

Experimental analysis of longitudinal shear of composite slabs

Análise experimental do cisalhamento longitudinal de lajes mistas

G. F. J. BRITTO ^a

guilhermino.f@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0705-1997>

V. S. SILVA ^a

vanessass@ufba.br

<https://orcid.org/0000-0003-2478-2353>

J. P. GONÇALVES ^a

jardelpg@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3484-3869>

Abstract

The composite concrete slab systems with steel-deck incorporated has become an alternative to conventional slab models, since it often does not require the use of shoring, promoting several constructive practices, beyond operation of the reinforcement as a positive moment. The procedure of verification of composite slabs is based on the semi-empirical method m and k . The purpose of this paper was to investigate the application of the "m-k method" in a group of slabs with alternative dimensions as the usually adopted in the tests, even as to correlate the values obtained with the results found when testing the models as proposed by the ANSI 2011 test standard, since the normative method is costly and expensive. Therefore, four-point flexural tests were performed on slab models considering only one deck module, varying two spans, the same procedure was repeated in slabs with usual construction dimensions (normative models). The linear regression method was applied to the data found in order to obtain the parameters that would be analyzed. The main results show that the alternative model with the adopted dimensions does not present values that can be applied directly to the normative models, since the increase of the shear span reduces in a significant way the theoretical resistance of the slabs. Nevertheless, the values for the m and k obtained of both alternative and normative models can be adopted confidently as part of the sizing process of the respective models. The deviations between theoretical and experimental resistance satisfy the specifications of the ANSI 2011 standard for both models helped in the confirmation of the previous statement. The expectation of this paper is to assist in the search for new procedures for determining parameters m and k .

Keywords: alternative and normative models, m - k method, longitudinal shear, composite slabs.

Resumo

O sistema de lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporada tem se tornado uma alternativa aos modelos de lajes convencionais, pois muitas vezes dispensa o uso de escoramentos, promovendo diversas praticidades construtivas, além do funcionamento da fôrma como armadura de momento positivo. O procedimento de verificação das lajes mistas está fundamentado no método semi-empírico m - k . Este documento buscou investigar a aplicação do "método m - k " em um grupo de lajes com dimensões alternativas às usualmente adotadas nos ensaios, assim como correlacionar os valores obtidos com os resultados encontrados ao ensaiar os modelos conforme proposto pela norma de ensaio ANSI 2011, já que o método normativo é custoso e oneroso. Para tanto, foram realizados ensaios à flexão de quatro pontos em modelos de lajes considerando apenas um módulo de "deck", variando dois vãos; o mesmo procedimento foi repetido nas lajes com dimensões usuais de construção (modelos normativos). Aplicou-se o método de regressão linear nos dados encontrados a fim de obter os parâmetros que seriam analisados. Os principais resultados encontrados demonstram que o modelo alternativo não apresenta valores que possam ser aplicados aos modelos normativos, uma vez que o aumento do vão de cisalhamento reduz de forma significativa a resistência teórica das lajes. Porém os valores obtidos para m e k , tanto dos modelos alternativos, quanto normativos, podem ser adotados confiadamente como parte do processo de dimensionamento dos respectivos modelos. Os desvios entre a resistência teórica e experimental satisfazem as especificações da norma ANSI 2011 para ambos os modelos auxiliando a confirmação da afirmação anterior. Espera-se com esse trabalho auxiliar a pesquisa de novos procedimentos para determinação dos parâmetros m e k .

Palavras-chave: modelos alternativos e normativos, método m - k , cisalhamento longitudinal, sistema misto.

^a Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola Politécnica, Salvador, BA, Brasil.

1. Introdução

As lajes mistas são constituídas por um perfil de chapa dobrada formado a frio associado ao concreto. O comportamento misto da laje se configura quando a fôrma e o concreto, no estado endurecido, se agregam formando um único elemento estrutural. A interação entre fôrma de chapa corrugada e capa de concreto deve ser capaz de transmitir as forças na interface, sendo responsável pela efetividade do sistema misto. A geometria da seção transversal da fôrma de aço e a disposição das mossas superficiais influenciam diretamente o comportamento estrutural das lajes mistas, pois as mossas presentes na superfície da forma são fundamentais para que haja ligação mecânica entre a capa de concreto e a fôrma metálica, Baião Filho [1]. As forças desenvolvidas na interface são as principais responsáveis pela quebra dessa ligação mecânica entre fôrma metálica e capa de concreto. Atualmente, dois métodos são usualmente adotados para verificar a resistência ao cisalhamento de interface desse sistema, sendo eles o método da interação parcial e o método semi-empírico *m-k*, sendo este o mais utilizado e objeto principal de estudo deste trabalho.

O uso do sistema de lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporado requer uma boa compreensão do comportamento dos materiais que o compõem, bem como das propriedades mecânicas que o norteia. Esse sistema, considerando os perfis e vãos usuais, possui um modo de colapso predominante, o cisalhamento longitudinal, sendo necessária a utilização dos métodos mencionados acima para se calcular sua capacidade resistente. O “método *m-k*” consiste na obtenção de dois parâmetros de dimensionamento, coeficiente angular (*m*) e linear (*k*) de uma reta construída a partir de uma equação semi-empírica que relaciona a resistência nominal à força cortante com os parâmetros obtidos em ensaio. Uma variação da aplicação do método *m-k*, exercido comumente, foi proposta e desenvolvida neste trabalho: a investi-

gação e validação da aplicabilidade do método em modelos com apenas um módulo do “deck”, observando a representatividade dos valores encontrados quando comparados com os valores de ensaios cujos modelos estão em conformidade com a proposição da norma ANSI [2]. Por se tratar de uma nova aplicação do método *m e k*, tornou-se necessário correlacionar e comparar os resultados e comportamentos apresentados com os que ocorrem na aplicação do método a modelos propostos por norma, com a finalidade de verificar a validade da aplicação dos resultados ante modelos de diferentes características geométricas. Diversos pesquisadores têm avaliado a influência do cisalhamento longitudinal no sistema misto, tomando como base modelos em escala normativa submetidos ao ensaio de flexão de quatro pontos. Esse ensaio consiste em submeter uma amostra à ação de duas cargas concentradas, de mesma intensidade, equidistantes dos apoios, onde a região da amostra entre a carga e o apoio está sujeita a esforços de flexão e cisalhamento enquanto a região entre as cargas está sujeita à flexão pura (figura 1). Com relação às pesquisas realizadas, Abdullah & Easterling [3] propuseram um novo método para modelar a ligação de cisalhamento horizontal em lajes mistas; Campos [4] avaliou o efeito da continuidade em lajes mistas; Costa[5] analisou a influência do atrito nos apoios no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal. Há também os estudos em modelos de menor escala, como o trabalho de Daniels & Crisinel [6], que desenvolveram um método numérico de análise que requer somente testes de cisalhamento tipo “push-off and pull-out”. Apesar de a literatura existente propor que lajes mistas de vãos curtos e grande altura possam transferir os carregamentos diretamente aos apoios, conforme o modelo de bielas e tirantes, e que a extrapolação de resultados pode levar a valores contra a segurança, Jonhson & Andeson [7], não foi possível, aos autores encontrar análises e resultados experimentais que comprovassem essas afirmações. Considerando as pesquisas já realizadas e o acima descrito, pretende-se neste trabalho, como proposta inédita de estudo, analisar o cisalhamento longitudinal em lajes mistas com dimensões alternativas às habitualmente utilizadas, submetendo-as ao ensaio de flexão de quatro pontos, obtendo, assim, valores para os parâmetros *m e k*, verificando sua viabilidade de aplicação. Buscar-se-á também, extrapolar os seus resultados para modelos de maiores dimensões, com o objetivo de comprovar se há ou não viabilidade dessa extrapolação.

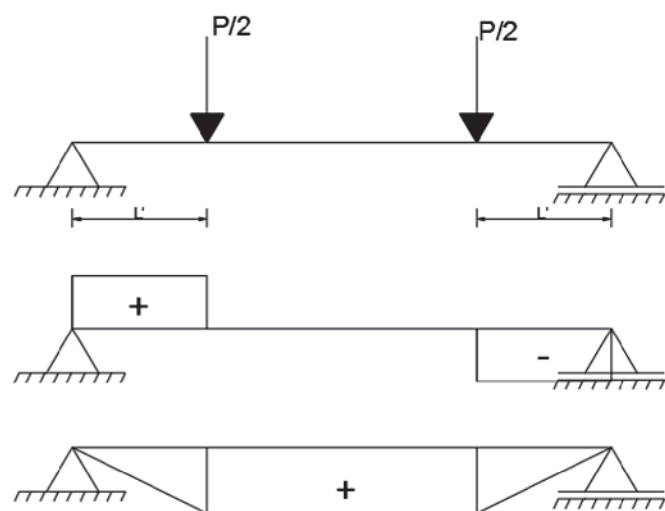


Figura 1
Modelo de ensaio à flexão de quatro pontos com diagramas de cortante e momento

Fonte: O Autor

1.1 Resistência ao Cisalhamento longitudinal de lajes “steel deck”

Diversos estudos vêm mostrando, a partir de procedimentos semi-empíricos, que o sistema de lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporada, considerando os perfis e vãos usuais, possui um modo de colapso predominante, o cisalhamento longitudinal. Sua ocorrência está condicionada a uma série de fatores envolvendo as características geométricas como: o relevo das fôrmas e a presença de mossas superficiais e reentrâncias que auxiliam na melhoria da ligação mecânica. A resistência ao escoamento do aço influencia muito pouco na ocorrência ou não desse modo de colapso. Segundo Araújo[8], a resistência ao cisalhamento longitudinal permite uma plastificação total da seção de momento

máximo somente se ocorrer interação completa entre o concreto e a fôrma de aço, ocorrendo então o colapso por flexão. Por outro lado, se a ligação ao cisalhamento não for suficiente para promover interação completa, o colapso da laje dar-se-á por cisalhamento longitudinal. Seleim & Schuster [9] mostraram que o processo de desenvolvimento do colapso por cisalhamento longitudinal ocorre de maneira gradativa. Inicialmente, a partir de quando os dispositivos de transferência de cisalhamento não forem mais capazes de transferir todo o esforço longitudinal, dar-se-á início a fissuração no ponto crítico, fator responsável pelo aumento da diferença de tensão entre concreto e fôrma, provocando a propagação das fissuras. A laje de concreto e a fôrma de aço começam então a se separar diminuindo a eficiência das mossas e, conseqüentemente, dá-se início ao deslizamento relativo significativo de extremidade entre concreto e fôrma. A partir daí, aumentam-se a abertura das fissuras e o deslizamento de extremidade até a falha completa dos dispositivos de transferência quando então o sistema não será mais capaz de suportar acréscimo de carga.

Um sistema misto pode possuir interação de cisalhamento total ou parcial. A interação de cisalhamento total é definida, segundo o EUROCODE 4 [10], quando o aumento na resistência ao cisalhamento longitudinal não mais corresponder a aumento da resistência ao momento fletor. Caso contrário, a interação de cisalhamento será parcial. Exceto em situações onde o vão de cisalhamento for excepcionalmente grande, o colapso do sistema de lajes mistas de aço e concreto ocorrerá por cisalhamento longitudinal. A solução usualmente adotada para verificar a capacidade resistente do sistema misto consiste na realização de um programa de ensaios em laboratório em protótipos com vãos simples submetidos à flexão a partir do método semi-empírico m - k , como o proposto pela norma ANSI [2], por meio da equação (1) no processo de regressão linear dos resultados dos ensaios.

$$V_{ut} = b \cdot d_f \left(m \frac{1}{L'} + k \right) \quad (1)$$

Sendo,

V_{ut} o cisalhamento transversal último total obtido nos ensaios, em Newton, relativo a 1000 mm de largura da laje;

b a largura da laje em mm;

d_f a altura efetiva da laje em mm;

L' o vão de cisalhamento em mm;

m e k os parâmetros obtidos no processo de regressão linear, em N/mm e N/mm², respectivamente.

Schuster [11], ao estabelecer a equação original que deu origem a formulação (1), verificou a validade da equação sugerida, variando características geométricas das fôrmas. Na primeira série de ensaios ele fixou a espessura, variando o tipo de fôrma, mossas e geometrias. Foi observado que nem a taxa de armação nem a resistência à compressão do concreto tem influência significativa sobre a resistência ao cisalhamento longitudinal dos modelos aplicados. A equação (1), recomendada pela norma ANSI [2], possui duas variáveis desconhecidas, m e k . Reescrevendo-a como a equação de uma reta linha, podem-se, a partir da regressão linear dos dados dos ensaios, obter as duas variáveis desconhecidas:

$$Y = mX + k \quad (2)$$

$$Y = \frac{V_{ut}}{bdf} \quad (3)$$

$$X = \frac{1}{L'} \quad (4)$$

É importante esclarecer que o método de tratamento dos dados, proposto pela norma ANSI [2], difere em alguns aspectos da proposição feita pela ABNT NBR 8800 [12], que adota a equação do EUROCODE 4 [10]. As equações adotadas no processo de regressão linear para a obtenção de m e k adotam parâmetros geométricos diferentes entre as duas normas. As unidades de medida de m e k , apresentadas pela ABNT NBR 8800 [12], são dadas em unidade de tensão, conforme apresentado na equação (5), enquanto na ANSI [2] são dadas em unidades conforme apresentadas anteriormente.

$$V_{L,R} = bd_f \left[\left(\frac{mA_{F,ef}}{bL_s} \right) \right] + k \quad (5)$$

Utilizando a mesma equação (2), as variáveis X e Y são dadas pelas equações (6) e (7), respectivamente:

$$Y = \frac{V_{L,R}}{bdf} \quad (6)$$

$$X = \frac{AF_{ef}}{bL_s} \quad (7)$$

Onde,

$V_{L,R}$ A força cortante longitudinal resistente das lajes com forma de aço incorporada, em Newton, relativa a 1000 mm de largura;

b a largura da laje em mm;

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

L_s o vão de cisalhamento em mm;

m e k os parâmetros obtidos no processo de regressão linear;

$A_{F,ef}$ a área da seção efetiva da forma.

É fácil observar, pela equação (7), que as variações geométricas presentes nas formas, decorrentes do processo de conformação, influenciam diretamente na obtenção dos parâmetros m e k , pois a área da seção transversal é inversamente proporcional ao coeficiente angular da reta, ou seja, quanto maior for a área, menor será seu coeficiente angular m , diferentemente do que ocorre na equação (4), onde a área da seção transversal da fôrma não é considerada na equação de regressão linear.

Além das equações que definem a resistência do sistema de lajes mistas, é importante frisar seus possíveis modos de colapso. Segundo Brendolan [13], o colapso do sistema da laje mista à flexão

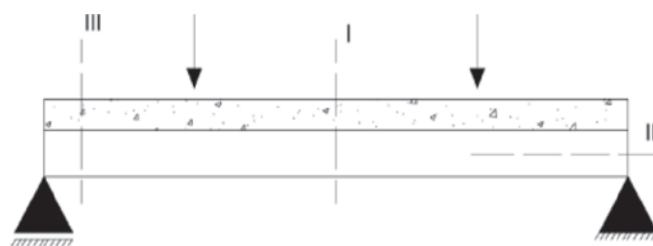


Figura 2
Modos de colapso do sistema misto

Fonte: SIEG, 2015, p. 30

Tabela 1
Características geométricas das amostras ensaiadas

Amostras	Características geométricas			
	CP01	CP02	CP03	CP04
b (mm)	19,82	21,01	20,87	19,33
Lo (mm)	50,00	50,00	50,00	50
Lc (mm)	140,00	140,00	140	140
t (mm)	0,914	0,924	0,934	0,914
Lt (mm)	251,35	251,96	250,98	250,87
So (mm ²)	18,12	19,41	19,49	17,67

Fonte: O Autor

é similar em natureza ao das vigas de concreto armado convencionais, diferindo somente na fôrma de aço que fornece a armadura positiva. O colapso por flexão pode ser considerado crítico apenas quando houver interação total ao cisalhamento na interface entre a fôrma metálica e capa de concreto, que ocorre quando se tem vãos longos e pequena espessura das lajes, com alta eficiência das mossas das fôrmas, de forma que a força de cisalhamento na interface não seja superior à resistência das ligações. Caso contrário, não haverá interação completa e o colapso da laje é definido como sendo por cisalhamento longitudinal.

O colapso por cisalhamento vertical ocorre apenas em casos especiais, de lajes de grandes espessuras, com vãos muito curtos ou pela aplicação de cargas concentradas elevadas próximas aos apoios. Já o colapso por punção ocorre nos casos onde são transmitidas cargas elevadas concentradas em áreas pequenas, como no caso de pilares que nascem sobre a laje.

O colapso por cisalhamento longitudinal, dentre os demais apresentados, se destaca por ser o que ocorre com maior frequência, sendo caracterizado pela formação de uma fissura por tensão diagonal embaixo ou próximo de um dos pontos de carga seguido de deslizamento relativo de extremidade, culminando na perda de capacidade de carga do sistema. Johnson [14] apresenta os três modos de colapso conforme pode ser observado na Figura 2: seção I (flexão), seção II (cisalhamento longitudinal) e seção III (cisalhamento vertical).

Outra característica fundamental a ser observada para as lajes mistas é a influência do atrito na região dos apoios. Estudos revelam que em modelos com vãos de cisalhamento relativamente curtos, a influência do atrito nos apoios é relevante no cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal, pois menores vãos promovem reação maior nos apoios. A intensidade da força vertical produzida aumenta o contato mecânico entre forma metálica e capa de concreto, dificultando o escorregamento entre eles. Isso provoca um aumento na força necessária para o deslizamento

relativo e perda total ou parcial da interação mecânica. Esse efeito é reduzido quando se trata de vãos maiores, exatamente pelo fato da força de contato, entre capa de concreto e forma, ser reduzida, facilitando a ocorrência de deslizamento relativo que ocorre para menores valores de força. No método *m-k* não se considera esse efeito diretamente, estando implícito nos resultados experimentais.

2. Análise experimental dos sistemas Normativo e Alternativo

O uso do sistema de lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporado requer uma boa compreensão do comportamento dos materiais que o compõem, bem como das propriedades mecânicas que o caracteriza. Esse sistema possui um modo de colapso predominante, o cisalhamento longitudinal, requerendo este para seu dimensionamento a utilização de um método bastante difundido, o método semi-empírico *m-k*, por meio do qual torna-se possível estabelecer a capacidade resistente da laje mista.

O ensaio proposto pela norma ANSI [2], adotada como referência neste trabalho, estabelece os meios que devem ser seguidos para avaliar a relação comportamental e quantitativa entre lajes com diferentes espessuras de fôrma e vão. Segundo ela, quando um número de diferentes espessuras de fôrma é produzido para o projeto e apenas a menor espessura é utilizada no programa de testes, deve ser realizado um mínimo de quatro testes: dois para um maior vão de cisalhamento e dois para um menor, sendo este o procedimento aqui adotado para realização dos experimentos. A espessura de “deck” efetuada no programa de testes deste trabalho foi de 0,8 mm, as demais características geométricas foram definidas a partir das necessidades de projeto e ensaios.

2.1 Caracterização da chapa de aço

A caracterização da chapa do *deck* consistiu no ensaio de quatro amostras seguindo os padrões especificados pela ABNT NBR 6892 [15]. A norma propõe que as dimensões do corpo-de-prova podem ser definidas ao considerar o produto metálico de origem, como também sua seção transversal que pode ser quadrada, retangular, circular, dentre outras formas. Podendo, portanto, ser subdividido em dois grupos: os proporcionais e não proporcionais. Para este trabalho, optou-se pelo uso do corpo-de-prova não proporcional, onde o comprimento de medida original (L_0) independe da área da seção transversal original (S_0). A partir das referências normativas, mediram-se as dimensões dos corpos de prova, retirou-se a espessura da camada de zinco, e apresentaram-se os resultados encontrados na Tabela 01.

Tabela 2
Propriedades mecânicas do “deck”

Amostras	Resultados do ensaio de tração da chapa de aço				Média
	CP01	CP02	CP03	CP04	
Carga de ruptura (kN)	4,94	5,10	5,48	4,16	4,92
Tensão de ruptura f_u (MPa)	272,62	262,75	281,17	235,42	262,99
Tensão de escoamento f_y (MPa)			180		
Módulo de elasticidade (MPa)			200000		

Fonte: O Autor

Tabela 3

Resistência à Compressão Axial (MPa) e Módulo de Elasticidade (Mpa) do concreto

Amostras	Steel deck tensile test results			Média
	CP01	CP02	CP03	
Resistência à compressão axial (MPa)	36,12	38,63	45,64	40,13
Módulo de elasticidade (GPa)	—	—	—	21,88

Fonte: O Autor

Como consequência do ensaio realizado, foi possível determinar a resistência à ruptura, f_u (MPa), do aço utilizado para fabricação das chapas (Tabela 2). Durante o procedimento levou-se em consideração a espessura real do aço, desprezando a espessura de galvanização no valor de 0,04 mm. Devido a variações nas dimensões dos corpos de prova e nas cargas de ruptura, foi acertado o valor da tensão média. Não foi possível obter a resistência ao escoamento do aço da fôrma. Dessa forma, as plastificações localizadas na fôrma que venham a aparecer nos ensaios somente poderão ser avaliadas qualitativamente.

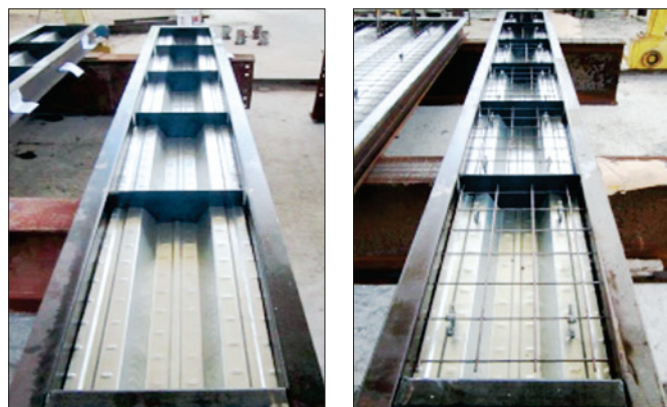
2.2 Caracterização do concreto

O concreto utilizado para moldar as lajes foi produzido por uma central dosadora de concreto, com resistência característica, f_{ck} , estimada em 30 MPa, após 28 dias. Antes de iniciar a concretagem foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100 por 200 mm; 3 amostras para ensaio de compressão axial conforme especificações da ABNT NBR 5739 [16] e 4 amostras para determinação do módulo de elasticidade adotando-se a prática de ensaio especificada pela norma ABNT NBR 8522 [17], cujos resultados estão apresentados na tabela 3.

3. Método

3.1 Modelos alternativos compostos por apenas um módulo de “deck”

O sistema de lajes mistas de concreto com fôrma de aço incorporada, utilizando apenas um módulo de forma, proposto como comparativo ao modelo em escala normativa, teve seu comprimento e largura definidos previamente, para montagem do

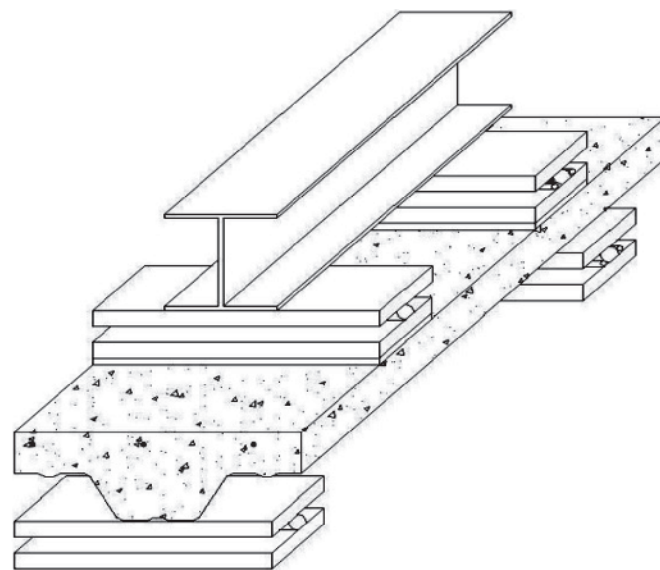
**Figura 3**

Fôrmas montadas para a concretagem; molde e forma para incorporação

Fonte: O Autor

“setup” de ensaio na prensa utilizada. Algumas limitações para desenvolvimento do ensaio, como dimensões máximas da prensa, foram responsáveis pela escolha das dimensões dos modelos alternativos, principalmente seu comprimento. Fixou-se a altura, tomando como base a que foi determinada para o modelo normativo, de maneira que permitisse analisar as compatibilidades e incompatibilidades dimensionais que viessem a influenciar no comparativo entre os resultados obtidos tanto no modelo alternativo quanto no normativo. O sistema misto alternativo foi então definido por um módulo de fôrma trapezoidal com espessura nominal de 0,8 mm e altura de 75 mm, largura de 350 mm e comprimento de 700 mm.

O modelo é composto, além da fôrma, por capa de concreto de densidade normal com espessura de 65 mm, f_{ck} especificado de 30 MPa, e por tela soldada de aço para restringir a propagação de fissuras e retração durante o processo de cura, a qual possui 3,8 mm de diâmetro e 15 cm de espaçamento entre fios. A tela foi posicionada na região acima da linha neutra elástica da seção transversal, garantindo, principalmente nos modelos alternativos, que as tensões de tração impostas à amostra durante o ensaio de flexão, fossem resistidas apenas pela forma metálica sem participação da tela metálica. A nomenclatura adotada para os modelos foi: RM75-NI. Sendo RM, a sigla do fabricante da fôrma, 75 a altura da fôrma e NI indica que a posição da mesa central do módulo da fôrma está abaixo de seu centro de gravidade. Para a execução dos modelos, normativos e alternativos, adotaram-se barras de perfis metálicos, do tipo U enrijecido, com largura, espessura e comprimentos específicos, para delimitar as dimensões das

**Figura 4**

Esquema de carregamento modelo alternativo

Fonte: O Autor

lajes (figura 3), que foram removidos antes dos ensaios. Todos os modelos, normativos e alternativos, foram apoiados apenas nas

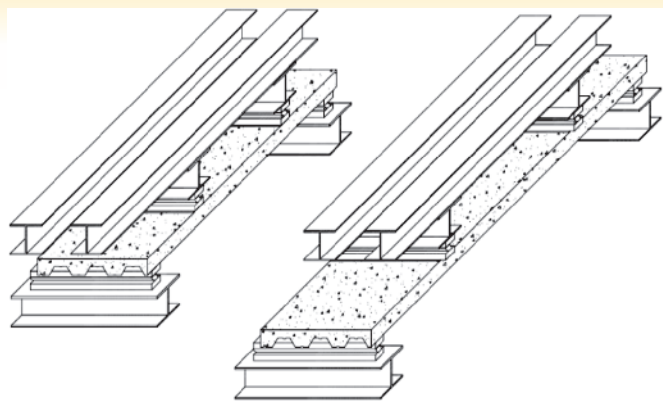


Figura 5
Esquema de carregamento do modelo normativo
Fonte: O Autor

extremidades durante sua execução, permitindo que se deformassem ao longo do vão durante a concretagem.

A instrumentação dos modelos foi composta basicamente de transdutores para medição de deslocamento linear (LVDT'S), com o objetivo de medir a flecha no meio do vão e o deslizamento relativo de extremidade, além da utilização de extensômetros de resistência elétrica (strain gauge) para medir o estado de deformação na fôrma e na capa de concreto.

O desenvolvimento do ensaio se deu primeiro no grupo de amostras com vão de 600 mm seguido das amostras de 500 mm. O ensaio foi realizado em etapas sequenciais de carregamento. Primeiramente, aplicou-se 5% da carga última esperada (W_i) sendo esta mantida durante um tempo de 5 minutos. Em seguida, o carregamento foi retirado e todos os instrumentos de medição zerados. O mesmo procedimento foi feito para um carregamento de 60% da carga de última esperada (W_i). Após cinco minutos, a carga foi retirada, todos os instrumentos zerados e a amostra “descansou” por 2 minutos. Iniciou-se então a etapa final de carregamento, levando a amostra até o colapso. Isso foi feito para todas as amostras de cada grupo. A figura 4 apresenta o esquema de carregamento adotado no ensaio dos modelos alternativos.

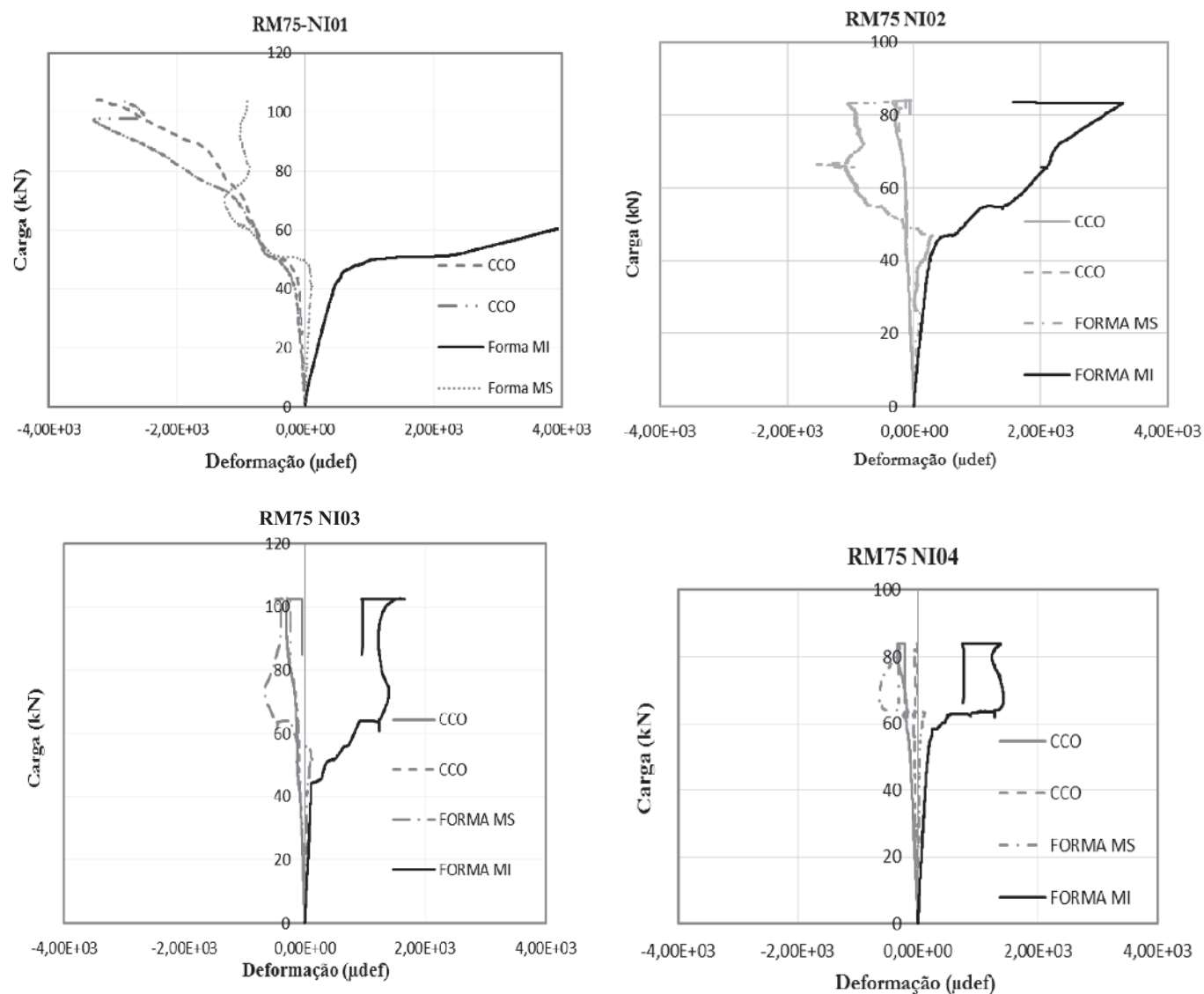


Figura 6
Carga x Deformação da amostra RM75-NI 01 a 04
Fonte: O Autor

3.2 Modelos de lajes normativas

Antes de apresentar as dimensões adotadas para os modelos normativos, é importante esclarecer que o vão de cisalhamento L' adotado para as lajes mistas com forma de aço incorporada deve ser equivalente a $\frac{1}{4}$ do vão teórico da laje; essa especificação se justifica pelo fato do ensaio ser feito aplicando-se duas cargas concentradas equidistantes dos apoios. Porém, ao realizar o projeto do sistema misto, considera-se o carregamento uniformemente distribuído em todo o vão da laje. A equivalência entre as duas condições se dá ao se igualar a área sob o diagrama do esforço cortante para situação de carga uniformemente distribuída com a área sob o diagrama de esforço cortante para situação de cargas concentradas simetricamente dispostas, produzindo o mesmo valor máximo de esforço cortante. Para o sistema misto normativo ensaiado neste trabalho, definiram-se os vãos que convencionalmente são adotados nos proces-

so construtivos com o “deck” RM 75. Dois valores para o vão de eixo a eixo de apoio foram então adotados, sendo estes valores 2 m e 3 m. As nomenclaturas adotadas para as amostras com essas dimensões foram definidas como RM75-02 e RM75-03 respectivamente. Outras características geométricas, como a espessura da fôrma (t) e a largura (b) do modelo, foram fixadas pela escolha da fôrma como já citado no “modelo alternativo”. Já a altura total (h_t) da laje foi definida a partir do comportamento apresentado pela fôrma para a fase do concreto no estado fresco; nessas condições foi possível estabelecer as medidas dos dois modelos normativos necessários para determinação dos parâmetros m e k . Dessa maneira, o sistema misto normativo adotado é formado por uma fôrma de seção trapezoidal com espessura nominal de 0,8 mm e altura de 75 mm, largura de 911mm, sendo essas características definidas pelo fabricante durante a conformação do “deck”. A capa de concreto de densidade normal possui espessura de 65 mm e

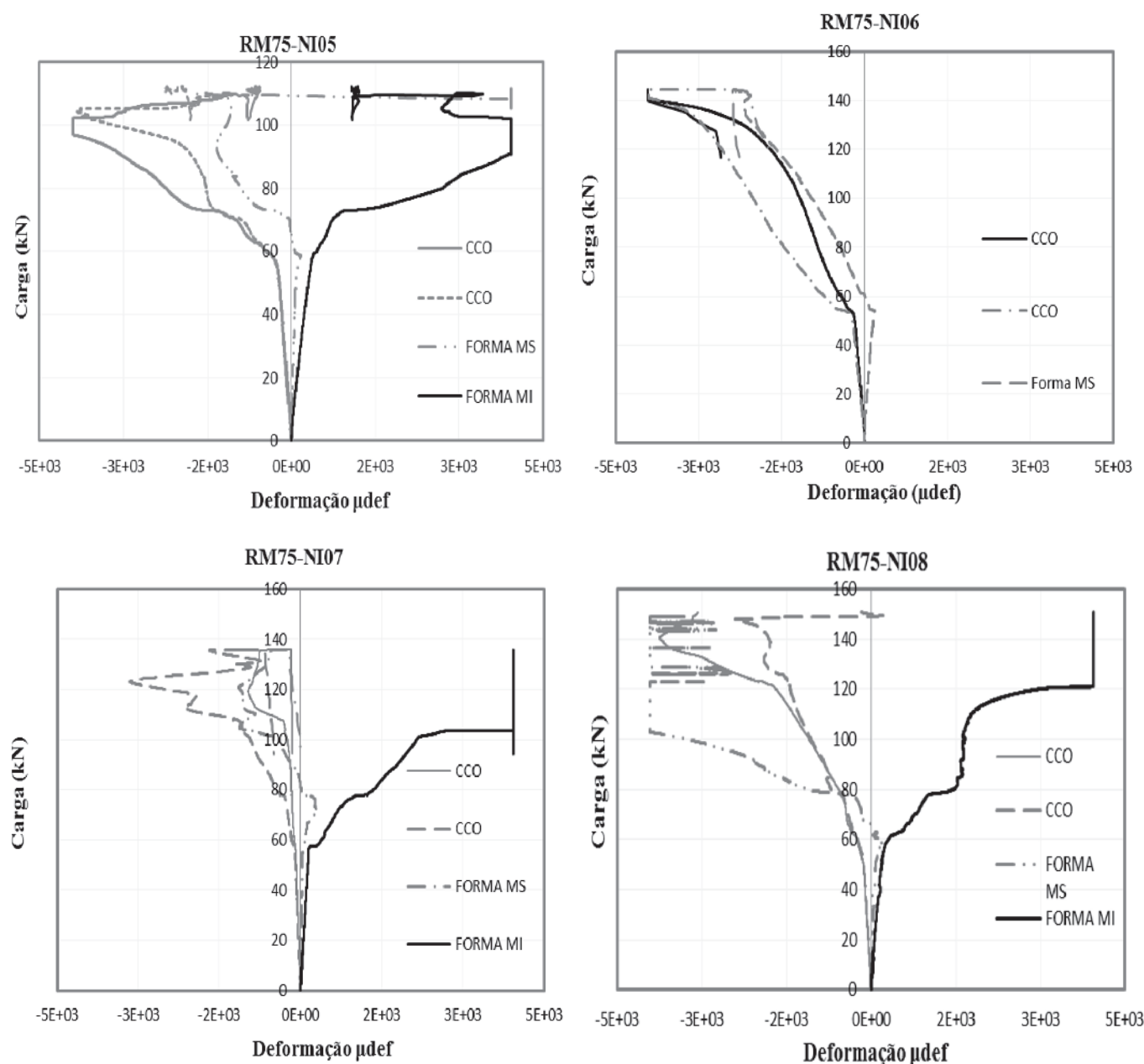


Figura 7
Carga x Deformação da amostra RM75-NI 05 a 08

Fonte: O Autor

f_{ck} especificado de 30 MPa. A tela utilizada possui diâmetro de 3,8 mm, sendo posicionadas 20 mm abaixo da face superior da laje, garantindo seu cobrimento mínimo, além de ficar acima da linha neutra elástica, de forma que não participe na resistência às tensões de tração oriundas da flexão durante a execução do ensaio. As lajes dos modelos normativos tiveram extensômetros posicionados na superfície de concreto e nas nervuras da fôrma conforme feito com os modelos alternativos. Na superfície de concreto foram dois extensômetros posicionados no centro do vão, simetricamente dispostos em relação à borda lateral das lajes. Os outros dois, da mesma maneira foram posicionados no centro da laje, um na nervura superior e outro na nervura inferior do “deck”. As medições da flecha e do deslizamento relativo foram feitas com a utilização de relógios comparadores; dois posicionados no meio do vão, em lados opostos da borda lateral da laje, e outro posicionado na face frontal, preso a uma base magnética, a qual foi fixada na fôrma, e o cursor do relógio pressionado contra a capa de concreto. Dessa maneira foi possível acompanhar se houve ou não deslizamento relativo e o valor da carga atuante

neste instante, além de medir qual seu valor máximo até o colapso. A avaliação das lajes normativas foi realizada atendendo boa parte do procedimento proposto pela norma ANSI [2], porém o processo de carregamento se deu de forma similar ao que é realizado numa prova de carga estática, onde os esforços estáticos foram aplicados de forma crescente registrando os deslocamentos correspondentes a cada valor de carga aplicada (Figura 5).

4. Resultados

4.1 Modelos alternativos compostos por um módulo de “deck”

Os gráficos obtidos nos ensaios das figuras 03 e 4 apresentam as deformações medidas nas amostras RM75-NI. Os resultados demonstram que os maiores valores de tensões, como esperado, ocorreram nas extremidades da seção transversal dos modelos. As tensões na mesa inferior da fôrma foram maiores do que as observadas em sua mesa superior. As duas mesas apresentaram tensões de tração

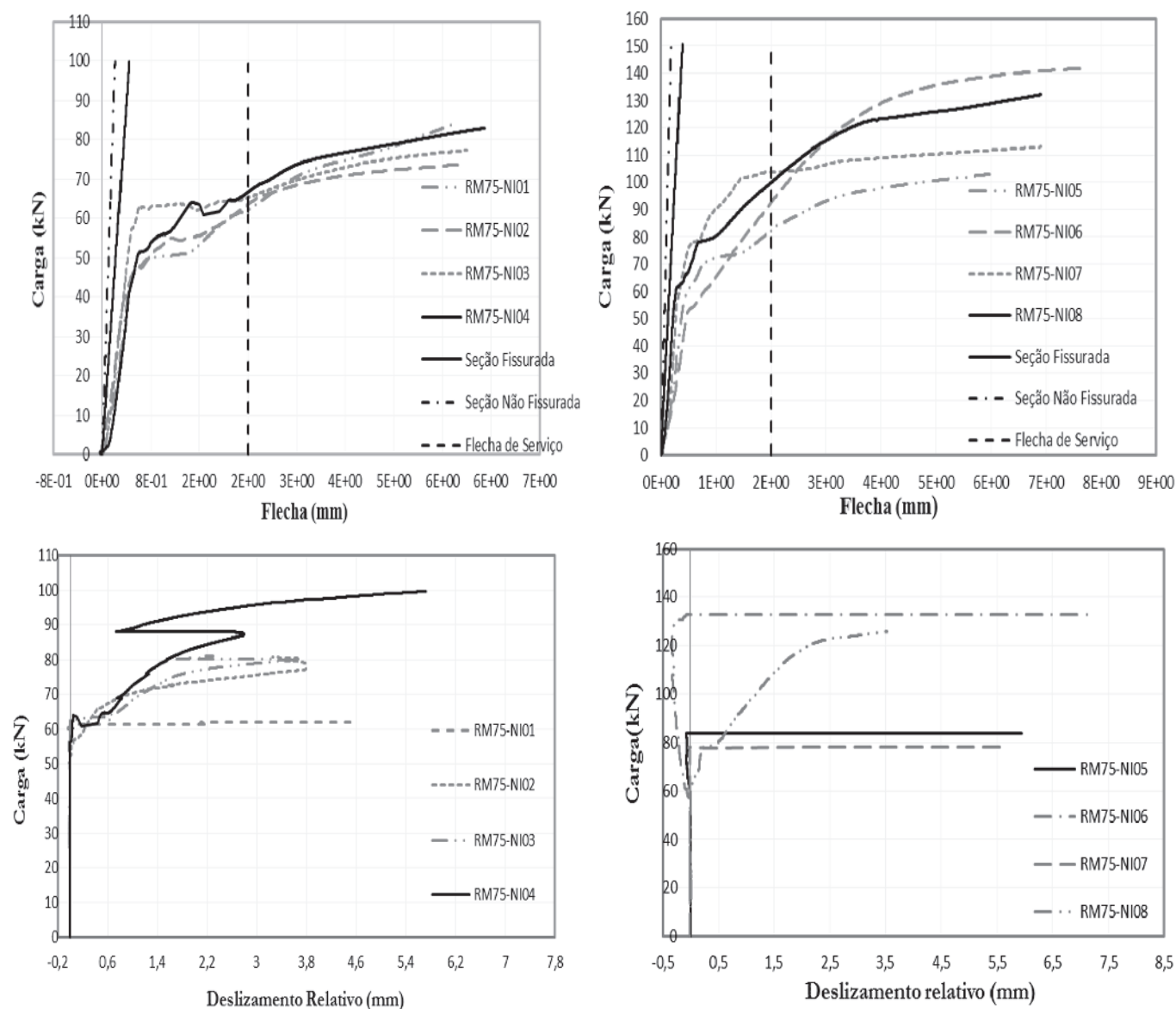


Figure 8
Carga x Flecha no meio do vão e carga deslizamento relativo das amostras RM75-NI

Fonte: O Autor

Tabela 4Determinação do cisalhamento transversal último total dos ensaios V_{ut}

Modelos	b (mm)	ht (mm)	df (mm)	L (mm)	L' (mm)	P (kN)	Pue (kN)	P.Plaje (kN/m ²)	Vut (kN)
RM75-NI01	352	143	126,618	600	150	104,84	105,26	2,563	52,899
RM75-NI02	353	145	128,618	600	150	83,93	84,35	2,563	42,445
RM75-NI03	355	148	131,618	600	150	83,79	84,21	2,563	42,376
RM75-NI04	355	147	130,618	600	150	102,66	103,08	2,563	51,811
RM75-NI05	356	145	128,618	500	125	112,27	112,69	2,563	56,572
RM75-NI06	350	145	128,618	500	125	144,55	144,97	2,563	72,708
RM75-NI07	353	146	129,618	500	125	135,88	136,30	2,563	68,375
RM75-NI08	355	148	131,618	500	125	150,80	151,22	2,563	75,836

Fonte: O Autor

Tabela 5

Regressão linear dos dados

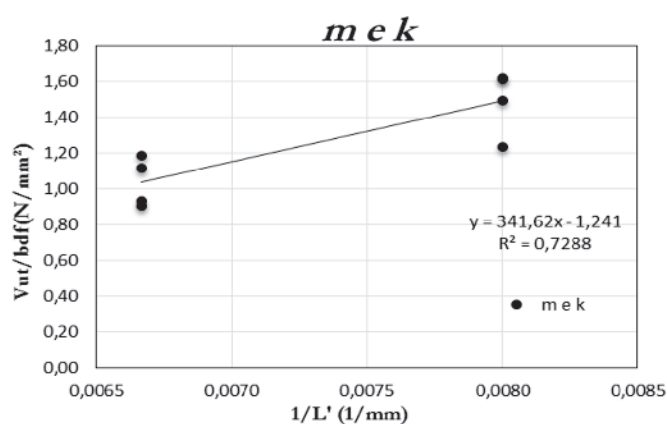
Modelos	X (1/mm)	Y (N/mm ²)	Resultado da regressão	Vus (kN)	Vus/Vut	Desvio (%)
RM75-NI01	0,0067	1,1869	m = 341,62	46,195	0,873	-12,67
RM75-NI02	0,0067	0,9349		47,058	1,109	10,87
RM75-NI03	0,0067	0,9069		48,428	1,143	14,28
RM75-NI04	0,0067	1,1174		48,060	0,928	-7,24
RM75-NI05	0,0080	1,2355	k = -1,241	68,314	1,208	20,76
RM75-NI06	0,0080	1,6151		67,163	0,924	-7,63
RM75-NI07	0,0080	1,4944		68,265	0,998	-0,16
RM75-NI08	0,0080	1,6230		69,711	0,919	-8,08

Fonte: O Autor

durante basicamente todo o ensaio, até a plastificação parcial da seção mista, quando a mesa superior passa a sofrer esforço compressivo. Os ensaios confirmaram o resultado esperado de que as deformações medidas pelos extensômetros posicionados na superfície da capa de concreto foram de compressão, conforme visto nas figuras 6 e 7. Nessas figuras os símbolos CCO, Forma MI e Forma MS significam: capa de concreto, mesa inferior da forma e mesa superior da forma respectivamente. A seção mista possui comportamento elástico até um carregamento da ordem de 40 kN passando a partir de então a demonstrar comportamento inelástico. As amostras RM75-NI 01 e 02 apresentaram maiores valores de deformação até a ruptura se comparadas com as amostras RM75-NI 03 e 04.

A diferença na rigidez entre o aço e o concreto na zona de interface de cada modelo aparenta não influenciar seu comportamento, enquanto ainda estão na fase elástica. É possível perceber que a ligação na interface se rompe após plastificações localizadas da seção, que podem ser percebidas pela ocorrência de flechas plásticas e deformações plásticas obtidas pelos extensômetros fixados às formas e capa de concreto. É possível perceber a existência de deslizamento relativo entre a fôrma e a capa de concreto, o que caracteriza uma falha por cisalhamento longitudinal. Além disso, a mudança do sinal da tensão na mesa superior da fôrma, de tração para compressão caracteriza a formação de uma segunda linha elástica, comportamento típico de interação parcial ao cisalhamento longitudinal. Antes, porém, observou-se a ocorrência de fissuras na parte inferior da seção transversal dos modelos na região entre as cargas aplicadas (região de flexão pura, cisalhamento nulo). Os gráficos apresentados na figura 8 demonstram que não houve grandes variações entre as flechas elásticas das amostras RM75-NI 01 a 04 sujeitas ao mesmo esquema de carregamento, se repetindo nas amostras 05 a 08, o que pode ser um indicio de que não houve grande variação no módulo de elasticidade do concreto utilizado. A flecha elástica ocorre até um carregamento da ordem de 40 kN,

passando a apresentar a partir de então comportamento inelástico. A flecha de serviço admissível $L/250$ e as flechas teóricas para os estágios fissurados e não fissurados também estão apresentadas nesta figura. As flechas teóricas da seção fissurada e não fissurada se aproximam da experimental apenas nos valores de carga iniciais. A flecha de serviço foi alcançada pelos modelos já na fase inelástica. O comportamento dúctil das amostras pode ser observado pelos grandes deslocamentos apresentados até o instante da ruptura, mesmo após plastificação da seção mista. A presença das telas aparenta influenciar na capacidade resistente dos modelos. A determinação dos parâmetros m e k dos modelos alternativos foram realizadas conforme processo apresentado nas tabelas 4 e 5, a partir dos resultados obtidos nos ensaios das amostras, tendo

**Figura 9**

Regressão linear dos dados de ensaio dos modelos alternativos

Fonte: O Autor

como referência a norma ANSI [2]. A reta obtida a partir da regressão linear dos dados está apresentada na figura 9.

4.2 Modelos normativos

Os gráficos apresentados na figura 10 demonstram maiores valores de tensão de tração na mesa inferior das amostras, enquanto a capa de concreto sofreu esforço compressivo durante todo o en-

saio. É possível observar também que até a ruptura não se percebe uma mudança bem definida da fase elástica para fase inelástica, ou seja, há um indício de baixa interação entre fôrma e capa de concreto já que o colapso ocorre antes da plastificação da seção mista. O gráfico Carga x Flecha no meio do vão das amostras RM75-02 e RM75-03 estão apresentadas na figura 11 a flecha teórica da seção fissurada acompanha o comportamento da flecha medida experimentalmente, no caso das amostras RM75-02, o que é um

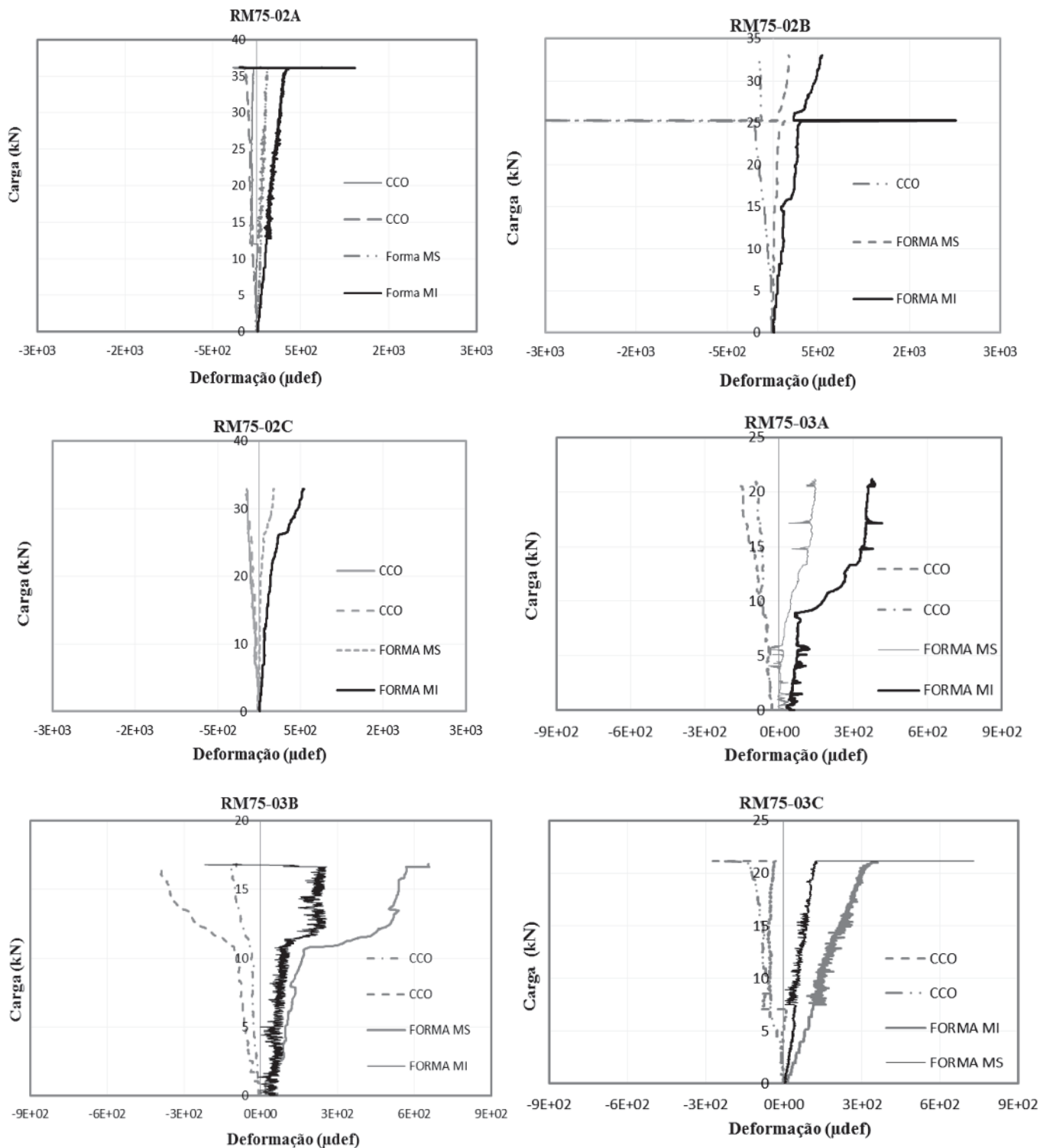


Figura 10
Carga x Deformação da amostra RM75 modelo normativo

Fonte: O Autor

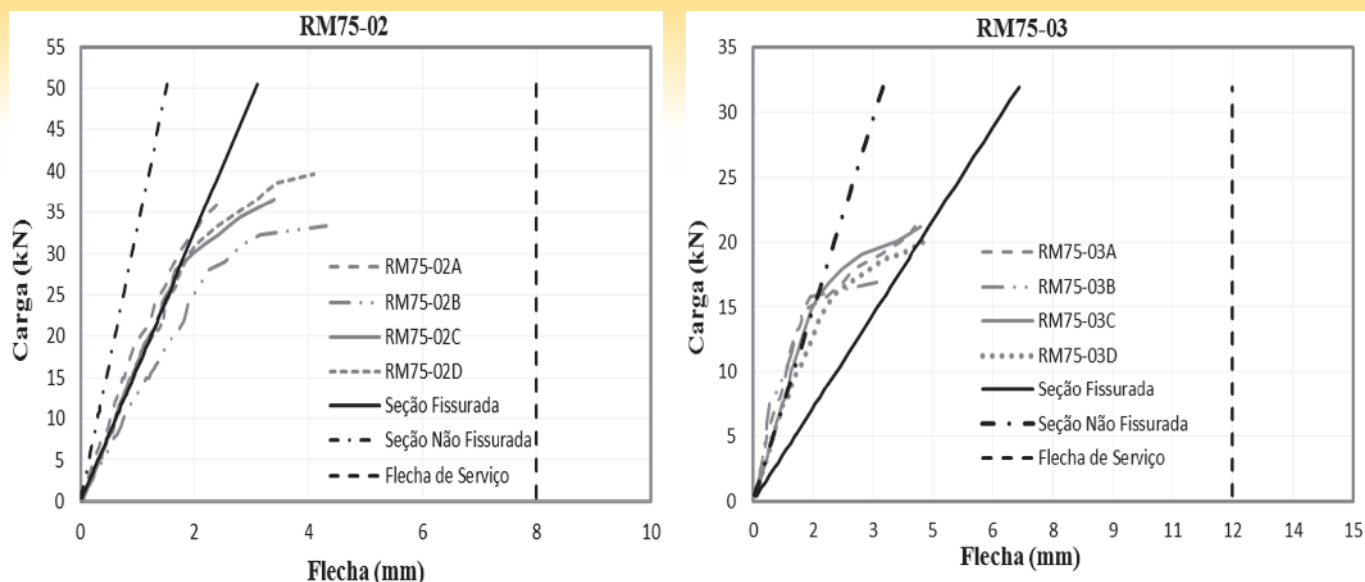


Figura 11

Carga x Flecha no meio do vão das amostras RM75 modelos normativos

Fonte: O Autor

indício de que a rigidez teórica fissurada se aproxima da rigidez real. Já a flecha teórica não fissurada acompanha a experimental apenas nos valores de carregamentos iniciais.

As amostras RM75-03 apresentaram flecha da seção não fissurada com comportamento similar ao experimental, demonstrando assim que sua rigidez inicial se assemelha à rigidez teórica da seção não fissurada, contrariando o ocorrido com as amostras RM75 02. As amostras dos dois grupos atingiram o colapso antes de alcançar a flecha de serviço.

A presença das telas, posicionadas na região comprimida da seção transversal, não demonstrou coibir ou auxiliar de forma significativa a capacidade de carga do sistema, já que, ao perder a interação, mesmo que parcial, entre capa de concreto e “deck”, o sistema imediatamente entrou em colapso.

A determinação dos parâmetros m e k desses modelos se deu conforme especificação da norma ANSI 2011, a partir da regressão linear dos dados obtidos em ensaio. Isso está apresentado nas tabelas 06, 07 e na figura 12.

Tabela 6

Determinação do cisalhamento transversal último total dos ensaios V_{ut}

Modelos	b (mm)	ht (mm)	df (mm)	L (mm)	L' (mm)	P (kN)	Pue (kN)	PPlaje (kN/m ²)	V _{ut} (kN)
RM75-02A	906	142	125,618	2000	500	36,200	41,828	2,563	23,232
RM75-02B	913	137	120,618	2000	500	32,986	38,606	2,563	21,643
RM75-02C	904	143	126,618	2000	500	36,208	41,828	2,563	23,231
RM75-02D	905	141	124,618	2000	500	39,430	45,050	2,563	24,844
RM75-03A	908	144	127,618	3000	750	21,172	26,792	2,563	16,886
RM75-03B	905	142	125,618	3000	750	16,876	22,496	2,563	14,726
RM75-03C	908	141	124,618	3000	750	21,172	26,792	2,563	16,886
RM75-03D	911	141	124,618	3000	750	21,300	26,920	2,563	16,962

Fonte: O Autor

Tabela 7

Regressão linear dos dados

Modelos	X (1/mm)	Y (N/mm ²)	Resultado da regressão	V _{us} (kN)	V _{us} /V _{ut}	Desvio (%)
RM75-02A	0,0020	0,2041	m = 93,748	23,444	1,009	0,916
RM75-02B	0,0020	0,1965		22,685	1,048	4,818
RM75-02C	0,0020	0,2030		23,579	1,015	1,500
RM75-02D	0,0020	0,2203		23,232	0,935	-6,488
RM75-03A	0,0013	0,1457	k = 0,0185	16,628	0,985	-1,528
RM75-03B	0,0013	0,1295		16,313	1,108	10,775
RM75-03C	0,0013	0,1492		16,237	0,962	-3,843
RM75-03D	0,0013	0,1494		16,291	0,960	-3,955

Fonte: O Autor

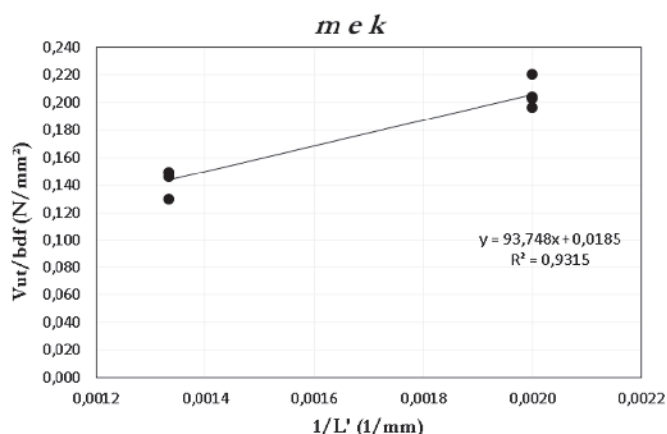


Figura 12
Regressão linear dos dados dos modelos normativos para obtenção dos parâmetros m e k
Fonte: O Autor

4.3 Análise comparativa dos modelos normativo e alternativo

A análise comparativa dos modelos requer algumas considerações básicas dos principais parâmetros que podem influenciar seu comportamento durante o ensaio, sendo estes a carga de colapso e as características geométricas. Este último é o fator principal, pois influencia diretamente os valores de carregamento e comportamento de cada modelo. Por esse motivo, se faz necessária

uma análise criteriosa das diferenças apresentadas pelos modelos a partir das diferentes características geométricas. Iniciou-se a análise aplicando os parâmetros m e k obtidos ao ensaiar o modelo alternativo, na equação 01, variando suas características geométricas, de tal modo que se aproximasse da geometria do modelo normativo. E, então, foi possível encontrar a relação entre a resistência ao cisalhamento longitudinal do sistema misto, V_{us} , e crescentes valores de vão de cisalhamento e largura da laje. Os resultados encontrados para esta situação foram comparados com os resultados encontrados ao adotar m e k do modelo normativo, como pode ser visto nas figuras 13 e 14.

Apesar dos parâmetros m e k obtidos no decorrer dos estudos realizados em modelos alternativos definirem a resistência ao cisalhamento longitudinal dos modelos alternativos, estes não podem ser adotados no cálculo dos modelos normativos, pois não descrevem sua resistência na interface. Ao adotar os parâmetros m e k obtidos no ensaio das lajes alternativas em lajes de vãos maiores, independentemente da largura adotada, há uma acentuada queda na resistência teórica da laje até que seja alcançado o valor zero. Esse valor é alcançado para todas as amostras no mesmo vão de cisalhamento o que caracteriza um vão limite para adoção desse parâmetro.

5. Conclusões

Ao ensaiar os modelos alternativos, foi possível concluir que os parâmetros de dimensionamento ao cisalhamento longitudinal m e k obtidos podem ser usados confiadamente como parte do processo de dimensionamento do modelo. Os desvios encontrados ao relacionar a capacidade resistente experimental ao cisalhamento

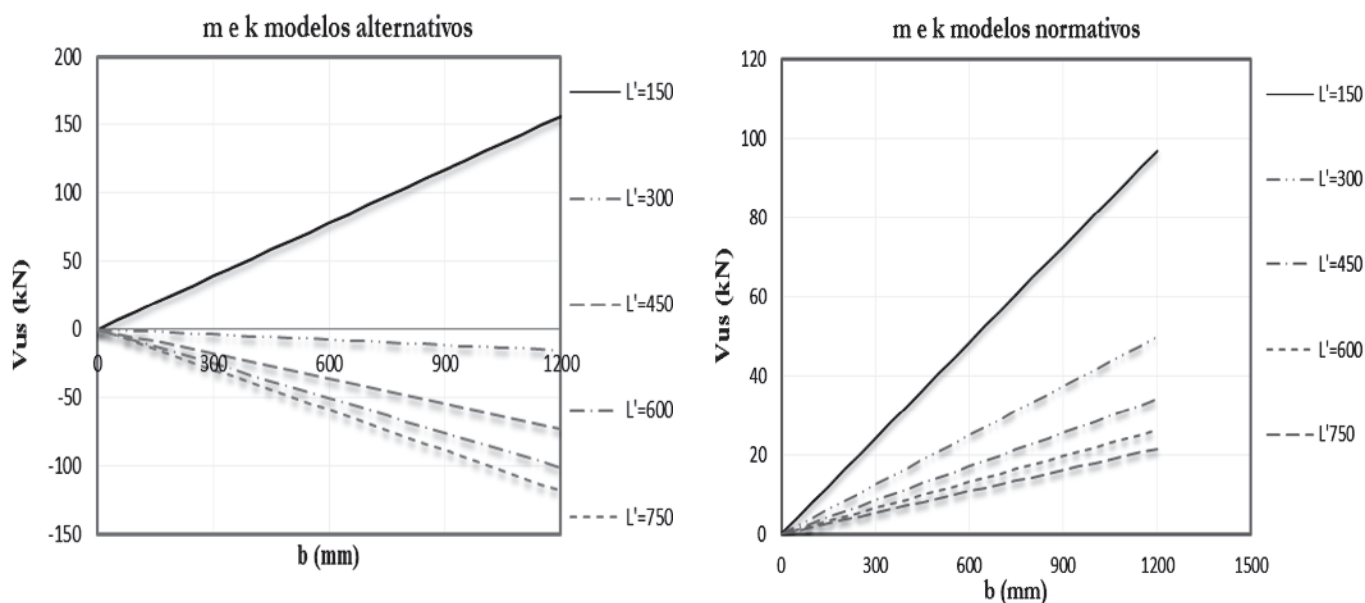


Figura 13
Resistência ao cisalhamento longitudinal ao adotar m e k dos modelos alternativo e normativo variando a largura das amostras
Fonte: O Autor

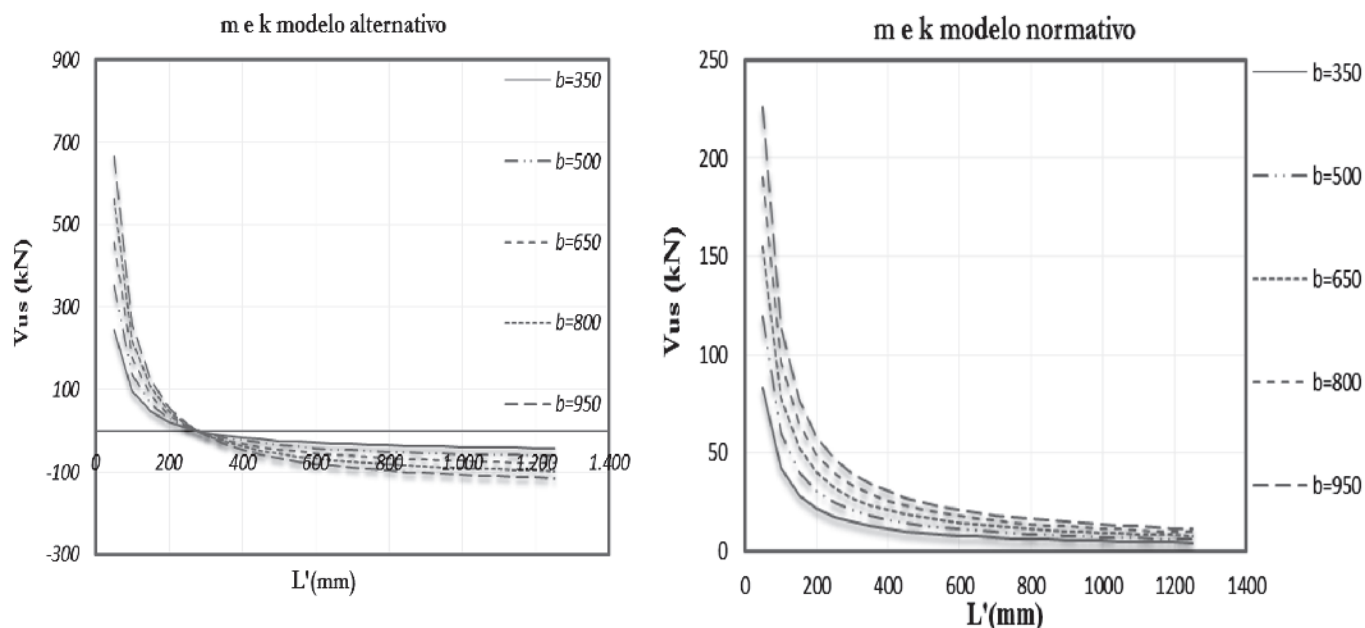


Figura 14

Resistência ao cisalhamento longitudinal ao adotar m e k dos modelos alternativo e normativo variando o vão de cisalhamento das amostras

Fonte: O Autor

longitudinal teórico (calculado por meio das equações apresentadas) satisfazem as solicitações normativas, permitindo-se, assim, confirmar a afirmação de que os valores de m e k encontrados podem ser adotados no procedimento de cálculo do modelo alternativo. Porém ao utilizar os parâmetros m e k , obtidos ao ensaiar os modelos alternativos, como procedimento de cálculo de modelos em maiores escalas dimensionais, é possível perceber que há um decréscimo na capacidade resistente desses modelos, independente de qual seja a dimensão variável, largura ou comprimento. Percebe-se também a existência de um limite de vão para o qual se podem adotar esses parâmetros. Infere-se, então, que os parâmetros m e k encontrados para os modelos alternativos não podem ser adotados no procedimento de cálculo do modelo normativo, já que apresentam inconsistências. A análise do comportamento dos gráficos carga x deformação dos modelos alternativos permitiu constatar que após plastificação parcial da seção e aproximação da carga que gera deslizamento relativo de extremidade, há uma mudança no comportamento da deformação da mesa superior da fôrma que passa a sofrer esforço compressivo, a saber, que a interação parcial entre o concreto e a forma após deslizamento relativo gera duas linhas neutras uma no concreto e outra no "steel deck", circunstâncias também confirmadas nas bibliografias estudadas.

Quanto ao modo de colapso dos modelos alternativos, percebe-se uma clara influência da tela metálica na sua capacidade resistente, mesmo após a perda de aderência mecânica entre fôrma metálica e capa de concreto. Além disso, após a aparição das primeiras fissuras é possível perceber grandes deformações até o colapso, caracterizando um comportamento dúctil.

Uma clara problemática dos modelos alternativos está na distância entre a carga aplicada e os apoios e a altura dos modelos. Esses fatores podem fazer com que a carga seja conduzida quase que diretamente aos apoios e não via cisalhamento longitudinal. Apesar disso, é possível observar nos modelos alternativos a transferência de esforços também via cisalhamento na zona de interface. Por meio dos ensaios em modelos normativos, tornou-se possível encontrar valores para m e k que representem de forma confiável a interação entre o "deck" RM75 e a capa de concreto, uma vez que os desvios entre a relação teórica e experimental não excederam em $\pm 15\%$, conforme a especificação normativa. Não obstante, a capacidade resistente ao cisalhamento longitudinal foi de baixa intensidade, demonstrando que houve uma baixa interação entre fôrma e capa de concreto. Acredita-se que isso se deva à baixa eficiência das mossas superficiais da fôrma; por conseguinte, é recomendado garantir uma melhor disposição das mossas superficiais, adotando mossas mais profundas e em maior quantidade por metro linear. Ou ainda, avaliar o processo de conformação mecânica do "deck" de maneira tal que se possa corrigir possíveis falhas nessa etapa.

A avaliação do colapso dos modelos normativos mostra que não houve influência considerável da tela nos resultados obtidos. O colapso ocorreu com deslizamento relativo significativo apenas próximo à carga última, ou seja, a ruptura se deu de maneira frágil. Outra característica não observada, comparando-se com o modelo alternativo, foi a ocorrência de um processo de aparecimento contínuo de fissuras antes do colapso.

Mediante este trabalho, espera-se auxiliar pesquisas de novos procedimentos para determinação dos parâmetros m e k .

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Pengec Engenharia e Consultoria, na pessoa do Dr Vinicius Maia Barreto de Oliveira. Aos Laboratórios de Estruturas S.P. TIMOSHENKO e Centro Tecnológico da Argamassa (CETA), da Escola politécnica da UFBA, por todo auxílio disponibilizado na produção e ensaio dos modelos.

7. Referências bibliográficas

- [1] FILHO, O. T. B. Estudo comparativo de respostas estruturais antes da cura do concreto de fôrmas metálicas incorporadas às lajes. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais-Belo Horizonte, (2003).
- [2] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ STEEL DECK INSTITUTE ANSI. T-CD-2011 Test standard for composite steel deck- slabs, (2011).
- [3] ABDULLAH, R. & EASTERLING, W. S., (2007). Determination of Composite Slab Strength Using a New Elemental Test Method. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, Nº 9, September1, 2007. ASCE.
- [4] CAMPOS, P. C. "Efeito da continuidade no comportamento e na resistência de lajes mistas com fôrma de aço incorporada". Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais- Belo Horizonte, (2001).
- [5] COSTA, R. S Análise de um sistema de lajes mistas considerando a influência do atrito dos apoios e a avaliação do momento de inércia efetivo. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais-Belo Horizonte, (2009).
- [6] DANIELS, B., & CRISINEL, M. (1993.a). Composite Slab Behavior and Strength Anlysis. Part I: Calculation Produced. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, Nº 1, January 1993. ASCE.
- [7] JOHNSON, R. P.; ANDERSON, D. Designers' Guide to EN 1994-1-1 Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, first edition, Thomas Telford Publishing, London, 2004.
- [8] ARAÚJO, G. S. Análise do comportamento e da resistência de um sistema de lajes mistas pelo método da interação parcial. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais- Belo Horizonte, (2008).
- [9] SELEIM, S. AND SCHUSTER, R. (1985). "Shear-Bond Resistance of Composite Deck-Slabs," *Canadian Journal of Civil Engineering*, National Research Council of Canada, Vol. 12, pp. 316-324.
- [10] EUROPEAN STANDARD-EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures-part 1-1: General rules and rules for buildings, (1994).
- [11] SCHUSTER, R. M. Strength and behavior of cold-rolled steel-deckreinforced concrete floor slabs. Iowa State University of Science and technology Ames, Iowa, (1970).
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, (2008)
- [13] BRENDOLAN, G. Análise comparativa da resistência de um sistema de lajes com fôrma de aço incorporada. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais- Belo Horizonte, (2007).
- [14] JOHNSON, R. P. Composite structures of steel and concrete- Volume 1 Beams, Slabs, Columns, and frame for buildings, Second Edition. Blackwell Scientific Publications, (1994).
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6892 (Ensaio de tração à temperatura ambiente),2002.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos).
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 (Concreto- Determinação dos módulos Estáticos de elasticidade e de deformação à compressão).