

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Lorena Ferreira Silva

SISTEMA SLIM FLOOR – DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS
DE PISO DE PEQUENA ALTURA

Belo Horizonte

2022

Lorena Ferreira Silva

**SISTEMA SLIM FLOOR – DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS
DE PISO DE PEQUENA ALTURA**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Estruturas.

Orientador: Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ESCOLA DE ENGENHARIA CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos 21 dias do mês de setembro de 2022, às 17h 30min, a estudante Lorena Ferreira Silva, matrícula 2019703402, defendeu o Trabalho intitulado “Sistema Slim Floor - Dimensionamento de Estruturas de Piso de Pequena Altura” tendo obtido a média (95)

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 95 (noventa e cinco)

Orientador(a): Rodrigo Barreto Caldas

Nota: 95 (noventa e cinco)

Examinador(a): Eng. Lucas Fadini Favarato



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 09/11/2022, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Fadini Favarato, Usuário Externo**, em 01/12/2022, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1778259** e o código CRC **17E29346**.

Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.

Resumo

No contexto das construções industrializadas, a utilização das estruturas mistas tem tido um crescimento considerável nos últimos anos. Um tipo de sistema misto é o denominado “*slim floor*”, que é caracterizado por uma laje mista em que a viga metálica está embutida na laje de concreto, de modo a reduzir a altura dos pavimentos nas edificações.

Neste trabalho, são abordados os conceitos sobre o sistema de piso de pequena altura, apresentando as vantagens e desvantagens em relação aos sistemas construtivos convencionais, e apresentado o método de dimensionamento desse tipo de estrutura, tendo como base pesquisas realizadas sobre o tema e normativas internacionais.

Palavras-chave: Estruturas mistas; Piso misto de pequena altura; Métodos de dimensionamento.

Abstract

In the context of the industrialization of constructions, the use of composite structures has continuously increased in recent years. Among different alternatives, a type of mixed system is the so-called “slim floor”, which is defined by a composite slab in which the metal beam is embedded in the concrete slab, in order to reduce the floor height in the buildings.

In this article, the concepts of the slim floor system are discussed, showing the advantages and disadvantages in comparison to conventional construction systems. Beyond that, the sizing method for this type of structure is presented, based on the subject research and international regulations.

Keywords: Composite structures; Slim floor; Sizing methods.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. SISTEMA <i>SLIM FLOOR</i>	7
2.1. Contexto Histórico do Sistema <i>Slim Floor</i>	7
2.2. Lajes Utilizadas no Sistema <i>Slim Floor</i>	12
2.3. Características dos Pavimentos do Tipo <i>Slim Floor</i>	13
2.4. Vantagens do Sistema de Piso <i>Slim Floor</i>	13
2.4.1. Menor altura total do sistema de piso.....	13
2.4.2. Menor prazo de execução e estruturas mais leves.....	14
2.4.3. Resistência ao fogo.....	14
2.4.4. Melhor isolamento térmico e acústico.....	14
3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA <i>SLIM FLOOR</i>.....	15
3.1. Modos de Interação Entre os Elementos da Estrutura.....	16
3.2. Estados Limites Últimos	17
3.2.1. Fase de construção	19
3.2.1.1. Flambagem lateral com torção	19
3.2.1.2. Combinação dos esforços de flexão e torção	21
3.2.1.3. Efeitos das tensões na mesa inferior do perfil.....	24
3.2.2. Fase de utilização	25
3.2.2.1. Resistência à flexão.....	26
3.2.2.2. Conexão de cisalhamento.....	28
3.2.3. Resistência à força cortante.....	31
3.3. Estados Limites de Serviço	33
3.3.1. Controle de deformações/deslocamentos	33
3.3.2. Controle de vibrações.....	35
4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	36
4.1. Estado Limite Último - Fase de Construção	39
4.2. Estado Limite Último - Fase de Utilização	41
4.3. Estado Limite de Serviço – Controle de Deslocamentos	42
4.4. Estado Limite de Serviço – Vibração.....	43
5. CONCLUSÃO	43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo desenvolvimento de sistemas construtivos mais eficientes e industrializados, com construção rápida e áreas com grandes vãos tem crescido cada vez mais nas últimas décadas. Nesse contexto, as estruturas mistas têm atendido à essa demanda, devido às vantagens apresentadas quando comparadas com construções que utilizam estruturas convencionais.

Pode-se definir estrutura mista como a união de elementos compostos por materiais distintos, a fim de que suas melhores propriedades sejam aproveitadas e o resultado seja o aumento da capacidade resistente da estrutura aliado ao seu comportamento eficiente em serviço. No caso das estruturas mistas de aço-concreto, são consideradas principalmente a capacidade resistente à tração do aço, sua leveza e esbeltez, com a resposta à compressão do concreto simples ou armado.

As lajes mistas são constituídas por uma forma de aço nervurada conformada a frio, onde o concreto é depositado, e a interação entre os elementos é feita através do atrito ou das nervuras (ou mossas). Nas vigas mistas, são utilizadas a laje de concreto apoiada sobre o banzo superior da viga metálica, interligada através dos denominados conectores de cisalhamento.

Com o avanço dos estudos sobre as estruturas mistas, outros recursos vêm sendo adotados, como os pisos do tipo *Slim Floor*, ou pisos mistos de pequena altura. Esse sistema consiste em uma viga de aço assimétrica embutida na laje de concreto, onde a mesa do perfil de aço serve de apoio para a laje, resultando em pisos com menor altura, diminuindo, conseqüentemente, a altura dos pavimentos das edificações.

No Brasil, o sistema *slim floor* ainda não é tão difundido e utilizado como nos países europeus. Até os dias de hoje, não existe uma regulamentação para este sistema, nem a fabricação de uma forma de aço comercial que possua as propriedades compatíveis para sua aplicação, como maior altura. Nos últimos anos, diversos estudos foram realizados com o intuito de desenvolver novos tipos de lajes e vigas para projetos de normas de plantas (KUHLMANN, 2012).

O objetivo deste trabalho é apresentar o conceito e os benefícios da utilização do sistema *slim floor*, frente às suas vantagens em relação ao sistema misto convencional, e contribuir para a disseminar o conhecimento deste tema no Brasil, uma vez que não existem regulamentações para o dimensionamento deste tipo de estrutura. Serão apresentados também os métodos de dimensionamento para os estados limites últimos e estados limites de serviço, para as fases de construção e utilização do sistema *slim floor*.

2. SISTEMA *SLIM FLOOR*

O início da utilização de estruturas mistas na construção civil é datado entre o final do século XIX e começo do século XX. Segundo Carini (2014), o concreto era usado, à princípio, como revestimento para as peças estruturais em aço para proteção contra o fogo e corrosão, sem considerar a resistência à compressão do material. Atualmente, a interação entre os elementos é considerada utilizando suas principais propriedades e grandes projetos têm sido desenvolvidos, sendo, no Brasil, regulamentados pela norma NBR 8800. (ABNT, 2008)

Dentro deste progresso da interação aço-concreto, os pisos do sistema *slim floor* surgiram aliando diferentes modelos de vigas metálicas e lajes de concreto. Atualmente, podem ser utilizadas vigas com seções tipo caixão, I ou H, em perfis soldados, laminados ou formados a frio. As lajes utilizadas são maciças, pré-fabricadas de diferentes tipos, lajes treliçadas e, principalmente, as lajes mistas (*steel deck*).

Pisos baixos integrados apresentam características vantajosas sobre as estruturas de piso de concreto convencionais, pois aumentam a resistência do edifício ao fogo e à corrosão do aço, reduzindo ou dispensando proteção adicional. Segundo BARROS (2011), com um sistema composto *slim floor*, é possível atingir um comprimento de viga de 14m e um vão de laje de 10m a 12m, permitindo a criação de vãos com número reduzido de pilares.

O último recurso mencionado é uma das grandes vantagens do *slim floor*. Porém, leva a uma análise importante: quanto menor a altura do pavimento, maior sua vulnerabilidade, o que requer a verificação dos estados limites de serviço, principalmente no domínio de flechas e vibrações. No entanto, explorar as oportunidades amplas e edificantes no *slim floor* também é muito interessante, o que requer mais pesquisas sobre o comportamento estrutural desses sistemas (PAES, 2003).

2.1. Contexto Histórico do Sistema *Slim Floor*

No contexto do conceito do sistema *slim floor*, segundo Barros (2011), no final do século XVIII já se empregavam vigas metálicas embutidas na altura total do pavimento, com a utilização de um sistema em arco constituído por blocos cerâmicos apoiados na mesa inferior de perfis em ferro fundido, denominado sistema *jack-arch*. No século seguinte, outro sistema também passou a ser utilizado, chamado *filler joist* (ou *joist concrete*), apresentado na Figura 1 abaixo,

com o emprego de duas vigas metálicas espaçadas e concretadas, de modo que a mesa inferior da viga ficasse no mesmo nível ou acima do nível do pavimento.

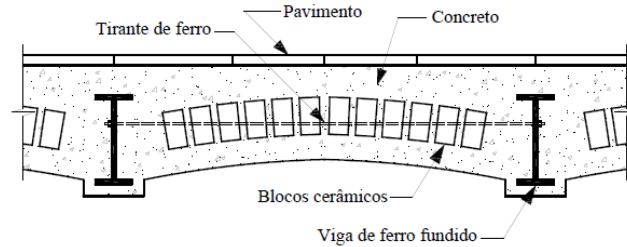


Figura 1 - Sistema "filler joist" (MESQUITA, 2016)

Diversos estudos possibilitaram a evolução do sistema *slim floor* nos anos 80, segundo Friedrich (2012), principalmente com o desenvolvimento e utilização de vigas metálicas do tipo HatBeam, que tiveram grande destaque devido à redução da altura total do piso e aspectos como inovação e economia. Andrade (2017) elucida que emprego desse tipo de viga possibilitou o crescimento de 80% no uso de estruturas de aço nesta mesma década. Esta viga foi desenvolvida utilizando-se quatro chapas metálicas soldadas, criando-se a chamada “viga chapéu”, conforme observado na Figura 2.

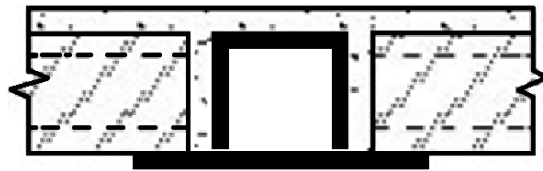

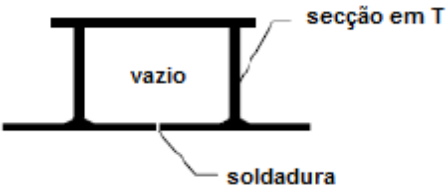
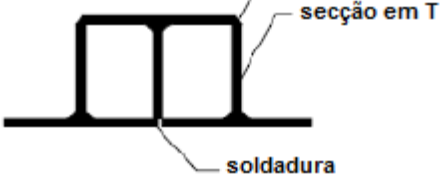
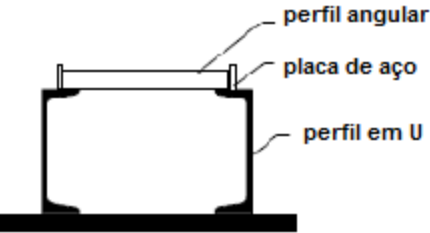

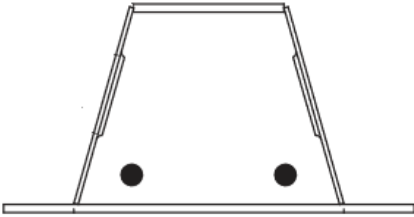


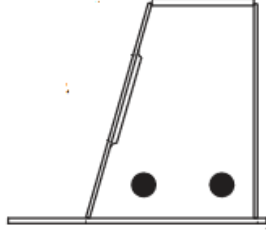
Figura 2 - Viga chapéu, desenvolvida nos anos 80 (ANDRADE, 2017)

A partir da concepção deste tipo de viga, outros modelos foram criados com o uso de chapas soldadas e perfis laminados. Os mais utilizados estão especificados no Quadro 1.

Quadro 1: Tipos de sistemas com vigas embutidas na altura do pavimento – *slim floor*

(a)	<p><i>HatBeam.</i></p> <p>Possui seção transversal constituída por quatro chapas soldadas, produzindo uma viga caixão. É tida como a tipologia inicial proposta nos países nórdicos.</p>	
-----	--	--

(b)	<p>Viga constituída por dois perfis estruturais, seção T, soldados entre si formando o banço inferior, e em uma chapa de aço, formando o banço superior.</p> <p>Trata-se de um modelo usado na Noruega e Finlândia.</p>	
(c)	<p>Modelo de viga formado pela união de três perfis estruturais, seção T, soldados entre si.</p> <p>Modelo utilizado também na Noruega e na Finlândia.</p>	
(d)	<p>Viga constituída por dois perfis, seção U, laminados, soldados a uma chapa de aço que forma o banço inferior.</p> <p>O complemento da secção transversal é realizado soldando-se uma pequena chapa de aço na aba de cada perfil U e aplicando-se ao longo do eixo longitudinal da viga, perfis angulares soldados entre estas chapas.</p>	
(e)	<p>Seção transversal da viga formada por um perfil <i>Universal Column</i> (UC) laminado, disposto com a alma na direção horizontal, soldado a duas chapas de aço nos banços do perfil. A chapa inferior possui largura e espessura maiores do que a chapa soldada superiormente.</p>	
(f)	<p>Viga tipo <i>Delta Beam</i></p> <p>Tipo de viga constituída por quatro chapas de aço soldadas formando uma viga caixão.</p> <p>Possui aberturas circulares de grandes dimensões na alma ao longo do seu</p>	

	<p>comprimento, tendo também as almas inclinadas</p> <p>Esse tipo de estrutura possui dois tipos de vigas, sendo uma para vigas centrais e outra para vigas exteriores à edificação.</p>	
--	--	---

Fonte: Andrade (2017); Cordeiro (2013)

As vigas apresentadas de (a) a (e), como podem ser vistas, possuem seções fechadas e, no sistema misto, a laje de concreto é apoiada no banzo inferior do perfil. O modelo *Delta Beam* (f), desenvolvido e comercializado a partir da década de 90, além de conter considerável resistência à torção como os demais tipos, apresenta aberturas na alma que possibilitam o preenchimento do interior da viga com concreto e a passagem de armaduras adicionais, aumentando a interação entre os materiais e a resistência do sistema.

Na Figura 3, é apresentado outro tipo de viga empregado no sistema *Slim Floor*, denominado *Universal Column*. Neste caso, a laje também se apoia no banzo inferior do perfil metálico e é permitido realizar recortes no extremo da aba superior do perfil ou em partes do extremo da laje para que seja possível realizar a montagem das lajes, introduzindo as placas de laje e posicionando-as corretamente. (BARROS, 2011)

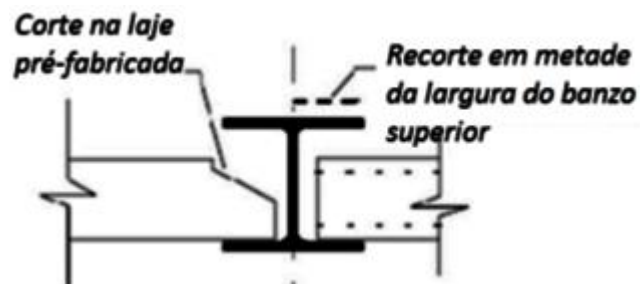
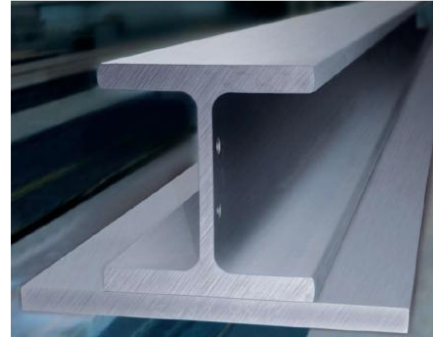
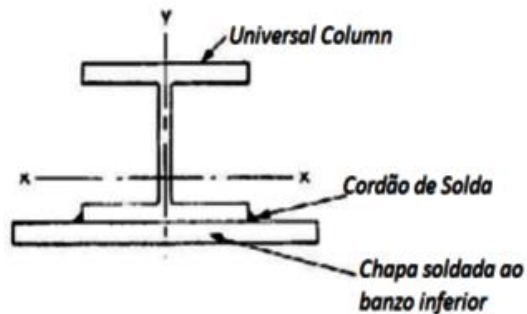


Figura 3 - Modelo de sistema slim floor denominado Universal Column (BARROS, 2011)

Esta crescente utilização do sistema *slim floor*, principalmente nos países nórdicos, desencadeou uma série de estudos e o desenvolvimento de novos modelos de vigas. A viga intitulada *Slymflor* foi apresentada pela empresa *British Steel* (atual *Tata Steel*) e o *Steel Construction Institute* (SCI), em 1992. Esse tipo de viga é constituído por um perfil laminado *Universal Column* e uma chapa de aço soldada no banzo inferior, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5. Segundo Andrade (2017), a largura do banzo inferior varia de 28 cm a 51 cm, a altura entre 14 cm a 30 cm e comprimento comercial com variação entre 5,0 e 8,0 metros.

Atualmente, este modelo é denominado SFB (*Slimfloor Fabricated Beam*), atinge de 5m a 14m de vão com espessuras de piso entre 20 cm e 40 cm. (ARCELORMITTAL,2015)



Figuras 4 e 5 – Modelo de viga Slimfloor, desenvolvida pela empresa British Steel (atual Tata Steel) e o Steel Construction Institute (SCI), em 1992

Em sequência à viga *Slimfloor*, surgiu a viga denominada *Asymmetric Slimfloor Beam* (ASB), criada também pela British Steel e o SCI a partir de um perfil laminado. Neste caso, a chapa soldada no banzo inferior foi retirada, criando-se um perfil assimétrico em que o banzo inferior possuía a largura maior que o superior, possuindo ainda propriedades mecânicas e geométricas aprimoradas. Também foram adicionadas nervuras no banzo superior do perfil, para aumentar a aderência do aço com o concreto. Este modelo garantia a utilização de perfis de 15 a 25% mais leves quando comparados à viga *Slimfloor*, além de ser mais econômico devido a utilização de menos material para sua confecção. (BARROS, 2011).

Posteriormente, foi desenvolvido pela empresa *ARBED* (atual grupo *ArcelorMittal*) o perfil intitulado *Integrated Floor Beam* (IFB), com a união de perfis laminados a chapas soldadas, em dois tipos. A fabricação da viga IFB tipo A consiste no corte de um perfil laminado I ou H, resultando em uma seção T, soldado à uma chapa de aço de maior espessura e maior comprimento em relação ao banzo do perfil laminado. A chapa soldada se torna o banzo inferior do perfil. Já a viga IFB tipo B possui uma seção T resultante do corte de um perfil laminado I ou H, soldado à uma chapa de aço que se torna o banzo superior do perfil, de espessura também maior que o perfil laminado, entretanto possuindo uma largura menor do que o banzo inferior, conforme Figura 6. Segundo a ArcelorMittal (2015), a disposição das vigas assimétricas e as diferentes geometrias estão disponíveis para oferecer a melhor solução de acordo com as condições do projeto.

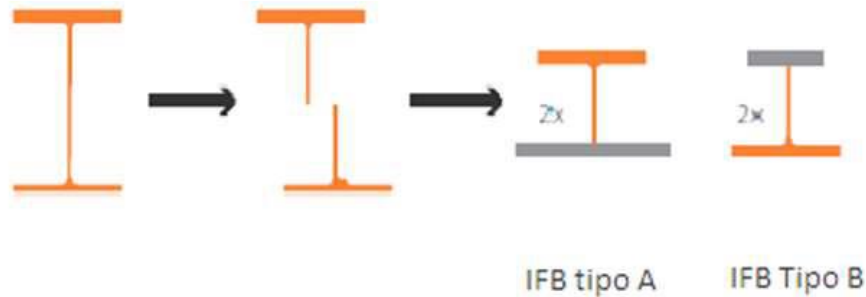
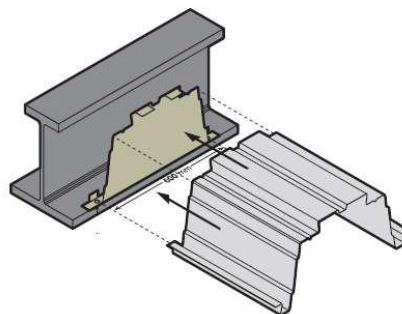


Figura 6– Viga IFB, desenvolvida ArcelorMittal (ARCELORMITTAL, 2015)

2.2. Lajes Utilizadas no Sistema *Slim Floor*

Durante o desenvolvimento dos diferentes perfis de vigas para serem empregados no sistema *slim floor*, a empresa British Steel e o SCI apresentaram, na década de 90, o sistema de laje mista denominado *Slimdek*. É constituído por uma forma de aço nervurada de grande profundidade, geralmente utilizada com as vigas tipo ASB ou *Slymflor*. No banzo inferior da viga são instalados os diafragmas, através da técnica *shot fire*, e a forma é fixada nestes diafragmas, como pode ser visto na Figura 7. O concreto é moldado in loco e depositado sobre a forma. Este sistema permite o alcance de vãos de 8 a 9 metros.



Figuras 7 – Modelo de laje *Slimdek*, desenvolvida na década de 90 (ANDRADE, 2017)

O *Slimdek* veio para complementar os demais tipos de lajes que podem ser utilizados no sistema *slim floor*, como as lajes de concreto pré-fabricadas e lajes maciças. As lajes pré-moldadas mais utilizadas são as vigotas, apoiadas no banzo inferior da viga com posterior concretagem da laje, e as lajes alveolares, que igualmente são apoiadas no banzo inferior do perfil, seguida da concretagem na interface entre o perfil e a laje. (ANDRADE, 2017)

2.3. Características dos Pavimentos do Tipo *Slim Floor*

O sistema de piso *slim floor* é uma evolução do piso misto comum, com a utilização dos mesmos materiais que resultam em uma laje plana com menor espessura. Esse uso em conjunto é possível devido à interação dos materiais aço e concreto, que depende da rigidez da conexão entre eles, quantidade e posicionamento. A conexão é feita através dos conectores e nervuras no banzo superior da viga e das nervuras presentes nas formas metálicas, dependendo dos tipos utilizados.

No piso *slim floor*, geralmente são empregadas formas metálicas bem mais altas que as formas do piso misto convencional, com o intuito de diminuir o volume de concreto acima da forma (entretanto, podem ser utilizadas as formas convencionais, desde que sejam inseridos calços na base do perfil a fim de fixar a forma no local desejado). Em alguns tipos de piso como o *Slimdek*, é permitida a execução de aberturas na alma da viga e nos diafragmas da forma, que permitem a passagem de diferentes instalações. (BARROS, 2011)

Além dessas características do sistema, a utilização do *slim floor* possui diversas vantagens em relação ao piso misto convencional, principalmente no que se refere à redução do peso da estrutura e custo de execução.

Considerando a obtenção do pavimento com menor altura, a desvantagem do sistema *slim floor* refere-se à possibilidade de ocorrerem maiores deformações e vibrações no piso, e aumento da flexibilidade.

2.4. Vantagens do Sistema de Piso *Slim Floor*

Além dessas características do sistema, a utilização do *slim floor* possui diversas vantagens em relação ao piso misto convencional, principalmente no que se refere à redução do peso da estrutura e custo de execução.

2.4.1. Menor altura total do sistema de piso

Devido às suas características geométricas, o sistema de piso de pequena altura produz uma redução no comprimento absoluto do pavimento em comparação com os sistemas de piso convencionais.

Segundo Cordeiro (2013), considerando o perfil metálico embutido na laje de concreto, a espessura final do piso pode variar entre 25 e 40 cm. A diminuição da altura total do pavimento pode garantir que os limites urbanísticos em relação à altura da edificação sejam atendidos ou,

em alguns casos, pode admitir a acomodação de novos pisos sem a produção de grandes custos adicionais. (MESQUITA, 2016)

2.4.2. Menor prazo de execução e estruturas mais leves

Por ser um sistema industrializado e frequentemente executado sem escoramento, o prazo de montagem da estrutura e os custos relacionados (material e mão de obra) são reduzidos. Além disso, o sistema *slim floor* resulta em estruturas mais leves quando comparadas a estruturas de concreto armado e mistas convencionais, e possibilita desenvolver construções com lajes de vãos com até 12 metros e vigas com 8 metros.

2.4.3. Resistência ao fogo

O fato de elementos de aço possuírem uma superfície preenchida com concreto resulta em maior resistência ao fogo. Segundo Paes (2003), normalmente, essa tipologia permite até 60 minutos de resistência ao fogo sem medidas de proteção adicionais. Pesquisas confirmaram (BRAUN, 2015), por análise de elemento finito (FEM), que vigas de piso do tipo *Slymflor* podem permitir até 90 minutos de resistência ao fogo sem a necessidade de proteção adicional, conforme Figura 10.

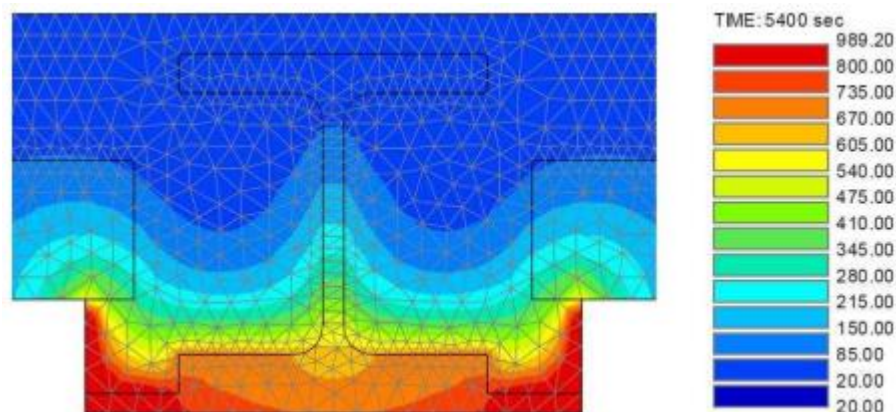


Figura 10 – Distribuição de temperatura após 90 minutos (MESQUITA, 2016)

2.4.4. Melhor isolamento térmico e acústico

As lajes pré-fabricadas alveolares e o sistema *slimdek* possuem vazios de ar em sua composição, que dificultam a transferência de calor e a propagação sonora.

Outra alternativa a ser utilizada é uma laje mista composta por chapas de aço dobradas com espessura de 1,0mm e blocos de lã de rocha, revestidos de concreto. O baixo peso da lã de rocha

associado ao seu desempenho acústico e térmico, torna a solução construtiva uma das mais vantajosas na esfera de isolamento. (MESQUITA, 2016)

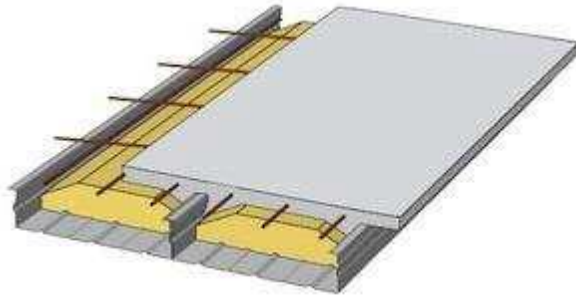


Figura 11 – Laje mista formada por chapas de aço dobradas, blocos de lã de rocha e uma capa de concreto (MESQUITA, 2016)

3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA *SLIM FLOOR*

Atualmente, ainda não existem recomendações normativas brasileiras para o completo dimensionamento do sistema de piso de pequena altura. Entretanto, fundamentados na norma NBR 6118 (ABNT,2014) e na NBR 8800 (ABNT,2008), além de normas internacionais como o EN 1993 (CEN, 2005), EN 1994 (CEN, 2004) e normas britânica BS 5950-1 (2001) e BS 5950-3.1 (2001), alguns pesquisadores nacionais iniciaram estudos sobre o tema.

Em 2016, Santos, Lima e Sakiyama (2016) realizaram uma publicação intitulada “*Slim floor*: método de dimensionamento e estudo paramétrico”, onde apresentaram uma metodologia de dimensionamento do sistema *slim floor* com utilização da laje *steel deck*. No mesmo ano, Mesquita (2016) avaliou através de modelagem numérica o comportamento estrutural à flexão do sistema, realizando também uma análise comparativa entre seus resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos por outros autores. Andrade (2017) realizou um estudo comparativo da laje de um pavimento executado no sistema misto com laje *steel deck*, com uma laje calculada no sistema *slim floor*, concluindo que o pavimento teria uma redução de 45% em sua espessura, com a utilização do sistema de piso de pequena altura. Em 2020, Borghi (2020) realizou o estudo comparativo do comportamento à flexão de quatro tipos de pisos do sistema *slim floor*, obtendo resultados compatíveis com os encontrados na literatura.

Uma vez definido o mecanismo de transferência das tensões de cisalhamento entre aço e concreto, o dimensionamento do piso misto do sistema *slim floor* deve ser feito considerando os Estado Limite Último (resistência aos esforços e estabilidade da estrutura) e Estado Limite

de Serviço (análise quanto aos deslocamentos e vibrações) nas fases inicial e final da construção.

A fase inicial considera a etapa de construção em que o concreto não atingiu 75% de sua resistência, onde ainda não foi estabelecido o comportamento misto da estrutura. Assim, a forma de aço é analisada de forma isolada (quando utilizada laje com esse material), resistindo às cargas permanentes e sobrecarga de construção, e a viga deve ser admitida sem contenção lateral. Nesta etapa, o dimensionamento pode ocorrer com base na ABNT NBR 8800 (2008) ou nas normas internacionais anteriormente citadas.

Já para a fase final, não existem normas nacionais que considerem o efeito misto da estrutura, sendo as normas internacionais as principais fontes de consulta. Aqui se considera a ação do concreto endurecido, já no sistema misto, tanto para a verificação de resistência da forma quanto da viga. (BORGHI, 2020; FRIENDRICH, 2012; RAMOS, 2010)

3.1. Modos de Interação Entre os Elementos da Estrutura

O comportamento misto entre aço e concreto é constituído quando os dois elementos conseguem se deformar como um elemento só. Ramos (2010) determina que inicialmente é considerada a aderência natural (adesão e atrito) proveniente das ligações físico-química que se formam entre os componentes (cimento e aço) na fase de hidratação do cimento, e que, em alguns casos, como nos pilares mistos preenchidos de concreto submetidos a compressão centrada, são suficientes para assegurar o comportamento misto da estrutura. No contexto do sistema de lajes *slim floor*, essa aderência não é suficiente e, assim, torna-se inevitável a utilização de dispositivos mecânicos que possibilitem absorver as forças de cisalhamento que surgem na interação entre os elementos.

Diversos dispositivos mecânicos podem ser utilizados na ligação entre os componentes desse sistema, entre eles as de barras de aço passantes na alma da viga metálica e conectores de cisalhamento. A escolha de uma forma de conexão em detrimento da outra passa pelos critérios de conhecimento do conector, seus modos de falha, das necessidades de projeto, facilidade de execução e custo. (RAMOS, 2010)

A Figura 12 apresentada abaixo, mostra a conexão entre a laje e a viga realizada com a utilização de barras de aço estruturais. Neste caso, são feitos furos na alma do perfil para a passagem das armaduras, o que possibilita reduzir a altura total do piso, uma vez que não são necessários os conectores de cisalhamento na mesa superior da viga metálica. (REIS, 2018)

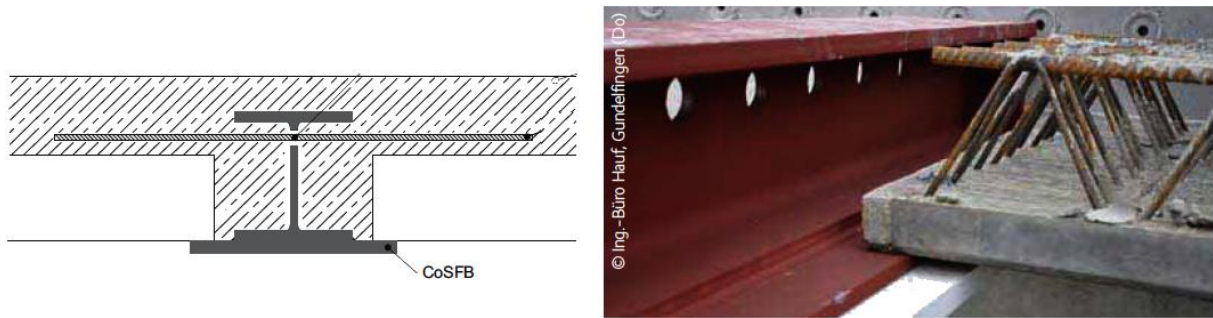


Figura 12 – Exemplo de uso de viga CoSFB com abertura na alma (ARCELORMITTAL, 2015)

As aberturas na alma da viga devem ser consideradas no dimensionamento de vigas mistas, segundo preconiza a NBR 8800 (ABNT,2008). Devem ser analisados o tipo de aço utilizado, as propriedades geométricas do perfil, dimensões e distância entre as aberturas, o esforço aplicado, entre outros parâmetros.

Os conectores de cisalhamento também são responsáveis por garantir o trabalho conjunto entre o perfil de aço e a laje de concreto. De acordo com Alves (2014), a função primária dos conectores de cisalhamento é transmitir forças de cisalhamento longitudinais quando a viga está fletida. Cabe destacar que existem vários tipos de conectores de cisalhamento, entre os quais mais se destacam: conectores do tipo pino com cabeça (*stud bolt*) e conectores em perfil U laminado, conforme apresentado na Figura 13. Além disso, estes dois modelos são os únicos previstos na NBR 8800 (ABNT,2008) para o dimensionamento de vigas mistas.

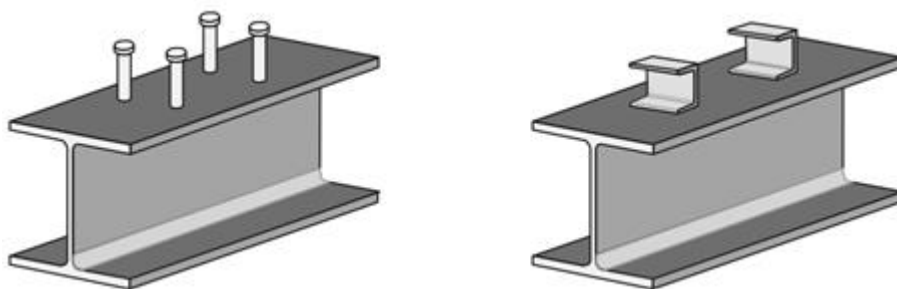


Figura 13 – Conectores de cisalhamento do tipo stud bolt e perfil U laminado (VERÍSSIMO, 2007)

3.2. Estados Limites Últimos

De acordo com Borghi (2020), algumas premissas devem ser seguidas para o dimensionamento do sistema *slim floor*. À priori, considera-se a viga simplesmente apoiada submetida a ações

uniformemente distribuídas, e sua análise plástica será em referência ao diagrama retangular de tensões. Ademais, os momentos e as forças correspondentes serão obtidos através de cargas majoradas pelos coeficientes de ponderação. Para as verificações de deslocamentos e vibrações serão verificados com as cargas sem coeficientes de majoração e a tensão na fibra extrema será limitada à f_y , ou seja, tensão de escoamento do aço. Recomenda-se também que as seções sejam divididas em classes de acordo com a análise global plástica, onde é avaliada a capacidade de rotação dos elementos que a compõem.

Segundo o EN 1994-1-1 (ECS, 2004), as vigas mistas podem ser classificadas de acordo com a análise global plástica, onde é avaliada a capacidade de rotação dos elementos que a compõem. Ela recomenda que essa distinção seja feita conforme previsto no EN 1993-1-1 (ECS, 2010). Desta forma, as quatro categorias opostas são definidas da subseqüente forma, apresentadas na Figura 14:

- Classe 1: aqueles onde uma rótula plástica pode ser construída, com potência rotacional necessária para análise, sem reduzir sua resistência;
- Classe 2: aqueles que podem atingir resistência plástica, mas sua resistência rotativa é limitada pela flambagem local;
- Classe 3: aqueles que podem atingir a tensão de escoamento, mas a flambagem local impede que o momento de resistência plástica seja alcançado;
- Classe 4: aquelas em que a flambagem local ocorre antes que a tensão de escoamento seja atingida em uma ou mais seções transversais.

Perfis de aço utilizados no sistema *slim floor*, por recomendação, devem ser das Classes 1 ou Classe 2, enquanto o emprego das seções das classes 3 ou 4 reduzem a resistência ao momento fletor. (PAES, 2003).

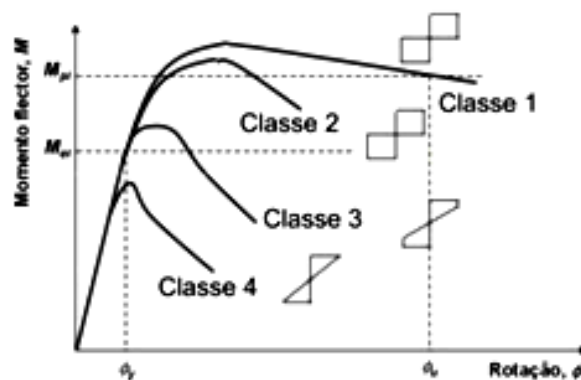


Figura 14 - Comportamento das seções à flexão (BORGHI,2020)

3.2.1. Fase de construção

Como citado anteriormente, na fase de construção, ainda não existe o comportamento misto da estrutura e, assim, o dimensionamento dos elementos do piso de pequena altura pode ser realizado como um piso misto convencional, tendo como base a NBR 8800 (ABNT, 2008), ou as normas internacionais.

Nesta fase, faz-se necessário realizar as verificações da laje resistindo isoladamente a todas as ações atuantes durante a construção, como peso próprio dos elementos, sobrecarga de construção e efeito de empoçamento, quando aplicável. Com a utilização das formas metálicas, a verificação depende da geometria da forma utilizada que, devido à sua pequena espessura, é bem suscetível a flambagem local.

Para as vigas, como é recomendada a utilização de perfis de aço das Classes 1 ou 2, são feitas as verificações para a flambagem lateral com torção (FLT), combinação dos esforços de flexão e torção e efeitos das tensões na mesa inferior do perfil utilizado, não sendo necessária a verificação para flambagem local.

3.2.1.1. Flambagem lateral com torção

A flambagem lateral com torção é um estado limite último que ocorre devido à ação do momento fletor na viga, em que a instabilidade é caracterizada pela saída lateral da parte comprimida do perfil e um giro da seção transversal no eixo principal de maior inércia. Segundo ABREU (2010), há três intervalos observados de comportamento da viga no estudo da flambagem lateral:

- flambagem elástica: comum em vigas que possuem grandes comprimentos destravados;
- flambagem inelástica: situação que ocorre em vigas que possuem comprimentos destravados intermediários, devido à instabilidade em alguma parte da seção transversal que já se plastificou;
- comportamento plástico: ocorre quando o comprimento destravado é suficientemente pequeno para que a plastificação total da seção transversal ocorra antes de qualquer tipo de instabilidade.

Segundo a NBR 8800 (2008), o momento crítico elástico M_{cr} é definido para vigas de grandes vãos e a flambagem inelástica é comumente definida se utilizando uma curva empírica

aproximada que forneça a solução para vigas de vãos intermediários, limitada pelo momento plástico $M_{cr} = M_{pl}$.

A flambagem lateral com torção ocorre no regime elástico caso o parâmetro de esbeltez λ seja maior que λ_r , determinados pelas equações (1) e (2) abaixo,

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (1)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} \quad (2)$$

onde L_b é o comprimento destravado, r_y é o raio de giração da seção em relação ao eixo y, I_y o momento de inércia em relação ao eixo Y, J a constante de torção, e C_w a constante de empenamento da seção transversal

No regime elástico, o momento fletor resistente para a flambagem lateral com torção é definida pela equação (3):

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w}\right)} \leq M_{pl} \quad (3)$$

sendo C_b um fator de momento equivalente que considera os momentos que ocorrem ao longo do comprimento destravado da viga (determinado pela equação (2)), E o módulo de elasticidade longitudinal do aço, E o módulo de elasticidade longitudinal do aço.

O coeficiente C_B é determinado conforme equação (4) abaixo:

$$C_b = \frac{12,5 |M_{\max}|}{2,5 |M_{\max}| + 3 |M_A| + 4 |M_B| + 3 |M_C|} R_m < 3,0 \quad (4)$$

Em que M_{\max} é o momento fletor máximo no comprimento destravado, M_A é o momento fletor na seção localizada a um quarto do comprimento destravado, M_B o momento fletor na seção central do comprimento destravado e M_C o momento fletor, na seção localizada a três quartos do comprimento destravado, situados a partir da extremidade da esquerda, e R_m é o parâmetro de monossimetria, aplicado a seções com um eixo de simetria e submetidas a curvatura reversa, tomado como 1,00 nos demais casos.

Para que a flambagem lateral com torção não aconteça por conta da plastificação total da seção transversal da viga, o parâmetro λ deve ser menor que λ_p , apresentado na equação (5). Assim, o momento fletor nominal resistente, M_{Rk} , será igual ao momento de plastificação, M_{pl} .

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (5)$$

Caso $\lambda > \lambda_p$, o momento resistente de cálculo, M_{Rd} , é obtido através da equação (6):

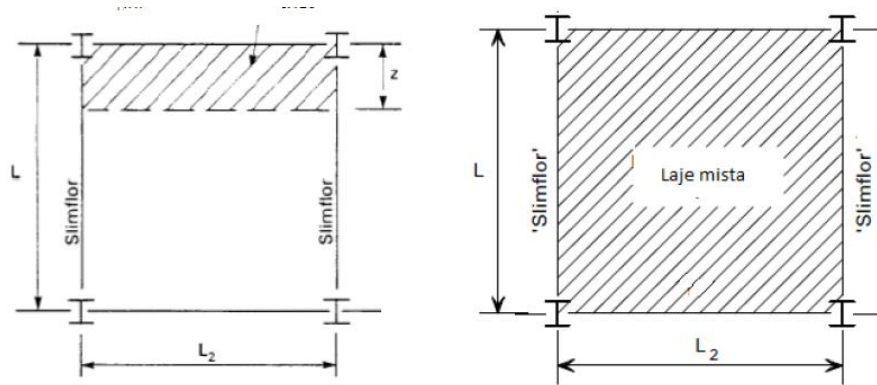
$$M_{b,Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} [M_{pl} - (M_{pl} - M_r)] \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r \lambda_p} \quad (6)$$

3.2.1.2. Combinação dos esforços de flexão e torção

No dimensionamento dos pisos do sistema *slim floor*, deve-se considerar que a laje se apoia no banzo inferior da viga metálica e, por isso, são gerados efeitos de torção, uma vez que a transmissão das cargas da laje para a viga ocorre fora do centro de cisalhamento e do eixo de simetria. Principalmente na fase de construção, essa característica deve ser analisada na verificação de segurança. (BORGHI,2020)

Independentemente do tipo de laje utilizada (pré-fabricada ou moldada in loco), apresentadas nas Figuras 15 e 16, à medida que ocorre sua instalação ou concretagem, geralmente é verificado o aumento dos efeitos de torção, devido a unilateralidade do descarregamento dos esforços da laje na viga. Segundo Barros (2011), caso a extensão dessas cargas aumente ao longo do vão, de igual maneira aumenta a probabilidade de ocorrer a torção ou a flambagem lateral com torção, devido ao aumento da carga não aplicada equilibradamente.

A verificação do efeito combinado de esforços de torção e flexão resulta do tipo da laje utilizada. Para efeito de dimensionamento e verificação da resistência da viga metálica no uso de lajes mistas ou moldadas in loco, pode-se analisar o caso mais desfavorável possível de carregamento, em que apenas um dos lados da viga possui a carga totalmente aplicada. Quando se der o uso de lajes pré-fabricadas, é possível estabelecer um número limite de módulos pré-fabricados da qual se torna necessária a colocação de módulos no lado oposto também, de modo que o desequilíbrio não ultrapasse um valor limite.



Figuras 15 e 16 – Laje pré-fabricada e laje moldada in loco (BORGHI, 2020)

Segundo BARROS (2011), para análise das cargas atuantes devido às lajes moldadas in loco, é considerada a soma do peso próprio da chapa, das armaduras e concreto como a carga W_1 , no lado em que a laje está concretada; a carga W_2 como o peso próprio da viga metálica, e a carga W_3 como o peso próprio da chapa e da armadura, uma vez que ainda não há concreto.

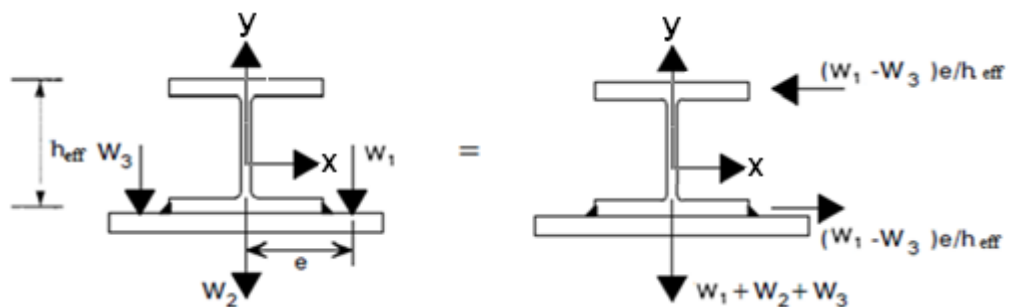


Figura 17 – Representação das cargas no sistema com lajes moldadas in loco (BORGHI, 2020)

Para às cargas atuantes referentes à instalação da laje pré-fabricada, a carga W_1 retrata o peso próprio das unidades pré-fabricadas e a sobrecarga para a etapa de construção e a carga W_2 representa o peso próprio da viga de aço. (CORDEIRO, 2013)

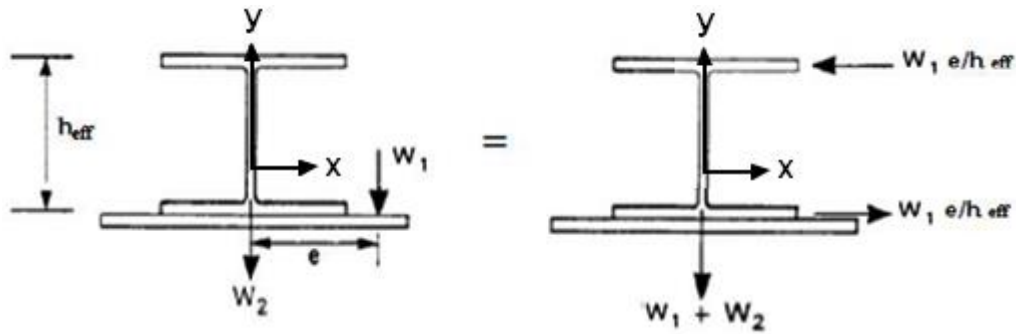


Figura 18 – Representação das cargas no sistema com lajes pré-fabricadas. (BORGHI, 2020)

Nesse sistema, o efeito de torção deve ser considerado tendo como base o empenamento. No banzo superior, as tensões devidas a torção se combinam com as tensões provenientes da flexão, sendo verificada de forma simplificada a partir da equação (7),

$$\frac{M_x}{M_{b,Rd}} + \frac{M_y}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (7)$$

em que M_x é o momento atuante na direção x, M_y é o momento transversal atuante na mesa superior segundo a direção y, $M_{b,Rd}$ é momento fletor resistente à flambagem, obtido conforme equação (8) e $M_{y,Rd}$ é o momento resistente da mesa superior segundo a direção y, definido pela equação (9). (BORGHI,2020)

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (8)$$

χ_{LT} : coeficiente de redução da flambagem lateral com torção;

$W_{pl,y}$: módulo de flexão plástico da seção em torno do eixo de maior inércia;

f_y : tensão de escoamento do aço;

γ_{M1} : coeficiente parcial de segurança em relação à flambagem, podendo ser tomado como 1,0.

$$M_{y,Rd} = \frac{b_t^2 t_t f_y}{4} \quad (9)$$

b_t : largura da mesa submetida a compressão;

t_t : espessura da mesa submetida à compressão.

3.2.1.3. Efeitos das tensões na mesa inferior do perfil

No sistema de piso de pequena altura, a laje é apoiada sobre o banzo inferior da viga. Por isso, são geradas tensões biaxiais nas eventuais chapas adicionais da viga (modelo SFB, por exemplo, apresentada na Figura 19) devido à distribuição de cargas. É considerado que as cargas são aplicadas no centro de cisalhamento, desprezando a força transferida pelas nervuras, que poderia diminuir este efeito. A chapa pode estar submetida a tensões longitudinais (σ_1) e ao mesmo tempo a tensões provocadas pela flexão transversal da própria chapa (σ_2), que podem provocar uma diminuição da sua resistência. (BORGHI, 2020)

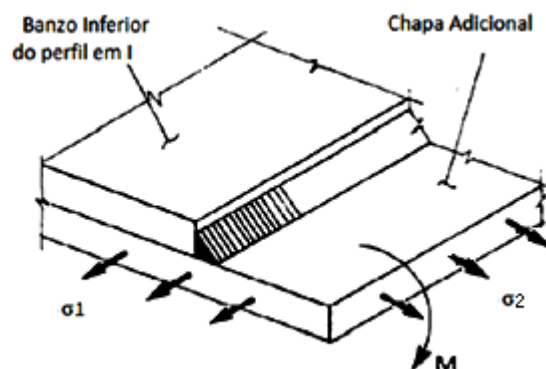


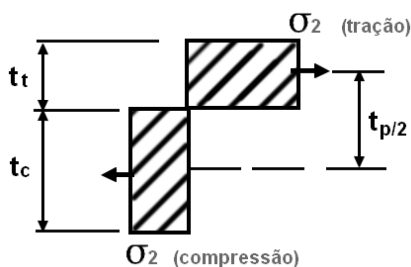
Figura 19 – Detalhe do banzo inferior da viga – tensões plásticas (BARROS,2011)

Para a verificação da chapa em questão, pode ser utilizado o critério de Von Mises:

$$f_y = \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1^2} \quad (10)$$

em que a tensão σ_2 pode ser tomado com valores positivos para compressão e negativos para tração, conforme abaixo:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 \pm (4f_y^2 - 3\sigma_1^2)^{1/2}}{2} \quad (11)$$



Para o equilíbrio:

$$t_t \sigma_2 (\text{tração}) = t_c \sigma_2 (\text{compressão})$$

Figura 20 – Banzo inferior – distribuição de tensões plásticas (adaptado de Barros, 2011)

A Figura 21 mostra o procedimento para o cálculo do momento transversal no banzo inferior da seção.

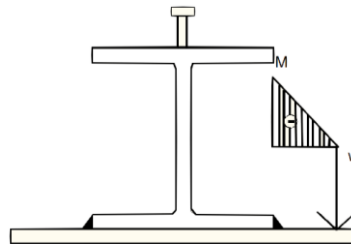


Figura 21 – Momento transversal M no banzo inferior metálico, numa viga do tipo ASB (BARROS,2011)

Com o equilíbrio das forças atuantes baseando-se na distribuição de tensões plásticas longitudinais no banzo inferior, obtém-se:

$$\frac{M}{M_P} = \frac{c^2 - \sigma_1^2}{2cf_y} \quad (12)$$

em que M se refere ao momento máximo transversal atuante, M_P representa o momento plástico resistente do banzo inferior – equação (13), e c é uma constante representada pela equação (14):

$$M_P = \frac{t^2 f_y}{4} \quad (13)$$

$$c = \sqrt{4f_y^2 - 3\sigma_1^2} \quad (14)$$

3.2.2. Fase de utilização

Uma vez comprovada a cura do concreto e após a remoção do escoramento da estrutura (quando necessário), já é constatado que o sistema se encontra na fase de utilização. Nesta etapa, é considerado o comportamento misto dos elementos aço e concreto para o dimensionamento do sistema *slim floor*. Como não existem normas brasileiras sobre este tema, são empregadas nas verificações dos elementos a norma BS 5950 3.1 (2001) e pesquisas já consolidadas, como a de Mullet (1992), Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Mullet e Lawson (1999). (BORGHI,2020)

As seções mistas são classificadas de acordo com o Quadro 2, levando-se em consideração a flambagem local da alma. Também é considerada uma distribuição retangular de tensões, indicando um valor limite da razão das tensões longitudinais na alma (r_1) para o cálculo da tensão de escoamento da alma. (BARROS, 2011; BORGHI, 2020)

Quadro 2 – Classificação da alma das seções de acordo com a norma BS 5950 3.1 (2001)

Tipo de elemento	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Alma com linha neutra da seção à meia altura	$\frac{d}{t_w} \leq 64 \epsilon$	$\frac{d}{t_w} \leq 76 \epsilon$	$\frac{d}{t_w} \leq 114 \epsilon$
Alma, caso geral	$\frac{d}{t_w} \leq \frac{64 \epsilon}{1 + r_i}$	$\frac{d}{t_w} \leq \frac{76 \epsilon}{1 + r_i}$	para $r \geq 0,66$ seções laminadas: $\frac{d}{t_w} \leq \frac{114 \epsilon}{1 + 2r_i}$ seções soldadas: $\frac{d}{t_w} \leq \left(\frac{41}{r_i} - 13 \right) \epsilon$ para $0,66 > r \geq 0$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{114 \epsilon}{1 + 2r_i}$ para $r < 0$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{114 \epsilon (1 + r_i)}{(1 + 2r_i)^{\frac{3}{2}}}$

Neste quadro, o valor ‘d’ representa a altura da alma do perfil metálico, t_w , a espessura da alma, ϵ é um coeficiente calculado por $\sqrt{\frac{275}{f_y}}$ e o coeficiente r_1 determinado conforme equação (15):

$$r_1 = \frac{F_c}{dt_w f_{yw}} \frac{(b_b t_b - b_t t_t)}{dt f_{yw}} \quad (15)$$

sendo que F_c representa a força de compressão axial, b_b a largura da mesa submetida à tração e b_t à compressão, t_b representa a espessura da mesa à tração e t_t à compressão e o coeficiente f_{yw} define a tensão de escoamento da alma.

Na fase de utilização, os elementos são verificados no estado limite último quanto à resistência à flexão, resistência da conexão de cisalhamento e armadura transversal.

3.2.2.1. Resistência à flexão

O momento fletor resistente de uma viga de piso de pequena altura ($M_{pl,Rd}$) é dependente do grau de conexão entre os elementos do sistema. Conforme citado anteriormente, também é considerado um diagrama retangular de tensões, e, neste caso, com tensão resistente do aço sendo f_y e $0,45 f_{cu}$ para a tensão resistente do concreto. A resistência à flexão é dada pela

verificação do momento plástico resistente da seção mista ($M_{pl,Rd}$) sendo maior que o valor do momento atuante máximo da seção (M_{Sd}), expresso na equação (16):

$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd} \quad (16)$$

Segundo Borghi (2020), o momento plástico resistente é obtido conhecendo-se a posição da linha neutra plástica (y_p) da seção mista, em relação ao topo da laje de concreto. Essa posição em um perfil I assimétrico geralmente é na alma, entretanto é necessário realizar o cálculo conforme o equilíbrio entre as forças de tração e compressão da seção determinado baseado no diagrama retangular de tensões. (BARROS, 2011)

Barros (2011) apresenta o cálculo da linha neutra plástica e do momento plástico resistente para uma estrutura *slim floor* formada por um perfil assimétrico associada a uma laje com fôrma de aço incorporada, tendo como premissas a altura da chapa (D_d) menor que a diferença entre altura efetiva do perfil metálico (h_{eff}) e a espessura do banzo tracionado (t_t). Esse modelo estrutural pode possuir a linha neutra plástica situada em cinco posições diferentes, como apresentado na Figura 22, e cinco valores para $M_{pl,Rd}$.

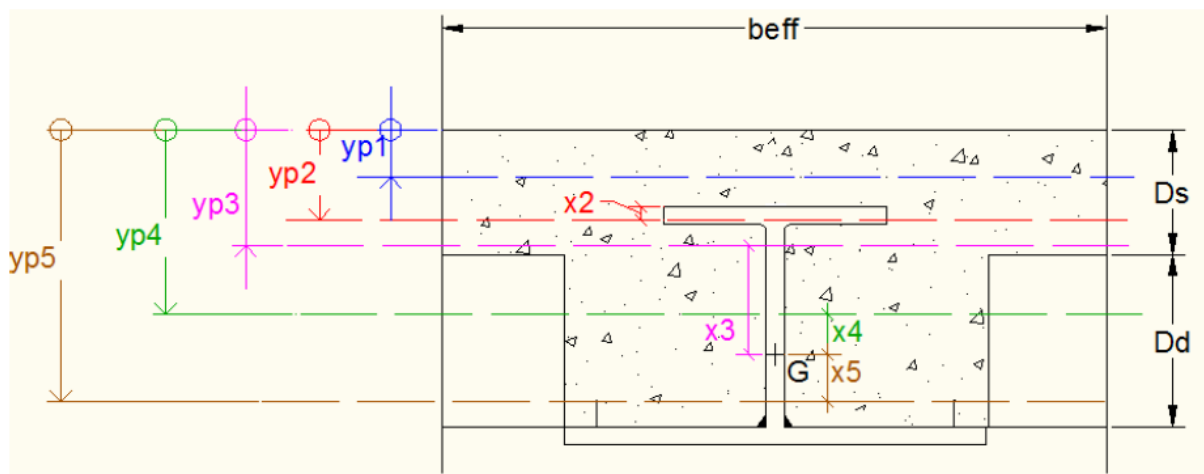


Figura 22 –Cinco possibilidades de posições das linhas neutras plásticas (BORGHI, 2020)

Simplificadamente, para o cálculo do $M_{pl,Rd}$, poderá ser tomado o valor de $L/4$ para a largura efetiva da laje de concreto (b_{eff}) para estruturas com ligações com conectores de cisalhamento ou de $L/8$ para ligações por aderência (cuja resistência está associada ao atrito entre uma ou mais interfaces aço-concreto) (BORGHI,2020). Entretanto, como existem áreas com distância ampla entre perfis, as tensões longitudinais na laje de concreto não são uniformes. Assim, o EN

1994 (CEN, 2004) determina uma relação de comprimento de concreto que permita considerar a distribuição de tensões como uniforme, calculando-as baseada nas distâncias entre pontos de momento fletor nulo, conforme a equação (17):

$$b_{eff} \leq b_0 + \sum b_{ei} \quad (17)$$

em que b_0 representa a distância entre os centros dos conectores; b_{ei} representa a largura efetiva da laje de concreto a cada lado da alma.

3.2.2.2. Conexão de cisalhamento

- Conexão total

Para que seja considerada uma conexão total ao corte entre os elementos da viga mista do tipo *slim floor* podem ser utilizados conectores tipo pino com cabeça ou conexão por aderência e barras de aço.

- Conectores tipo pino com cabeça

A interação com a utilização de conectores tipo pino com cabeça, ou stud bolt, impossibilita completamente o escorregamento vertical e longitudinal e a deformação relativa na área compartilhada entre aço e concreto. Neste caso, a quantidade de conectores deve ser igual ou superior ao número necessário para garantir a mobilização do momento plástico resistente da seção mista.

Sabendo-se a posição da linha neutra plástica, já explicada anteriormente, é possível determinar a força de ligação ao cisalhamento (F_p) entre uma seção de momento máximo positivo e uma seção de momento nulo, conforme equações (18), (19), (20) e (21).

$$R_c = 0,45 f_{cu} b_{eff} y_p \quad (18)$$

$$R_s = A f_y \quad (19)$$

$$R_p = A_p f_y \quad (20)$$

$$F_p = \min(R_c, R_s + R_p) \quad (21)$$

Nas equações, b_{eff} é a largura efetiva da laje de concreto, A_p é a área da chapa adicional, A representa a área do perfil metálico, R_c é o valor da força resistente do concreto, R_p é a força

resistente da chapa adicional e R_s , resistência do restante do perfil metálico. As forças resistentes são obtidas através do diagrama retangular de tensões, conforme exemplo apresentado na Figura 23, utilizando uma viga do tipo ASB.

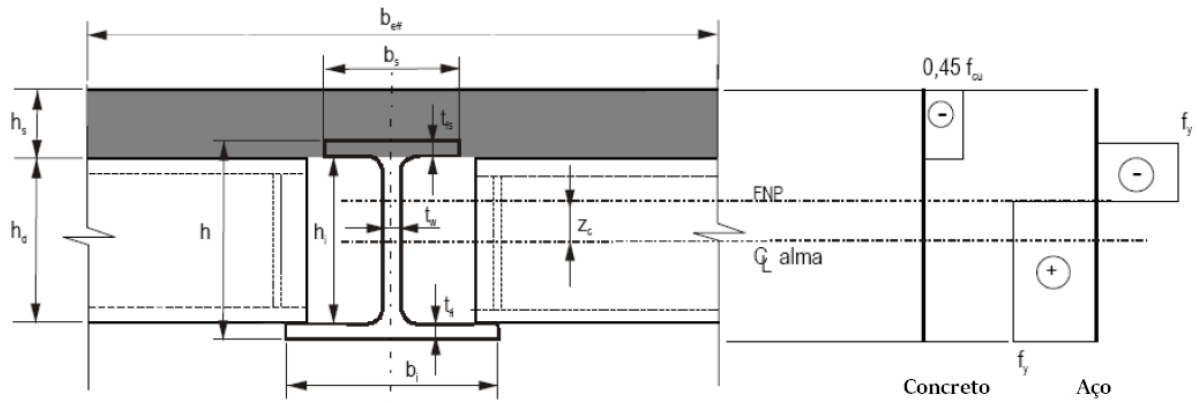


Figura 23 – Exemplo do diagrama retangular de tensões para uma viga do tipo ASB (JURADO,2008)

O número de conectores (N_p) necessários para a verificação da resistência ao esforço de cisalhamento depende de F_p e da força resistente dos conectores na região de momentos positivos (Q_p), calculados conforme equações abaixo:

$$N_p = \frac{F_p}{Q_p} \quad (22)$$

$$Q_p = 0,8Q_k \quad (23)$$

em que Q_k é a força resistente característica dos conectores.

- Conexão por aderência e barras de aço

Para o caso da utilização de conexão por aderência com armaduras, ocorre a interação completa entre os elementos quando se pode garantir a transferência da resistência à compressão (R_c), considerando a altura de laje de concreto acima da chapa de aço nervurada (D_s) dentro da largura efetiva (b_{eff}), conforme equação (24):

$$R_c = 0,45f_{cu}b_{eff}D_s \quad (24)$$

A interação completa é confirmada quando se compara a resistência à compressão com a força de cisalhamento longitudinal (F_{sb}), em que a transmissão ocorre através de tensões que se originam

ao longo do banzo superior do perfil metálico e dos dois lados da alma. A força F_{sb} é definida pela equação (25) abaixo:

$$F_{sb} = (2b_b - t_w + 2h_{eff})L \frac{f_{sb}}{2} \quad (25)$$

Onde f_{sb} representa a resistência média da aderência longitudinal do banzo superior e da alma.

Portanto, caso a linha neutra plástica (y_p) esteja localizada abaixo da altura da laje de concreto (D_s) a interação completa é verificada com a relação $F_{sb} \geq R_c$. Se y_p estiver localizada no banzo superior do perfil ou na alma, no interior da camada de concreto, existe interação completa ao corte se $F_{sb} \geq R_c y_p D_s$. (BORGHI,2020)

O Instituto Alemão de Engenharia Estrutural, DIBt (2019), apresenta os conceitos gerais de dimensionamento e execução de pisos mistos com viga tipo CoSFB. Esse perfil laminado possui aberturas circulares na alma ao longo de seu comprimento, que possibilitam a passagem de barras de aço para conexão entre o aço e o concreto. Neste caso, o valor característico da resistência ao cisalhamento longitudinal por abertura, P_{Rk} , apresentado no Quadro 2, depende diretamente da classe de resistência a compressão do concreto e da espessura da alma da viga metálica, t_w .

Quadro 2: Valores característicos da resistência ao cisalhamento longitudinal por recesso P_{Rk} (em kN)

Classe de resistência à compressão do concreto / Espessura da alma	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50 até C55/67
$7,5 \text{ mm} \leq t_w < 15,5 \text{ mm}$	117	125	135	122
$15,5 \text{ mm} \leq t_w$	148	157	166	122

Simplificadamente, são utilizados perfis com altura inferior a 650mm, com aberturas circulares variando de 25 a 40mm e armaduras com diâmetro mínimo 12mm de diâmetro. Para obtenção do valor resistente de projeto, P_{Rd} , deve-se tomar o valor da resistência característica P_{Rk} dividido pelo fator de segurança parcial $Y_v = 1,25$.

- Conexão parcial

A conexão parcial ocorre quando a resistência da aderência longitudinal entre a seção de uma viga mista de *slim floor* e a seção de concreto, não é o bastante para transferir a força resultante de compressão da laje de concreto (R_c). Neste caso, a resistência ao momento fletor dos elementos é menor, quando comparada com a conexão total. Para a determinação do momento

fletor resistente, calcula-se a resultante da compressão reduzida (F_{sb}), conforme equação (26): (CORDEIRO, 2013)

$$F_{sb} = 2(b_s + t_{fs} + h_i - 0,5t_w) \frac{L}{4} f_{sb} \quad (26)$$

onde f_{sb} representa a resistência média da aderência longitudinal do banzo superior e da alma. Segundo Barros (2011), estudos realizados determinaram que pode ser usado o valor de cálculo de 0,6 MPa para a resistência média da aderência longitudinal nos perfis ASB. Para vigas soldadas a chapas adicionais ou não (modelos IFB tipos A e B), o valor da resistência média da aderência longitudinal pode ser tomado segundo equações (27) e (28):

$$F_{sb} = (2b_p + t_w + 2h_{eff}) \frac{L_{cr}}{2} f_{sb} \quad (27)$$

$$F_{sb} = (2b + t_w + 2h_{eff}) \frac{L_{cr}}{2} f_{sb} \quad (28)$$

onde b_p representa a largura da chapa metálica adicional, b é a largura do banzo metálico da seção, t_w é a espessura da alma, L_{cr} é o comprimento de flambagem e h_{eff} é a altura efetiva da seção de aço, ou seja, a altura total da seção metálica menos a espessura da chapa adicional. (CORDEIRO, 2013)

3.2.3. Resistência à força cortante

Para a verificação da resistência do sistema ao esforço cortante, deve-se ser obedecida a premissa entre $V_{sd} < V_{pl,Rd}$. Neste caso, é considerado que apenas a seção de aço resiste à força cortante, não sendo contabilizada a resistência do concreto. Assim, a resistência ao esforço cortante é dada pela equação (29):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma M_0} \quad (29)$$

sendo f_y o valor correspondente à tensão de escoamento do aço; γM_0 o coeficiente parcial de segurança para a resistência da seção (sendo recomendado a utilização do valor igual a 1,0) e A_v a área resistente ao esforço cortante, que depende do tipo de seção a ser utilizada, conforme mostrado nas equações (30) e (31):

- Para perfis laminados em I ou H, com carga paralela à alma:

$$A_v = A_t - 2b_t t_t + (t_w + 2r) t_t \leq \eta d t_w \quad (30)$$

- Para perfis soldados em I, H ou caixão, com carga paralela à alma:

$$A_v = \eta \Sigma(dt_w) \quad (31)$$

3.2.4. Verificação da armadura de reforço transversal

A armadura de reforço tem a função de transmitir a força cortante longitudinal entre os conectores de cisalhamento e a laje e aumentar a resistência do sistema. Assim, é necessário verificar se estes critérios têm sido atendidos, utilizando novamente as recomendações da norma britânica BS 5950 3.1 (2001). Inicialmente, é obtido o valor da resistência ao cisalhamento longitudinal da laje por unidade de comprimento (v_r), através da equação (32) a seguir,

$$v_r = 0,7A_{sv}f_{ys} + 0,03\eta A_{cv}f_{ck} \leq 0,8\eta A_{cv}\sqrt{f_{ck}} \quad (32)$$

sendo A_{sv} a área resistente de armadura de reforço que transpassa a superfície de cisalhamento, f_y a tensão de escoamento do aço, η um coeficiente de valor unitário para concreto de densidade normal e A_{cv} a área da superfície de cisalhamento por unidade de comprimento (definida em 'a' ou 'b' dependendo do plano de corte, conforme Figura 24).

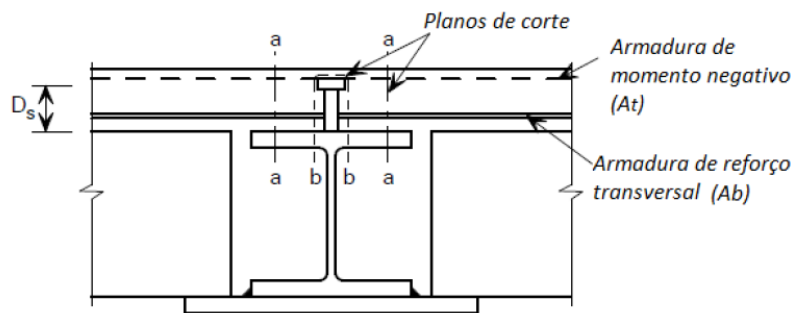


Figura 24 – Representação de planos de corte (BARROS, 2011)

Uma vez que o plano de corte se dê no plano 'a', a área de armadura de reforço (A_{sv}) se dá através da soma da área da armadura de momento negativo (A_n) e da área de armadura de reforço transversal (A_b), por unidade de comprimento. Caso o corte aconteça no plano 'b', caso se use conectores de cisalhamento, a área da armadura de reforço transversal (A_b) será considerada em duplicidade. Logo, a armadura de reforço é dimensionada, para uma força igual à que pode ser mobilizada pelos conectores, por unidade de comprimento, sendo necessário calcular a força longitudinal gerada (v), através da equação (33):

$$v = \frac{NQ}{s} \quad (33)$$

Em que s é o espaçamento entre os conectores; N representa o número de conectores na seção e Q é o valor de cálculo da força resistente de cada conector. (CORDEIRO, 2013)

3.3. Estados Limites de Serviço

Os estados limites de serviço abordados são o deslocamento vertical excessivo e vibrações nos elementos do sistema.

3.3.1. Controle de deformações/deslocamentos

O sistema *slim floor* possui alguns atributos importantes que podem gerar deformações excessivas no sistema, como a possibilidade de grandes vãos e, principalmente, a redução da altura total do piso. Segundo PAES (2003), alguns aspectos como o efeito *shear lag* (distribuição não uniforme de tensões ao longo da largura da laje de concreto), fissuração, retração e fluência do concreto, tipo de conexão de cisalhamento e processo construtivo também podem interferir no aparecimento de deformações e deslocamentos. Assim, é necessária uma priorização na verificação deste fenômeno, visando a prevenção de fissuração e as condições adequadas para os critérios de durabilidade e estética da estrutura.

Para o cálculo de uma viga sem escoramento, o valor da flecha devida às sobrecargas (δ_q) deve ser baseado nas propriedades da seção mista, ao passo que o deslocamento devido às cargas permanentes (δ_p) deve ser baseado nas propriedades da seção metálica. Entretanto, para vigas com escoramentos temporários, todos os deslocamentos devem ser baseados também nas propriedades da seção mista.

Assim, a verificação de uma viga simplesmente apoiada sem escoramentos possui os deslocamentos determinados a partir das equações (34) e (35) apresentadas abaixo:

$$\delta_q = \frac{5qL^4}{384(EI)_c} \quad (34)$$

$$\delta_p = \frac{5pL^4}{384(EI)_m} \quad (35)$$

sendo $(EI)_c$ o valor da rigidez da seção mista e $(EI)_m$ a rigidez da seção metálica.

Para o cálculo da rigidez à flexão da seção metálica, são multiplicados os valores do módulo de elasticidade do aço, E_a , e o momento de inércia do perfil metálico, I_a . Já para a obtenção da rigidez da seção mista, deve-se considerar o cálculo do momento de inércia da seção homogeneizada. A posição da linha neutra na seção mista é obtida considerando a distribuição linear de tensões na seção homogeneizada. Deve-se considerar a área do concreto convertida em uma área de aço equivalente, calculada através da redução de sua largura efetiva b_{eff} para uma largura transformada b_{tr} , obtida pela equação (36):

$$b_{tr} = \frac{b_{eff}}{\alpha_E} \quad (36)$$

sendo α_E a razão entre os módulos de elasticidade do aço, E_a , e do concreto, E_c . (FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS, 2016)

Segundo FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS (2016, p. 412), a linha neutra pode estar situada tanto no perfil metálico quanto na laje de concreto, conforme Figura 25. Para os cálculos da posição da linha neutra elástica na seção homogeneizada em relação à face inferior do perfil metálico, $Y_{tr,i}$, altura comprimida da laje de concreto, a , e momento de inércia transformado, I_{tr} , utilizam-se as equações (37), (38) e (39), respectivamente. Nos casos em que a linha neutra passa pela área da laje de concreto, é desprezada a parcela do concreto tracionado.

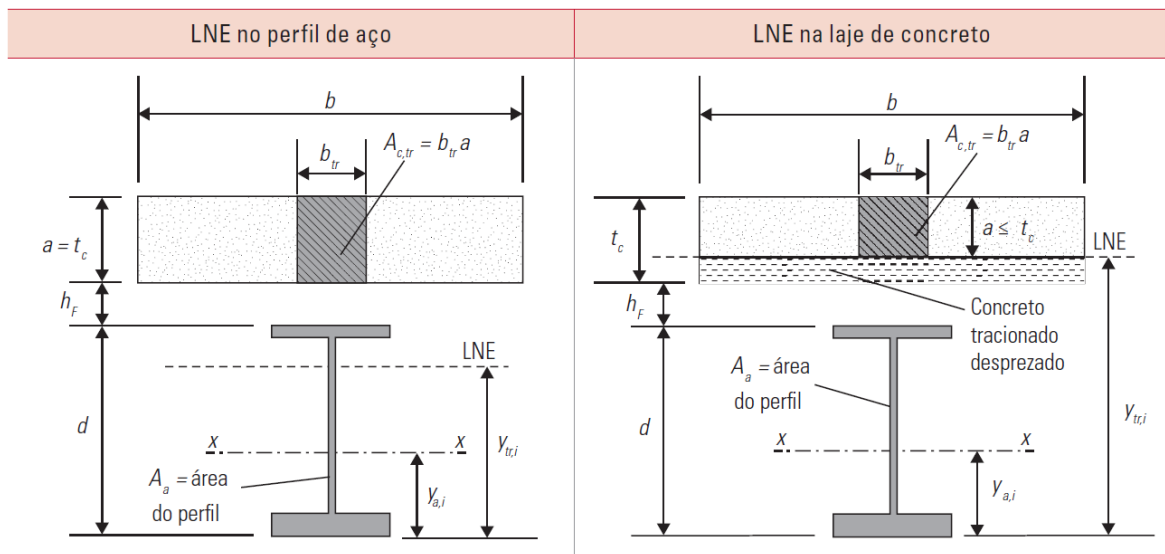


Figura 25 – Posição da linha neutra na seção homogeneizada (FAKURY; CASTRO E SILVA; CALDAS, 2016)

$$Y_{tr,i} = \frac{A_a Y_{a,i} + b_{tr} t_c \left(d + h_f + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + b_{tr} t_c} \quad (37)$$

em que A_a é a área do perfil de aço, $Y_{a,i}$ é a distância da face inferior ao centro do perfil, d é a altura do perfil, h_F é a altura das nervuras da fôrma de aço e t_c a altura da laje de concreto.

$$a = d + h_F + t_c - y_{tr,i} \leq t_c \quad (38)$$

$$I_{tr} = I_a + A_a(y_{tr,i} - y_{a,i})^2 + \frac{b_{tr}a^3}{12} + A_{c,tr} \left(d + h_F + t_c - \frac{a}{2} - y_{tr,i} \right)^2 \quad (39)$$

sendo $A_{c,tr}$ a área transformada de concreto, resultante do produto entre a largura efetiva transformada b_{tr} , e a altura da parte comprimida da laje de concreto.

Logo, o valor da rigidez à flexão da seção mista é definido pela equação (40):

$$(EI)_c = E_a I_{tr} \quad (40)$$

Segundo a norma BS 5950 3.1 (2001), é definido o limite de deslocamento para δq de $L/360$. Deve-se realizar também a verificação do deslocamento total (δ_{tot}), considerando-se a combinação rara de ações, conforme equação (41), com um limite de $L/200$. (BORGHI,2020)

$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} F_{Qi,k}) \quad (41)$$

sendo $F_{Gi,k}$ os valores característicos das ações permanentes, $F_{Q1,k}$ o valor característico da ação variável considerada principal; Ψ_{1j} o fator de redução, e $F_{Qi,k}$ os valores característicos das ações variáveis que podem atuar simultaneamente com a ação variável principal. (ABNT, 2008)

3.3.2. Controle de vibrações

Uma das características do piso *slim floor*, como o nome já diz, é possuir uma altura reduzida em relação aos pisos mistos convencionais. Essa esbelteza pode levar a estrutura a uma condição de maior sensibilidade aos efeitos de vibrações.

Para que a estrutura esteja em situações adequadas de conforto e durabilidade, é necessário impor um limite de frequência natural (f_n) do sistema. Segundo Borghi (2020), o limite especificado é de 3,55 Hz, enquanto o SCI (1992) delimita em 4Hz. Aproximadamente, a frequência natural de uma viga simplesmente apoiada pode ser determinada pelas equações (42) e (43):

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta_w}} \quad (42)$$

sendo a deformação máxima da viga (δ_w) simplesmente apoiada definida por:

$$\delta_w = \frac{5(p+0,1q)L^4}{384EI} \quad (43)$$

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

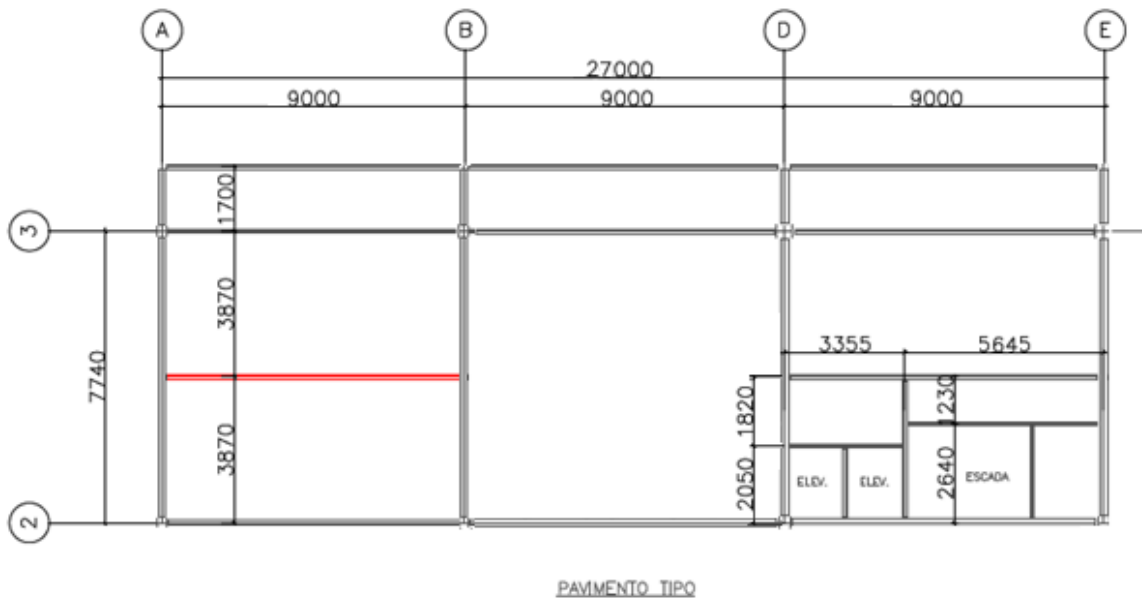
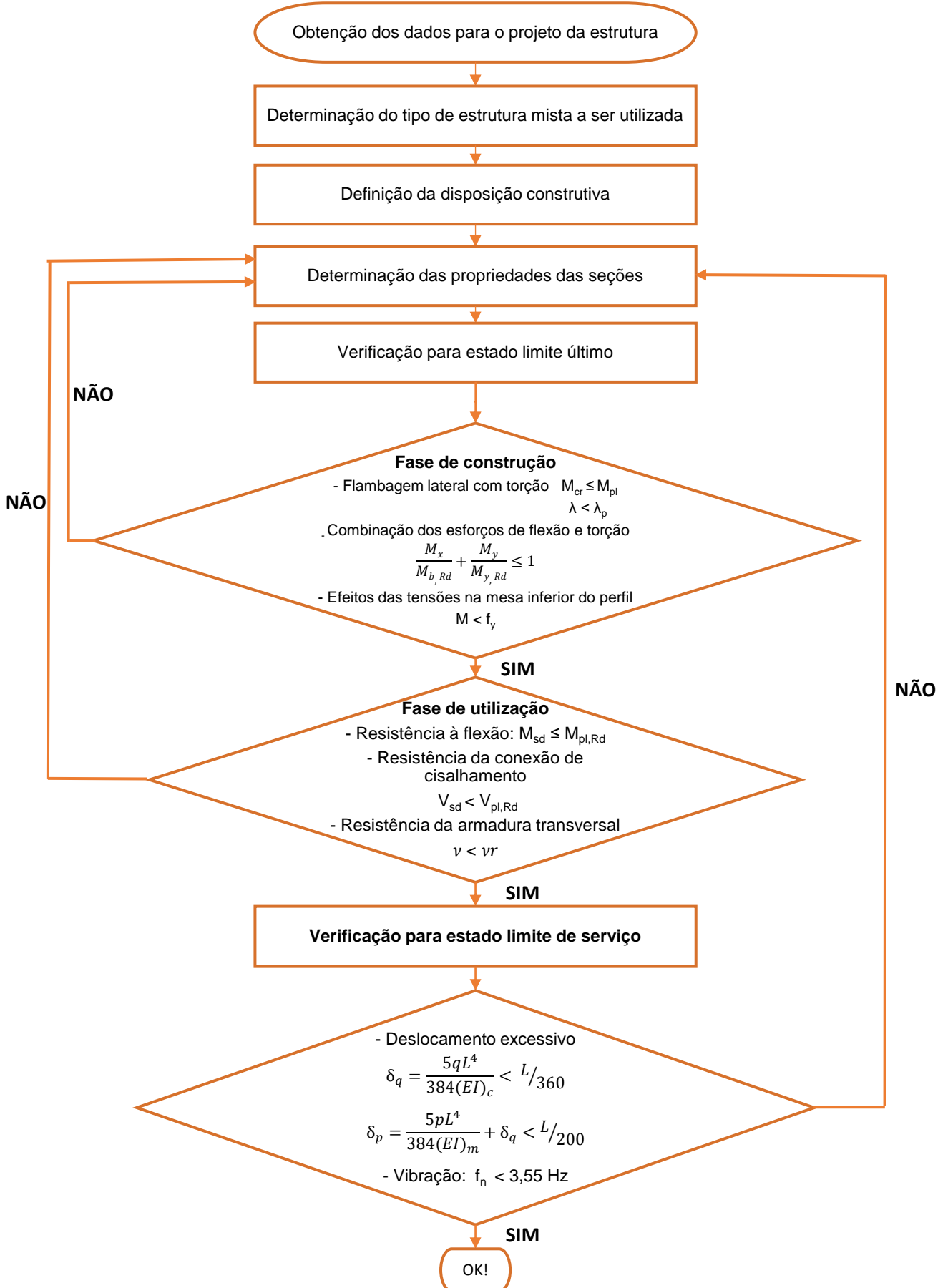


Figura 25 – Planta baixa de um pavimento tipo de edifício comercial

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso referente ao pavimento tipo de um edifício comercial, com o dimensionamento de uma viga mista do tipo *slim floor* realizado através dos conceitos e formulações apresentados no capítulo anterior. Será considerado o vão da viga de 9,0m, e largura de influência de 3,87m.



Para este exemplo, a tipologia adotada foi uma viga bi apoiada do tipo SFB, aço A572 Gr 50, com laje de concreto moldado in loco, com carregamento apresentado no Quadro 3 e esforços solicitantes apresentados para a fase de construção nas equações (44), (45) e (46) e fase de utilização nas equações (47), (48) e (49). Para o cálculo das combinações raras de serviço, para obtenção do limite de deslocamento, foi utilizada a equação (41).

Quadro 3: Tipos de sistemas com vigas embutidas na altura do pavimento – *slim floor*

Tipo de ação	Fase de atuação	Especificação	q_k (kN/m)	Total (kN/m)
Ações permanentes	Antes e depois da cura do concreto	Peças metálicas (perfis e elementos de ligação)	$0,40 \times 3,87 = 1,55$	26,71
		Laje de concreto	$25 \times 0,26 \times 3,87 = 25,16$	
	Somente após a cura do concreto	Revestimento do piso	$0,50 \times 3,87 = 1,94$	7,75
		Divisórias móveis	$1,5 \times 3,87 = 5,81$	
Ações variáveis	Somente durante a construção	Sobrecarga de construção	$1,0 \times 3,87 = 3,87$	3,87
	Somente após a construção	Sobrecarga de utilização	$3,0 \times 3,87 = 11,61$	11,61

- Fase de construção:

$$q_{pa,d} = 1,3 (26,71) + 1,2(3,87) = 39,37 \text{ kN/m} \quad (44)$$

$$M_{pa,Sd} = \frac{q_{pa,d} L_e^2}{8} = \frac{39,37 \times 9^2}{8} = 398,62 \text{ kNm} \quad (45)$$

$$V_{pa,Sd} = \frac{q_{pa,d} L_e}{2} = \frac{39,37 \times 9}{2} = 177,17 \text{ kN} \quad (46)$$

- Fase de utilização:

$$q_{vm,d} = 1,4 (26,71 + 7,75 + 11,61) = 64,50 \text{ kN/m} \quad (47)$$

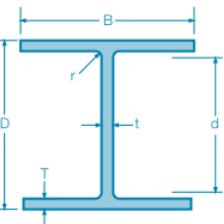
$$M_{vm,Sd} = \frac{q_{vm,d} L_e^2}{8} = \frac{64,50 \times 9^2}{8} = 653,00 \text{ kNm} \quad (48)$$

$$V_{vm,Sd} = \frac{q_{vm,d} L_e}{2} = \frac{64,50 \times 9}{2} = 290,25 \text{ kN} \quad (49)$$

- Combinações raras de ações

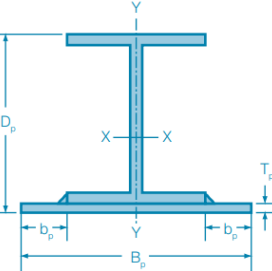
$$F_{ser} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\Psi_{1j} F_{Qi,k}) = (26,71 + 7,75) + 11,61 = 46,07 \text{ kN/m}$$

A viga metálica escolhida foi o perfil SFB de perfil I 356x368, cujas propriedades geométricas estão apresentadas nas Figuras 26 e 27.



Designation		Serial size	Mass per metre kg/m	Depth of section D mm	Width of section B mm	Thickness of web t mm	Thickness of flange T mm	Root radius r mm	Depth between fillets d mm	Ratios for local buckling		Second moment of area		Radius of gyration	
Flange B/2T	Web d/t									Axis x-x cm ⁴	Axis y-y cm ⁴	Axis x-x cm	Axis y-y cm		
356x368	202	201.9	374.6	374.7	16.5	27.0	15.2	290.2	6.94	17.6	66261	23688	16.1	9.60	
	177	177.0	368.2	372.6	14.4	23.8	15.2	290.2	7.83	20.2	57118	20529	15.9	9.54	
	153	152.9	362.0	370.5	12.3	20.7	15.2	290.2	8.95	23.6	48589	17553	15.8	9.49	
	129	129.0	355.6	368.6	10.4	17.5	15.2	290.2	10.5	27.9	40246	14611	15.6	9.43	

Figura 26 – Propriedades geométricas perfil I 356x368 (CORUS,2007)



Base section		Serial size	Mass per metre kg/m	Thickness of plate Tp mm	Width of outstand bp mm	Mass per metre of compound section kg/m	Depth of compound section Dp mm	Width of compound section Bp mm	Area of compound section cm ²	Elastic neutral axis position ye cm	Second moment of area	
											Axis x-x cm ⁴	Axis y-y cm ⁴
356x368	202	15	100	269.6	390	575	343.4	15.3	90779	47415		
	177	15	100	244.4	383	573	311.4	14.6	79968	43997		
	153	15	100	220.1	377	571	280.4	13.8	69732	40763		
	129	15	100	196.0	371	569	249.6	12.9	59541	37590		

Base section		Elastic modulus			Radius of gyration		Plastic neutral axis position	Plastic modulus		Buckling parameter	Torsional index	Warping constant	Torsional constant
Serial size	Mass per metre kg/m	Axis x-x top cm ³	Axis x-x bottom cm ³	Axis y-y cm ³	Axis x-x cm	Axis y-y cm	ye cm	Axis x-x cm ³	Axis y-y cm ³	u	x	H	J
356x368	202	3843	5918	1650	16.3	11.8	3.78	4687	3158	0.723	15.18	11.6	623
	177	3375	5468	1537	16.0	11.9	3.37	4085	2900	0.703	16.86	9.98	445
	153	2923	5036	1429	15.8	12.1	2.97	3510	2655	0.677	18.77	8.51	315
	129	2469	4598	1322	15.4	12.3	2.57	2943	2411	0.643	21.06	7.08	217

Figura 27 – Tabela de propriedades geométricas Perfil SFB (CORUS, 2007)

4.1. Estado Limite Último - Fase de Construção

- Flambagem lateral com torção –Considerando perfil 356x368 177

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{900}{11,9} = 75,63$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W_x}{E_a J} = \frac{(0,7 \times 34,5)3375}{20000 \times 445} = 0,0092/cm$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}} = \frac{1,38 \sqrt{43997 \times 445}}{11,9 \times 445 \times 0,0092} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 9,98 \times 10^6 \times 0,0092^2}{43997}}}$$

$$= 187,26$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{20000}{34,5}} = 42,38$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{b,Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right]$$

$$C_b = \frac{12,5 |M_{max}|}{2,5 |M_{max}| + 3 |M_A| + 4 |M_B| + 3 |M_C|} R_m < 3,0 \rightarrow$$

$$= \frac{12,5 |4036|}{2,5 |4036| + 3 |3021| + 4 |4036| + 3 |3018|} \times 1,0 = 1,138$$

$$M_{pl} = Z f_y = 4085 \times 34,5 = 140932,5 \text{ kNcm}$$

$$M_r = (f_y - \sigma_r)W_x = 0,7 \times 34,5 \times 5468 = 132052,2 \text{ kNcm}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{1,138}{1,1} \left[140932,5 - (140932,5 - 132052,2) \frac{75,63 - 42,38}{187,26 - 42,38} \right]$$

$$= 143692,6 \text{ kNcm} = 1432,93 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} > M_{pa,Sd} = OK!$$

- Combinação de esforços de flexão e torção

Considerando a condição mais desfavorável das combinações de esforços, a verificação é feita para a viga tendo apenas um dos lados com a laje totalmente aplicada.

$$W_1 = 1,35(25 \times 0,26) + 1,4 \times (1,0/2) = 9,48 \text{ kN/m}^2$$

$$M_x = \frac{(W_1 + W_q) L^2 b}{16} = \frac{9,48 \times 9^2 \times 3,87}{16} = 185,73 \text{ kNm}$$

$$M_y = \frac{e}{(h_{eff})} M_x = \left(\frac{B_p}{2} - \frac{b_p}{2} \right) M_x = \left(\frac{0,573}{2} - \frac{0,100}{2} \right) 185,73 = 119,36 \text{ kNm}$$

sendo B_p e b_p as larguras da chapa adicional soldada e largura da mesa inferior do perfil, respectivamente, D_p a altura total do perfil metálico e T_p a espessura da chapa adicional.

$$M_{y,Rd} = \frac{b_t^2 t_t f_y}{4} = \frac{36,86^2 \times 2,38 \times 34,5}{4} = 278,90 \text{ kNm}$$

$$M_{b,Rd} = 1432,93 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_x}{M_{b,Rd}} + \frac{M_y}{M_{y,Rd}} = \frac{185,73}{1432,93} + \frac{119,36}{278,90} = 0,56 < 1 \rightarrow OK!$$

4.2. Estado Limite Último - Fase de Utilização

- Resistência à flexão

$$y_p = D_s + t_b - z_1 = 0,26 + 0,015 - 0,146 = 0,129 \text{ m}$$

$$M_{pl,Rd} = 0,45 f_{cu} b_{eff} D_s \left(y_p - \frac{D_s}{2} \right) + f_y \left(b_t t_t \left(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_t}{2} \right) \right) \\ + t_w \left(\frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} + t_t)^2}{2} \right) + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} \\ + t_b b_b \left(D_s + D_d + \frac{t_t}{2} - y_p \right)$$

$$M_{pl,Rd} = 0,45 \times 30000 \times \left(\frac{3,870}{4} \right) \times 0,26 \left(0,129 - \frac{0,26}{2} \right) \\ + 345000 \left(0,3686 \times 0,0238 \left(0,129 - 0,26 + (0,383 - 0,015) - \frac{0,0238}{2} \right) \right) \\ + 0,0144 \left(\frac{(0,129 - 0,26 + (0,383 - 0,015) + 0,0238)^2}{2} \right) \\ + 0,0144 \frac{(0,26 - 0,129)^2}{2} + 0,0238 \times 0,3686 \left(0,26 + \frac{0,0238}{2} - 0,129 \right) \\ = 677,96 \text{ kNm}$$

$$M_{Sd} = 653,00 \text{ kNm} < M_{Rd} \rightarrow OK!$$

- Resistência da conexão de cisalhamento

Neste estudo, foram considerados conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça, com diâmetro de 19 mm.

$$R_c = 0,45 f_{cu} b_{eff} y_p = 0,45 \times 3 \times 96,75 \times 12,9 = 1684,90 \text{ kN}$$

$$R_s = Af_y = [311,4 - (57,3 \times 1,5)] \times 34,5 = 7778,03 \text{ kN}$$

$$R_p = A_p p_y = (57,3 \times 1,5) \times 34,5 = 2965,28 \text{ kN}$$

$$F_p = \min(R_c, R_s + R_p) = 1684,90 \text{ kN}$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{\pi \times 1,9^2}{4}\right) \sqrt{3 \times 2683,84}}{1,25} = 101,76 \text{ kN} \\ Q &= \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} = \frac{1 \times 1 \times \left(\frac{\pi \times 1,9^2}{4}\right) \times 41,5}{1,25} = 94,13 \text{ kN} \end{aligned} \right.$$

$$Q_p = 0,8 Q_k = 0,8 \times 94,13 = 75,3 \text{ kN}$$

$$N_p = \frac{F_p}{Q_p} = \frac{1684,90}{75,3} = 22,4 = 23 \text{ conectores}$$

$$A_v = A_t - 2b_t t_t + (t_w + 2r) t_t = 311,4 - 2 \times 36,86 \times 2,38 + (1,44 + 2 \times 1,52) \times 2,38 = 125,28 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma M_0} = \frac{125,28 \times \frac{34,5}{\sqrt{3}}}{1} = 2495,48 \text{ kN}$$

$$V_{vm,Sd} = 290,25 \text{ kN} < V_{pl,Rd} \rightarrow OK!$$

- Verificação da armadura de reforço transversal

Não foi considerada a utilização de armaduras de reforço transversal

4.3. Estado Limite de Serviço – Controle de Deslocamentos

$$b_{tr} = \frac{b_{eff}}{\alpha_E} = \frac{\left(\frac{L}{4}\right)}{\left(\frac{E_a}{E_c}\right)} = \frac{\left(\frac{387}{4}\right)}{\left(\frac{20000}{2683,84}\right)} = 12,98 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} Y_{tr,i} &= \frac{A_a Y_{a,i} + b_{tr} t_c \left(d + h_F + \frac{t_c}{2}\right)}{A_a + b_{tr} t_c} = \frac{311,4 \times \frac{38,3}{2} + 12,98 \times 0,26 \left(38,3 + 0 + \frac{0,26}{2}\right)}{311,4 + 12,98 \times 0,26} \\ &= 19,36 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$a = d + h_F + t_c - y_{tr,i} \leq t_c = 38,3 + 0 + 0,26 - 19,36 = 19,2 \text{ cm} < 26 \text{ cm}$$

$$A_{c,tr} = b_{tr} a = 12,98 \times 19,2 = 249,22 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 I_{tr} &= I_a + A_a(y_{tr,i} - y_{a,i})^2 + \frac{b_{tr}a^3}{12} + A_{c,tr} \left(d + h_F + t_c - \frac{a}{2} - y_{tr,i} \right)^2 \\
 &= 79968 + 311,4 \left(19,36 - \frac{38,3}{2} \right)^2 + \frac{12,98 \times 19,2^3}{12} \\
 &\quad + 249,22 \left(38,3 + 0 + 0,26 - \frac{19,2}{2} - 19,36 \right)^2 = 111907,29 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

$$\delta_q = \frac{5qL^4}{384(EI)_c} = \frac{5 \times 0,1161 \times 900^4}{384 \times 20000 \times 111907,29} = 0,44 \text{ cm} < \frac{L}{360} = \frac{900}{360} = 2,50 \text{ cm} \rightarrow OK$$

$$\delta_p = \frac{5pL^4}{384(EI)_m} = \frac{5 \times 0,3446 \times 900^4}{384(20000 \times 79968)} = 1,84 \text{ cm}$$

$$\delta_q = \frac{5F_{ser}L^4}{384(EI)_c} = \frac{5 \times 0,4607 \times 900^4}{384 \times 20000 \times 111907,29} = 1,76 \text{ cm} < \frac{L}{200} = \frac{900}{200} = 4,50 \text{ cm} \rightarrow OK$$

4.4. Estado Limite de Serviço – Vibração

$$\delta_w = \frac{5(p + 0,1q)L^4}{384EI} = \frac{5(0,3446 + 0,1 \times 0,1548)900^4}{384 \times 20000 \times 79968} = 1,92 \text{ cm}$$

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta_w}} = \frac{18}{\sqrt{1,92}} = 12,98 \text{ Hz} > 3,5 \text{ Hz} \rightarrow OK$$

O estudo de caso apresentado demonstrou que o perfil utilizado satisfaz as premissas indicadas para a utilização dessa estrutura.

5. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento dos processos construtivos industrializados e a crescente utilização de estruturas mistas no Brasil, há a necessidade da ampliação dos estudos e pesquisas sobre diferentes e eficientes soluções nestas áreas. Este trabalho evidenciou algumas características importantes sobre o sistema *slim floor*, que ainda merecem atenção no país.

O sistema de piso de pequena altura, apesar de possuir um maior consumo de concreto, que pode gerar flechas maiores nas estruturas, apresenta vantagens em relação ao sistema misto convencional nos âmbitos construtivos, estéticos e, em edifícios de múltiplos pavimentos,

apresenta também uma redução econômica significativa, uma vez que um de seus principais benefícios é a diminuição da altura total do piso, podendo, assim, executar um edifício com maior número de pavimentos.

Além disso, nesse sistema, também são utilizadas novas formas de conexões ao cisalhamento como por exemplo, as barras de armaduras. Nesse caso, são dispensadas as soldagens *in loco* dos conectores de cisalhamento e permite diminuição dos custos com os equipamentos.

É essencial reforçar a importância das pesquisas para esse tipo de sistema construtivo no Brasil, inclusive para criação de diretrizes normativas de dimensionamento. É importante também o estudo e desenvolvimento de novos sistemas de lajes compatíveis com as necessidades do *slim floor*. Dessa forma, é possível expandir e impulsionar o uso deste tipo de sistema, garantindo maior competitividade das soluções em aço em edifícios de múltiplos pavimentos frente ao concreto armado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. M. P. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço celulares**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ALVES, A. R. L. **Teste de comportamento do conector Crestbond em vigas compostas**. 2014. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Cursos de Mestrado Integrados em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2014.

AMADIO, C.; FRAGIACOMO, M. **Avaliar o alcance prático de vigas mistas aço-concreto**. Journal of Constructional Steel Research, vol. 58, p.373-388, 2002. Elsevier.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTIONAL - ANSI / AISC 360: **Especificação de Estruturas Estruturais de Aço**. 5ª ed. Chicago, EUA, 2005. 518 p.

ANDRADE, D. M. **Comparativo de dimensionamento de pavimento misto de STEEL DECK com o sistema SLIM FLOOR utilizando o software CoSFB**. 2017. 68 f.

ARCELORMITTAL. **Viga composta de piso fino (CoSFB)**. Boletim Técnico da ArcelorMittal, 2015. 40 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas metálicas e metálicas mescladas com estruturas de concreto**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.

_____. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 238p.

BAILEY, C.G. **O comportamento de um pequeno metal assimétrico no fogo**. Construction Metal Research Journal. v. 50, pág. 235-257, 1999.

BARROS, M. O. **Análise e dimensionamento de pavimentos mistos slim floor**. 2011. 132p. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2011.

BONO, Giuliana Furtado Franca. **Modelos básicos para análise tridimensional de estruturas de concreto armado usando um método de recursos limitados**. 208 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

BORGHI, T. M. **Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise numérica das tipologias**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2020. 177p.

BRAUN, Matthias. **CoSFB, Composite Slim-floor Beam Integrated Floor Beam Solution with Resistance to Fire**. Oslo, Noruega: Norwegian Steel Day 2015, 2015. 30 slides, color.

CARINI, M. R. **Estruturas mistas de aço e concreto: projeto de edifício comercial**. 2014.

COMITÉ EUROPEU DE PADRÕES DE QUALIDADE. TS EN 1994-1-1 Eurocódigo 4 - **Projeto Misto de Metais e Edifícios de Concreto - Parte 1-1: Códigos e regulamentos gerais de construção** Bruxelas, 2004.

COMITÉ EUROPEU DE PADRÕES DE QUALIDADE. TS EN 1993-1-1 Eurocódigo 3 - Projeto sazonal - Parte 1-1: **Regras gerais e códigos de construção**. Bruxelas, 2010.

CORDEIRO, M. C. **Projeto de estruturas de edifícios com pavimentos mistos tipo “slim floor”**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra. 2013

FAKURY, Ricardo; CASTRO E SILVA, Ana Lydia; CALDAS, Rodrigo. **Dimensionamento básico de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Person, 2016.

FILIPE, F. M. C. **Avaliação numérica do comportamento de vigas mistas aço betão do tipo Slim Floor**. 2014. 80p.

JURADO, M. G. **Estudio del comportamiento estructural de los forjados tipo “slim floor” bajo cargas de servicio**. 2008. 154p. Tesis (Doctorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2008.

KOCHEM, R.F.F; DE NARDIN, S. **Piso misto de pequena altura: componentes e processo construtivo**. 2018. 168p.

KUHLMANN, Ulrike. Training Course "Composite Construction - Slim-floor systems". Oslo, Noruega: Institute of Structural Design, 2012. 273 slides, color.

MESQUITA, L. C. **Avaliação do comportamento estrutural de vigas mistas de slim floor com aberturas na alma**. 2016. 203p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

MULLET, D. L. Slim Floor Design and Construction. **Relatório Técnico P110**. The Steel Construction Institute, 1992. 174

LAWSON, R. M.; MULLET, D. L.; RACKHAM, J. W. Design of Asymmetric Slimflor Beams using Deep Composite Decking. **Relatório Técnico P175**. The Steel Construction Institute, 1997.

MULLET, D.L.; LAWSON, R.M. Design of Slimflor Fabricated Beams using Deep Composite Decking. **Relatório Técnico P248**. The Steel Construction Institute, 1999.

PAES, J. L. R. **Aportaciones al análisis del comportamiento estructural de sistemas de forjados mixtos tipo "Slim floor"**. Departamento de Engenharia da Construção, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2003.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J.; MATINS, A.G. Estruturas mistas. 2. Ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2012. v.1

RAMOS, A. L. **Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura**. 2010. 138p.

REIS, M. R. P. **Utilização do sistema de lajes mistas slim floor em habitações de interesse social**. 2018. 48p.

SANTOS, V. J. M.; LIMA, D. M.; SAKIYAMA, F. I. H. Slim floor: método de dimensionamento e estudo paramétrico. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.106-117, 17 nov. 2016. Universidade Federal de Goiás.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. 2007. 316p.