

ANÁLISE COMPARATIVA DE CONSUMO DE MATERIAIS ENTRE VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO COM DIFERENTES OPÇÕES DE LAJES

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONSUMPTION OF MATERIALS BETWEEN COMPOSITE BEAMS OF STEEL AND CONCRETE WITH DIFFERENT SLAB OPTIONS

Thalita Emanuela Matos Frota Lemos Duarte(1); Maria de Lourdes Teixeira Moreira(2);

(1) Engenheira Civil pela Universidade Federal do Piauí

*(2) Professora Associada, Departamento de Estruturas da Universidade Federal do Piauí
Rua Cláudio Soares de Brito, 1832. Bairro Ininga. Teresina – PI, Brasil. CEP: 64049-825*

Resumo

As vigas mistas de aço e concreto se apresentam como uma opção estrutural eficiente e eficaz por aproveitarem da melhor forma as características de cada material: o aço com sua esbelteza e resistência à tração e o concreto com sua elevada resistência à compressão. No entanto, ainda há casos onde elas, mesmo sendo vantajosas, não são consideradas como opção por projetistas e construtores por falta de conhecimento e estudos sobre suas características e dimensionamento nos cursos de Engenharia. As vigas mistas são compostas por perfis metálicos ligados a lajes de concreto por conectores de cisalhamento e cada tipo de laje (maciça, mista ou pré-moldada) influencia de forma diferente o seu dimensionamento. Para verificar de que forma influenciavam no dimensionamento os diferentes tipos de laje e qual opção de laje é mais vantajosa e utiliza de forma mais racional materiais e recursos, realizou-se o dimensionamento de um pavimento tipo de um edifício comercial utilizando cada uma das três opções citadas anteriormente e analisaram-se os resultados obtidos. Constatou-se que as vigas mistas com laje pré-moldada treliçada apresentaram a maior economia quanto ao consumo dos principais materiais utilizados. Também se verificou que as vigas que possuíam cargas concentradas, independentemente do tipo de laje utilizada, apresentaram os perfis metálicos mais robustos.

Palavras-chave: Vigas mistas. Lajes Maciças. Lajes Mistas. Lajes Pré-moldadas.

Abstract

The composite steel and concrete beams present themselves as an efficient and effective structural option to make the best use of the characteristics of each material: the steel with its slenderness and tensile strength and the concrete with its high compressive strength. However, there are still cases where, even if they are advantageous, they are not considered as an option by designers and constructors due to lack of knowledge and studies about their characteristics and design in Engineering courses. Composite beams are composed of metal profiles connected to concrete slabs by shear connectors and each type of slab (massive, mixed or precast) influences its sizing differently. In order to verify how the different slab types influence and which slab option is more advantageous and uses materials and resources more rationally, the design of a commercial building type floor was carried out using each of the three options quoted above and the results obtained were analyzed. It was verified that the mixed beams with precast latticed slab presented the greatest saving in the consumption of the main materials used. It was also verified that the beams that had concentrated loads, regardless of the type of slab used, showed the most robust metal profiles.

Keywords: Composite beam. Slab form of steel built. Slab precast. Slab solid.

1 Introdução

O concreto é o material mais utilizado na construção civil no Brasil e no mundo. Entre os motivos desta alta popularidade podemos citar sua versatilidade (pode ser moldado em formas diversas), elementos constituintes abundantes e de baixo custo, resistência à compressão e elevada rigidez.

Outro material também muito utilizado na Construção Civil é o aço. Ele apresenta elevada resistência à tração, elementos esbeltos, o que gera um alívio na carga das fundações, e rapidez na execução.

Esses materiais podem ser utilizados de forma isolada ou podem trabalhar em conjunto, formando os elementos mistos, que permitem a combinação das vantagens do aço e do concreto, tanto em termos estruturais como construtivos.

No início das construções mistas, executavam-se pilares mistos revestidos utilizando o concreto apenas como material de revestimento para proteger o aço do fogo e da corrosão e sua contribuição estrutural era ignorada nos cálculos. Também se executavam lajes de concreto armado com vigas metálicas, mas a resistência da laje no plano de flexão da viga era desprezada. Neste último caso o desenvolvimento dos conectores foi de suma importância para o avanço no dimensionamento de vigas mistas, pois possibilitou que os elementos de aço e concreto trabalhassem em conjunto, aumentando assim sua eficiência. Atualmente as estruturas mistas são amplamente utilizadas no Brasil e no mundo, tanto na construção de edificações (comerciais, residenciais ou industriais) quanto na construção de pontes.

Segundo Pfeil (2009, p.264) “denominam-se vigas mistas aço-concreto as vigas formadas pela associação de um perfil metálico com uma laje de concreto, sendo os dois elementos ligados por conectores mecânicos”. A NBR 8800 (2008) cita que as lajes podem ser dos tipos: maciça moldada no local, mista (com forma de aço incorporada) ou de concreto pré-moldado.

Com a atual crise econômica do país e a crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável, as estruturas mistas vêm se tornando uma opção cada vez mais competitiva por apresentarem um menor tempo de execução, menor consumo de materiais, se comparadas com as estruturas simples de concreto armado, e maior rigidez, se comparadas com as estruturas simples de aço.

O presente trabalho procurou determinar qual dos tipos de lajes (maciça, mista ou pré-moldada) gera maior economia nos principais materiais para execução de vigas mistas do pavimento tipo de um edifício comercial.

2 Referencial teórico

Pfeil (2009) cita que as vigas mistas passaram a ter grande utilização após a II Guerra Mundial, pois, com a carência do aço no pós-guerra, os engenheiros europeus passaram a considerar as lajes de concreto como parte do vigamento.

A combinação dos dois elementos pode ser feita de inúmeras formas, desde que a transmissão parcial ou total dos esforços cisalhantes longitudinais seja garantida. As formas mais utilizadas para se garantir essa transmissão de esforços são: utilização de conectores de cisalhamento ou embutimento do perfil metálico (FABRIZZI, 2007).

As estruturas mistas foram inseridas pela primeira vez nas normas brasileiras na NBR 8800:1986: “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios” (ALVA; MALITE, 2005), que abordava somente o dimensionamento e execução de elementos mistos submetidos à flexão (vigas mistas). Esta norma já foi revisada e a sua versão de 2008 apresenta diretrizes para o dimensionamento e execução de vigas, pilares, lajes e ligações mistas.

É importante destacar que foi o surgimento dos conectores que possibilitou que se pudesse considerar laje e viga trabalhando em conjunto. Bellei (2008, apud SOUZA, 2011) afirma que apesar de haver gastos adicionais com a colocação dos conectores, esses são compensados pela redução no peso do perfil metálico.

A escolha do tipo de laje a ser utilizada depende de vários fatores, como ambientais, construtivos, arquitetônicos, relativos ao conforto e relativos à utilização da construção. Entre as opções estão as lajes maciças, pré-moldadas e mistas (*steel deck*).

A laje maciça é a mais conhecida. São lajes moldadas no local da obra a partir de fôrmas e vergalhões metálicos, podendo ser armadas em uma ou duas direções. Este tipo de laje apresenta algumas desvantagens em relação ao seu peso próprio elevado e à necessidade de escoramento.

A laje pré-moldada composta por vigotas igualmente espaçadas de acordo com o material de enchimento, que serve apenas para eliminar o concreto da área tracionada e assim diminuir o peso próprio da estrutura, reduz consideravelmente o escoramento. Nesse tipo de laje os conectores são soldados à mesa superior das vigas metálicas nos intervalos entre as vigotas (FABRIZZI, 2007).

No caso de lajes mistas com fôrma de aço incorporada, a concretagem é feita sobre chapas de aço que permanecem incorporadas à laje após o endurecimento do concreto. Estas chapas podem ter nervuras paralelas ou perpendiculares em relação ao eixo da viga. A aderência entre os dois materiais (aço e concreto) é garantida por endentações e moissas existentes na chapa e permite que ela atue como armadura da laje. Esse sistema é bastante eficiente e econômico (PFEIL, 2009). Os conectores de cisalhamento são soldados através da fôrma de aço à mesa do perfil (FABRIZZI, 2007). A utilização de escoramento fica a critério do projetista.

Ao se definir o sistema de piso a ser utilizado deve-se levar em consideração a possibilidade e a necessidade ou não de escoramentos. “A NBR 8800 estabelece que a construção de vigas mistas pode ser feita com ou sem escoramento provisório” (MALITE, 1990, p. 24). Esse aspecto é de grande importância para o dimensionamento de estruturas mistas, pois influencia tanto no cálculo das deformações quanto no dimensionamento do perfil metálico.

Para o dimensionamento das vigas mistas, é feita uma analogia com uma viga “T” em concreto armado e não se considera que a largura total da laje contribua para a resistência da seção mista. Isto se deve ao fato da distribuição de tensões na laje de concreto não ser uniforme, efeito conhecido como “shearlag”. Devido à elevada extensão da mesa, as tensões axiais não são uniformemente distribuídas em toda a sua largura e por isso utiliza-se uma largura de laje reduzida na qual se possa considerar que as tensões são uniformes (FABRIZZI, 2007). A esta largura dá-se o nome de largura efetiva.

As vigas mistas podem ser dimensionadas tanto pelo regime plástico quanto pelo regime elástico. A NBR 8800 (2008) estabelece que o cálculo do momento resistente das seções

compactas seja feito considerando-se a análise plástica e que para as seções semicompactas seja considerada a análise elástica.

Durante a verificação do cisalhamento vertical da estrutura desconsidera-se o tratamento da peça como estrutura mista e admite-se que apenas a viga de aço seja responsável pela absorção desse esforço. Apesar de parte desse cisalhamento ser resistida pela laje de concreto ela é desconsiderada no cálculo por não haver um método de cálculo simples reconhecido para tal verificação (FUZIHARA, 2006).

Outro aspecto a ser levado em consideração no dimensionamento das vigas mistas é a armadura de costura, cujo objetivo é controlar a fissuração da laje na região adjacente ao perfil de aço, na direção paralela a este. No caso de lajes maciças ou de lajes mistas com nervuras paralelas ao perfil de aço, a área dessa armadura não deve ser inferior a 0,2% da área da seção de cisalhamento do concreto e no caso de lajes mistas com nervuras perpendiculares ao perfil, 0,1%, não sendo em nenhum dos casos inferior a 1,5 cm²/m.

3 Metodologia

3.1 Pavimento tipo

Realizou-se o dimensionamento de vigas mistas para três tipos de lajes (maciça, mista e pré-moldada) de um pavimento tipo de um edifício comercial para escritórios, pois, normalmente, eles apresentam grandes vãos com pouca ou nenhuma variação em suas dimensões e essas características se adéquam ao objetivo do trabalho. Além disso, edifícios comerciais exigem maior rapidez de execução e por isso é mais provável que o construtor ou projetista eleja as vigas mistas como opção para este tipo de obras.

Escolheu-se então um pavimento com vãos de 10 m e distância de 3 m entre as vigas como está mostrado na Figura 1.

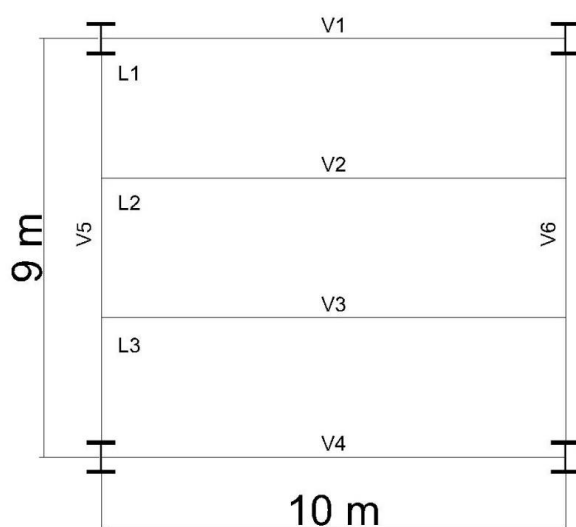


Figura 1 – Pavimento tipo e suas dimensões (Autora (2017))

Fazendo-se uma analogia com as vigas T e L de concreto armado, onde as vigas T são vigas simétricas e as vigas L são assimétricas, em relação à geometria da seção, pode-se afirmar que no pavimento tipo selecionado existirão tanto vigas simétricas, V2 e V3, como

vigas assimétricas, V1, V4, V5 e V6. No entanto, as últimas não serão dimensionadas à flexão oblíqua, pois, por analogia com as vigas de concreto armado, as vigas assimétricas serão dimensionadas da mesma forma das simétricas caso “exista o impedimento à deformação horizontal (transversina ou laje horizontalmente indeslocável), garantindo que a deformação será vertical (e linha neutra, então, horizontal).” (SUSSEKIND, 1980, p. 137).

Para as lajes do tipo maciça e pré-moldadas considerou-se o método de construção escorada, pois não há a necessidade da realização de verificações do perfil metálico durante a fase de construção. Já para as lajes do tipo mista considerou-se o método de construção não-escorada, porque o catálogo técnico da Metform, empresa fabricante do *steel deck*, fornece as informações necessárias para dimensionamento de vigas mistas com lajes mistas sem a necessidade de verificação do perfil metálico durante a fase de construção.

3.2 Características dos materiais

Optou-se por utilizar perfis metálicos soldados do tipo VS, porque são os mais utilizados em obras na região (Teresina – PI) e pela facilidade em se moldar os perfis com as dimensões especificadas. O aço utilizado para os perfis possui tensão de escoamento (f_y) igual a 250 MPa.

Utilizou-se também concreto com f_{ck} de 30 MPa ($\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$) nas lajes e aço CA-50 para as armaduras. Quanto ao *steel deck*, optou-se por utilizar o modelo MF-50 da Metform por ser indicado para edificações urbanas tipo hotéis, hospitais, escritórios, edifícios, garagens, entre outros.

Os conectores de cisalhamento utilizados foram do tipo pino com cabeça, do fabricante Ciser, com 19 mm de diâmetro e que possuem uma resistência limite de ruptura de 450 MPa.

Tanto as lajes mistas quanto as lajes pré-moldadas foram consideradas com nervuras perpendiculares às vigas V1, V2, V3 e V4 e paralelas às vigas V5 e V6.

3.3 Cargas atuantes

Além do peso próprio da estrutura, considerou-se uma carga de pavimento e revestimento, estimada em 1 kN/m^2 , e uma sobrecarga de utilização de 2 kN/m^2 , conforme recomendado pela NBR 6120: “Cargas para o cálculo de estruturas de edificações” para escritórios.

Não foram previstas paredes de alvenaria no interior das lajes, então foi considerada uma sobrecarga de 1 kN/m^2 referente ao peso de divisórias internas (de acordo com o item 2.1.2 da NBR 6120:1980). Já para fechamento do pavimento foram previstas paredes de alvenaria com carga de $2,43 \text{ kN/m}^2$.

Para as vigas V5 e V6 foram considerados apenas o peso próprio do perfil metálico, as reações de apoio das vigas V2 e V3 em cada caso considerado e o peso próprio da parede externa de alvenaria, considerando-se um pé direito de 3,2 m.

Cargas horizontais, como ação do vento, por exemplo, não foram consideradas em nenhum dos casos, pois não se verificou a estabilidade global do edifício, apenas as vigas mistas são o objetivo do estudo.

3.4 Dimensionamento das lajes

As lajes maciças foram dimensionadas manualmente de acordo com o método clássico simplificado, considerando-se uma espessura de 10 cm, concreto com $f_{ck} = 30$ MPa e que o edifício estaria localizado em uma região de CAA II. A seção da viga mista utilizando laje maciça está representada na Figura 2.

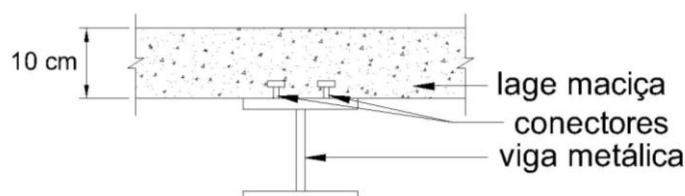


Figura 2 – Seção transversal da viga mista utilizando laje maciça (Autora (2017))

As lajes mistas foram dimensionadas seguindo-se as especificações e orientações técnicas do Anexo Q da NBR 8800 (2008) e do catálogo técnico da Metform. A Figura 3 mostra as dimensões do *steel deck* considerado. Utilizou-se uma capa de concreto com 6 cm de altura acima da chapa de aço, totalizando uma altura de 11 cm de laje, como mostrado na Figura 4.

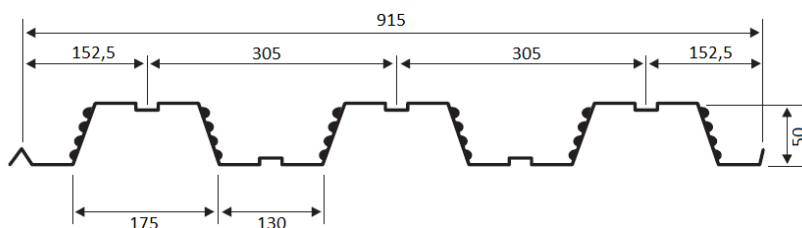


Figura 3 – Dimensões (em milímetros) do *steel deck* modelo MF-50 (Metform)

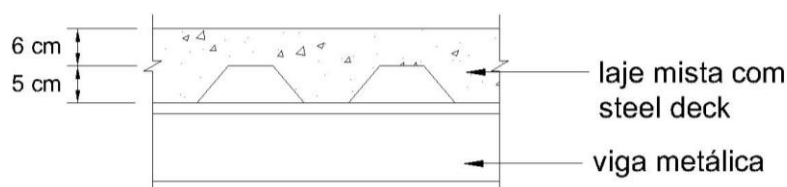


Figura 4 – Seção transversal da viga mista utilizando laje mista (Autora (2017))

Já para o dimensionamento das lajes pré-moldadas treliçadas utilizou-se o STG – Software de Treliças Gerdau e considerou-se enchimento de bloco cerâmico, capa de concreto de 5 cm, treliça do tipo TG8L e tela superior Q92. Na Figura 5 estão representadas as dimensões da seção da laje pré-moldada.

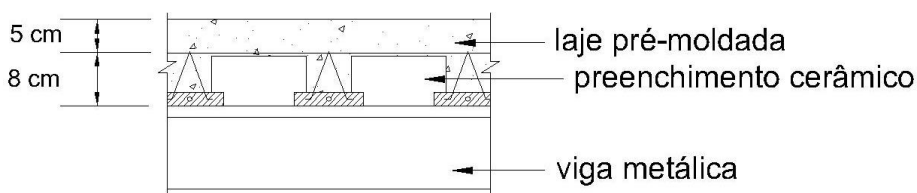


Figura 5 – Seção transversal da viga mista utilizando laje pré-moldada (Autora (2017))

3.5 Largura efetiva

A largura efetiva foi calculada de acordo com as especificações do item O.2.2 da NBR 8800 (2008) e é a mesma para todos os tipos de laje, mudando apenas de viga para viga, pois ele só depende de características geométricas do pavimento tipo, como vão da viga e espaçamento entre vigas paralelas adjacentes.

3.6 Pré-dimensionamento das vigas mistas

Após definida a planta do pavimento tipo, locou-se os pilares e realizou-se o pré-dimensionamento das vigas, considerando perfis com altura entre 1/30 e 1/20 do vão. Durante o dimensionamento ajustou-se esses perfis de forma a se utilizar a menor área de aço possível.

Em todas as etapas do dimensionamento as vigas mistas foram consideradas biapoiadas, pois desta forma os materiais são solicitados de maneira mais adequada, e com interação total, pois apresentam maior resistência do que as vigas mistas de interação parcial.

3.7 Dimensionamento das vigas mistas

As vigas mistas foram dimensionadas seguindo as determinações da NBR 8800 (2008). Os passos seguidos foram:

- Homogeneização da seção para determinação do momento de inércia e posição da linha neutra. Para a laje maciça, a espessura de concreto considerada foi a altura total da laje, 10 cm. Já para as lajes mistas e pré-moldadas considerou-se apenas a capa de concreto acima do *steel deck* e da vigota treliçada, 6 cm e 5cm, respectivamente;
- Combinações de ações de acordo com a NBR 8681: "Ações e segurança nas estruturas", utilizando-se a combinação última normal para verificação dos estados limites últimos e combinação quase permanente de serviço para verificação dos estados limites de serviço;
- Cálculo dos esforços atuantes (momento fletor e cortante);
- Cálculo do deslocamento máximo;
- Verificação dos perfis metálicos selecionados no pré-dimensionamento (para cortante, momento fletor e deslocamento) com auxílio de planilhas desenvolvidas pela autora no Excel. Quando possível os perfis foram reduzidos de forma a se utilizar a menor quantidade possível de aço. O deslocamento limite considerado foi o previsto no item 13.3 da NBR 6118:2014, considerando-se apenas a aceitabilidade sensorial;
- Determinação da resistência, quantidade necessária e espaçamento dos conectores de forma a satisfazer as especificações do item O.4.3 da NBR 8800 (2008). Adotaram-se espaçamentos múltiplos de 2,5 cm de forma que o número mínimo de conectores entre a seção de momento máximo e a seção de momento nulo fosse satisfeito. Em algumas vigas mistas com laje mista utilizaram-se dois conectores por nervura para que as condições do item O.2.6 da NBR 8800 (2008) fossem satisfeitas;
- Dimensionamento da armadura de costura respeitando as áreas mínimas;
- Quantificação dos materiais utilizados: consumo de aço do perfil metálico, consumo de concreto e consumo de aço para armadura de costura.

4 Resultados e discussões

4.1 Momentos e cortantes solicitantes de cálculo

Os resultados dos cálculos da etapa de esforços atuantes estão listados na Tabelas 1.

Tabela 1 – Valores de momentos e cortantes máximos de cálculo (Autora (2017))

Tipo de laje	V2 e V3		V1 e V4		V5 e V6	
	Mmax (kN.m)	Vmax (kN)	Mmax (kN.m)	Vmax (kN)	Mmax (kN.m)	Vmax (kN)
Laje maciça	355,63	142,25	300,13	120,05	529,13	187,64
Laje mista	337,33	134,93	325,66	130,27	515,92	184,25
Laje pré-moldada	339,82	135,93	293,22	117,29	510,16	181,32

É possível perceber que para as vigas internas, V2 e V3, as vigas mistas com lajes mistas apresentaram os menores esforços solicitantes, cerca de 5% menores do que os esforços solicitantes das vigas mistas com lajes maciças, que apresentaram os maiores valores. Já em relação às vigas mistas com lajes pré-moldadas elas não apresentaram redução significativa, cerca de 0,7%.

Para as vigas externas V1 e V4, as vigas mistas utilizando lajes mistas apresentaram os maiores esforços solicitantes, embora as lajes maciças apresentem maior peso próprio. Esses valores foram cerca de 10% maiores do que os das vigas mistas utilizando laje pré-moldada, tipo que apresentou os menores esforços.

Já para as vigas V5 e V6, vigas que apresentam cargas concentradas, as vigas mistas com laje maciça apresentaram os maiores esforços e as com laje pré-moldada apresentaram novamente os menores valores.

4.2 Perfis metálicos adotados

Com o uso de planilhas elaboradas no Excel foi possível determinar qual perfil possuía a menor área de aço e satisfazia todas as condições do dimensionamento. Os perfis adotados estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Perfis metálicos adotados no dimensionamento (Autora (2017))

Tipo de laje	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	VS 400 x 44	VS 450 x 51	VS 500 x 61
Laje mista	VS 450 x 51	VS 450 x 51	VS 450 x 83
Laje pré-moldada	VS 400 x 44	VS 400 x 44	VS 500 x 61

Para as três situações de vigas mistas as lajes do tipo pré-moldadas apresentaram os menores perfis (perfis com menor área de aço) e as lajes mistas, os maiores perfis, mesmo para as vigas internas, nas quais elas tinham apresentado os menores valores para os esforços solicitantes atuantes. Isso ocorreu porque, nas vigas internas as lajes mistas tiveram seu perfil limitado pela deformação no meio do vão, sendo necessária a utilização de um perfil com maior área de aço, mesmo que possuíssem valores baixos para os momentos atuantes. O aumento da área de aço causa uma redução na deformação por elevar o valor do momento de inércia da viga.

Foram utilizados perfis metálicos mais robustos nas vigas laterais, pois essas vigas estavam em situações mais desfavoráveis de utilização.

4.3 Momentos e cortantes resistentes de cálculo

Os resultados obtidos para os momentos e cortantes resistentes de cálculo estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos momentos e cortantes resistentes de cálculo (Autora (2017))

Tipo de laje	V2 e V3		V1 e V4		V5 e V6	
	Mres (kN.m)	Vres (kN)	Mres (kN.m)	Vres (kN)	Mres (kN.m)	Vres (kN)
Laje maciça	364,65	224,72	433,37	386,59	542,58	391,4
Laje mista	472,30	386,59	446,57	386,59	523,93	386,59
Laje pré-moldada	364,65	224,72	346,80	224,72	542,58	391,41

As vigas V2 e V3 são as vigas internas do pavimento e por esse motivo apresentam largura efetiva maior, pois possuem mesa colaborante de ambos os lados do perfil. Já as vigas V1, V4, V5 e V6 são vigas de extremidade e por isso só apresentam mesa colaborante em um dos lados (lado voltado para o interior do pavimento).

Exceto no caso das vigas mistas com laje maciça, utilizou-se o mesmo perfil nos dois primeiros pares de vigas (V2/V3 e V1/V4) e é possível perceber a influência da mesa colaborante na determinação do momento resistente. Tanto nas vigas mistas com laje mista quanto nas vigas mistas com laje pré-moldada, as vigas internas V2 e V3 apresentaram momento fletor maior quando comparadas com as vigas externas V1 e V4, pois as primeiras possuíam o dobro da largura efetiva das últimas.

Apesar das vigas mistas com laje mista apresentarem os perfis mais robustos para as vigas V5 e V6 elas apresentaram o menor momento resistente porque a LN ficou localizada no perfil metálico, enquanto que para os outros tipos de laje ficou localizada na própria laje.

Em alguns casos as vigas foram classificadas como compactas e em outros como semicompactas. Nas situações em que se utilizou o mesmo perfil, obteve-se o mesmo esforço cortante resistente, que depende da esbeltez, classificação e área da alma do perfil.

Nas vigas V2, V3, V5 e V6 de vigas mistas com laje maciça e V1, V2, V3 e V4 de vigas mistas com laje pré-moldada o perfil metálico foi classificado como semicompacto. Em todos os outros casos, como compacto.

Diante dos resultados é possível perceber que em nenhum dos casos o cortante foi o limitante, pois os cortantes resistentes apresentados são cerca de duas a três vezes maiores do que os cortantes de cálculo apresentados no item anterior.

4.4 Deslocamento máximo

Os resultados obtidos para as flechas máximas no meio do vão das vigas listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Flecha máxima no meio do vão (Autora (2017))

Tipo de laje	δ_{max} (cm)		
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	2,60	2,16	0,51
Laje mista	2,21	2,20	0,61
Laje pré-moldada	2,43	2,77	0,51

Em todas as situações têm-se um deslocamento menor do que o limite permitido pela norma de $l/250$. Para as vigas internas e externas, V1, V2, V3 e V4, o deslocamento máximo permitido é de 2,86 cm e para as vigas laterais, V5 e V6, é de 2,57 cm. Percebe-se então que as vigas laterais (V5 e V6) apresentam deslocamentos máximos bem abaixo do valor permitido pela norma em todos os tipos de laje, então, nessas vigas, a escolha do perfil metálico não foi limitada pela deformação no meio do vão e sim pelo momento máximo atuante, como é possível ver nas Tabelas 1 e 4.

As vigas V2 e V3 tem perfil metálico limitado pelo momento solicitante no meio do vão, exceto nas lajes mistas, onde essas vigas tem o seu perfil limitado pelo deslocamento.

Já as vigas V1 e V4, para todos os tipos de laje, a deformação no meio do vão foi o fator determinante para a escolha do perfil metálico a ser utilizado na viga.

4.5 Aço do perfil metálico

Multiplicando-se o peso próprio da viga por metro linear pelo comprimento do vão obteve-se o consumo de aço, em quilogramas, para as vigas metálicas em cada uma das situações e os resultados estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Consumo de aço dos perfis metálicos (Autora (2017))

Tipo de laje	Consumo de aço (kg)			
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6	TOTAL
Laje maciça	880	1024	1099,8	3003,8
Laje mista	1024	1024	1501,2	3549,2
Laje pré-moldada	880	880	1099,8	2859,8

As vigas mistas com a utilização das lajes pré-moldadas apresentaram o menor consumo de aço para o perfil metálico, com um valor cerca de 20% menor do que em caso de utilização das lajes mistas.

O dimensionamento do pavimento utilizando vigas mistas com lajes mistas foi a opção que apresentou o maior consumo de aço para os perfis metálicos, resultado que já era esperado já que essa opção havia apresentado os perfis com as maiores seções, como mostrado no item 4.2.

4.6 Concreto

O concreto utilizado na confecção das lajes também é um material que apresenta participação significativa no custo da estrutura. No caso da laje maciça, calculou-se o consumo multiplicando a altura da laje pela área, logo, para uma laje de 10 cm de espessura encontra-se um consumo de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

No caso das lajes mistas, o consumo de concreto foi retirado do catálogo técnico da fabricante Metform para lajes com altura total de 110mm. O valor do consumo de concreto de acordo com a altura da laje está listado na Tabela 6.

Tabela 6 – Consumo de concreto em lajes utilizando *steel deck* MF-50 (Metform)

Altura total da laje (mm)	Consumo de Concreto (m³/m²)	Tipo de armadura para retração, em tela soldada		
		Denominação	Composição	Peso (kg/m²)
100	0,0750	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
110	0,0850	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
120	0,0950	Q - 75	ø3,8 x ø3,8 - 150x150	1,21
130	0,1050	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
140	0,1150	Q - 92	ø4,2 x ø4,2 - 150x150	1,48
150	0,1250	Q - 113	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	1,80
160	0,1350	Q - 113	ø4,2 x ø4,2 - 100x100	1,80
170	0,1450	Q - 138	ø3,8 x ø3,8 - 100x100	2,20

Já para as lajes pré-moldadas, o valor do consumo do concreto para fabricação das vigotas pré-moldadas foi obtido através do orçamento gerado no software STF – Software de Trelças Gerdau e a ele somou-se o valor referente à execução da capa de concreto com espessura de 5 cm. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo de concreto (Autora (2017))

Tipo de laje	Consumo de concreto (m³/m²)
Laje maciça	0,100
Laje mista	0,085
Laje pré-moldada	0,059

Como esperado, as lajes maciças apresentaram o maior consumo de concreto por m² e as lajes pré-moldadas, o menor.

4.7 Armadura de costura

Os valores obtidos para área de aço mínima e necessária para armadura de costura em cada uma das situações encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Área de aço mínima para armadura de costura (Autora (2017))

Tipo de laje	As,min (cm²/m)		
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	2,00	2,00	2,00
Laje mista	1,50	1,50	1,50
Laje pré-moldada	1,50	1,50	1,50

Para as vigas mistas com laje mista e com laje pré-moldada adotou-se o valor de 1,50cm²/m, mínimo estabelecido por norma, pois ao calcular-se a armadura de costura mínima em função da porcentagem da área de concreto da seção de cisalhamento encontraram-se valores menores do que esse, pois a área de concreto nesses casos é muito pequena.

Tabela 9 – Área de aço necessária para armadura de costura (Autora (2017))

Tipo de laje	As,nec (cm²/m)		
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	0,93	1,41	2,52
Laje mista	0,00	0,00	1,94
Laje pré-moldada	1,93	1,93	3,52

É importante destacar que as lajes maciças já irão possuir armadura negativa, que irá absorver o esforço cisalhante na região próxima ao perfil metálico. Realizou-se o dimensionamento da armadura negativa necessária e encontrou-se 2,97 cm²/m, superior ao valor mínimo e ao valor necessário para armadura de costura em todos os casos de vigas mistas com laje maciça. Então, foi adotada a área de armadura negativa como sendo de costura pois não há a necessidade de se armar duas vezes a região.

As vigas mistas V1, V2, V3 e V4 com laje mista não apresentaram área de aço necessária para armadura de costura, porque a fôrma de aço incorporada à laje já é suficiente para combater o cisalhamento que aparece na seção.

É possível perceber que em todos os tipos de lajes as vigas V5 e V6 foram as que apresentaram maior área de aço necessária para armadura de costura devido às cargas concentradas das reações das vigas internas que fizeram com que a seção do perfil utilizado fosse maior, o que resultou em um maior valor para o somatório das forças resistentes de cálculo individuais dos conectores de cisalhamento ($\sum Q_{Rd}$).

A área de aço adotada para cada situação foi o maior valor entre a área mínima e a necessária. Os resultados estão na Tabela 10.

Para todas as situações de posição das vigas, as vigas mistas com laje mista foram as com menor área de aço para armadura de costura e as vigas mistas com laje maciça, as com maior área. Esse resultado se explica pelos fatos anteriormente comentados de que o aço da fôrma de aço incorporada à laje ajuda a combater o esforço de cisalhamento e que a armadura negativa da laje maciça cumpre o papel de armadura de costura.

Tabela 10 – Área de aço adotada para armadura de costura (Autora (2017))

Tipo de laje	As,adot (cm²/m)		
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	2,97	2,97	2,97
Laje mista	1,50	1,50	1,94
Laje pré-moldada	1,93	1,93	3,52

4.8 Conectores

Após obter-se o espaçamento necessário entre os conectores, dividindo-se metade do comprimento do vão pelo número mínimo de conectores entre a seção de momento máximo e a seção de momento nulo, arredondou-se o valor encontrado para múltiplos de 2,5 cm, sempre menores do que o espaçamento necessário calculado. Os valores dos espaçamentos adotados podem ser encontrados na Tabela 11.

O número de conectores foi então calculado dividindo-se o comprimento da viga pelo espaçamento adotado e arredondando-se o valor encontrado para mais. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 12.

Tabela11 – Espaçamento entre conectores de cisalhamento (Autora (2017))

Tipo de laje	Espaçamento (cm)		
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6
Laje maciça	37,50	32,50	25,00
Laje mista	30,50	30,50	30,00
Laje pré-moldada	45,00	37,50	25,00

Tabela 12 – Quantidade de conectores de cisalhamento (Autora (2017))

Tipo de laje	Quantidade de conectores (und)			
	V2 e V3	V1 e V4	V5 e V6	TOTAL
Laje maciça	28	32	36	96
Laje mista	66	66	30	162
Laje pré-moldada	28	28	36	92

A quantidade de conectores para as vigas mistas V1, V2, V3 e V4 com laje mista foi bem maior do que as outras situações, porque considerou-se 2 conectores por nervura para que o diâmetro máximo do conector estabelecido na NBR 8800 (2008), de 19mm, fosse satisfeito.

4.8 Resumo

Na Tabela 13 é possível ver o tipo de laje que apresentou o maior e o menor consumo para cada um dos principais materiais citados anteriormente.

Tabela 13 – Tipos de lajes com maiores e menores consumo para os principais materiais (Autora (2017))

Material	Laje com menor consumo	Laje com maior consumo
Aço do perfil metálico (kg)	Pré-moldada	Mista
Concreto (m³/m²)	Pré-moldada	Maciça
Armadura de costura (cm²/m)	Mista	Maciça
Conectores (und)	Pré-moldada	Mista

As vigas mistas com lajes pré-moldadas se mostram como opção mais econômica quanto ao consumo de materiais, pois apresentaram o menor consumo para três dos quatro principais materiais analisados, consumo de aço do perfil metálico, consumo de concreto e quantidade de conectores utilizada. Já as vigas mistas com lajes mistas ou maciças se alternam como opção de maior consumo para os materiais analisados e as primeiras aparecem como opção mais econômica apenas em relação ao consumo de aço para armadura de costura.

5 Conclusão

O presente trabalho buscou comparar vigas mistas utilizando três opções de lajes (maciça, mista e pré-moldada treliçada) quanto ao consumo de materiais e o fez a partir do dimensionamento de um pavimento tipo de um edifício comercial, com planta baixa elaborada pela autora, para cada tipo de laje considerado e tal objetivo foi alcançado.

Os resultados obtidos mostraram que as vigas mistas com lajes pré-moldadas são as mais econômicas quanto ao consumo de aço para o perfil metálico, consumo de concreto e quantidade de conectores, perdendo apenas no consumo de aço para armadura de costura para as vigas mistas com lajes mistas, pois nestas a forma de aço incorporada absorve o esforço de cisalhamento.

Desta forma conclui-se que, quanto ao consumo dos principais materiais utilizados, as vigas mistas com laje pré-moldada treliçada são mais econômicas do que vigas mistas com lajes maciças ou lajes mistas *steel deck*.

Também se verificou que as vigas V5 e V6, que apresentam cargas concentradas, foram as que necessitaram dos perfis metálicos mais robustos, além de maior consumo de armadura de costura e de conectores, exceto no caso de lajes mistas, pois, como comentado, considerou-se dois conectores por nervuras para as vigas V1, V2, V3 e V4, o que elevou bastante o número de conectores utilizados nessas situações.

6 Referências

ALVA, G. M. S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Caderno de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, v.7, n. 25, p. 51-84, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120** – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 8681** – Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8800** – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6118** – Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

FABRIZZI, M. A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos de aço-concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). 233 f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2007.

FUZHARA, M. A. L. S. **Ligações e armaduras de lajes em vigas mistas de aço e concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). 165 f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MALITE, M. **Sobre o cálculo de viga mista aço-concreto: ênfase em edifícios**. 144 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.



Anais do
60º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2018
Setembro / 2018



@ 2018 - IBRACON - ISSN 2175-8182

METFORM. Produtos e Serviços. Telha-fôrma. **Catálogo Técnico**. Disponível em http://www.metform.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2015/05/steel_deck_metform.pdf. Acessado em: 01 de maio de 2018.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**, Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SOUZA, R. L. **Influência do tipo de laje no dimensionamento de vigas mistas**. Feira de Santana, 2011. 132 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011.

SUSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto** – Volume 1: Concreto armado, Porto Alegre: Editora Globo, 1980.