido em usina, com a resistência característica f_{ck} igual ou superior a 20 MPa.

Com efeito apenas de prevenção contra fissuração causada por retração e variações de temperatura do concreto, conforme indica a ABNT NBR 8800 [3], foi utilizada armadura soldada em formato de tela, com área de aço superior a 0,1% da área de concreto e cobrimento de 20 mm.

2.3 Caracterização dos Protótipos

Para o presente trabalho, foi realizada uma amostragem de 6 protótipos para o estudo de cada espessura do modelo de fôrma “Steel Deck” P-75, sendo utilizado o ensaio de flexão de quatro pontos. Em cada par de protótipos foram variadas as medidas de vão de cisalhamento, de modo a cobrir os possíveis comportamentos a serem apresentados por estes modelos. No total foram produzidos 12 protótipos da fôrma P-75, sendo 6 com espessura $t = 0,65$ mm, e 6 com $t = 0,95$ mm.

A ABNT NBR 8800 [3] apresenta critério para vãos de cisalhamento, sendo que, utiliza-se valores maiores que $\frac{1}{4}$ do vão total da laje, e tão grandes quanto possíveis, contanto que garantam a falha por cisalhamento longitudinal.

A Tabela 2 apresenta as características nominais dos protótipos ensaiados, sendo t a espessura da fôrma, L o vão entre apoios, h_t a altura total da laje mista, b a largura, e L_s os vãos de cisalhamento variados a cada par de ensaios.

Tabela 2. Características nominais dos protótipos ensaiados

Protótipo	t (mm)	L (mm)	h_t (mm)	L_s (mm)	b (mm)
P-75-1A	0,65	2700	160	450	880
P-75-1B	0,65	2700	160	450	880
P-75-2A	0,65	2700	160	650	880
P-75-2B	0,65	2700	160	650	880
P-75-3A	0,65	2700	160	900	880
P-75-3B	0,65	2700	160	900	880
P-75-4A	0,95	2700	160	450	880
P-75-4B	0,95	2700	160	450	880
P-75-5A	0,95	2700	160	650	880
P-75-5B	0,95	2700	160	650	880
P-75-6A	0,95	2700	160	900	880
P-75-6B	0,95	2700	160	900	880

2.4 Instrumentação

Para as análises de resistência e deslocamentos dos protótipos, foram utilizados dois tipos de instrumentos. No meio do vão, logo acima da face superior do concreto, com a finalidade de leitura dos deslocamentos verticais, foram utilizados dois transdutores de deslocamento (DT), com precisão de 0,01 mm. Estes foram posicionados simetricamente a, aproximadamente, 20 cm da borda longitudinal da laje, e o deslocamento vertical adotado para o meio do vão foi a média entre os dois valores obtidos.

Para a medição dos deslocamentos longitudinais, foram utilizados quatro DT's, com precisão de 0,01 mm, sendo dois em cada extremidade da laje. Estes foram posicionados equidistantes, 5 cm afastados das bordas laterais. Assim, foram fixados à uma chapa metálica de modo a mensurar os deslocamentos horizontais relativos entre a fôrma de aço e o concreto, conforme ilustra a Fig. 2.

Os registros das deformações da fôrma de aço foram feitos por dois extensômetros elétricos de resistência (EER) na face inferior da laje, posicionados um na mesa superior da fôrma (EER2S), e outro na mesa inferior (EER1I), ambos no meio do vão da laje ensaiada, conforme ilustra a Fig. 3. Para a medição da carga aplicada ao sistema, foi utilizado um anel dinamométrico, com capacidade de leitura de 500 kN (Fig. 2).



Figura 2. Posicionamento dos transdutores de deslocamento



Figura 3. Posicionamento dos extensômetros elétricos de resistência

2.5 Procedimentos de Ensaio

Os ensaios foram feitos conforme as indicações contidas na EN.1994-1-1 [1], na ANSI/ASCE 3-91 [2] e na ABNT NBR 8800 [3]. A ANSI/ASCE 3-91 [2], indica que, para a determinação da resistência e do comportamento das lajes mistas, estas devem ser ensaiadas de maneira similar ao seu uso em situações comuns. Dessa forma, os protótipos foram testados utilizando o ensaio de flexão de quatro pontos, conforme o esquema representado pela Fig.4.

Os protótipos foram dispostos em um sistema apoio fixo-apoio móvel, o qual se apoiada, por sua vez, em blocos de concreto. Para a aplicação de cargas concentradas foi utilizado um sistema vigas metálicas denominado de aparato, disposta sobre um sistema apoio móvel-apoio fixo. Esse aparato foi posicionado sob o atuador hidráulico, responsável pela aplicação do carregamento a ser transmitido à laje mista. Foi utilizada uma tira de borracha nos pontos de contato entre a laje e o aparato, a fim de possibilitar uma transmissão mais homogênea do carregamento.

Após posicionamento e instrumentação, era aplicada uma pré-carga ao sistema, a fim de evitar instabilidades devidas à acomodação do aparato ao sistema misto. Após a retirada da pré-carga iniciava-se o ensaio para medição dos parâmetros como carregamentos, deslocamentos e deformações.

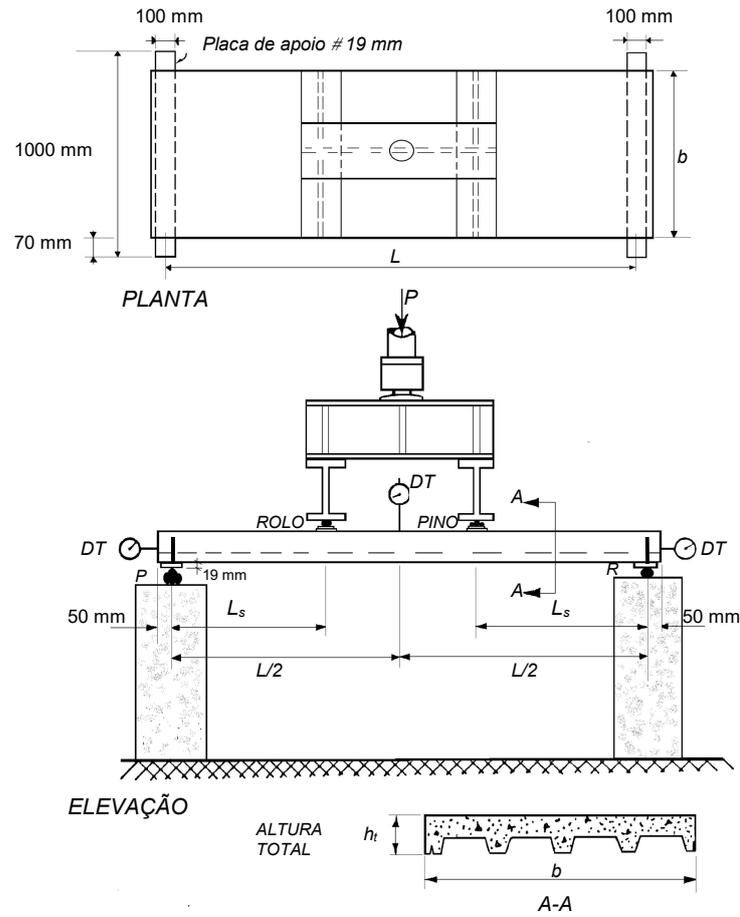


Figura 4. Esquema de ensaio de flexão de quatro pontos

Com a taxa gradual de carregamento, o ensaio era acompanhado passo a passo, com o registro dos incrementos de cargas e consequentes eventos importantes do sistema de laje mista, como surgimento das primeiras fissuras, descolamento da fôrma (perda de aderência química) e colapso. O ensaio era interrompido após o colapso do sistema, ou seja, quando este não suportasse maiores incrementos de cargas e apresentasse deformação excessiva, sendo esta sua carga última (P_u). Contudo, caso o valor de P_u obtido produza uma flecha que exceda o valor de $L/50$, conforme preconiza o EN.1994-1-1 [1], a carga para essa flecha deve ser adotada como P_u . As Figs. 5 e 6 apresentam uma laje mista ensaiada após sua ruptura.



Figura 5. Seção transversal após colapso



Figura 6. Vista da laje mista após colapso

Após a remoção da prensa do atuador hidráulico, eram feitos os mapeamentos de fissuras e demais análises do comportamento da fôrma, como a constatação do deslizamento relativo entre a fôrma e o concreto, visualizada em todos os ensaios realizados. Este era um indicativo da ruptura por cisalhamento longitudinal, premissa deste trabalho. Após a finalização da série de ensaios, iniciava-se o tratamento dos dados coletados.

3 Análise do Comportamento das Lajes Mistas de Aço e Concreto

Nesta seção, serão estudados os comportamentos apresentados pelos protótipos ensaiados sob condições pré-determinadas, o que significa que, para as características dos protótipos e da configuração utilizada, há uma previsão de comportamento.

Através dessas análises será possível observar de que forma as características de cada protótipo, e como as características de ensaio influenciam nos dados obtidos, utilizando como parâmetros os dados apresentados nos gráficos carga *versus* flecha no meio do vão, carga *versus* deslizamento relativo e carga *versus* deformação.

Proporcionalmente ao acréscimo do carregamento, a laje mista apresentará estágios de resistência, de forma a comportar-se diferentemente em cada um deles. Inicialmente, o sistema de laje mista possui interação total entre a fôrma de aço e o concreto, estando totalmente solidarizados. Após o aparecimento das primeiras fissuras, é dado início à fase de interação parcial, caracterizado pela resistência devida às mossas e ao atrito nos apoios. Com o contínuo incremento de cargas e consequente propagação de esforços, há a ruptura da ligação química entre a fôrma de aço e o concreto, caracterizando, a partir daí, o deslizamento relativo e o funcionamento das mossas como principal mecanismo de resistência da laje. Após o deslizamento relativo de 0,5 mm, a laje mista pode apresentar dois comportamentos distintos:

- Se a laje mista se comportar de maneira dúctil, apresentará capacidade portante após a estabilização do sistema. Segundo o EN.1994-1-1 [1], lajes mistas que têm a relação entre a carga última (P_u) e a carga medida no momento que é registrado o deslizamento relativo de 0,1 mm (P_{des}), igual ou superior a 1,10, serão consideradas dúcteis.
- Caso a relação entre a carga última e a carga de deslizamento relativo de 0,1 mm não seja satisfeita, igual ou superior a 1,10, a laje mista é considerada frágil. Se a laje se comportar de maneira frágil, após o deslizamento relativo de extremidade, é observada a perda brusca de capacidade portante, caracterizando assim a falha do sistema.

Na presente pesquisa, observou-se que todos os modelos ensaiados apresentaram comportamento frágil, exceto os modelos 1A, 4A e 4B, que apresentaram comportamento dúctil. Portanto, a partir desses conhecimentos, pode-se estudar e compreender os gráficos carga *versus* flecha no meio do vão, carga *versus* deslizamento relativo e carga *versus* deformação.

3.1 Comportamento Carga versus Flecha

Os gráficos carga *versus* flecha no meio do vão dos protótipos 2A ($t = 0,65$ mm) e 5A ($t = 0,95$ mm) são tomados como representativos dos demais protótipos de mesma espessura de fôrma. A flecha de serviço é calculada conforme a ABNT NBR 8800 [3], por $L/350$.

Observa-se na Fig. 7, que inicialmente há interação total entre a fôrma de aço e o concreto, definida pelo estágio não fissurado ilustrado pela reta tracejada, apresentando comportamento elástico linear.

Com o aumento da carga aplicada, ocorre o surgimento das primeiras fissuras, observadas na região central do vão da laje mista. Inicia-se nessa fase, o estágio fissurado (reta pontilhada, Fig.7), com notável mudança de rigidez, portanto, apresentando um comportamento não linear. O comportamento observado é caracterizado pela crescente capacidade de carga, porém, apresentando maiores deformações quando comparado com o primeiro estágio.

Para um carregamento em torno de 20 kN, o protótipo apresenta-se uma maior capacidade de carga, seguido pelo momento em que ocorre o deslizamento relativo de extremidade (end slip). Após a acomodação entre o concreto e a fôrma de aço, ocorre relativa estabilização em relação à capacidade de carregamento, devido ao funcionamento das mossas, porém, é notável que o protótipo em estudo indica pouca eficiência após atingir o deslizamento relativo de extremidade apresentando flecha crescente associada à perda de capacidade resistente.

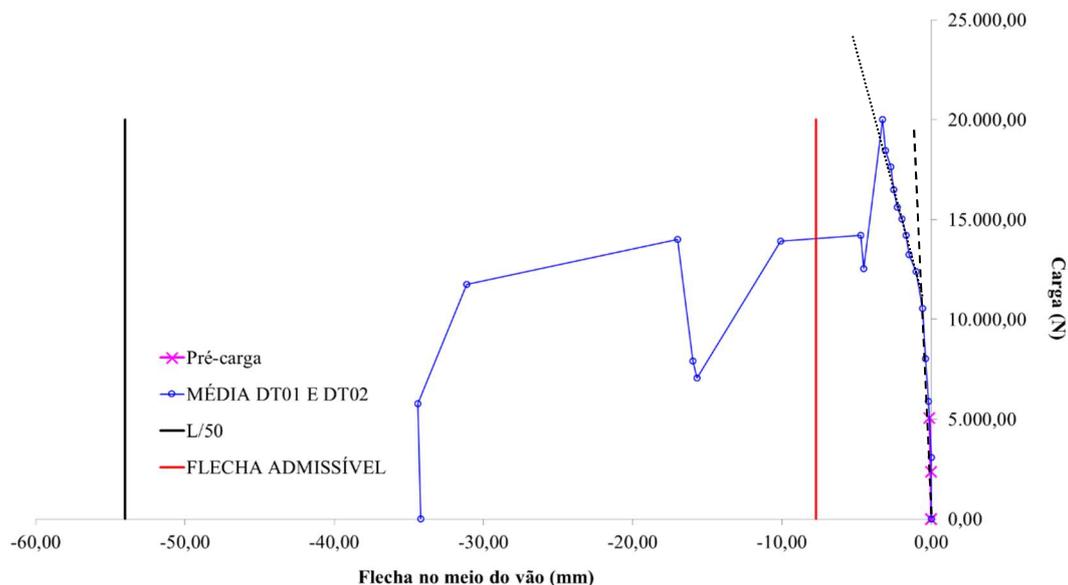


Figura 7. Comportamento carga *versus* flecha no meio do vão do protótipo 2A.

Na Fig. 8, é observado um comportamento em fase inicial similar ao do protótipo 2A, analisado anteriormente, sequenciado pelo aparecimento das fissuras no meio do vão, que iniciam o estágio fissurado, no qual o valor de resistência alcançado até a ocorrência do deslizamento relativo de extremidade foi em torno de 23,5 kN.

O protótipo 5A demonstrou melhor desempenho, se comparado ao protótipo 2A, nessa fase cuja resistência é caracterizada pelo trabalho das mossas, mesmo após a considerável deformação iniciada depois do end slip. Mesmo o sistema de laje mista apresentando uma crescente flecha, alcançou a resistência última em torno de 24,4 kN, um pouco superior ao seu valor predecessor ao deslizamento de extremidade inicial.

Dessa forma, é possível constatar que a maior espessura da fôrma e profundidade de suas mossas resultam em um desempenho com menores flechas e maior capacidade de carga, se comparada com um modelo de menor espessura.

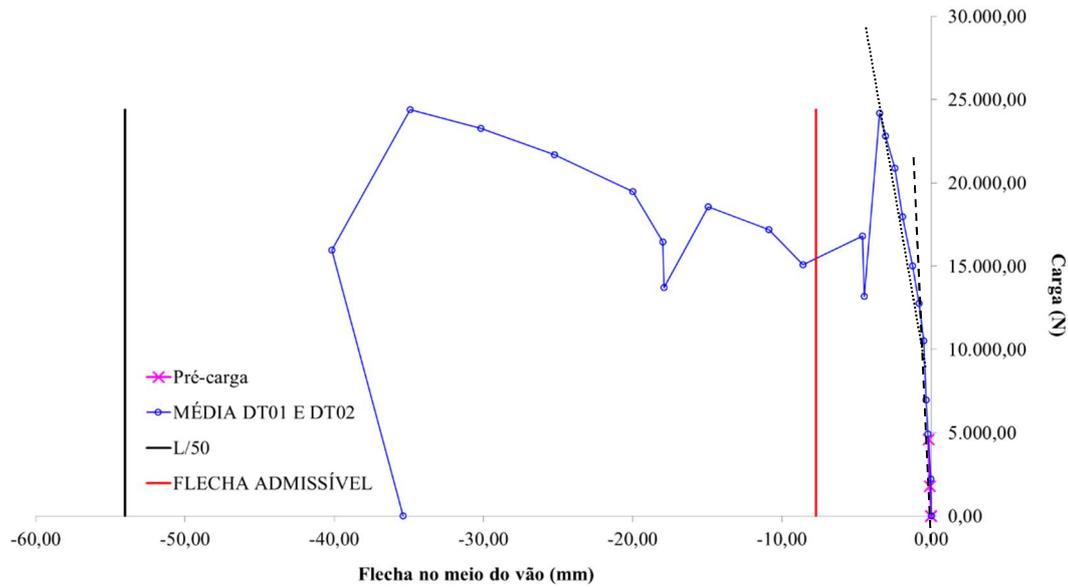


Figura 8– Comportamento carga *versus* flecha no meio do vão do protótipo 5A.

3.2 Comportamento Carga *versus* Deslizamento relativo de extremidade

O deslizamento relativo entre a o concreto e a fôrma de aço é o mecanismo que caracteriza o colapso do presente sistema misto, conforme premissas estabelecidas para os ensaios. A reta denominada “end slip”, apresentada nos gráficos das Figs. 9 e 10, representa a marcação do deslizamento de extremidade inicial de 0,5 mm.

Nos gráficos das Figs. 9 e 10 são apresentados os comportamentos de carga *versus* deslizamento relativo de extremidade dos protótipos 2A e 5A, onde os valores dos deslocamentos são as médias obtidas pelos DT’s posicionados nas extremidades e na direção longitudinal das lajes mistas ensaiadas.

Através da análise dos gráficos das Figs. 9 e 10, pode-se caracterizar a resistência da fôrma relativa ao cisalhamento longitudinal observando seus deslocamentos, sendo possível quantificar sua carga de serviço e a carga última. Como na análise carga *versus* flecha no meio do vão, os protótipos 2A e 5A serão representativos dos demais modelos ensaiados.

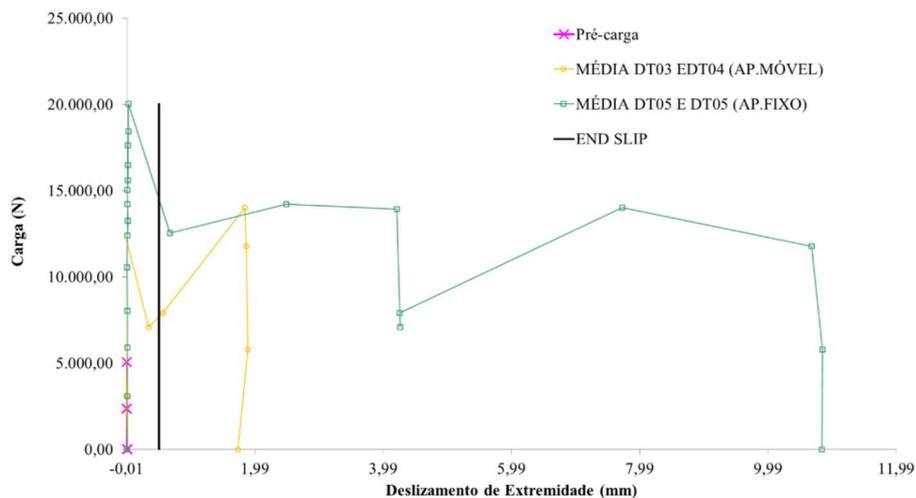


Figura 9. Comportamento carga *versus* deslizamento relativo de extremidade do protótipo 2A.

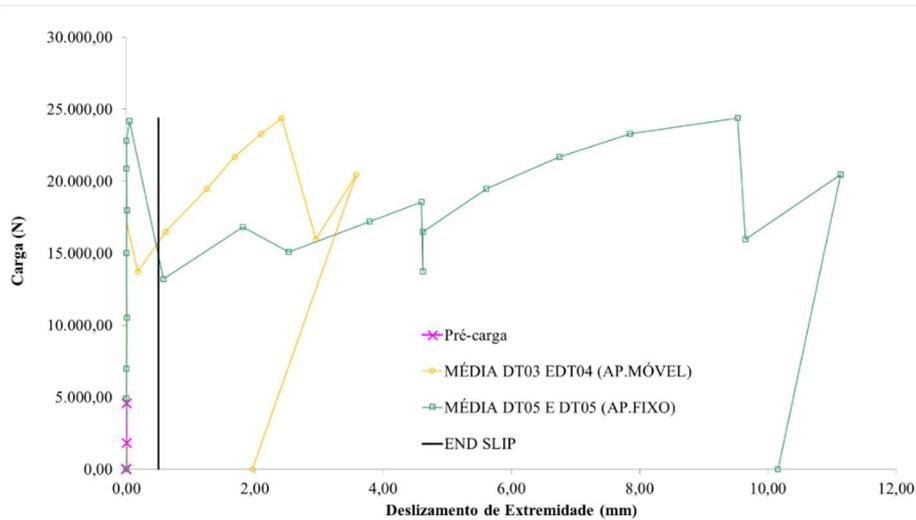


Figura 10. Comportamento carga *versus* deslizamento relativo de extremidade do protótipo 5A.

Durante a fase inicial de carregamento, os protótipos apresentam comportamento de interação total, sem praticamente qualquer deslocamento relativo, resistindo de forma solidária aos esforços cisalhantes longitudinais. Dado o surgimento das primeiras fissuras, é notável o início da movimentação entre a fôrma de aço e o concreto. Ao ser registrado o deslizamento relativo de 0,5 mm, conforme preconiza o EN.1994-1-1 [1], é registrada a carga de deslizamento de extremidade inicial (P_{des}). Fica caracterizado como colapso do sistema ensaiado o momento em que se observam deslizamentos relativos excessivos e perda da capacidade portante.

3.3 Comportamento Carga *versus* Deformação da fôrma de aço

De forma análoga às análises anteriores, serão tomados como representantes dos demais modelos de mesmas espessuras, a dizer, o protótipo 2A, com espessura $t = 0,65$ mm e o protótipo 5A, com espessura $t = 0,95$ mm, representados nos gráficos das Figs. 11 e 12.

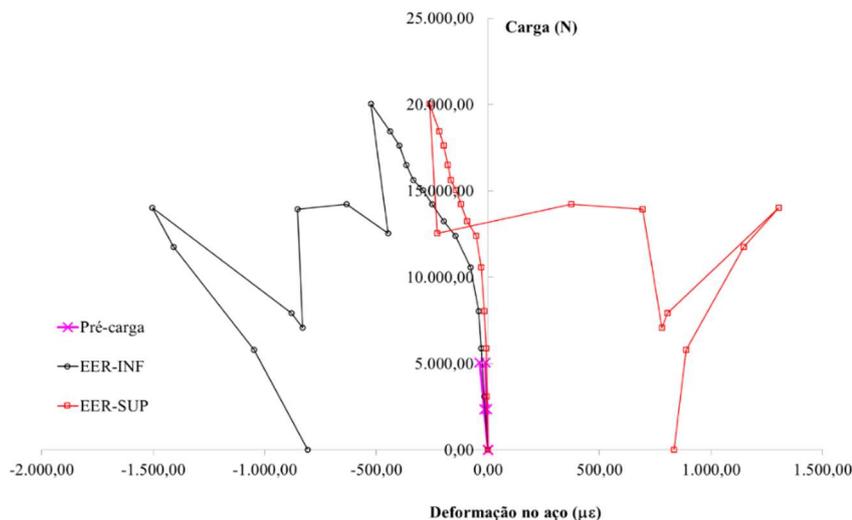


Figura 11. Comportamento carga *versus* deformação da fôrma de aço do protótipo 2A.

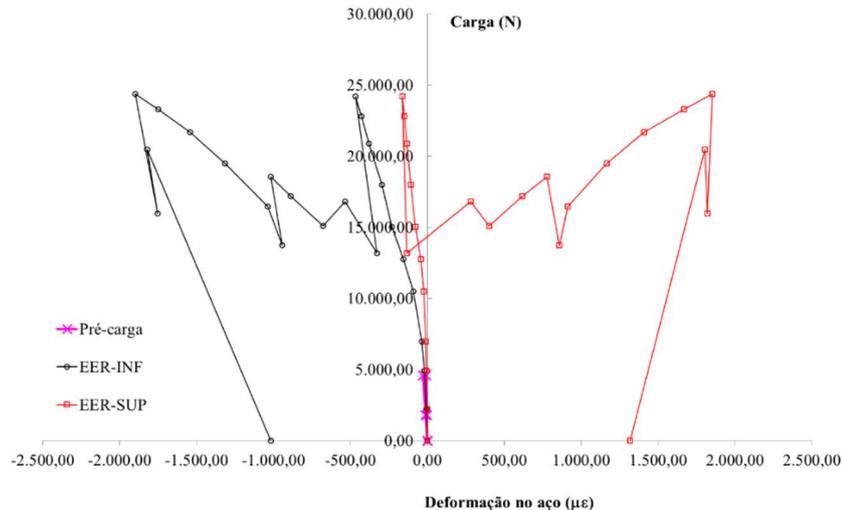


Figura 12. Comportamento carga *versus* deformação da fôrma de aço do protótipo 5A.

Os registros apresentados a seguir são análises dos comportamentos da fôrma de aço, obtidos a partir da utilização de dois extensômetros elétricos de resistência (EER), fixados no meio do vão da fôrma de aço, sendo um na mesa superior e o outro na mesa inferior, conforme ilustra a Fig. 3. Os sinais de positivo e negativo das deformações são, respectivamente, compressão e tração na fôrma de aço.

Inicialmente, observa-se nas Figs. 11 e 12 o comportamento conjunto entre o concreto e a fôrma de aço, verificando uma interação total. Nas Figs. 11 e 12, a sobreposição dos traçados de deformação dos extensômetros indica que ambas as mesas possuem esforços de mesma magnitude, configurando a existência de uma única linha neutra, situada acima da fôrma de aço, na região do concreto.

Conforme aumenta a aplicação de carga, vai sendo observada a diferença entre as deformações do extensômetro fixado à mesa inferior e o fixado à mesa superior, isto indica que, devido ao surgimento das fissuras no concreto e a conseqüente quebra da aderência química, evidencia-se no sistema misto o surgimento de uma segunda linha neutra.

Após o evento do deslizamento de extremidade inicial, observa-se, a partir das Figs. 11 e 12, a mudança de comportamento da parte superior da fôrma de aço, antes tracionada, agora comprimida, caracterizando um comportamento de interação parcial.

3.4 Modo de Colapso

Conforme os ensaios realizados e segundo as análises dos comportamentos Carga *versus* Flecha, Carga *versus* Deslizamento Relativo de Extremidade e Carga *versus* Deformação da Fôrma de Aço, foram alcançados os resultados esperados, havendo o colapso de todos os protótipos ensaiados por cisalhamento longitudinal, conforme Grossi [6].

O cisalhamento longitudinal é a falha por cisalhamento da ligação entre as mossas da fôrma de aço e o concreto, fazendo com que a região do vão de cisalhamento, L_s , perca sua ação composta com a fôrma de aço, conforme Lavall et al [7]. Esta falha é indicada por um deslizamento relativo acentuado entre a fôrma de aço e o concreto na extremidade do modelo, conforme ilustra a Fig. 13.

Observou-se, também, que, além das fissuras na região central do vão, características do ensaio de flexão, houve também intensa fissuração na região entre apoio e aplicação de carga.

A caracterização do colapso por cisalhamento longitudinal do sistema de laje mista P-75 é similar a de outros sistemas do tipo steel deck com mossas, como relatado em Schuster [8], Melo [4], Cifuentes e Medina [9] e Costa et al [10].



Figura 13. Detalhe do deslocamento horizontal relativo entre a fôrma de aço e o concreto.

4 Análise da resistência do sistema de laje mista

A partir dos resultados dos ensaios dos protótipos e considerando o modo de falha por cisalhamento longitudinal, elaborou-se uma base sólida de informações para o dimensionamento de lajes mistas que utilizem o modelo de fôrma de aço P-75 aqui estudado. Para a determinação da resistência desse sistema misto, será utilizado o método semiempírico “*m-k*”, que se caracteriza pela utilização de dados obtidos experimentalmente, tratados por meio de regressão linear. O método “*m-k*” é, conforme citam diversos autores, como Melo [4], Lavall et al [7] e Costa [11], o método mais utilizado para o cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal em lajes mistas. Este método é apresentado por diversos documentos, e, para o presente trabalho, serão utilizados os procedimentos indicados pelo ANSI/ASCE 3-91 [2], utilizando também como referência a ABNT NBR 8800 [3].

Objetiva-se, com a aplicação do método *m-k*, obter uma reta característica que represente as resistências de lajes mistas compostas que utilizem o protótipo de fôrma ensaiado. Dessa forma, será utilizada a Eq. (1) fornecida pela ABNT NBR 8800 [2].

$$V_{l,R} = bd_F \left[\left(\frac{mA_{F,ef}}{bL_s} \right) + k \right]. \quad (1)$$

onde $V_{l,R}$ é a força cortante longitudinal resistente nominal da laje mista (N), b é a largura nominal (mm), d_F é a altura da face superior do concreto ao centro de gravidade da laje (mm), $A_{F,ef}$ é a área da seção efetiva da fôrma (mm²), L_s é o vão de cisalhamento (mm), e os valores m (N/mm²) e k (N/mm²) são as constantes empíricas a serem determinadas a partir dos dados experimentais obtidos.

4.1 Determinação das constantes *m* e *k*

Para obter as constantes semiempírica m e k , serão utilizados os dados obtidos experimentalmente, cujos ensaios foram realizados em dois grupos de diferentes espessuras, $t = 0,65$ mm e $t = 0,95$ mm, contendo seis protótipos de igual espessura em cada grupo, todos com mesmo vão $L = 2700$ mm, adotando diferentes vãos de cisalhamento (Tab. 3), a fim de cobrir a amplitude de funcionamento da laje mista em questão.

Na Tabela 3 serão apresentados os dados geométricos aferidos de cada protótipo ensaiado e as cargas obtidas nos ensaios, sendo b é a largura da laje, h_t é a altura total, d_F é a altura da face superior do concreto ao centro de gravidade da laje, $A_{F,ef}$ é a área da seção efetiva da fôrma, L_s é o vão de cisalhamento, P_u é a carga última suportada pela laje, pp_{laje} é o peso próprio da laje por unidade de milímetro quadrado, P_a é o peso próprio do aparato (sistema de aplicação de carga), e V_{ut} é a força cortante última, composta pela Eq. (2):

$$V_{ut} = \frac{P_u + P_a + (pp_{laje} L b)}{2}. \quad (2)$$

Tabela 3. Dados geométricos e cargas de ensaio

Protótipos	t ($\frac{m}{m}$)	b (mm)	h_t (mm)	d_F (mm)	$A_{F,ef}$ (mm ²)	L_s (mm)	P_u (kN)	pp_{laje} (N/mm ²)	P_a (kN)	V_{ut} (kN)
P75-1A	0,65	879,67	159,50	122,39	774,35	450	26,88	0,00301	4,52	19,27
P75-1B	0,65	879,00	160,67	123,55			31,17		4,52	17,13
P75-2A	0,65	877,00	160,50	123,39	774,35	650	20,02	0,00301	4,52	12,67
P75-2B	0,65	879,00	163,33	126,22			17,93		4,52	11,84
P75-3A	0,65	880,00	160,00	122,89	774,35	900	14,94	0,00301	4,52	10,65
P75-3B	0,65	877,33	159,50	122,39			12,75		4,52	9,76
P75-4A	0,95	879,67	160,50	123,24	1.132,2	450	40,03	0,00304	4,52	25,88
P75-4B	0,95	878,00	161,17	123,90			44,17		4,52	27,95
P75-5A	0,95	878,00	162,50	125,24	1.132,2	650	24,19	0,00304	4,52	14,37
P75-5B	0,95	880,67	161,67	124,40			24,22		4,52	14,39
P75-6A	0,95	879,00	160,50	123,24	1.132,2	900	16,92	0,00304	4,52	11,46
P75-6B	0,95	878,33	160,00	122,74			20,20		4,52	12,77

Segundo os procedimentos para a determinação dos parâmetros m e k , a Eq. (1) que determina a força cortante longitudinal resistente nominal da laje mista ($V_{L,R}$), será reescrita na forma da Eq. (3), sendo as variáveis X e Y expressas, respectivamente, pelas Eqs. (4) e (5).

$$Y = mX + k. \quad (3)$$

$$Y = \frac{V_{uk}}{bd_F}. \quad (4)$$

$$X = \frac{A_{F,ef}}{bL_s}. \quad (5)$$

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de regressão linear para obtenção dos valores característicos dos parâmetros m e k , de acordo com ANSI/ASCE 3-91 [2]. Nesta tabela, as coordenadas X e Y são determinadas conforme as Eqs. (4) e (5). Segundo a ANSI/ASCE 3-91 [2], se apenas dois ensaios são realizados para cada valor de L_s , o valor de Y para qualquer um dos ensaios não pode se desviar da média dos dois em mais de 15%. Uma vez satisfeita essa exigência, procede-se à análise de regressão determinando os valores de m e k relativos aos ensaios. Ainda conforme a ANSI/ASCE 3-91 [2], reduzindo-se esses valores de ensaio em 15% obtém-se os valores característicos de m e k a serem utilizados para o dimensionamento.

Tabela 4. Resultados da análise de regressão linear

Protótipos	X	Y (N/mm ²)	Regressão linear Ensaio (N/mm ²)	Regressão linear característica (N/mm ²)	$V_{L,R}$ (N)
P75-1A	0,0019562	0,1790272	m	m	15.139,26
P75-1B	0,0019577	0,1972126	77,1156	65,5483	15.282,56
P75-2A	0,0013584	0,1463391	k	k	10.976,70
P75-2B	0,0013553	0,1333589			11.231,89
P75-3A	0,0009777	0,1230579	0,0146	0,0124	8.271,27
P75-3B	0,0009807	0,1136152			8.233,57
P75-4A	0,0028600	0,2387447	m	m	22.045,52
P75-4B	0,0028655	0,2569044	98,3781	83,6214	22.172,17
P75-5A	0,0019838	0,1633247	k	k	14.303,94
P75-5B	0,0019778	0,1641416			14.196,88
P75-6A	0,0014311	0,1322453	-0,0421	-0,0358	9.085,24
P75-6B	0,0014322	0,1480721			9.051,31

As figuras 14 e 15 apresentam os gráficos da resistência nominal ao cisalhamento longitudinal para os seis modelos com espessura $t = 0,65$ mm e seis com espessura $t = 0,95$ mm do steel deck P-75, respectivamente. Essas figuras ilustram os resultados experimentais, compondo três grupos bem definidos e distintos de dois ensaios cada, correspondentes aos valores de X e a reta de ajuste da regressão linear. Após a redução dos valores de ensaio em 15% obtêm-se a reta de ajuste característica com os correspondentes valores de m e k , que definem a resistência nominal ao cisalhamento longitudinal.

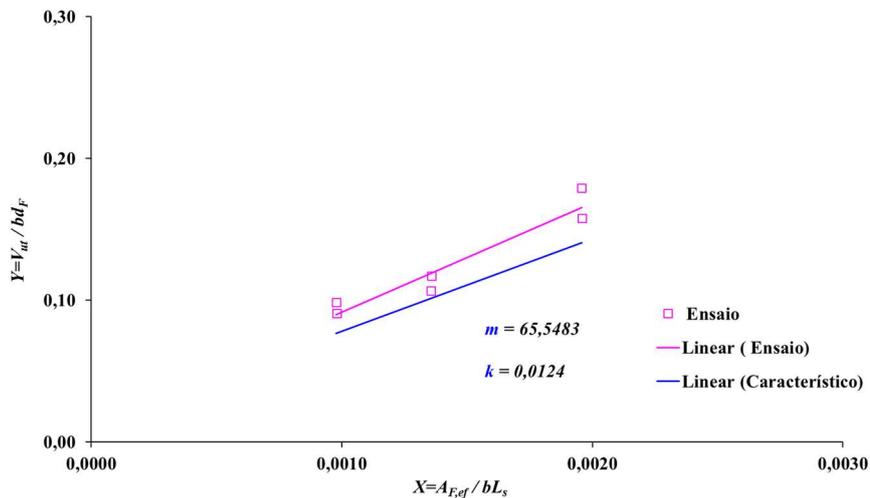


Figura 14. Resistência nominal ao cisalhamento longitudinal ($t = 0,65$ mm)

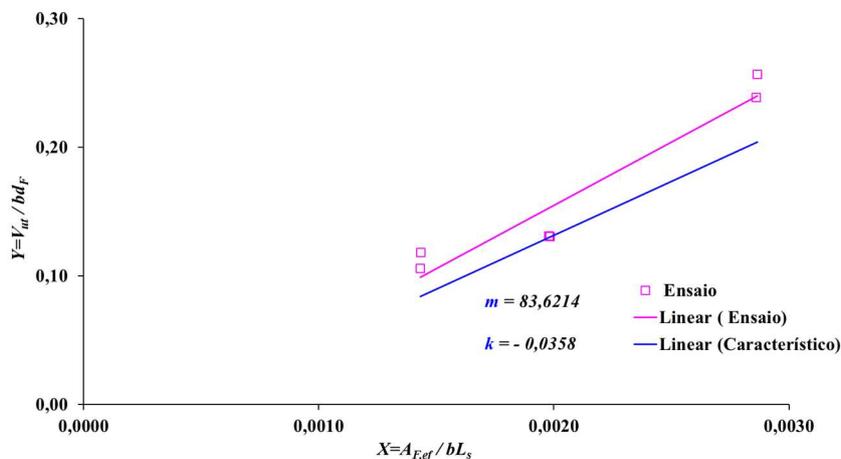


Figura 15. Resistência nominal ao cisalhamento longitudinal ($t = 0,95$ mm)

Apresenta-se na Tab. 5 os valores finais dos parâmetros m e k a serem utilizados no dimensionamento do sistema de laje mista de aço e concreto P-75 com espessuras $t = 0,65$ mm e $t = 0,95$ mm. Os valores correspondentes à espessura $t = 0,80$ mm foram obtidos através de uma interpolação linear dos demais.

TABELA 5 – Valores finais dos parâmetros m e k .

Fôrma	t_n (mm)	m (N/mm ²)	k (N/mm ²)
P-75	0,65	65,5483	0,0124
	0,80	74,5849	-0,0117
	0,95	83,6214	-0,0358

4.2 Força cortante longitudinal resistente de cálculo

Conforme apresentado inicialmente nesta seção 4 da análise de resistência da laje mista, a partir dos parâmetros semiempíricos “ m ” e “ k ”, torna-se possível calcular os valores da força cortante longitudinal resistente, $V_{l,R}$, para diferentes configurações de utilização de um mesmo modelo de laje mista. Contudo, para a determinação dos valores da força cortante longitudinal resistente de cálculo, $V_{l,Rd}$, a ABNT NBR 8800 [3] insere à equação o coeficiente de ponderação da resistência ao cisalhamento longitudinal, γ_{sl} . Esse coeficiente de ponderação engloba a variabilidade presente nos procedimentos, como a qualidade dos materiais e da mão de obra, além das aproximações contidas quando se utiliza a Eq. (6) em relação ao comportamento real do sistema.

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\left(\frac{m A_{F,ef}}{b L_s} \right) + k \right]. \quad (6)$$

As normas técnicas utilizam diferentes valores para γ_{sl} , e, conforme explicado, nele estão contidas determinadas tolerâncias de projeto, as quais se relacionam com diversas outras considerações utilizadas durante a metodologia, podendo então, o projetista estudar e definir o valor adequado para o estudo. A EN 1994-1-1: [1] recomenda também que o valor de cálculo obtido com esse coeficiente para as cargas de serviço não ultrapasse a carga de deslizamento de extremidade inicial, obtida nos ensaios, dividida por 1,2. Portanto, neste trabalho, o γ_{sl} adotado foi o valor de 1,20.

4.3 Carregamento uniformemente distribuído

Segundo Costa [10] para se considerar um carregamento uniformemente distribuído, a força cortante de cálculo, $V_{l,Rd}$, pode ser tomada como a reação nos apoios produzida por uma carga linear w_d aplicada sobre um vão L biapoiado. Igualando as áreas do diagramas de força cortante do carregamento distribuído e o de duas cargas concentradas equidistantes, referentes as condições de ensaio, é calculado um vão de cisalhamento (L_s) equivalente a um quarto do vão teórico L_F , conforme é apresentado na ABNT NBR 8800 [3]. Assim, a Eq. (6) pode ser expressa da seguinte forma, pela Eq. (7):

$$\frac{w_d L_F}{2} = \frac{bd_F}{\gamma_{sl}} \left[\left(\frac{m A_{F,ef}}{b \frac{L_F}{4}} \right) + k \right]. \quad (7)$$

A partir de manipulação matemática torna-se possível a determinação do carregamento distribuído equivalente aos carregamentos aplicados no ensaio, por meio da Eq. (8).

$$w_d = \frac{2bd_F}{\gamma_{sl} L_F} \left[\left(\frac{4m A_{F,ef}}{b L_F} \right) + k \right]. \quad (8)$$

O cálculo de w_d representa a carga última distribuída de cálculo a ser aplicada sobre a laje para os parâmetros considerados. Para a determinação do carregamento de serviço, w_s , basta dividir o valor de w_d pelo coeficiente de ponderação das ações, γ_f , que, segundo a ABNT NBR 6118 [11], seu valor é 1,40.

5 Exemplo de Aplicação

Com o intuito de demonstrar a aplicação prática do método semiempírico $m-k$ para a determinação das resistências do sistema de laje mistas utilizando o *Steel Deck* P-75 aqui estudado, será apresentado um exemplo de laje mista, conforme ilustra a Fig. 16, similar ao elaborado por Costa [11], utilizando a fôrma de aço com a espessura $t = 0,80$ mm.

Será avaliado a carga máxima considerando a resistência ao cisalhamento longitudinal, sendo este o modo padrão de ruptura das lajes mistas com fôrmas de aço incorporada, conforme metodologia relativa ao método adotado. Serão utilizados os coeficientes de ponderação estabelecidos pela ABNT NBR 6118 [12] e pela ABNT NBR 8800 [3], os valores de m e k , além da equação de cálculo da força cortante longitudinal resistente de cálculo, $V_{l,Rd}$, apresentada pela Eq. (6).

Serão estudadas duas situações distintas para as quais o sistema de laje mista estará submetido:

- Carregamento uniformemente distribuído
- Duas cargas concentradas, aplicadas equidistantes dos apoios

Dessa forma, será possível construir um panorama de aplicações de cargas de projeto para as condições estabelecidas.

A seguir são apresentados os dados para o exemplo de verificação:

$t = 0,80$ mm; $d_F = 110$ mm; $A_{F,ef} = 953,25$ mm²; $b = 1000$ mm; $L = 2500$ mm;

$pp_{laje} = 0,003025$ N/mm²; $m = 74,5849$ N/mm²; $k = -0,0117$ N/mm²; $\gamma_{sl} = 1,20$.

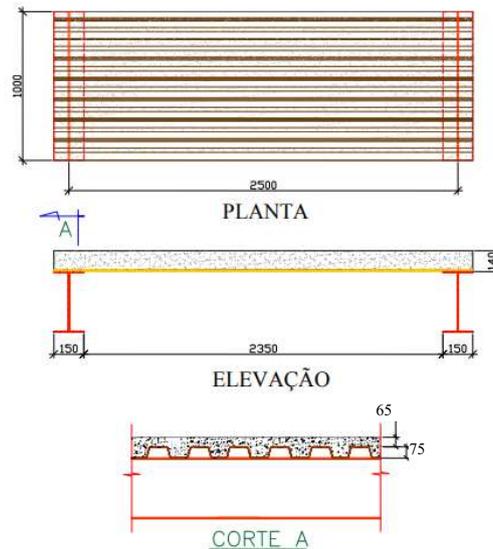


Figura 16. Esquema de representação do protótipo em estudo.

Fonte: Costa [11]

5.1 Carregamento uniformemente distribuído

Analisando a condição da laje simplesmente apoiada, submetida a um carregamento uniformemente distribuído, conforme ilustrada na Fig. 17, pode-se obter a carga máxima sobreposta w_{sp} utilizando a Eq. (8), conforme expressão a seguir:

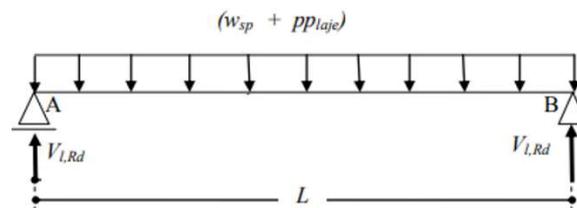


Figura 17. Esquema de cargas atuantes no sistema.

Fonte: Costa [11].

Solução:

$$\frac{[(1,4 \times 0,003025 \times 1000) + (1,4 \times w_{sp})] \times 2500}{2} = \frac{1000 \times 110}{1,20} \left[\left(\frac{74,5849 \times 953,25}{1000 \times \frac{2500}{4}} \right) - 0,0117 \right]$$

$$w_{sp} = 2,32 \text{ kN/m}^2$$

5.2 Duas cargas concentradas

O modelo apresentado, conforme ilustra a Fig. 18, é análogo ao utilizado durante os ensaios para a determinação dos parâmetros m e k deste trabalho. A laje, simplesmente apoiada, é submetida à aplicação de duas cargas concentradas, equidistantes aos apoios, além da carga relativa ao seu peso próprio.

Para essa situação, o vão de cisalhamento L_s é a distância do ponto de aplicação das cargas até os apoios, conforme ilustrado na Fig. (18), tomando $L_s = 450$ mm, de maneira similar ao utilizado por Costa [11].

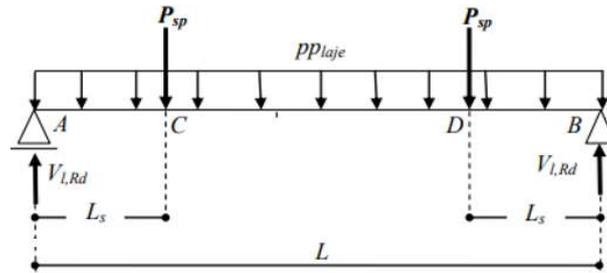


Figura 18. Esquema de cargas atuantes no sistema.

Fonte: Costa [11].

Para se determinar a carga máxima sobreposta a ser aplicada, P_{sp} , utiliza-se a Eq. (6), onde $V_{L,Rd}$ será composta conforme a Eq. (9):

$$V_{L,Rd} = \frac{(\gamma_f * PP_{laje})L + (\gamma_f * 2P_{sp})}{2} \quad (9)$$

Empregando-se os valores adotados para o estudo, tem-se:

$$\frac{(1,4 \times 0,003025 \times 1000) \times 2500 + (1,4 \times 2P_{sp})}{2} = \frac{1000 \times 110}{1,20} \left[\left(\frac{74,5849 \times 953,25}{1000 \times 450} \right) - 0,0117 \right]$$

$$P_{sp} = 5797,63 \text{ N} = 5,80 \text{ kN}$$

A utilização do método semiempírico “ m - k ” para a determinação da resistência de lajes mistas de aço e concreto se mostra eficiente e versátil, conforme a demonstração em exemplo, possibilitando, a partir de valores de ensaios, obter as resistências para as outras configurações de lajes mistas que utilizem um mesmo modelo de fôrma, apresentando excelente confiabilidade.

6 Conclusão

Nesse trabalho foram apresentados os procedimentos de ensaio utilizados, com suas respectivas referências e parâmetros adotados para execução, análise e tratamento de dados.

Conforme estabelecido inicialmente, os protótipos foram submetidos ao ensaio de flexão de quatro pontos até o colapso, onde apresentaram ruptura por cisalhamento longitudinal, caracterizado pelo deslizamento relativo de extremidade entre o concreto e a fôrma de aço incorporada.

Durante as análises dos comportamentos de carga *versus* flecha no meio do vão, carga *versus* deformação da fôrma de aço e carga *versus* deslizamento relativo de extremidade, foi observado que, nesse sistema misto, praticamente todos os modelos tiveram comportamento frágil. Esse comportamento pode ser relacionado à uma pouca eficiência das mossas com menor profundidade, por se tratar de ser o principal mecanismo de resistência em lajes mistas, após a perda da aderência química.

O estudo foi feito através do método semiempírico “ m - k ” para a determinação da resistência ao cisalhamento longitudinal, pelo qual foi utilizado a regressão linear, produzindo uma reta de ajuste aos dados obtidos, onde “ m ” é o coeficiente angular, e “ k ” é uma constante. Após essa etapa, conforme indicado pela ANSI/ASCE 3-91 [2], foi feita uma redução de 15% nos valores de m e k para obtenção das resistências ao cisalhamento longitudinal, dessa forma, podendo-se assegurar que os valores de

projeto estejam a favor da segurança, ainda com boa correlação aos seus valores característicos. Os coeficientes de ponderação ao cisalhamento longitudinal e de ponderações às ações utilizados foram, respectivamente, γ_{sl} igual a 1,20 e γ_f igual a 1,40.

Portanto, a resistência de projeto dessas lajes ao cisalhamento longitudinal pôde ser determinada utilizando os parâmetros m e k na Eq. (6). O comportamento e a resistência das lajes foram analisados conforme critérios e especificações internacionais tais como, EN 1994-1-1 [1], ANSI/ASCE 3-91 [2], ABNT NBR 8800 [3] e CSSBI S2 [13], mostrando um excelente resultado.

7 Agradecimentos

Os autores são gratos à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a FEP – Fundação Escola Politécnica da Bahia pelo apoio recebido para a realização deste trabalho de pesquisa.

8 Referências bibliográficas

- [1] European Committee for Standardization. *Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Part 1.1, General rules and rules for building, EN 1994-1-1. UK, 2004.
- [2] American Society of Civil Engineers. *Standard for the Structural Design of Composite Slabs*. ANSI/ASCE 3-91. USA, 1992
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. NBR 8800. Rio de Janeiro, 2008.
- [4] C. B. F. Melo. *Análise do Comportamento e da Resistência do Sistema de Lajes Mistas*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, BR, 1999.
- [5] L. C. Gomes. *Estudo do Sistema de Lajes Mistas com Fôrma de Aço Incorporado empregando Concreto Estrutural Leve*. 165 p. Dissertação do Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- [6] L. G. F. Grossi. *Sobre o comportamento estrutural e o dimensionamento de lajes mistas de aço e concreto com armadura adicional*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016
- [7] A. C.C. Lavall, R. S. Costa e F. C. Rodrigues. *Analysis of the behavior and strength of a composite slab system by m-k method*. XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural de 27 de setembro a 01 de outubro de 2010, San Juan, Argentina, 2010.
- [8] R. M. Schuster. *Strength and behaviour of the P-2430 - 12HB, composite slab system (normal weight concrete)*. Department of civil engineering, university of Waterloo. Report no. WRI 110-12-02. Canada, 1984.
- [9] H. Cifuentes and F. Medina. *Experimental study on shear bond behavior of composite slabs according to Eurocode 4*. Journal of Constructional Steel Research; 82: 99-110, 2013.
- [10] R. S. Costa, A. C. C. Lavall, R. G. L. Silva, F. C. Rodrigues. *Experimental study of the influence of friction at the supports on longitudinal shear resistance of composite slabs*. Ibracon Structures and Materials Journal; p 1075-1086. 2017
- [11] R. S. Costa. *Análise de um Sistema de Lajes Mistas considerando a Influência do Atrito dos Apoios e a Avaliação do Momento de Inércia Efetivo*. 193p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, BR. 2009.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado*. NBR 6118. Rio de Janeiro. 2014.
- [13] Canadian Sheet Steel Building Institute. *Criteria for the Testing of Composite Slabs*. CSSBI S2. Ontario. Canada. Willodale, revised. 2008