

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

TAINÁ MASCARENHAS BORGHI

**Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise
numérica das tipologias**

SÃO CARLOS

2020

TAINÁ MASCARENHAS BORGHI

**Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise
numérica das tipologias**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs

SÃO CARLOS

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B732c Borghi, Tainá Mascarenhas
Contribuição ao estudo do piso misto de pequena
altura: análise numérica das tipologias / Tainá
Mascarenhas Borghi; orientador Ana Lucia Homce de
Cresce El Debs. São Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

1. Estruturas mistas. 2. Piso misto de pequena
altura. 3. Simulação numérica. 4. Tipologias. I.
Titulo.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **TAINÁ MASCARENHAS BORGHI**.

Título da dissertação: "Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise numérica das tipologias".

Data da defesa: 20/03/2020

Comissão Julgadora

Resultado

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs** APROVADA

(Orientadora)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EEESC)

Prof. Dr. **Alex Sander Clemente de Souza**

(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Dr. **Jose Luiz Rangel Paes**

(Universidade Federal de Viçosa/UFV)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por guiarem meus passos na jornada da vida, sempre com fé e esperança.

Agradeço aos meus pais, Idalina e Giorgio, exemplos que sempre procuro seguir. Obrigada pelo amor, dedicação e grande apoio, pois mesmo com a distância, sempre estiveram presentes, me motivando nessa caminhada. Às minhas irmãs, Gabriela, Letícia e Ana Vitória que, de diversas maneiras, me lembram sempre do mais puro amor. Ao meu namorado Daniel, pelo companheirismo, paciência e carinho. Aos meus padrinhos, Franca e Gabrielle, por sempre torcerem pela minha felicidade.

À minha orientadora Prof^a. Ana Lúcia El Debs pelas orientações, disponibilidade e serenidade com que conduziu o nosso processo. Agradeço pela confiança, atenção e paciência ao longo da minha trajetória no mestrado.

Aos colegas de turma do mestrado e amigos do SET. À força feminina, Adriana, Aline, Anne, Camila, Mariane e Paula, que foi a minha família São-carlense. Aos meus companheiros de luta, Matheus Rocha, Ray, Sergiomar e Thomas. Ao colega e amigo Lucas Antônio, pela grande disponibilidade e contribuições dadas ao trabalho final.

Aos professores Vladimir Haach e Maximiliano Malite pelas sugestões dadas na qualificação.

Aos funcionários e professores do Departamento de Estruturas da EESC-USP pelo apoio na realização desse trabalho.

Aos amigos de longa data e parentes pelo apoio psicológico, tornando a caminhada mais leve. Em especial Alice, Mariele, Isabela Serrano, Clarice, Isabela Garboggini, Nathalia e Mayana.

À Universidade Federal da Bahia (UFBA) e aos professores dessa instituição, pela formação dada e motivação para fazer o mestrado.

Agradeço ao Conselho Nacional Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa do mestrado.

Enfim, agradeço a todos que estiveram presentes nessa jornada, me apoiando e acreditando no meu potencial.

“[...] Confio, e muito, no pensamento dos grandes homens,
mas reivindico o meu direito próprio de pensar”

(Sêneca)

RESUMO

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

A indústria da construção civil vem exigindo estratégias cada vez mais eficientes para economizar tempo e diminuir os custos da construção. Nesse contexto, foram desenvolvidas as estruturas mistas, que aproveitam as vantagens do aço e do concreto. Além dos componentes mistos convencionais já consolidados na construção, outros elementos estruturais vêm se firmando mundialmente, como é o caso do piso misto de pequena altura, também conhecido como *slim floor*. Esse sistema é composto por vigas de aço e lajes de concreto ou mistas, com a finalidade de reduzir a altura total do piso, por meio da introdução da laje na altura da viga. Existem muitas combinações possíveis para compor o *slim floor*, podendo variar tanto o tipo de laje empregado, quanto o perfil de aço ou a posição dos conectores de cisalhamento. Nesse sentido, muitas são as tipologias encontradas na literatura, principalmente em relação às seções da viga, mas, apesar de bastante promissor, esse tema ainda possui pesquisas bastante iniciais. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento à flexão de quatro tipologias de piso misto de pequena altura e compará-las. As tipologias analisadas foram escolhidas de acordo com o levantamento teórico realizado, sendo elas a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), *Deltabeam*®, *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) e *Shallow Cellular Composite Floor Beam* (SCCFB). A avaliação foi feita numericamente, empregando o ABAQUS, programa computacional em elementos finitos. Foi realizada a calibração dos modelos a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura. Após a validação, os modelos foram padronizados quanto às dimensões geométricas básicas e propriedades dos materiais e simulados numericamente, permitindo realizar uma comparação do comportamento estrutural das tipologias. Os resultados mostraram que características particulares dos perfis, como aberturas na alma e formato de Delta, aumentam significativamente a rigidez e capacidade resistente dos pisos mistos de pequena altura em relação ao sistema com o perfil I assimétrico. Em complemento, foi desenvolvido um estudo paramétrico avaliando a influência de dois parâmetros do concreto e dois do aço no comportamento a flexão das tipologias, mostrando que o aço interfere de maneira mais significativa nesse comportamento.

Palavras-chave: Estruturas Mistas. Piso Misto de Pequena Altura. Simulação Numérica. Tipologias.

ABSTRACT

BORGHI, T. M. **Contribution to the study of slim floor: numerical analysis of the typologies**. 2020. 177p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structures)) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

The construction industry is demanding increasingly efficient strategies to save time and reduce construction costs. In this context, composite structures emerged, which enjoy of the advantages of steel and concrete, creating a system more resistant, economic and of easy assembly. In addition to conventional composite components, other structural elements have being established worldwide, like the slim floor. This system consist in steel beams and concrete or composite slabs, for the purpose of reducing the total height of the floor by introducing the slab at the height of the beam. There are many possible combinations to compose the slim floor, may vary the type of slab and steel profile employed and the position of the shear connections. In this sense, there are many typologies found in the literature, mainly in relation to the variety of beam sections. But, although quite promising, these researches are still incipient. Thus, this work aims to evaluate the flexural behavior of four typologies of slim floor and to compare them. The typologies analyzed were chosen according to the theoretical survey carried out, namely Asymmetric Slimflor Beam (ASB), Deltabeam®, Composite Slim-Floor Beam (CoSFB) and Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB). The evaluation was made numerically, using ABAQUS, a computer program in finite element. The models were calibrated based on experimental results willing in the literature. After validation, the models were standardized as to the basic dimensions and materials properties and simulated numerically, allowing a reliable and accurate comparison. The results showed that particular characteristics of the profiles, such as web openings and Delta shape, significantly increase the stiffness and flexural resistant of the slim floor in relation to the system with the asymmetric I profile. In addition, a parametric study was developed evaluating the influence of two concrete parameters and two steel parameters on the flexural behavior of typologies, showing that steel interferes more significantly in this behavior.

Keywords: Composite structures. Slim floor. Finite element modeling. Typologies.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área da alma somada à área da mesa superior
A_b	Área da armadura de reforço transversal
A_{cv}	Área da superfície de cisalhamento por unidade de comprimento
A_n	Área da armadura de momento negativo
A_p	Área da mesa inferior ou chapa adicional
A_r	Área da armadura de reforço
A_{sv}	Área da armadura da laje para momento negativo
A_s	Área resistente de armadura de reforço que atravessa a superfície de corte
A_t	Área total do perfil
A_v	Área resistente ao esforço transversal
b_b	Largura da mesa inferior do perfil de aço
b_{eff}	Largura efetiva da laje de concreto
b_{ei}	Largura efetiva da laje de concreto de cada lado da alma
b_t	Largura da mesa superior do perfil de aço
D_d	Altura da chapa nervurada
D_s	Altura de concreto moldado <i>in loco</i> acima da chapa nervurada
d	Altura da alma do perfil de aço
E	Módulo de elasticidade do aço
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
e	Excentricidade de aplicação da carga
F_c	Força de compressão axial (negativa para a tração)
F_p	Força de ligação de cisalhamento
F_{sb}	Força de cisalhamento longitudinal
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto moldado no local
f_n	Frequência natural da estrutura
f_{sb}	Tensão média da aderência longitudinal da mesa superior e da alma
f_t	Resistência à tração do concreto
f_u	Tensão limite última do aço
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_{yf}	Tensão de escoamento das mesas
f_{ys}	Tensão de escoamento do aço da armadura
f_{yw}	Tensão de escoamento da alma
f_{b0}/f_{c0}	Relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial
G	Módulo de distorção do aço estrutural
H	Constante de empenamento
h_{eff}	Altura da alma somada à altura da mesa superior do perfil de aço
I_c	Momento de inércia da seção mista não fissurada
I_t	Momento de inércia à torção
I_x	Momento de inércia em x
I_y	Momento de inércia em y
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia
J	Constante de torção da seção estrutural
k	Fator de forma
L	Comprimento do perfil

M_0	Momento máximo na viga simplesmente apoiada
M_{Sd}	Momento atuante máximo na seção
$M_{b,Rd}$	Momento resistente à flambagem lateral
M_{cr}	Momento crítico elástico de flambagem lateral
$M_{pl,Rd}$	Momento plástico resistente da seção mista
M_x	Momento atuante segundo a direção x-x;
M_y	Momento transversal atuante na mesa superior segundo a direção y-y
N_n	Número de conectores
Q_k	Força resistente característica dos conectores
R_c	Força resistente do concreto
R_p	Força da mesa inferior ou chapa adicional
R_s	Força do restante do perfil de aço
r_y	Raio de giração
t_b	Espessura da mesa inferior do perfil de aço
t_t	Espessura da mesa superior do perfil de aço
t_w	Espessura da alma do perfil de aço
V_{Sd}	Resistência ao esforço solicitante
$V_{pl,Rd}$	Resistência ao esforço transversal
y_e	Posição da linha neutra elástica da seção mista
y_p	Posição da linha neutra plástica da seção mista
W_1	Peso da laje do concreto em um lado
W_2	Peso próprio da viga de aço
W_q	Sobrecarga para a fase de construção
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico da seção em torno do eixo de maior inércia
z	Altura total de seção de aço
z_1	Distância da linha neutra elástica até a superfície interna da mesa inferior
z_2	Distância da linha neutra elástica até a superfície externa da mesa superior
α_{LT}	Fator de imperfeição para a flambagem lateral
α_e	Coefficiente de equivalência
γ_{M1}	Coefficiente parcial de segurança em relação à flambagem
δ_p	Deslocamento devido à cargas permanentes
δ_q	Deslocamento devida às sobrecargas
δ_{tot}	Deslocamento total
δ_w	Deslocamento máxima da viga
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza adimensional para a flambagem lateral
μ	Parâmetro de viscosidade
v	Força longitudinal gerada
v_r	Resistência ao cisalhamento longitudinal da laje por unidade de comprimento
ρ	Excentricidade
σ_1	Tensões longitudinais
σ_2	Tensões provocadas pela flexão transversal
ψ	Ângulo de dilatação
χ_{LT}	Coefficiente de redução da flambagem lateral

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Pisos mistos	24
Figura 1.2: Tipos de seções dos perfis de aço	25
Figura 2.1: Sistemas slim floor históricos	34
Figura 2.2: Variações Hat beam	35
Figura 2.3: Thor-beam e Universal column	36
Figura 2.4: Slimflor	36
Figura 2.5: Slimdek® e vedação da laje-viga	37
Figura 2.6: Deltabeam®	37
Figura 2.7: Integrated Floor Beam	38
Figura 2.8: Composite Slim-Floor Beam (CoSFB)	38
Figura 2.9: UPE slimfloor system	39
Figura 2.10: <i>D-beam</i>	39
Figura 2.11: iTECH system	40
Figura 2.12: Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)	40
Figura 2.13: Tipologia estudada por Derysz, Lewinski e Wiech (2017)	41
Figura 2.14: Aplicações do piso misto de pequena altura - Floralis	41
Figura 2.15: Aplicações do piso misto de pequena altura - ArcelorMittal Maizieres Research	42
Figura 2.16: Aplicações do piso misto de pequena altura - Galerie Kons	42
Figura 2.17: Exemplos de utilização do piso misto de pequena altura	43
Figura 2.18: Protótipo Codeme S.A.	44
Figura 2.19: Ensaio experimental Lawson, Mullett e Rackham (1997)	45
Figura 2.20: Esquema da interface aço-concreto utilizado por Paes (2003)	46
Figura 2.21: Teste experimental em perfis iTECH	46
Figura 2.22: Estudo experimental e numérico realizado por Peltonen et al. (2016)	49
Figura 2.23: Esquema da configuração das conexões de cisalhamento	50
Figura 2.24: Perfil estudado por Derysz, Lewinski, Wiech (2017)	51
Figura 2.25: Posição dos conectores em vigas parcialmente revestidas	53
Figura 2.26: Modelo numérico proposto por Ramos (2010)	54
Figura 2.27: Modelo ensaiado por Souza (2016)	55
Figura 3.1: Diagrama força x deslizamento relativo Aço-concreto	62
Figura 3.2: Distribuições de deformações para os tipos de interações	63
Figura 3.3: Posição dos conectores em vigas I parcialmente revestidas	64
Figura 3.4: Conexão de cisalhamento através de barras de aço	64
Figura 3.5: Denominação das dimensões das duas tipologias estudadas	66
Figura 3.6: Comportamento das seções à flexão	67
Figura 3.7: Classificação da alma de seções pelo Eurocode 3 (2005)	68
Figura 3.8: Classificação da mesa de seções pela norma Eurocode 3 (2005)	69
Figura 3.9: Consideração das lajes na verificação do slim floor	71
Figura 3.10: Cargas atuantes no sistema composto por lajes pré-fabricadas	71
Figura 3.11: Cargas atuantes no sistema composto por lajes moldadas in loco	72
Figura 3.12: Tensões plásticas na mesa inferior	73

Figura 3.13: Distribuição de tensões plásticas na mesa inferior	74
Figura 3.14: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5	76
Figura 3.15: Distribuição retangular de tensões	78
Figura 3.16: Transferência de corte ao longo da superfície interna da viga de aço	79
Figura 3.17: Planos de corte	80
Figura 3.18: Layout do piso misto de pequena altura (mm)	84
Figura 4.1: Dimensões Asymmetric Slimflor Beam (280ASB).....	92
Figura 4.2: Modelo físico Lawson, Mullet e Rackham (1997)	92
Figura 4.3: Gráfico obtido por Lawson, Mullet e Rackham (1997).....	93
Figura 4.4: Tipos de Deltabeam®	94
Figura 4.5: Seção Deltabeam®	95
Figura 4.6: Modelo físico Peltonen et al. (2016).....	95
Figura 4.7: Gráfico obtido por Peltonen et al. (2016)	96
Figura 4.8: Composite Slim-Floor Beam (CoSFB).....	97
Figura 4.9: Dimensões do Composite Slim-Floor Beam	97
Figura 4.10: Modelo físico Hechler et al. (2016).....	98
Figura 4.11: Gráfico obtido por Hechler et al. (2016)	99
Figura 4.12: Modelo físico Chen, Limazie e Tan (2015).....	100
Figura 4.13: Gráfico obtido por Chen, Limazie e Tan (2015)	101
Figura 5.1: Fluxograma da análise numérica	104
Figura 5.2: Elementos finitos utilizados na representação dos componentes do slim floor	106
Figura 5.3: Modelos constitutivos adotados.....	107
Figura 5.4: Superfície de plastificação do CDP para um estado plano de tensões	108
Figura 5.5: Curvas tensão x deformação para o concreto	109
Figura 5.6: Gráfico tensão x deformação compressão - modelo de Carreira e Chu (1985)	111
Figura 5.7: Gráfico tensão x deformação tração - modelo de Polak e Genikomsou (2015)	111
Figura 5.8: Geometria dos perfis de aço	113
Figura 5.9: Geometria das lajes de concreto	113
Figura 5.10: Geometria Asymmetric Slimflor Beam para calibração.....	114
Figura 5.11: Geometria Deltabeam® para calibração.....	114
Figura 5.12: Geometria Composite Slim Floor Beam para calibração	115
Figura 5.13: Geometria Shallow Cellular Composite Beam para calibração	115
Figura 5.14: Dimensões padronizadas dos perfis de aço (dimensões em mm).....	116
Figura 5.15: Dimensões das lajes de concreto (em mm)	117
Figura 5.16: Geometria Asymmetric Slimflor Beam padronizada	119
Figura 5.17: Geometria Deltabeam® padronizada	119
Figura 5.18: Geometria Composite Slim Floor Beam padronizada.....	119
Figura 5.19: Geometria Shallow Cellular Composite Beam padronizada	120
Figura 5.20: Contato Asymmetric Slimflor Beam (ASB).....	121
Figura 5.21: Contato Deltabeam®	122
Figura 5.22: Contato Composite Slim Floor Beam (CoSFB)	122
Figura 5.23: Contato Shallow Cellular Composite Beam (SCCFB).....	122

Figura 5.24: Vista do esquema estático simplesmente apoiado adotado	123
Figura 5.25: Condições de contorno e carregamento padronizadas	123
Figura 5.26: Linhas auxiliares dos perfis de aço com aberturas	125
Figura 6.1: Calibração da Asymmetric Slimflor Beam (ASB)	130
Figura 6.2: Calibração da Deltbeam®	131
Figura 6.3: Calibração da Composite Slim Floor Beam (CoSFB)	132
Figura 6.4: Calibração da Shallow Cellular Composite Beam (SCCFB)	133
Figura 6.5: Estrutura deformada – Exemplo <i>Asymmetric Slimflor Beam</i>	134
Figura 6.6: Tensões máximas (MPa) – <i>Shallow Cellular Composite Beam</i>	134
Figura 6.7: Gráfico comparativo do comportamento à flexão das tipologias	137
Figura 6.8: Gráfico força x deslocamento - tamanho das aberturas	139
Figura 6.9: Gráfico força x deslocamento – quantidade de barras de aço	141
Figura 6.10: Tensões de von Mises (MPa) – <i>Asymmetric Slimflor Beam</i>	142
Figura 6.11: Tensões de von Mises (MPa) – <i>Deltbeam®</i>	142
Figura 6.12: Tensões de von Mises (MPa) – <i>Composite Slim Floor Beam</i>	143
Figura 6.13: Tensões de von Mises (MPa) – <i>Shallow Cellular Composite Beam</i>	143
Figura 6.14: Tensões principais de compressão (MPa) – <i>Asymmetric Slimflor Beam</i>	145
Figura 6.15: Tensões principais de compressão (MPa) – <i>Deltbeam®</i>	146
Figura 6.16: Tensões principais de compressão (MPa) – <i>Composite Slim Floor Beam</i>	147
Figura 6.17: Tensões principais de compressão (MPa) – <i>Shallow Cellular Composite Beam</i>	148
Figura 6.18: Padrão de fissuração	149
Figura 6.19: Deformações plásticas – <i>Asymmetric Slimflor Beam</i>	150
Figura 6.20: Deformações plásticas – <i>Deltbeam®</i>	150
Figura 6.21: Deformações plásticas – <i>Composite Slim Floor Beam</i>	151
Figura 6.22: Deformações plásticas – <i>Shallow Cellular Composite Beam</i>	151
Figura 6.23: Gráficos comparativos das tipologias com os perfis de aço isolados	152
Figura 6.24: Gráficos força x deslocamento – Resistência do concreto	156
Figura 6.25: Gráficos força x deslocamento – Altura da capa de concreto	158
Figura 6.26: Gráficos força x deslocamento – Resistência do perfil de aço	160
Figura 6.27: Gráficos força x deslocamento – Espessura da mesa inferior do perfil de aço	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1: Resumo dos trabalhos mais relevantes por tipologia	56
Tabela 3.1: Curvas recomendadas de flambagem lateral com torção	70
Tabela 3.2: Classificação da alma	75
Tabela 3.3: Características padronizadas Asymmetric Slimflor Beam (ASB).....	84
Tabela 3.4: Propriedades do perfil de aço	85
Tabela 3.5: Resumo do dimensionamento na fase de construção	86
Tabela 3.6: Resumo do dimensionamento na fase de utilização	89
Tabela 4.1: Propriedades dos materiais - Asymmetric Slimflor Beam (ASB).....	93
Tabela 4.2: Propriedades dos materiais - Deltabeam®	96
Tabela 4.3: Propriedades dos materiais - Composite Slim-Floor Beam (CoSFB).....	98
Tabela 4.4: Propriedades dos materiais - Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB).....	100
Tabela 4.5: Resumo das propriedades geométricas e mecânicas da calibração	101
Tabela 5.1: Valores de referência para os parâmetros do Concrete Damaged Plasticity (CDP).....	110
Tabela 5.2: Propriedades dos materiais – Tipo 1	118
Tabela 5.3: Propriedades dos materiais – Tipo 2	118
Tabela 5.4: Quantidade de elementos finitos por componentes	125
Tabela 6.1: Parâmetros variados para a calibração	128
Tabela 6.2: Passo de carga final	129
Tabela 6.3: Passo de deslocamento final padronização.....	136
Tabela 6.4: Comparação da força máxima (F_m).....	138
Tabela 6.5: Comparação da força máxima (F_m).....	154
Tabela 6.6: Comparação da força máxima (F_m) - resistência característica do concreto	157
Tabela 6.7: Comparação da força máxima (F_m) - altura da capa de concreto.....	158
Tabela 6.8: Comparação da força máxima (F_m) - resistência do perfil de aço.....	160
Tabela 6.9: Comparação da força máxima (F_m) - espessura da mesa inferior do perfil	162

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.2 JUSTIFICATIVA.....	26
1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	27
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	29
2 PISOS MISTOS DE PEQUENA ALTURA	31
2.1 TIPOLOGIAS	34
2.2 APLICAÇÕES	41
2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	44
2.3.1 Considerações finais.....	58
3 MODELOS TEÓRICOS.....	61
3.1 COMPORTAMENTO MISTO	61
3.2 DIMENSIONAMENTO	65
3.2.1 Fase de construção	67
3.2.2 Fase de utilização	74
3.2.3 Considerações finais.....	90
4 TIPOLOGIAS ANALISADAS	91
4.1 ASYMMETRIC SLIMFLOR BEAM (ASB).....	91
4.2 DELTABEAM®	94
4.3 COMPOSITE SLIM FLOOR BEAM (CoSFB).....	96
4.4 SHALLOW CELLULAR COMPOSITE FLOOR BEAM (SCCFB)	99
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	103
5.1 TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS.....	105
5.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS	107
5.2.1 Modelos constitutivos para o aço.....	107
5.2.2 Modelos constitutivos para o concreto.....	108
5.3 GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	112
5.3.1 Calibração	112
5.3.2 Padronização	115
5.4 CONTATO ENTRE COMPONENTES	120
5.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO.....	123
5.6 MALHA	124

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	127
6.1 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS.....	127
6.2 ESTUDO COMPARATIVO	135
6.2.1 Considerações finais.....	154
6.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA	155
6.3.1 Resistência característica do concreto.....	155
6.3.2 Altura da capa de concreto.....	157
6.3.3 Resistência do perfil de aço.....	159
6.3.4 Espessura da mesa inferior do perfil de aço.....	161
6.3.5 Considerações finais.....	162
7 CONCLUSÕES.....	163
7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	167
REFERÊNCIAS	169

1 INTRODUÇÃO

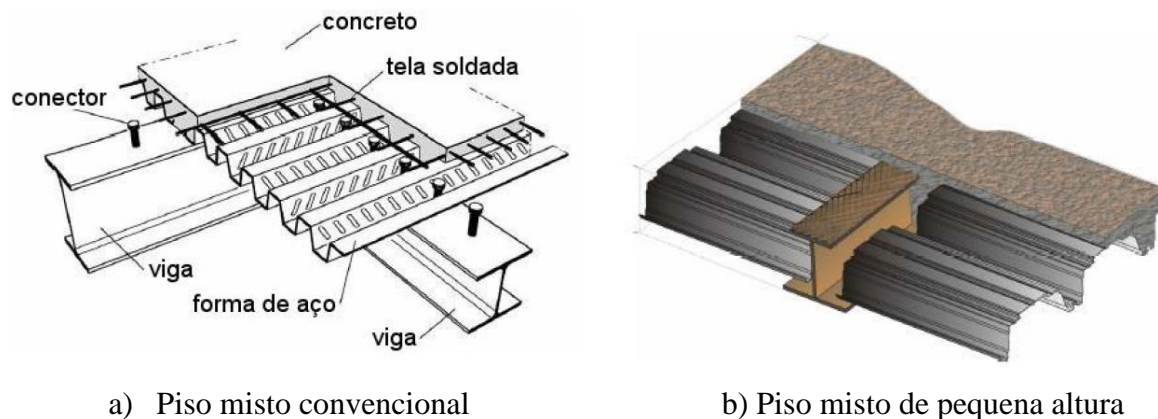
A indústria da construção civil vem buscando alternativas para deixar as obras mais atrativas economicamente, por meio de construções mais eficientes e com tempo reduzido de montagem. Atendendo a essas expectativas, as estruturas mistas de aço e concreto começaram a ganhar espaço no cenário brasileiro e atualmente já estão consolidadas na construção civil.

No século XIX, o concreto começou a ser empregado com o aço com o objetivo de proteger o perfil contra a ação do fogo e da corrosão, porém não aproveitava as vantagens desse uso conjunto. Apenas no século XX o comportamento das estruturas de aço e concreto passa a ser considerado misto, pois foram introduzidos os conectores de cisalhamento, que propiciam a transferência de esforços entre os componentes, restringem o deslizamento relativo longitudinal e impedem a separação vertical nessa interface.

Por meio desse trabalho conjunto foi possível se beneficiar das vantagens isoladas do concreto e do aço e minimizar suas desvantagens. Por exemplo, pode-se aproveitar a resistência à compressão, ao fogo e a facilidade de ser moldado do concreto, e a elevada resistência à tração e ruptura dúctil do aço. A partir do comportamento misto, houve um ganho de resistência, surgindo os primeiros modelos de cálculo e indicações normativas para estruturas mistas.

Além do aproveitamento das características isoladas de cada material e de ser um sistema mais industrializado, as estruturas mistas de aço e concreto, quando comparadas com o concreto armado, apresentam maior velocidade de execução, menor geração de resíduos, redução na quantidade de fôrmas, grande capacidade resistente e elevada rigidez. Ademais, apresentam a possibilidade de controle dimensional e de qualidade e facilidade na instalação e manutenção dos sistemas prediais.

Dentre as estruturas mistas mais utilizadas na construção mundial, pode-se citar as vigas, pilares e lajes. Atualmente está se difundindo o sistema de piso misto de pequena altura, também conhecido como *slim floor*, que objetiva reduzir a altura total do piso, introduzindo a laje na altura da viga. Na Figura 1.1 fica evidente a diferença construtiva entre o sistema de piso misto convencional e o piso misto de pequena altura.

Figura 1.1: Pisos mistos

Fonte: Ramos, 2010

Segundo Bailey (1999), têm-se notícias de construções seguindo o padrão *slim floor* desde o século XVIII, entretanto foi por volta de 1970 que se iniciou a caracterização dos seus princípios pela comunidade técnica internacional (PAES, 2003). O fato da viga estar revestida pelo concreto fornece a esse sistema inúmeras vantagens, como o aumento da resistência ao fogo, às instabilidades locais e da rigidez da seção de aço, mesmo quando comparadas com as estruturas mistas convencionais.

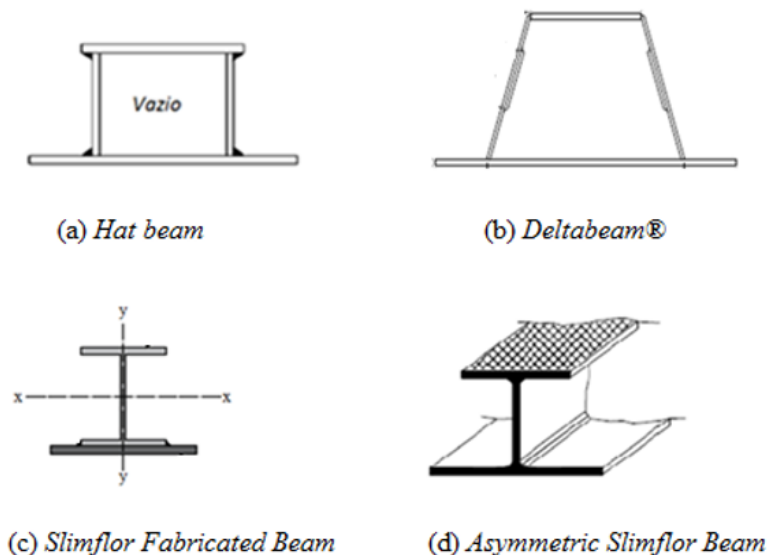
Esse sistema proporciona um vasto leque de possibilidades. Na concepção do *slim floor* é possível variar o modo de apoio da laje na viga de aço, sendo parcial ou total; a posição dos conectores de cisalhamento, que se for do tipo pino com cabeça, pode estar na mesa superior, inferior, em ambas, na posição vertical ou horizontal (DE NARDIN; EL DEBS, 2008), ou o tipo dessas conexões, conseguindo garantir o comportamento misto também com o auxílio de barras de aço.

Existe possibilidade de variação na configuração da laje de concreto, podendo ser do tipo maciça, pré-fabricada alveolar, mista com forma de aço incorporada, pré-moldada, entre outras. Além das multiplicidades já citadas, o sistema *slim floor* consegue ter variantes também em relação à fabricação do perfil de aço, podendo ser laminado, soldado ou dobrado a frio, ou de acordo com a seção da viga utilizada.

Dentre as opções de seção, as mais utilizadas historicamente são as *hat beams*, vigas fechadas com vazios internos, desenvolvidas nos países nórdicos, mostrada na Figura 1.2(a); *Deltabeam®*, viga em formato de delta com aberturas circulares na alma (Figura 1.2(b)); *Slimflor Fabricated Beam (SFB)*, formada por uma seção I (*universal column*) soldada à uma

chapa de aço (Figura 1.2(c)); e a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), viga I assimétrica (Figura 1.2(d)).

Figura 1.2: Tipos de seções dos perfis de aço



Fonte: Adaptado de Ramos, 2010

Devido à gama de possibilidades relativas à seção do perfil de aço, o presente trabalho pretende realizar um estudo numérico de quatro tipologias usuais de *slim floor*, duas já consolidadas historicamente, a *Asymmetric Slimflor Beam* e a *Deltabeam®*, e duas ainda em fase de aprofundamento, mas já bastante estudadas, a *Composite Slim-Floor Beam* e a *Shallow Cellular Composite Floor Beam*, comparando os resultados de cada modelo à flexão. Para a execução das simulações foi empregado o programa ABAQUS e, para a calibração dos modelos numéricos, foram utilizados resultados experimentais obtidos na revisão da literatura.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar o comportamento à flexão de quatro tipologias de piso misto de pequena altura (*slim floor*) e compará-las entre si.

São objetivos específicos do presente trabalho:

- Desenvolver modelos numéricos representativos das quatro tipologias, utilizando programa computacional em elementos finitos, ABAQUS;
- Calibrar os modelos numéricos das tipologias analisadas, a partir de resultados experimentais disponíveis na literatura;
- Padronizar geométrica e mecanicamente os modelos calibrados, para a realização da comparação das tipologias e de seus comportamentos;

- Realizar uma análise paramétrica, a fim de avaliar a influência de quatro parâmetros no comportamento à flexão do *slim floor*, sendo eles a resistência característica do concreto, altura da capa de concreto, resistência do perfil de aço e espessura da mesa inferior do perfil.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, empresas da construção civil estão investindo em obras cada vez mais industrializadas e racionalizadas, diminuindo custos e aumentando a velocidade de execução. Assim, as estruturas mistas surgem como uma possibilidade para atender à essas exigências, já que se utiliza de muitos materiais fabricados industrialmente, o que garante qualidade, facilidade e rapidez na montagem.

Buscando esses benefícios, o presente trabalho apresenta um sistema que abrange todas as qualidades das estruturas mistas convencionais, com o adicional de reduzir a altura total do piso. Esse sistema é denominado piso misto de pequena altura. Outras vantagens tornam esse sistema uma opção relevante, como o fato de melhorar o momento fletor resistente, a resistência ao cisalhamento e a rigidez do componente estrutural. Além disso, existem muitas maneiras de compor o piso misto de pequena altura, podendo variar tanto o tipo de laje empregado, quanto a seção do perfil de aço. Assim, é de fundamental importância conhecer melhor suas tipologias e os benefícios trazidos por cada uma delas, a fim de aumentar sua utilização e empregar a estrutura da maneira mais assertiva.

Contudo, quando se investiga os pisos mistos de pequena altura, usualmente se evidencia o comportamento de apenas uma tipologia. Visto que existem muitas opções de vigas que podem ser utilizadas para compor o *slim floor*, e que não foi executado um estudo numérico comparativo entre elas, o presente trabalho visa analisar algumas das mais importantes tipologias e compará-las, realizando um estudo inovador, que contribuirá para a área dos pisos mistos de pequena altura.

Outro ponto a ser considerado é que o estudo do *slim floor* é escasso no Brasil, e, por falta de conhecimento e ausência de recomendações normativas nacionais que orientem o projeto e execução desse sistema estrutural, ele ainda é pouco aplicado na construção civil brasileira. Por isso, no presente trabalho é feita também uma revisão teórica do que já se tem consolidado mundialmente nessa área, como o dimensionamento do piso misto de pequena altura, baseado no trabalho de Lawson, Mullet e Rackham (1997), visando ampliar a utilização desse sistema nacionalmente.

Além disso, os perfis mais empregados no piso misto de pequena altura, como o *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), ainda não são fabricados no Brasil, o que tornaria a montagem cara e mais demorada. Entretanto, outros perfis, como o *Slimflor Fabricated Beam* (SFB), podem substituir a utilização do ASB, tornando viável a sua utilização na construção. Isso porque, ele possui uma chapa de aço soldada a sua mesa inferior, como mostrado na Figura 1.2(c), garantindo uma conformação assimétrica, que proporciona uma fabricação mais simples e acessível e comportamento análogo ao da ASB.

A escolha de realizar uma análise numérica foi feita com base na necessidade de avaliar muitos modelos e com alto grau de refinamento. Assim, concluiu-se que um estudo experimental para investigar o comportamento à flexão das quatro tipologias se tornaria oneroso, já que demandaria grande quantidade de recursos financeiros, humanos e de tempo. Dessa forma, optou-se por analisar as tipologias através da simulação numérica, utilizando o programa computacional ABAQUS, em que foram desenvolvidos modelos representativos, calibrados a partir de estudos experimentais selecionados durante a revisão bibliográfica.

Dessa forma, confirma-se a necessidade de aprofundar os estudos sobre o *slim floor*, tendo, esta pesquisa, por finalidade contribuir com a temática dos pisos mistos de pequena altura, de modo a divulgar as tipologias existentes e verificar seu comportamento quando submetidas à esforços de flexão. Assim, as informações obtidas nesse estudo colaboram para a ampliação do conhecimento e disseminação à comunidade científica e técnica, cooperando com a maior utilização desse sistema estrutural futuramente.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho, foi dividida nas seguintes etapas: revisão bibliográfica, levantamento teórico, elaboração do modelo numérico, estudo comparativo e análise paramétrica.

Na revisão bibliográfica, foi realizado o levantamento técnico-científico para nivelamento do assunto e comprovação do potencial do trabalho. Foram utilizadas as bases de dados disponíveis, como sites de artigos científicos, teses e livros encontrados na biblioteca. Essa coleta de dados teve como objetivo conhecer as tipologias de piso misto de pequena altura mais utilizadas na indústria da construção mundial e mais estudadas no meio acadêmico, assim como compreender o comportamento estrutural dos diferentes tipos. Para complementação do conhecimento houve estudo do programa computacional ABAQUS, por meio de treinamento e consulta aos manuais (SIMULIA, 2017). A partir dessa etapa, foi possível constatar que os

estudos sobre o piso misto de pequena altura ainda são iniciais, principalmente em relação a diversidade de tipologias, motivando o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o tema.

A fase de levantamento teórico corresponde ao fichamento dos estudos mais significativos e avaliação de resultados experimentais e numéricos já realizados, a fim de conhecer o que já foi estudado nessa área. Nessa fase foram escolhidas as quatro tipologias analisadas, a *Asymmetric Slimflor Beam*, *Deltabeam*®, *Composite Slim-Floor Beam* e *Shallow Cellular Composite Floor Beam*, baseado em quantidade de publicação de cada tipologia, aplicação na construção mundial e existência de estudos experimentais do comportamento à flexão, para realização da calibração do modelo na fase seguinte.

Na terceira fase, o pacote computacional ABAQUS foi utilizado para a elaboração de modelos numéricos em elementos finitos e execução da análise, iniciada pela calibração. Ela consiste em representar numericamente o comportamento de um modelo físico já ensaiado, buscando aproximar os resultados numéricos dos obtidos experimentalmente. Para isso, a geometria, propriedades dos materiais e condições de contorno e carregamento são modeladas de acordo com o estudo experimental. A partir daí, faz-se necessário a realização de análises preliminares, alterando parâmetros envolvidos, buscando aqueles que melhor se adequem ao problema. Assim, foi simulado o comportamento à flexão das quatro tipologias de piso misto de pequena altura, de acordo com os estudos experimentais selecionados na etapa anterior.

Nessa mesma fase, as quatro tipologias analisadas foram padronizadas, tanto relativo às dimensões geométricas e propriedades dos materiais quanto de acordo às condições de contorno e carregamento, permitindo uma comparação dos resultados mais confiável.

Vale ressaltar que, como a atual norma brasileira de estruturas de aço, a ABNT NBR 8800 (2008), não contempla esse tipo de dimensionamento, o trabalho foi desenvolvido baseado no Eurocode 3 (2005) e 4 (2004) e na norma britânica BS 5950-1 (2001) e BS 5950-3.1 (2001), que diz respeito ao projeto de vigas mistas, sendo já utilizada para fundamentar o dimensionamento do *slim floor*, inicialmente proposto por Mullet (1992).

Por fim, foi realizada a análise dos resultados obtidos, para prosseguir com o objetivo geral do trabalho que é a realização do estudo comparativo. Na fase de calibração, foi avaliada a precisão dos modelos numéricos desenvolvidos, sendo os resultados considerados satisfatórios para prever o comportamento das tipologias e aplicados na fase de padronização dos modelos. Então, foram selecionadas as informações necessárias, para que, no estudo comparativo,

fossem confrontados os resultados do comportamento a flexão de cada tipologia e comparadas as respostas numéricas com as perspectivas teóricas que possuíam.

Após o estudo comparativo, foi realizada uma análise paramétrica avaliando a influência da resistência do concreto, altura da capa de concreto, espessura da mesa inferior do perfil e resistência do perfil no comportamento à flexão das tipologias estudadas. Assim, além da análise da influência do parâmetro em si, foi realizada também a avaliação de como essa influência varia em cada tipologia.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O corpo da dissertação foi organizado em seis capítulos. No **Capítulo 1** é feita a apresentação do trabalho, com a introdução sobre o tema a ser estudado, abordando os objetivos, a justificativa da pesquisa e a metodologia empregada na construção do trabalho.

O **Capítulo 2**, denominado “Pisos mistos de pequena altura”, apresenta os principais conceitos dos pisos mistos, com ênfase no piso misto de pequena altura, abordando seu histórico e aplicações. É realizada uma revisão bibliográfica trazendo os principais estudos internacionais e nacionais sobre o *slim floor*, com uma posterior análise sobre esses estudos.

O **Capítulo 3** aborda aspectos teóricos encontrados na literatura, sobre como é garantido o comportamento misto e como é executado o dimensionamento dos pisos mistos de pequena altura.

O **Capítulo 4** é dedicado à mostrar os estudos empregados na calibração das quatro tipologias de piso misto de pequena altura analisadas numericamente, sendo elas, a *Asymmetric Slimflor Beam*, *Deltabeam®*, *Composite Slim-Floor Beam* e a *Shallow Cellular Composite Floor Beam*.

No **Capítulo 5** são detalhados os procedimentos e simplificações adotadas na simulação numérica das tipologias de *slim floor*. Para isso, são definidos quais elementos finitos devem ser utilizados, a malha dos modelos e características não-lineares da simulação, como relações constitutivas dos materiais e contato entre os componentes.

O **Capítulo 6** traz os resultados obtidos e suas discussões. São apresentados e analisados os gráficos da calibração e elaboradas as comparações entre o comportamento à flexão das tipologias estudadas. É analisado também, no estudo paramétrico, a influência de parâmetros do concreto e do perfil de aço no comportamento à flexão do *slim floor*.

Por fim, no **Capítulo 7** são expostas as conclusões obtidas ao longo do trabalho, de acordo com as análises dos resultados, bem como trazidas sugestões para trabalhos futuros.

2 PISOS MISTOS DE PEQUENA ALTURA

As estruturas mistas de aço e concreto se caracterizam pela união entre perfis de aço e o concreto, beneficiando-se com as qualidades desses materiais, tanto relativas a capacidade resistente, quanto à aspectos construtivos, funcionais e estéticos. Assim, além de aproveitar de maneira eficiente a resistência do aço à tração e do concreto à compressão, outras vantagens desse conjunto podem ser citadas, como redução do peso próprio do sistema, capacidade de vencer grandes vãos sem a necessidade de escoramento, atenuação de instabilidades e maior proteção contra o fogo e a corrosão, quando comparado à estruturas de concreto armado ou de aço.

A fim de promover o comportamento misto de maneira eficaz é necessário o uso de conectores de cisalhamento, que são responsáveis pela transferência de esforços de cisalhamento entre os componentes, limitando o deslizamento entre os dois materiais e garantindo a compatibilidade de deformações na interface aço-concreto. O conector do tipo pino com cabeça, ou *Stud Bolt*, é o mais consolidado na indústria e está previsto pela ABNT NBR 8800 (2008), sendo seus modos de falha e de aplicação bastante conhecidos.

Os estudos sobre estruturas mistas já se consolidaram no Brasil e no mundo. Segundo Griffis (1994), essas construções começaram a surgir por volta de 1894 nos Estados Unidos, quando foi construída uma ponte em Iowa e o edifício *Methodist Building* em Pittsburgh. Alguns anos depois, entre 1914 e 1939, muitos edifícios e pontes adotando essas estruturas foram construídos, principalmente na Inglaterra (MALITE, 1993). A construção em estruturas mistas foi marcada pela patente “*Composite Beam Construction*” (Construção em viga mista), pertencente a J. Khan, em 1926, e o primeiro registro de normatização foi em 1930, pelo *New York City Building Code*, seguido pela introdução do assunto nas normas da *American Association of State Highway Officials* (AASHO) em 1944 e no *American Institute of Steel Construction* (AISC) em 1952.

Apesar de ser um assunto já bastante difundido em países europeus, a construção em estruturas mistas no Brasil iniciou-se apenas na década de 50 do século passado, ficando muito tempo estagnada, tanto pela natural resistência dos engenheiros à adoção de novos sistemas, quanto pela preferência por estruturas em concreto armado. Com isso, a norma brasileira ABNT NBR 8800 “Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios” (2008), que aborda esse tipo

estrutural em seus anexos O, P, Q e R, só surgiu em 1986, trazendo apenas o dimensionamento e execução de elementos mistos sujeitos à flexão.

Atualmente, os componentes abordados nessa norma são as vigas, lajes e pilares mistos, além das ligações. Um pilar misto de aço e concreto é um elemento estrutural sujeito, predominantemente, à forças de compressão (DE NARDIN, 1999). Ele pode ser dividido em dois tipos, revestidos ou preenchidos, dependendo da posição do concreto na seção, e pode ter a parte de aço formada por um ou mais perfis em aço estrutural. Por sua vez, as lajes mistas de aço e concreto tem a fôrma de aço incorporada ao sistema de sustentação das cargas, funcionando como suporte para as ações permanentes e sobrecargas de construção antes da cura do concreto, e como armadura de tração após a cura do concreto (ROCHA, 2010).

O terceiro componente estrutural misto abordado pela ABNT NBR 8800 (2008), é a viga mista, que compõe os pisos mistos convencionais. Ela se caracteriza pela associação de perfis de aço, que constituem a viga, com uma laje de concreto ou mista. Essa laje é apoiada na mesa superior do perfil, e ligada a ela por conectores de cisalhamento, para promover o comportamento conjunto do sistema. É possível combinar diferentes perfis com lajes de concreto ou mistas, fazendo com que o seu dimensionamento dependa dos tipos utilizados.

As vigas mistas podem ser biapoiadas ou com continuidade nos apoios. As biapoiadas permitem uma maior eficiência do piso misto, já que os momentos fletores geram tração no perfil de aço e compressão na laje de concreto, situação mais adequada aos dois materiais. Já naquelas com continuidade nos apoios, o perfil de aço será comprimido e a laje de concreto tracionada a partir do ponto de momento nulo, tendo como vantagens proporcionar momentos fletores positivos menores, maior estabilidade devido ao efeito de pórtico e diminuir os deslocamentos verticais.

O que se pode perceber dessa associação é que os pisos mistos convencionais apresentam uma significativa altura total, já que é a soma das alturas da viga e da laje. Além disso, a construção mista em geral, como vigas, lajes e pilares, já está bem consolidada atualmente, o que abre espaço para novas pesquisas em elementos estruturais mistos. Nesse contexto, se encaixa o piso misto de pequena altura, também conhecido como *slim floor*, o qual tem o intuito de reduzir a altura total do sistema, através do acoplamento da laje de concreto ou mista na altura da viga de aço, sendo apoiada na mesa inferior da viga.

Embora esse sistema estrutural seja usado desde o século XVIII, ele começou a ser estudado apenas em meados do século XX (BAILEY, 1999). Segundo Mullet (1992), os países

escandinavos foram os precursores do *slim floor*, com destaque para a Suécia. Atualmente, esse sistema se manifesta mais em países como a Espanha, Holanda, Alemanha e países nórdicos, em construções como edifícios comerciais e residenciais de grande altura e parques de estacionamento.

Algumas características desse sistema atribuem a ele vantagens únicas. O *slim floor* mostra aumento da rigidez, da resistência ao fogo e às instabilidades locais da seção de aço devido ao fato da viga de aço estar revestida pelo concreto (DE NARDIN; EL DEBS, 2008). Além disso, Bailey (1999) destaca que o *slim floor* permite um ótimo nivelamento do piso, ajudando na fixação das instalações de serviços e economizando no revestimento.

Outras vantagens também podem ser citadas, como o aumento da capacidade resistente; economia de material, contribuindo com a ideia de construção sustentável; redução da mão de obra e do número de vigas secundárias; velocidade na construção; segurança e atendimento às demandas arquitetônicas modernas (MULLET, 1992). Porém, apesar das vantagens descritas, o piso misto de pequena altura exige um maior volume de concreto e reduz o momento de inércia, sendo necessário perfis mais pesados, o que conferirá ao elemento estrutural um maior peso próprio, quando comparado ao piso misto convencional (ROCHA, 2012).

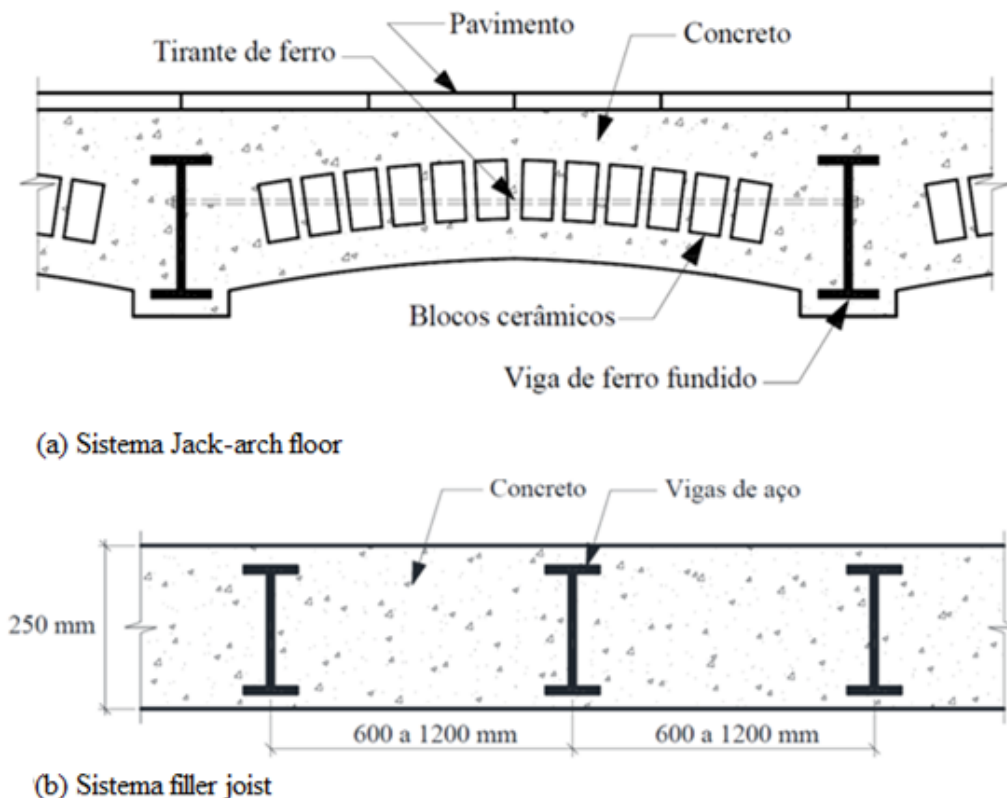
Como ficou evidente, o *slim floor* se mostra bastante atrativo devido às suas vantagens construtivas e de resistência. Contudo, os estudos sobre o comportamento estrutural desse sistema ainda são incipientes no Brasil, não havendo recomendações normativas no país, e por isso, o piso misto de pequena altura ainda não é muito utilizado. Entretanto, já são sentidas movimentações de pesquisadores para o estudo de seu dimensionamento, baseando-se em países europeus, cujo dimensionamento é feito com base na norma britânica BS 5950-3.1 (2001) para vigas sujeitas à carga uniformemente distribuídas (MULLET, 1992).

Apesar de ser composto basicamente por vigas de aço e lajes de concreto, o *slim floor* consegue ter uma grande versatilidade, combinando diferentes características. Além de ser possível variar o tipo de laje empregada e o tipo de conector de cisalhamento, o sistema *slim floor* também permite a variação da seção da viga. A seguir são apresentadas as principais tipologias de piso misto de pequena altura, obtidas pela alteração dos perfis de aço, e suas aplicações na construção civil ao redor do mundo.

2.1 TIPOLOGIAS

Por volta de 1790, a primeira forma de *slim floor* foi utilizada em um sistema que se denominava *jack-arch floor*. Era composto por arcos de blocos cerâmicos, apoiados nas mesas das vigas de ferro fundido e recobertos com concreto (BAILEY, 1999), como mostrado na Figura 2.1(a). Logo depois, no século XIX, registra-se a utilização do *filler joist* (ou *joist concrete*), um sistema *slim floor* que utilizava vigas de aço espaçadas de 0,6 a 1,2 m, sendo posteriormente revestidas com concreto, que deveria ficar abaixo da mesa inferior da viga (BAILEY, 1999), Figura 2.1(b). Entretanto, essas ações foram pontuais, sem estudos registrados e considerados somente para fins históricos.

Figura 2.1: Sistemas *slim floor* históricos



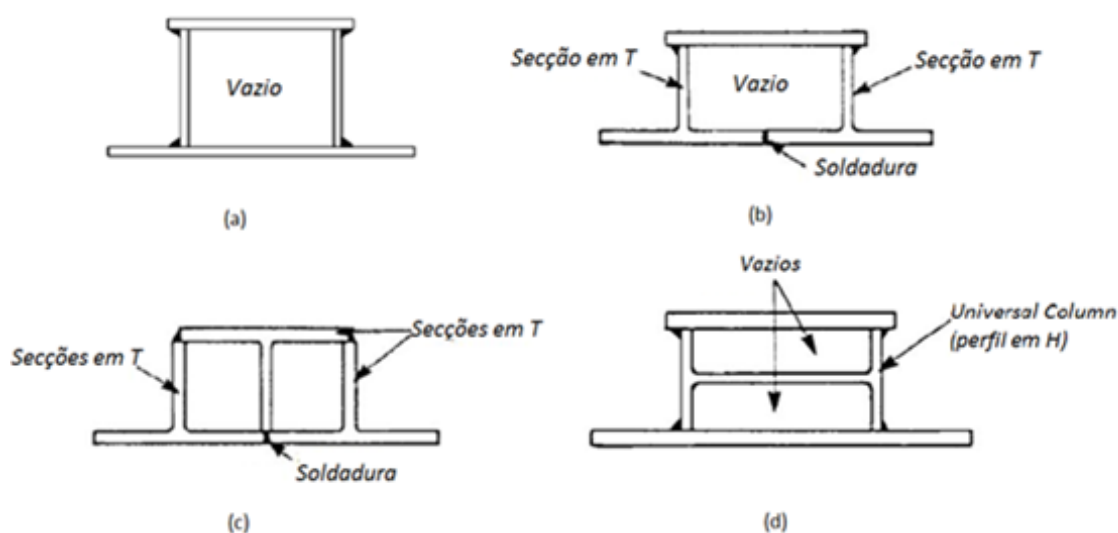
Fonte: Adaptado de Mesquita, 2016

O estudo do piso misto de pequena altura teve início em meados da década de 70, com os pesquisadores do *Swedish Institute of Steel Construction*. A partir da década de 80, os países nórdicos (Noruega, Finlândia, Dinamarca, Suécia e Islândia) foram responsáveis pela difusão desse sistema, causando um grande crescimento na indústria metálica, principalmente devido ao uso da viga *Hat beam* (LAWSON; MULLETT; RACKHAM, 1997). Segundo Mullet (1992), a viga *Hat beam* era originalmente formada pela união soldada de quatro chapas de aço, duas verticais e duas horizontais, como é possível identificar na Figura 2.2(a). O grande

uso desse sistema aumentou cerca de 80% a utilização de estruturas de aço na década de 80 e impulsionou o desenvolvimento de outras formas construtivas para o sistema *slim floor* (LAWSON; MULLETT; RACKHAM, 1997).

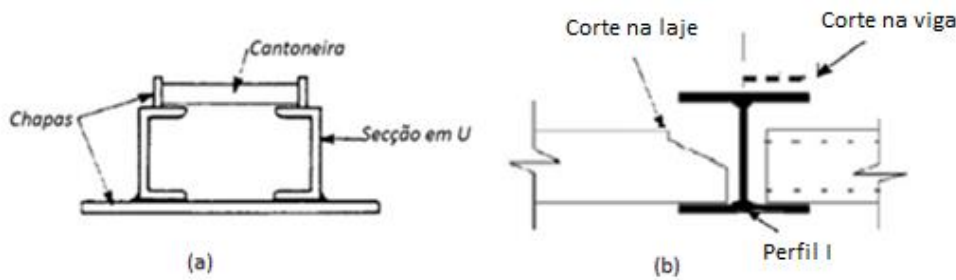
As formas mais usuais das derivações da *Hat beam* eram formadas por perfis T. O primeiro tipo é composto por duas seções T soldadas pela mesa, com uma chapa soldada horizontalmente às almas dos perfis, como mostrado na Figura 2.2(b). A segunda variação da viga *Hat beam* é constituída por 3 seções T, soldadas entre si (Figura 2.2(c)). O modelo da seção da viga da Figura 2.2(d) difere das demais por utilizar um perfil tipo I (*universal column*), soldado à duas chapas, uma no topo e outra por baixo.

Figura 2.2: Variações *Hat beam*



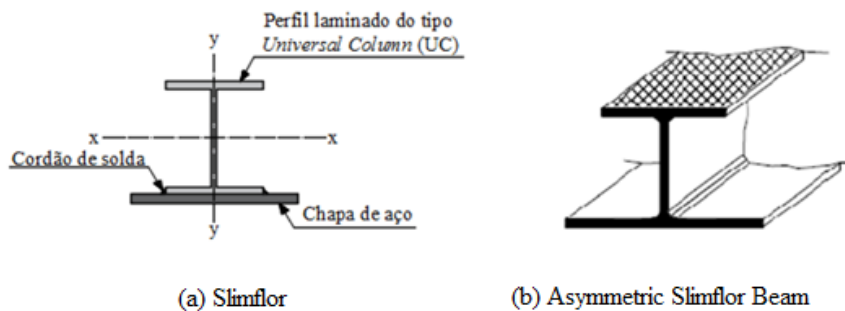
Fonte: Adaptado de Mullet, 1992

Outro modelo de seção de viga que foi bastante usado no final do século XX, foi a *Thor-beam*, comercializada pela empresa *ConstrucThor*, a qual consiste na utilização de duas seções U soldadas à uma chapa nas mesas inferiores. Nas mesas superiores são soldadas chapas menores e uma cantoneira, que funcionam como conectores de cisalhamento. Na Figura 2.3(a) pode-se entender melhor a disposição das peças. Além desses modelos, Mullet (1992) também aborda uma seção de viga composta apenas por um perfil tipo I, como visto na Figura 2.3(b), no qual a laje é apoiada na mesa inferior. Porém esse tipo de seção apresenta dificuldade ao encaixar a laje pré-moldada, sendo necessário efetuar recortes na laje ou na viga.

Figura 2.3: *Thor-beam e Universal column*

Fonte: Adaptado de Mullet, 1992

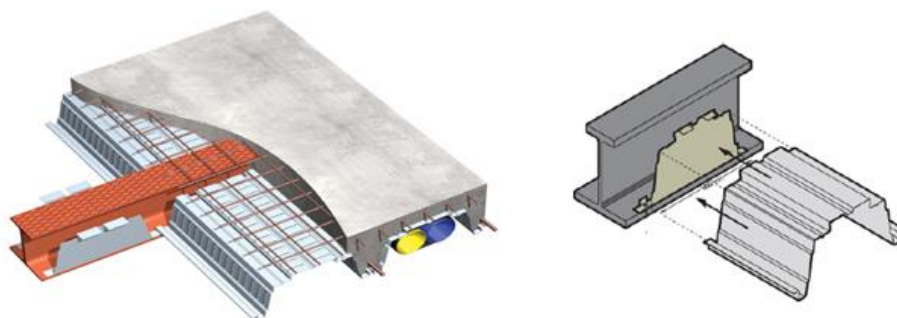
Devido à grande utilização do piso misto de pequena altura nos países nórdicos, a *British Steel* (atual *Tata Steel*) e o *Steel Construction Institute* (SCI) desenvolveram conjuntamente um estudo para avaliar a capacidade resistente deste sistema e suas características (JURADO, 2008). A partir desse estudo, um novo tipo de viga de aço para ser utilizada no sistema *slim floor* foi criado, denominado *Slimflor Fabricated Beam* (SFB). Essa viga consiste em um perfil laminado tipo I soldado à uma chapa de aço mais larga pela mesa inferior (MULLET, 1992), conforme mostrado na Figura 2.4(a). Alguns anos depois, em 1997, essas instituições apresentaram um novo perfil laminado, denominado *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB). Um perfil assimétrico, com a mesa inferior maior que a superior e que contém ranhuras na face externa da mesa superior, Figura 2.4(b).

Figura 2.4: *Slimflor*

Fonte: Adaptado de Paes, 2003

Ainda em 1997, a *British Steel* apresenta um novo sistema *slim floor*, denominado *Slimdek*®. É um sistema composto pelo perfil assimétrico, podendo ser o ASB, em conjunto com uma laje mista, com forma de aço incorporada do tipo trapezoidal (BARROS, 2011), como visto na Figura 2.5. Para a anexação da laje na viga, são fixados diafragmas com a técnica *shot fire* e, após isso, é feita a concretagem convencional. Atualmente esse sistema é comercializado na Europa pela *Tata Steel* e dentre as suas vantagens está a redução do peso próprio, melhoria do isolamento térmico e acústico e a possibilidade de se utilizar o espaço entre nervuras da laje para a passagem de instalações de serviço.

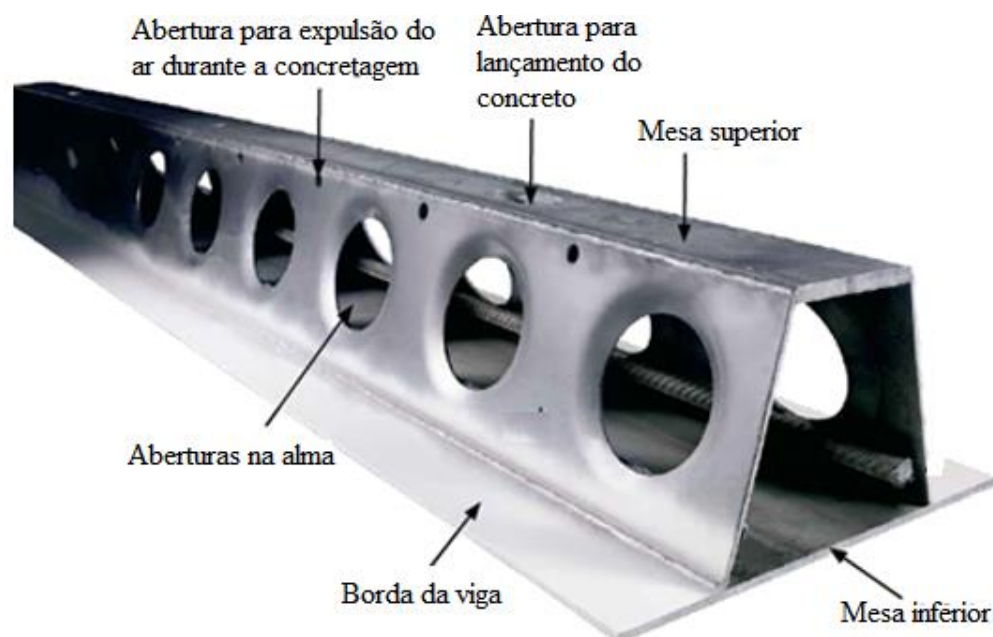
Figura 2.5: *Slimdek®* e vedação da laje-viga



Fonte: Limazie e Chen, 2015; Barros, 2011

As seções fechadas apresentadas na Figura 2.2, não possibilitavam o preenchimento do seu interior com o concreto. A partir da *Thor-beam* iniciou-se o uso desse método, que garante a viga maior rigidez, sendo essa técnica aprimorada em meados dos anos 90 com o surgimento da *Deltabeam®*. Essa tipologia foi desenvolvida na Finlândia pela empresa *Peikko* (NÁDASKÝ, 2012), e consiste em uma viga com 4 chapas de aço soldadas entre si e com aberturas na alma, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: *Deltabeam®*

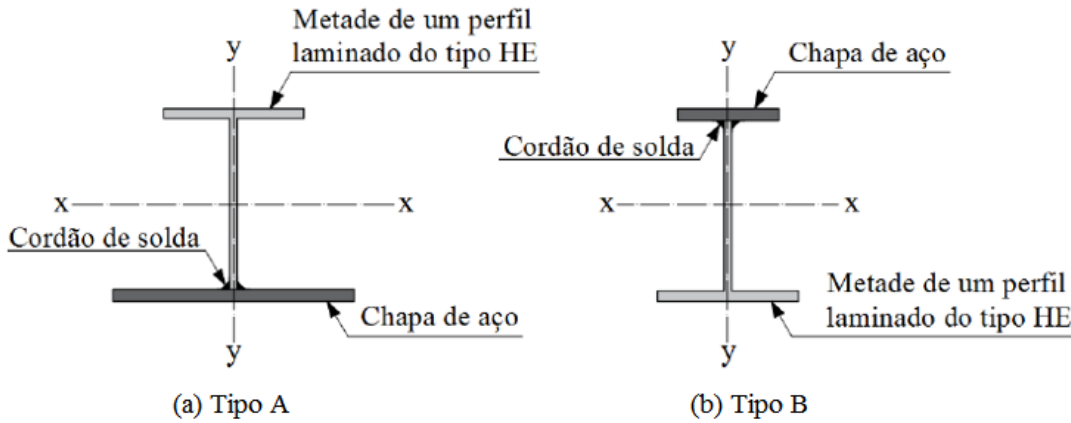


Fonte: Adaptado de Peikko, 2014

Também no início dos anos 90, a companhia siderúrgica ARBED (atual grupo *ArcelorMittal*) começou a desenvolver um novo perfil de aço para o *slim floor*, o perfil *Integrated Floor Beam* (IFB). Esse perfil é produzido a partir da metade de um perfil I, formando uma seção T e, de acordo com seu processo de fabricação, pode ser dividido em tipo A ou B. No tipo A, a seção T formada é soldada a uma chapa com largura maior que a mesa do perfil original (Figura 2.7(a)).

Para o perfil tipo B o processo é parecido, porém solda-se à alma uma chapa com largura inferior à da mesa do perfil, como visto na Figura 2.7(b) (BARROS, 2011).

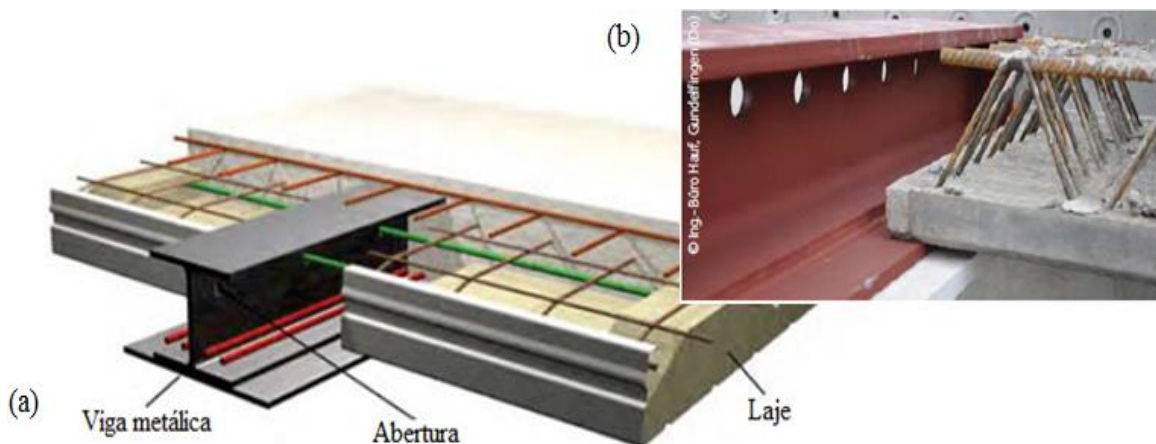
Figura 2.7: *Integrated Floor Beam*



Fonte: Adaptado de Paes, 2003

Estudos mais recentes propõem outras variações nas tipologias de vigas de aço utilizadas nos sistemas *slim floor*. A introdução de vigas I com aberturas na alma, por exemplo, foi estudada pela *Universität Stuttgart* (Alemanha) em parceria com a *ArcelorMittal*, desde 2009, desenvolvendo o *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB). É um sistema que pode ser formado por um perfil laminado soldado a uma chapa de largura superior à mesa do perfil, com o diferencial de possuir pequenas aberturas circulares no topo da alma, como visto na Figura 2.8. Essas aberturas possibilitam a passagem de barras de aço, que funcionam como conectores de cisalhamento, desenvolvendo a ação mista da estrutura (KUHLMANN, 2012). Na Figura 2.8(b) é possível ver uma aplicação da CoSFB, no edifício *Dillingen a.d. Donau*, na Alemanha.

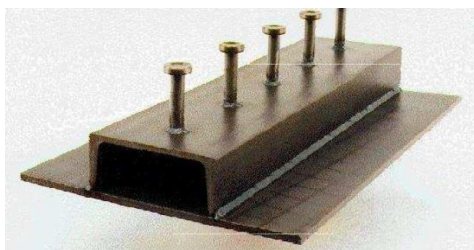
Figura 2.8: *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB)



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

Em continuidade às pesquisas sobre as tipologias, a *Universität Stuttgart* desenvolveu também o UPE *slimfloor system* (Figura 2.9), um sistema formado por um perfil tipo U (UPE) soldado a uma chapa de aço. Para a conexão de cisalhamento, são usados pinos com cabeça e a laje é apoiada na chapa soldada (KUHLMANN, 2012).

Figura 2.9: *UPE slimfloor system*



Fonte: Kuhlmann, 2012

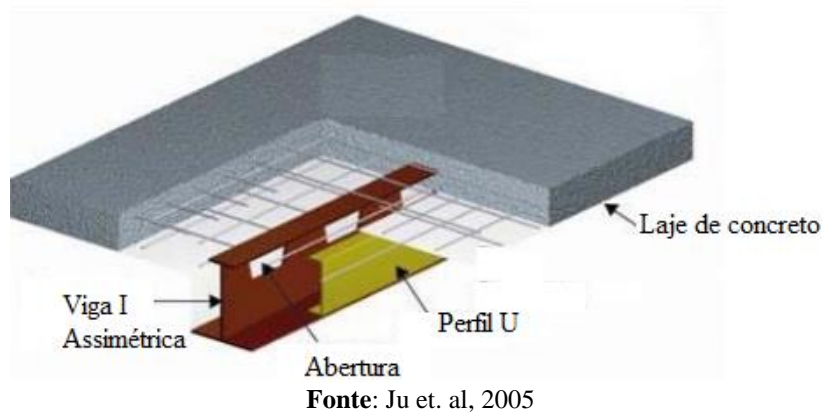
Outra tipologia de viga utilizada no sistema *slim floor*, foi desenvolvida nos Estados Unidos pela empresa *Girder-Slab Technologies*, o sistema *Girder-Slab System*, que consiste em um perfil de aço castelado (aberturas hexagonais) cortado ao meio e soldado à uma chapa de aço, que funciona como a mesa superior. Esse perfil se denomina *D-beam* e é visto na Figura 2.10, assim como o sistema em fase de construção, com a aplicação da laje.

Figura 2.10: *D-beam*

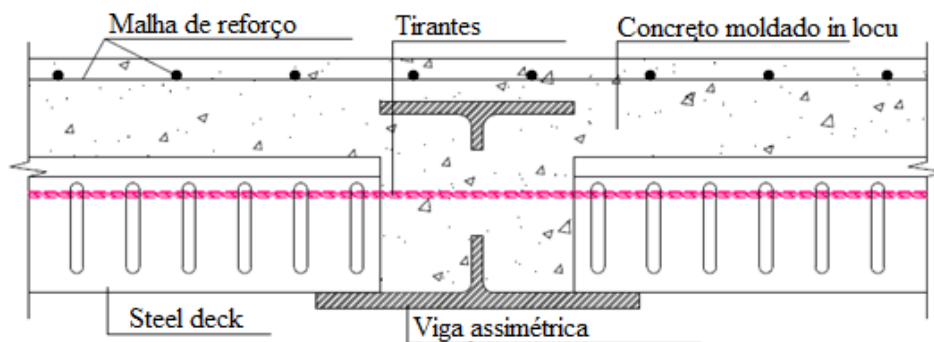


Fonte: Girder-Slab Technologies, 2015

Ju et. al (2005) apresentam outro tipo de sistema *slim floor* utilizado na Coreia do Sul, o *iTECH system*. O perfil de aço utilizado é igual ao *Girder-Slab System* (Figura 2.11), porém é adicionado um perfil U apoiado nas mesas inferiores do perfil I para sustentar as lajes durante a fase de construção, não tendo função estrutural no sistema. O concreto passa através das aberturas, assim como armaduras, garantindo a ação mista sem utilizar conectores de cisalhamento.

Figura 2.11: iTECH system

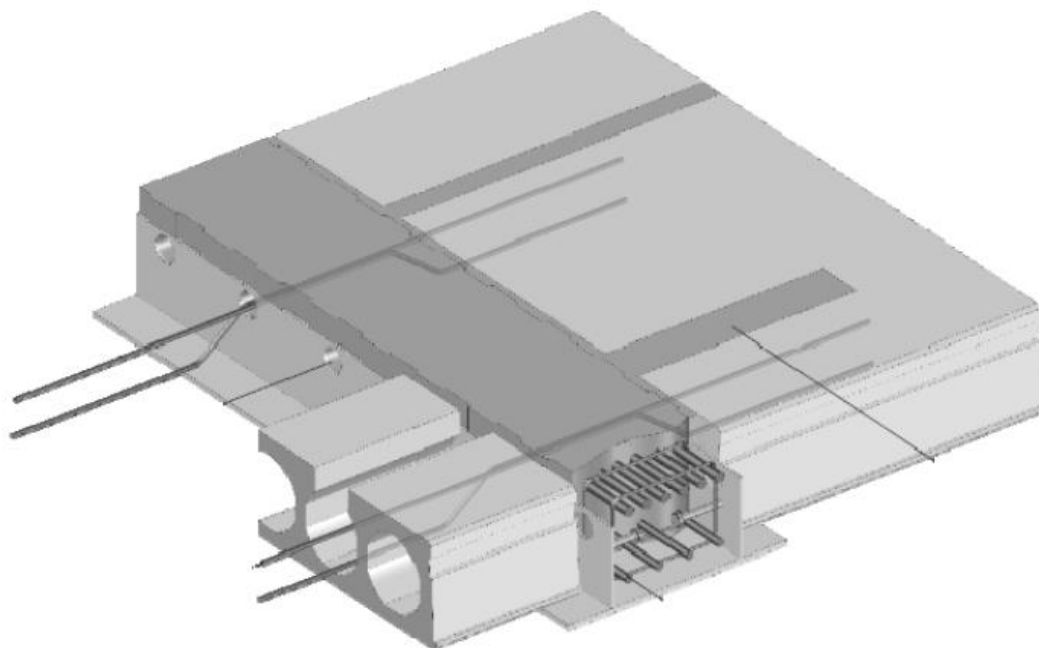
Estudos recentes vêm sendo realizados sobre o uso e viabilidade de novas tipologias de *slim floor*, uma delas diz respeito ao *Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)*, também chamado de *Ultra Shallow Floor Beams (USFB)*. É um sistema fabricado pela soldagem de duas seções T assimétricas, com a mesa inferior maior que a superior, aberturas circulares ao longo da alma e a utilização de barras de aço que passam entre as aberturas, exercendo a função de conectores de cisalhamento (Figura 2.12).

Figura 2.12: Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)

Fonte: Limazie e Chen, 2015

Outro trabalho foi proposto por Derysz, Lewinski e Wiech (2017), e se trata de uma seção de aço formada pela soldagem de dois perfis “T” invertidos, com pequenas aberturas superiores, preenchida internamente com concreto moldado *in loco* e com uma laje pré-fabricada apoiada nas mesas dos T. Para garantir o comportamento misto, foram usados pinos soldados às almas dos perfis, armadura longitudinal na parte interna da viga e barras de reforço que passam pelas aberturas do perfil, como mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13: Tipologia estudada por Derysz, Lewinski e Wiech (2017)



Fonte: Derysz, Lewinski e Wiech, 2017

2.2 APLICAÇÕES

Na Europa, existem diversas aplicações do piso misto de pequena altura. Uma delas é a Floralis, um edifício comercial, localizado em Gent (Bélgica), construído em 2005, e projetado pelo arquiteto Ivan van Mossevelde para a Liberty Invest n.v. Foi utilizado o perfil *Integrated Floor Beam* (IFB) e lajes alveolares (ARCELORMITTAL, 2017). O empreendimento pode ser visto na Figura 2.14.

Figura 2.14: Aplicações do piso misto de pequena altura - Floralis



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

O grupo ArcelorMittal construiu uma de suas sedes utilizando o sistema *Composite Slim Floor Beam* (CoSFB) e a laje *Cofradal 260*. O *ArcelorMittal Maizieres Research building*, localizado em Maizieres-les-Metz, França e construído em 2016, mostrado na Figura 2.15.

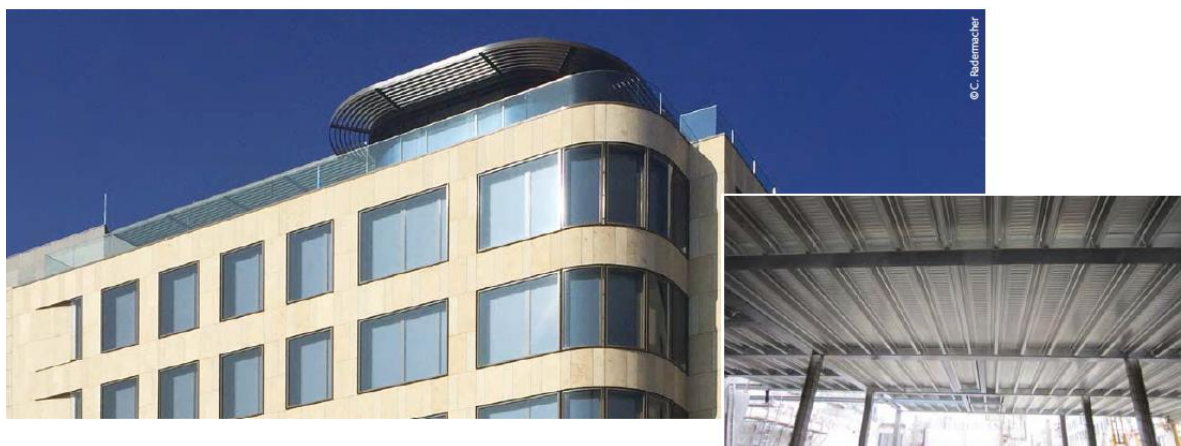
Figura 2.15: Aplicações do piso misto de pequena altura - *ArcelorMittal Maizieres Research*



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

Também em 2016 foi construída a *Galerie Kons*, mostrada na Figura 2.16, em Luxemburgo, cujos proprietários são a PEF KONS Investment AS. O empreendimento tem funções comerciais, tanto de escritório quanto de lojas, flats residenciais e estacionamento subterrâneo. O perfil empregado foi o *Slimflor Fabricated Beam* (SFB) e a laje *Cofraplus 220*, tendo o piso uma altura total de 320mm.

Figura 2.16: Aplicações do piso misto de pequena altura - *Galerie Kons*



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

Outros exemplos de construções utilizando o sistema *slim floor* são os edifícios *Clinique D'Eich* (Figura 2.17(a)) composto por perfis assimétricos e laje alveolar e o *ArcelorMittal Office Building Petrusse* (Figura 2.17(b)) formado por perfis *Slimflor Fabricated Beams* (SFB) e laje de concreto, ambos localizados em Luxemburgo. Além deles tem-se o *The Boilerhouse* (Figura

2.17(c)) e o *The Exchange* (Figura 2.17(d)), localizados na Inglaterra, com perfis do tipo I assimétrico e laje mista com fôrma de aço incorporada; os edifícios residenciais *Luxembourg II* e III no Canadá (Figura 2.17(e)) constituídos com o perfil *Deltabem*® e laje alveolar e o *Chasse Church* na Holanda (Figura 2.17(f)) com perfis I assimétricos e laje mista com fôrma de aço incorporada.

Figura 2.17: Exemplos de utilização do piso misto de pequena altura



(a) Clinique D'Eich



(b) ArcelorMittal Office Building Petrusse



(c) The Boilerhouse



(d) The Exchange



(e) Luxembourg II e III

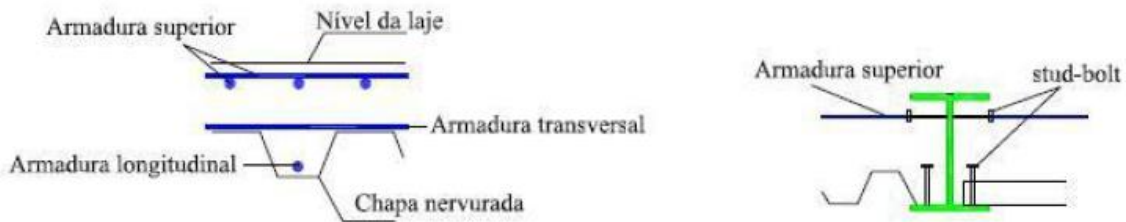


(f) Chasse Church

Fonte: Adaptado de Kochem, 2018

No Brasil, a empresa Codeme S.A. construiu um protótipo do sistema *slim floor* (Figura 2.18). É composto por perfis tipo I simétricos, com altura de 200 a 250 mm e laje mista moldada *in loco*. Para promover o comportamento misto do sistema, foram usadas barras de aço passando pelas aberturas na alma do perfil e conectores de cisalhamento, tanto soldados à alma, quanto à mesa inferior.

Figura 2.18: Protótipo Codeme S.A.



Fonte: Ramos, 2010

É possível perceber que o sistema *slim floor* possui uma grande variedade de combinações e que tem maior aplicação, estudo e fabricação em países europeus. Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas mundialmente mostrando a perspectiva de evolução desse tema e o quanto é promissor e vantajoso para o sistema construtivo. No Brasil, porém, a utilização ainda é escassa e as pesquisas ainda estão em fase inicial, como pode ser visto no tópico de revisão bibliográfica.

2.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os principais estudos sobre pisos mistos de pequena altura iniciaram-se com as pesquisas de Mullet (1992), que objetivaram apresentar um método de projeto, de acordo com a BS 5950 (1982), para o *slim floor*. Em seguida, Mullet e Lawson (1993), publicaram critérios de dimensionamento para a nova tipologia que estava sendo lançada, a *Slimflor*, em conjunto com o perfil de aço perfilado com fôrma de aço incorporada (*steel deck*). Esse trabalho, publicado pelo *Steel Construction Institute* (SCI), apresentou uma avaliação experimental para basear o método de projeto proposto, trazendo exemplos de aplicação.

A pesquisa de Mullet foi estendida com o estudo experimental da *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), usando laje com fôrma de aço incorporada (*Slimdek*®). O estudo foi feito em conjunto com Lawson e Rackham e permitiu elaborar um procedimento analítico para essa estrutura baseado na norma britânica BS 5950 (1982). O *Slimdek*® foi investigado por Lawson, Mullet e Rackham (1997) por meio de ensaios (Figura 2.19), para determinar o momento fletor resistente, a tensão última de aderência na interface aço-concreto e a rigidez do conjunto.

Figura 2.19: Ensaio experimental Lawson, Mullett e Rackham (1997)



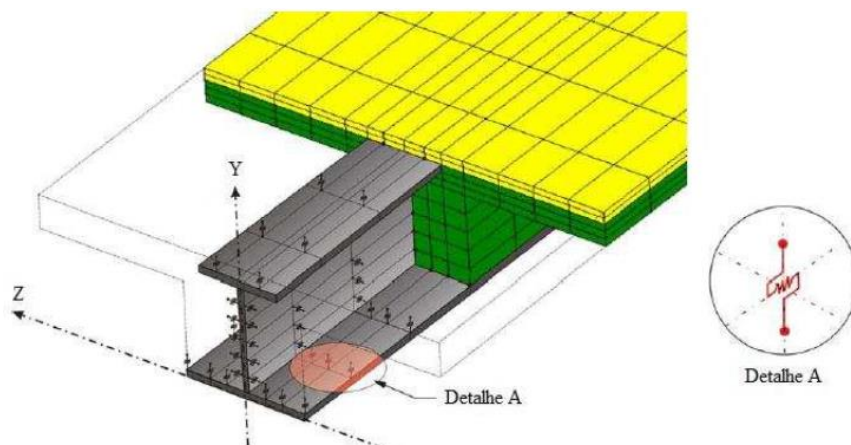
Fonte: Lawson, Mullett e Rackham, 1997

Lu e Makelainen (1995) realizaram investigações de vigas preenchidas, com seções *Hatbeam* e *Deltabeam*®. Por meio de ensaios experimentais e análises paramétricas, avaliaram a posição dos conectores de cisalhamento e a contribuição da armadura transversal no comportamento misto de vigas *Hatbeam* preenchidas com concreto e a eficácia das bordas das aberturas serem curvas em vigas *Deltabeam*®. A partir desse estudo, foram obtidos resultados que indicaram que para o perfil *Hatbeam* é melhor posicionar os conectores na parte inferior, sendo a armadura capaz de reduzir o deslizamento da interface aço-concreto. Na seção *Deltabeam*®, foi possível observar que, para as bordas das aberturas curvas, a rigidez não apresentou grande alteração, se mantendo próxima da original.

O estudo de Bailey (1999) trouxe um aparato histórico dos pisos mistos de pequena altura e analisou o comportamento da tipologia *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) em situação de incêndio. Para isso, desenvolveu um *software* que previa o comportamento estrutural nessas condições, obtendo bons resultados de desempenho comparativamente aos ensaios experimentais. Ma e Makelainen (2000) e Makelainen e Ma (2000) publicaram sobre o mesmo tema e avaliaram o comportamento do ASB em situação de incêndio através de uma análise numérica, mostrando que esse perfil apresenta boas condições sob essas circunstâncias.

O trabalho numérico de Paes (2003), desenvolvido na Universitat Politècnica de Catalunya (Espanha), estabeleceu recomendações de projeto para condições ultimas e de serviço. Foram elaborados modelos numéricos baseados nos estudos de Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Leskelä e Hopia (2000), utilizando o *software* ANSYS. Nesses modelos, a interface aço-concreto foi simulada utilizando um elemento de mola espacial, como pode ser visto na Figura 2.20. Paes (2003) obteve resultados compatíveis com os experimentais alcançados por Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Leskelä e Hopia (2000).

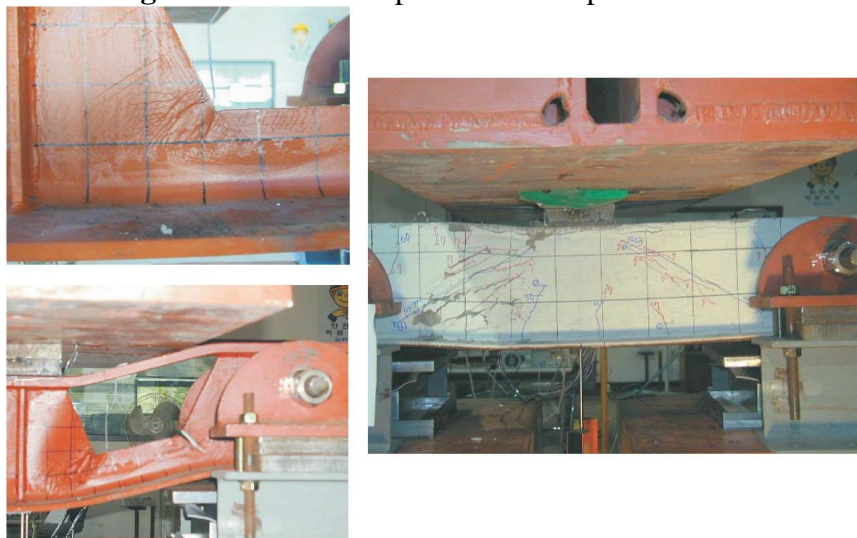
Figura 2.20: Esquema da interface aço-concreto utilizado por Paes (2003)



Fonte: Mesquita, 2016

Um grupo de pesquisadores da Coreia do Sul começou, por volta de 2003, uma pesquisa sobre uma nova tipologia para o *slim floor*, chamada iTECH. A primeira publicação realizada por esse grupo diz respeito ao desempenho estrutural, em que foi analisado o comportamento de cisalhamento e flexão através de ensaio experimental, provando ser aceitável pelo Código de Projeto Estrutural Coreano (JU et al., 2003). Ju et al. (2004) avaliaram o desempenho dinâmico desse elemento estrutural nas etapas de construção, também em um ensaio experimental, chegando à conclusão que ele satisfaz os critérios definidos em três códigos normativos diferentes, sendo eles o JIS (1991), ISO 2631-2(1989) e DIN 4150(1986). Outros artigos foram publicados em anos posteriores, que focaram no comportamento do iTECH quanto à resistência ao cisalhamento (JU; KIM; KIM, 2005), à flexão (JU; CHUN; KIM, 2009) e ao comportamento dinâmico em uma avaliação de campo (JU et al., 2008). A configuração dos testes de flexão é mostrada na Figura 2.21.

Figura 2.21: Teste experimental em perfis iTECH



Fonte: Adaptado de Ju et al., 2005

Rackham, Hicks e Newman (2006) desenvolveram uma publicação com orientações sobre a concepção do piso misto de pequena altura composto pelo perfil *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) e laje alveolar de concreto pré-fabricadas. Por meio de duas configurações distintas (Tipo 1 formado por seção sem capa de concreto e Tipo 2 por seção com capa de concreto), foi estabelecido um procedimento de cálculo, considerando todos os casos de carregamento durante as fases de construção e as verificações de projeto nos estados limites últimos e de serviço. Baseando-se na BS 5950 (2001) e em publicações existentes da SCI, foram feitas também verificações de instabilidades do perfil, cisalhamento e capacidade resistente à torção e à flexão.

Hegger et al. (2009) estudou o *slim floor* composto pelo perfil *Integrated Fabricated Beam* (IFB), avaliando a resistência ao cisalhamento desse sistema com lajes alveolares e os efeitos de condições de apoio, rígidas e flexíveis, nessa resistência. O estudo foi experimental, indicando que perfis esbeltos podem causar um decréscimo na resistência ao cisalhamento de 30 a 40%. Outros fatores como a rigidez à flexão do perfil, grau de conexão do piso misto e a seção transversal das lajes alveolares também influenciaram nesse resultado. Verificou-se que o enchimento dos alvéolos com concreto moldado *in loco* não fez aumentar a resistência ao cisalhamento no sistema avaliado.

Uma nova conformação para a viga, utilizando perfil assimétrico com aberturas na alma, foi apresentada inicialmente nas publicações da SCI (1997, 1999), e focada com mais detalhes por Lawson et al. (2006). Nesse trabalho, os autores propuseram um método de projeto levando em conta a assimetria e a existência de aberturas circulares, alongadas ou retangulares. Além disso, foram sugeridas equações simplificadas com base em estudos de campo e análise de elementos finitos. A partir desse trabalho o perfil assimétrico com aberturas na alma, denominado na época de “*Ultra Shallow Floor Beams*”, começou a ser estudado com mais intensidade.

Tsavdaridis, D’Mello e Hawes (2009) publicaram um estudo experimental sobre o mesmo perfil estudado por Lawson et al. (2006), para investigar a contribuição do concreto que passa entre as aberturas da viga nas forças de cisalhamento longitudinais. Concluiu-se que o concreto entre as aberturas aumenta a resistência, fornecendo um caminho de carga para transferir a força de cisalhamento. Huo, D’Mello e Tsavdaridis (2010) continuaram a pesquisa sobre o cisalhamento longitudinal do *Ultra Shallow Floor Beam* e o efeito de conectores adicionais, realizando 16 testes *push-out* e uma análise teórica para investigar o mecanismo de falha do sistema.

Huo e D’Mello (2013) apresentaram outros trabalhos sobre o tema, com foco nos mecanismos de transferência de cisalhamento nesse tipo de perfil. Através de investigações experimentais,

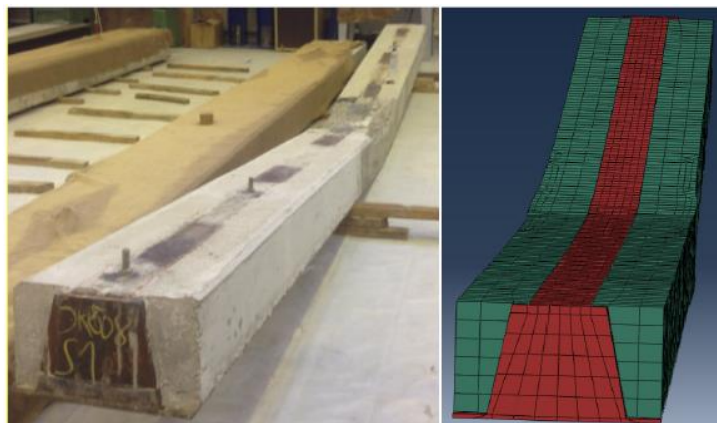
foram realizados 24 testes *push-out* para estudar a conexão sob a força de cisalhamento direto e foi proposto um método de cálculo de resistência ao cisalhamento para a conexão de cisalhamento (HUO; D’MELLO, 2013). Huo e D’Mello (2017) realizaram um ensaio de flexão em escala real, o qual permitiu concluir que a ação mista foi significativa e a falha inicial ocorreu com esmagamento do concreto.

Um estudo realizado por Barros (2011) propôs um método de dimensionamento para o sistema *slim floor* em quatro tipos de seções: a primeira com viga SFB e laje mista (I-a), a segunda com viga SFB e laje maciça (I-b), a terceira e a quarta com viga IFB, sendo uma com laje mista (II-a) e outra com laje maciça (II-b). Além disso, foi desenvolvido um *software* para verificação de segurança, com posterior estudo paramétrico. A partir dos resultados, concluiu-se que a seção mista do tipo I-a é mais resistente à flexão do que uma seção do tipo I-b, assim como nas seções do tipo II-a e II-b.

O perfil *Deltabeam*®, tipologia que vem sendo investigada desde meados dos anos 90, foi estudada por Nádaský (2012) mais detalhadamente. Neste trabalho, foram apresentados requisitos específicos de projeto para esses perfis em estados limites últimos e de serviço, para a concepção adequada deste sistema. Além disso, foram fornecidas condições de aceitação para vibrações e princípios sobre como garantir o tempo de resistência ao fogo. Um trabalho para avaliar a resistência ao cisalhamento longitudinal de perfis *Deltabeams*®, foi realizado por Leskela et al. (2014), comparando testes de cisalhamento realizados no *Technical Research Center of Finland* com um modelo numérico 3D desenvolvido em elementos finitos. As conclusões tiradas nesse trabalho mostraram que o modelo numérico está calibrado com base no experimental e prediz a resistência ao cisalhamento com bastante precisão (LESKELA et al., 2014).

Em continuação ao trabalho anterior, o grupo *Peikko*, em parceria com a *National Technical University of Athens*, realizou em 2016, um estudo experimental e numérico sobre o comportamento à flexão do sistema estrutural composto pela *Deltabeam*®, como visto na Figura 2.22. A partir desse estudo foi possível obter as curvas força x deslocamento, valores de deslizamento e padrões de danos das amostras ensaiadas. Percebeu-se que os deslizamentos entre o aço e o concreto foram muito pequenos e a resposta estrutural foi bastante benéfica, indicando que tais vigas podem ser implementadas pelos projetistas (PELTONEN et al., 2016).

Figura 2.22: Estudo experimental e numérico realizado por Peltonen et al. (2016)



Fonte: Peltonen et al., 2016

Um estudo mais recente sobre a *Deltabeam*® foi realizado por Derkowski e Skalski (2017). Através de uma análise computacional, discutiu-se requisitos de projeto, mostrando que todas as condições básicas avaliadas foram atendidas. Além disso, foram apontadas vantagens, como aumentar significativamente o vão alcançado e limitar o deslocamento do elemento durante a montagem, e desvantagens, como redistribuição do momento fletor ao longo do comprimento da viga e a necessidade de grande precisão na montagem (DERKOWSKI; SKALSKI, 2017).

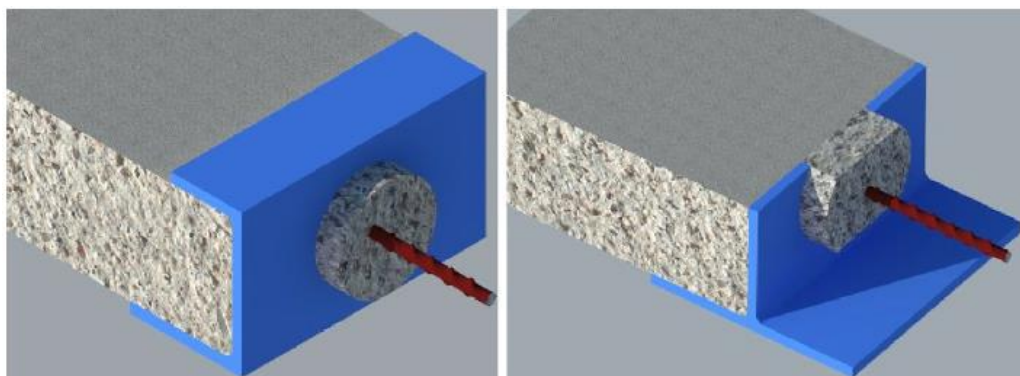
Por volta de 2015, o perfil assimétrico com aberturas na alma voltou a ser estudado com maior assiduidade por um grupo de pesquisa da China. Chen, Limazie e Tan (2015) apresentaram inicialmente um estudo experimental do perfil, renomeado por eles de “*Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)*”. Foi analisado o comportamento à flexão e os mecanismos de transferência de cisalhamento, considerando que o concreto que passa através das aberturas na alma do perfil é combinado com barras de aço para promover o comportamento misto. Com os experimentos, demonstrou-se que essa combinação aumenta significativamente a resistência ao cisalhamento, a capacidade de deslizamento e a ductilidade das ligações aço-concreto. Um estudo analítico foi desenvolvido posteriormente para determinar a capacidade resistente dessas vigas, permitindo estimar com maior precisão o momento resistente (LIMAZIE; CHEN, 2015).

Com os resultados experimentais encontrados por Chen, Limazie e Tan (2015) foi validado um modelo numérico que mostrou como a variação de alguns parâmetros influencia no comportamento misto da viga (LIMAZIE; CHEN, 2016). Foi concluído que a variação da largura efetiva da laje de concreto não exerce grande influência no comportamento misto, porém a altura de concreto acima do perfil exerce influência em parâmetros como rigidez à flexão, capacidade de carga do conjunto laje-viga, ação conjunta aço-concreto e resistência ao cisalhamento longitudinal. Além disso, aumentando a espessura da mesa inferior, há aumento

significativo na capacidade resistente a flexão e na rigidez da viga, porém com o aumento do tamanho das aberturas, essa resistência diminui (LIMAZIE; CHEN, 2016).

Limazie e Chen (2017) deram continuidade a pesquisa da SCCFB com o estudo de conexões inovadoras de cisalhamento, composta por barras de aço e concreto passando pelas aberturas do perfil. Através de uma análise numérica por elementos finitos, investigaram parâmetros como mecanismo de transferência de força, capacidade de carga e comportamento de falha dessas conexões. Simulando testes *push-out* em duas configurações diferentes de perfil (I assimétrico e T invertido), como visto na Figura 2.23, foi revelado que o tipo de conexão proposta é efetivamente capaz de fornecer a resistência ao cisalhamento e o comportamento dúctil desejado. A partir dos resultados experimentais e numéricos obtidos nos seus estudos anteriores, Chen e Limazie (2018) apresentaram e validaram uma proposta analítica de projeto para a verificação dessas conexões de cisalhamento e orientações para o dimensionamento do SCCFB.

Figura 2.23: Esquema da configuração das conexões de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Limazie e Chen, 2017

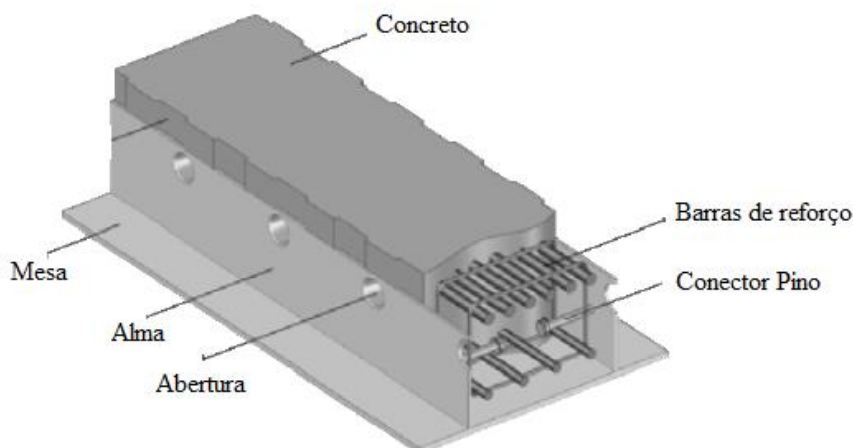
Hechler et al. (2016) analisaram estruturalmente o *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB). Para isso, foram realizados testes *push-out* avaliando o cisalhamento, vibração e deformação e proposto um método para ativar a totalidade da largura efetiva do concreto (EUROCODE, 1994). Ensaios de flexão também foram realizados, obtendo-se as curvas força \times deslocamento das amostras. As avaliações mostram um aumento da capacidade de carga em 100% e da rigidez em 150%, comparando ao piso misto de pequena altura tradicional.

Em 2018, alguns pesquisadores continuaram o estudo de perfis CoSFB, como Sheehan et al. (2018) que realizaram testes de cisalhamento e ensaios de flexão, a fim de avaliar o grau de conexão de cisalhamento e a capacidade do conector utilizado, barras de aço. Foi mostrado que a quantidade de barras de aço que passam pelas aberturas da viga influenciam diretamente na capacidade resistente do sistema a flexão. Baldassino et al. (2018) também fizeram um

estudo experimental com o objetivo de avaliar o comportamento em serviço de vigas CoSFB, influenciado pelo tempo de cura do concreto e efeitos da fluência na resposta final.

Um estudo desenvolvido por Derysz, Lewinski, Wiech (2017) estuda uma seção composta por dois perfis T invertidos, sendo a laje pré-fabricada apoiada nas abas do perfil e em seu interior colocado um reforço e preenchido com concreto auto adensável (Figura 2.24). Resultados de testes experimentais indicaram que a queda da resistência está ligada à perda das ligações entre a viga e a laje. Assim, elementos de conexão especiais foram projetados em forma de pinos RC para evitar esse comportamento, sendo realizados testes em escala real. Concluiu-se que esses pinos têm resistência e rigidez suficientes para permitir a ação mista do elemento, capaz de atingir os estados limites últimos.

Figura 2.24: Perfil estudado por Derysz, Lewinski, Wiech (2017)



Fonte: Adaptado de Derysz, Lewinski e Wiech, 2017

Yu et al. (2019) investigaram experimentalmente o desempenho à flexão de uma nova tipologia de *slim floor*, composta pelo perfil I tradicional ou castelado. Buscando melhorar a rigidez desse sistema, os autores avaliaram a influência da altura das vigas e do tamanho das formas de aço na capacidade resistente à flexão. Os resultados dos ensaios indicaram que esses dois parâmetros afetaram diretamente a rigidez e capacidade resistente do sistema, aumentando esses fatores com o aumento de dimensões. Além disso, o trabalho propôs métodos de cálculo da rigidez e capacidade resistente à flexão, que foram validados e considerados aplicáveis para essa tipologia.

Um estudo recente de caráter teórico e abrangente foi desenvolvido por Ahmed e Tsavdaridis (2019), trazendo o resumo de tipologias de piso misto de pequena altura, antigas, recentes e novas tendências, juntamente com características e formulações de projeto, baseadas no Eurocode 4 (2004). A partir desse trabalho, concluiu-se que há necessidade de mais pesquisas

nessa área para a melhoria dos códigos normativos, confirmando que esse tema ainda é pouco explorado mundialmente.

Muitos pesquisadores realizaram trabalhos sobre a eficiência das tipologias de piso misto de pequena altura em situações de incêndio. Além das pesquisas de Bailey (1999) e Makelainen e Ma (2000) já apresentadas anteriormente, cabe citar Ellobody (2011) e Ellobody (2012) estudando o perfil CoSFB; Maraveas, Swailes e Wang (2012) e Alam et al. (2018) avaliando numericamente o perfil *Asymmetric Slimflor Beam*; Maraveas, Tsavdaridis e Nadja (2016), em pesquisa sobre o *Shallow Cellular Composite Floor Beam* e Albero et al. (2018), Albero et al. (2019) e Albero et al. (2020) trabalhando experimental e numericamente com perfis *Slimflor* e *Integrated Floor Beam*.

No Brasil, apesar do tema não ser ainda muito explorado, alguns pesquisadores já realizaram estudos, focando principalmente no dimensionamento dessas estruturas. Santos, Lima e Sakiyama (2016) apresentaram uma metodologia de dimensionamento para o *slim floor* em conjunto com a laje *steel deck*, utilizando o *software* VigaMix, com orientações para esse dimensionamento, visto que nenhuma norma brasileira aborda o tema.

Mesquita (2016) avaliou o comportamento estrutural à flexão do sistema *slim floor* composto pelo CoSFB através da modelagem numérica, utilizando o ABAQUS. Além disso, realizou estudos comparativos entre os seus resultados numéricos e os experimentais obtidos por outros autores. Verificou que, em função dos meios de conexão utilizados, as vigas *slim floor* com aberturas na alma conseguem atingir diversos graus de interação, podendo alcançar inclusive a condição de interação completa. Andrade (2017) realizou um estudo comparativo da espessura da laje de um pavimento do edifício do IFMG, que foi concebido no sistema misto *steel deck*, com uma laje calculada no sistema *Slim Floor*, utilizando o *software* CoSFB, da *ArcelorMittal*. Concluiu que o pavimento teria uma redução de 45% na altura total se fosse utilizado o sistema *Slim floor*.

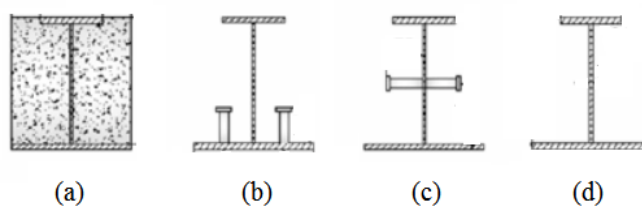
Minhaneli (2018) avaliou os modos de conexão e o comportamento à flexão de sistemas *slim floor* baseados nos estudos das tipologias I-TECH e SCCFB. O estudo foi numérico, utilizando o programa computacional ABAQUS e a metodologia proposta por Paes (2003). Concluiu-se que as aberturas na alma influenciam na ativação do comportamento misto e são relevantes para o melhor desempenho do sistema de piso.

Kochem (2018) desenvolveu um modelo numérico de uma ligação mista viga-pilar, utilizando o perfil *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) e laje com fôrma incorporada, no ABAQUS. São

apresentados os procedimentos para o desenvolvimento do modelo numérico, a avaliação do efeito dos modelos constitutivos dos materiais e um estudo paramétrico, analisando a influência da taxa de armadura da laje. O modelo numérico apresentou boa correlação com o modelo físico, e mostrou que a taxa de armadura da laje influencia diretamente no momento resistente e na rigidez.

No Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), o sistema *slim floor* vem sendo estudado há alguns anos, tanto em aspectos teóricos, quanto experimentais e numéricos, e já apresenta bases bem consolidadas. Os trabalhos de De Nardin e El Debs (2008) foram os precursores nesse tema. A pesquisa trata de vigas parcialmente revestidas, em que foram iniciadas análises sobre a posição dos conectores de cisalhamento. Para esse estudo, foram ensaiadas três vigas parcialmente revestidas (Figura 2.25(a)), com conectores do tipo pino com cabeça soldados à mesa inferior (Figura 2.25(b)), à alma (Figura 2.25(c)) e um modelo sem conectores (Figura 2.25(d)).

Figura 2.25: Posição dos conectores em vigas parcialmente revestidas



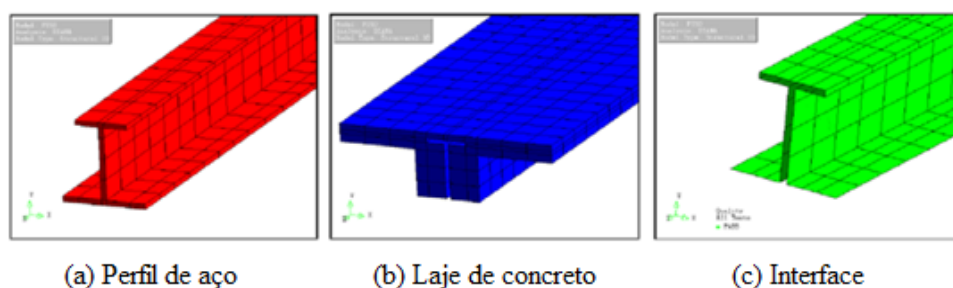
Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs, 2008

Os resultados experimentais mostraram que a capacidade resistente à flexão é levemente aumentada quando são utilizados conectores soldados à mesa inferior do perfil. Já em relação ao escorregamento relativo entre o aço e o concreto, essa posição proporciona uma redução em torno de 37% quando comparada à amostra sem conectores. Além disso, concluiu-se que a posição dos conectores não modifica o modo de falha, sendo visualizada a fissuração do concreto, com início no meio do vão e propagação na direção dos apoios.

Em continuidade a esse trabalho, Cavalcanti (2010) analisou, experimental e numericamente, a contribuição da armadura na capacidade resistente de vigas mistas parcialmente revestidas e sua eficiência na garantia do comportamento conjunto do aço e concreto. Foram realizados ensaios de vigas sob flexão em quatro pontos, analisando a taxa de armadura longitudinal no concreto e posição dos conectores tipo pino com cabeça. Foi comprovada a eficiência do conjunto armadura-conector, aumentando a capacidade resistente à flexão e garantindo o comportamento misto, estando os resultados numéricos de acordo com os experimentais.

Ramos (2010) fez um estudo numérico, validado com os resultados experimentais de Lawson, Mullett e Rackham (1997), em que foi analisada a influência de alguns parâmetros no comportamento da estrutura, como a resistência do concreto, variação da altura da capa de concreto e taxa de armadura. O estudo numérico mostrou boa concordância com o experimental, e a análise paramétrica revelou que a variação da resistência do concreto tem pouca influência no momento resistente, sendo este mais sensível à variação da altura da capa de concreto. A Figura 2.26 mostra a geometria das estruturas modeladas por Ramos (2010).

Figura 2.26: Modelo numérico proposto por Ramos (2010)



Fonte: Adaptado de Ramos, 2010

Em 2012, De Nardin e El Debs realizaram um estudo experimental, dessa vez com o objetivo de avaliar as conexões entre pilar e viga no sistema *slim floor*. A ligação pilar-viga analisada se dá por uma chapa que atravessava o pilar misto e é conectada à alma da viga por uma única linha de três parafusos, sendo o comportamento misto do piso garantido por conectores de cisalhamento soldados à mesa superior. Concluiu-se que a ligação mista apresentou comportamento não-linear e a presença da laje mista modificou o comportamento da ligação e contribuiu para a transferência de momentos entre a viga e o pilar. Além disso, foi confirmada a interação completa aço-concreto, pois não houve deslizamento entre laje e viga.

Rocha (2012) fez um estudo numérico para avaliar o desempenho térmico e estrutural do piso misto de pequena altura com e sem armadura. Constatou-se que o uso de armadura influenciou o comportamento estrutural apenas após os 90 minutos de exposição ao incêndio padrão, mantendo o comportamento mais suave, com menores deslocamentos. Esse comportamento, obtido por meio de modelos numéricos, foi comparado aos obtidos a partir da Teoria Plástica da Seção Transversal (MMP). Os resultados foram bastante próximos nos dois casos, porém para tempos de exposição menor, o MMP apresenta momento resistente maior.

No mesmo ano, Friedrich (2012) fez um estudo experimental testando uma nova geometria de fôrma de aço trapezoidal com mossas nas laterais para pisos mistos de pequena altura. Essa pesquisa envolveu desde a elaboração e a fabricação da fôrma até o ensaio experimental, que

apresentou capacidade resistente comparável à de lajes mistas usuais comercializadas no Brasil. A estrutura apresentou razoável resistência ao cisalhamento longitudinal e o modo de ruptura foi semelhante aos de outros sistemas estudados na literatura.

Souza (2016) fez um estudo bastante completo sobre o piso misto de pequena altura composto por lajes alveolares protendidas. O trabalho foi composto por duas partes: a parte experimental, em que foram feitos ensaios de cisalhamento direto (*push-out*) e de flexão (Figura 2.27), e a parte numérica, realizando uma análise paramétrica. Os resultados experimentais mostraram que os conectores tipo pino com cabeça, aliados ao preenchimento dos alvéolos, aumentaram a capacidade resistente da ligação entre o aço e o concreto. A análise paramétrica mostrou que a variação da mesa inferior do perfil teve maior influência no momento fletor resistente que a variação da espessura da capa de concreto.

Figura 2.27: Modelo ensaiado por Souza (2016)



Fonte: Souza, 2016

Como visto no presente tópico, o piso misto de pequena altura apresenta diversos estudos experimentais, numéricos e teóricos. Entretanto, quando organizados por tipologias, o número de trabalhos realizados diminui consideravelmente para cada uma delas. Assim, a fim de realizar um levantamento teórico e analisar, através de uma perspectiva bibliográfica, o impacto de cada tipologia no estudo do *slim floor*, as pesquisas foram divididas por tipologia em uma Tabela com informações relevantes sobre o tipo de pesquisa.

Devido à grande quantidade de tipologias relacionadas, a Tabela foi resumida e foram selecionadas quatro tipologias, as quais foram estudadas numérica e comparativamente no presente trabalho. Dessa forma, a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) e a *Shallow Cellular*

Composite Floor Beam (SCCFB) foram selecionadas por possuírem uma maior quantidade de estudos, mostrando interesse por parte da comunidade técnico-científica, e a *Deltabeam*® e *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) foram escolhidas por serem tipologias mais recentes, porém com confirmação de grande potencial e aplicação. Assim, foi montada a Tabela 2.1, que traz um resumo dos trabalhos mais relevantes das tipologias selecionadas, com indicação dos estudos utilizados para a calibração de cada modelo.

Tabela 2. 1: Resumo dos trabalhos mais relevantes por tipologia

Tipologia estudada	Autores	Estudo		
		Experimental	Numérico	Teórico/Analítico
Asymmetric Slimflor Beam (ASB)	Lawson, Mullet e Rackham (1997)	x (Calibração)	-	x
		Procedimento analítico baseado na norma britânica BS 5950 (1982); determinou o momento fletor resistente, a tensão última de aderência na interface aço-concreto e a rigidez.		
	Paes (2003)	-	x	-
		Avaliação do comportamento estrutural do <i>slim floor</i> , em condições últimas e de serviço.		
	Rackham, Hicks e Newman (2006)	-	-	x
		Orientações sobre a concepção do sistema ASB com laje alveolar. Estabelecimento de um procedimento de cálculo.		
	Ramos (2010)	-	x	-
		Estudo numérico e paramétrico baseado no modelo de Lawson, Mullet e Rackham (1997).		
	De Nardin, El Debs (2012)	x	-	-
		Realização de testes em escala real para avaliação das conexões entre pilar e viga, utilizando conectores de cisalhamento soldados na mesa superior.		
	Rocha (2012)	-	x	-
		Investigação do desempenho térmico e estrutural do sistema com e sem armadura; avaliar a perda da capacidade portante da seção em função do tempo de exposição ao fogo.		
Limazie e Chen (2015)	-	-	x	
	Desenvolvimento de um procedimento de projeto, validado com resultados experimentais apresentados na literatura. Avaliação das propriedades de flexão das vigas.			
Kochem (2018)	-	x	-	
	Avaliação da ligação mista viga-pilar misto preenchido, utilizando o perfil ASB e laje com fôrma de aço incorporada; estudo sobre os modelos constitutivos dos materiais que compõem a ligação mista e a interface aço-concreto.			

Tabela 2.1: Resumo dos trabalhos mais relevantes por tipologia (Continuação)

Tipologia estudada	Autores	Estudo		
		Experimental	Numérico	Teórico/Analítico
<i>Deltabeam</i> ®	Nadasky (2012)	-	-	x
		Discussão de requisitos específicos para os perfis em estado limite último e de serviço. Fornece condições de aceitação para vibrações e como alcançar a resistência de fogo.		
	Leskela et al. (2014)	x	x	-
		Realização de testes experimentais de cisalhamento e de capacidade de carga; Análise paramétrica a partir de modelos numéricos.		
	Pentonen et al. (2016)	x (Calibração)	x	-
		Análise do comportamento à flexão do sistema estrutural, obtendo-se as curvas de deslocamento, valores de deslizamento e padrões de danos das amostras ensaiadas.		
Derkowski e Skalski (2017)	-	x	-	
	Discussão de requisitos de projeto, mostrando que as condições básicas foram atendidas. Aponta vantagens e desvantagens do sistema.			
<i>Composite Slim-floor Beam (CoSFB)</i>	Ellobody (2011)	-	x	-
		Investigação numérica não-linear do desempenho estrutural da CoSFB sob condições de incêndio. Foram avaliados parâmetros como geometria da seção transversal, comprimento da viga e diferentes cenários de incêndio.		
	Hechler et al. (2013)	x (Calibração)	x	-
		Realização de testes push-out avaliando o cisalhamento, vibração e deformação e proposto um método para ativar a largura total efetiva do concreto. Ensaios de flexão também foram realizados.		
	Baldassino et al. (2018)	x	-	-
Sheehan et al. (2018)	x	-	-	
	Realização de testes de cisalhamento e ensaios de flexão, a fim de avaliar o grau da conexão de cisalhamento utilizando barras de aço e a influência da quantidade dessas barras na capacidade resistente a flexão e ao cisalhamento.			
<i>Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)</i>	Lawson et al. (2006)	x	x	-
		Propõe um método de projeto levando em conta a assimetria e a existência de aberturas circulares, alongadas ou retangulares. Sugeridas equações simplificadas, calibradas com os resultados de análise de elementos finitos.		
	Tsavdaridis, D’Mello e Hawes (2009)	x	-	-
		Investigação da contribuição do concreto que passa entre as aberturas da viga, nas forças de cisalhamento verticais.		
Huo, D’Mello e Tsavdaridis (2010)	x	-	-	
		Pesquisa sobre o efeito de conectores adicionais, realizando 16 testes <i>push-out</i> em escala real e uma análise teórica para investigar o mecanismo de falha do sistema.		

Tabela 2.1: Resumo dos trabalhos mais relevantes por tipologia (Continuação)

Tipologia estudada	Autores	Estudo		
		Experimental	Numérico	Teórico/Analítico
<i>Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)</i>	Huo e D’Mello (2013)	x	-	-
		Foco nos mecanismos de transferência de cisalhamento, através de investigações experimentais. Foram realizados 24 testes <i>push-out</i> para estudar a conexão de cisalhamento e proposto um método de cálculo de resistência ao cisalhamento para a conexão de cisalhamento.		
	Chen, Limazie e Tan (2015)	x (Calibração)	-	x
		Análise do comportamento à flexão e dos mecanismos de transferência de cisalhamento, considerando a combinação entre o concreto que passa através das aberturas na alma do perfil e as armaduras para garantir o comportamento misto.		
	Limazie e Chen (2016)	-	x	-
		Variação de parâmetros como a largura efetiva da laje de concreto, altura de concreto acima do perfil, espessura da mesa inferior e aumento das aberturas.		
	Limazie e Chen (2017)	-	x	-
		Estudo de conectores de cisalhamento inovadores (barras de aço), e investigação de parâmetros como mecanismo de transferência de força, capacidade de carga e comportamento de falha dessas conexões.		
Huo e D’Mello (2017)	x	-	x	
	Teste de flexão em escala real, que permitiu concluir que a ação mista foi significativa e a falha de flexão inicial ocorreu no concreto.			
Chen e Limazie (2018)	-	-	x	
	Proposta analítica de projeto para a verificação de conexões de cisalhamento inovadores e orientações para o dimensionamento do SCCFB.			
Yu et al. (2019)	x	-	x	
	Teste de flexão, através de ensaios realizados em seis amostras, variando a altura das vigas. Os resultados indicaram grande rigidez, capacidade resistente e alta ductilidade. Foram propostas fórmulas de cálculo da rigidez e capacidade resistente à flexão.			

Fonte: Autora, 2020

2.3.1 Considerações finais

O piso misto de pequena altura é um sistema que pode trazer diversas vantagens para a construção, como redução da altura total do piso, adequada resistência ao fogo e aumento da capacidade resistente do perfil de aço às instabilidades locais. Porém, foi possível perceber

por meio da revisão bibliográfica, que o estudo do *slim floor* ainda é recente, principalmente quando se leva em conta a diversidade de tipologias existentes.

Em geral, os trabalhos que compõem a revisão bibliográfica apresentam uma avaliação do comportamento estrutural do sistema *slim floor*, principalmente com avaliação do momento fletor resistente e capacidade da conexão. Os resultados encontrados pelos autores dependem da tipologia estudada, mas sempre mostram bom desempenho das estruturas, confirmando que a aplicação desse sistema é viável. A maioria dos trabalhos foi realizado a partir de ensaios experimentais, sendo complementado com simulação numérica, calibrada a fim de elaborar uma análise paramétrica. Trabalhos analíticos ainda são bastante iniciais, visto que, por falta de normatização, trazem métodos de dimensionamento baseados em normas para outras estruturas e que não se aplicam a todas as tipologias existentes.

Ficou evidente durante a pesquisa, que o estudo do comportamento do *slim floor* em situações de elevadas temperaturas é bastante frequente, assim como o estudo das conexões de cisalhamento. Muitos autores investigam conexões alternativas ao uso tradicional do pino com cabeça soldado à mesa superior do perfil, uma vez que o objetivo desse componente estrutural é diminuir a altura do pavimento e na conformação original o *stud bolt* exige uma capa de concreto de grande altura.

No Brasil, apesar do estudo inicial, percebe-se que a EESC/USP se destaca pela quantidade de pesquisas realizadas nesse tema e pelo conteúdo completo que abrange aspectos teóricos, analíticos, experimentais e numéricos. Mesmo assim, a tipologia mais estudada nacionalmente ainda é a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), ressaltando que, experimentalmente, apenas essa tipologia foi analisada. O Grupo de Pesquisa de Estruturas da Universidade Federal de Viçosa – MG, também vem desenvolvendo trabalhos relacionados ao sistema *slim floor*, como pode ser visto em Mesquita (2016) e Minhaneli (2018).

Internacionalmente, o piso misto de pequena altura já se apresenta como uma opção viável de construção e por isso os estudos já começam a focar na análise de novas tipologias, visando melhorar a conexão de cisalhamento, alcançar maiores vãos e diminuir o peso próprio da estrutura.

Pode ser observado que as tipologias com uma maior gama de pesquisas são a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) e a *Shallow Cellular Composite Floor Beam* (SCCFB), apresentando estudos mais completos, com análises experimentais, numéricas e teóricas/analíticas. A *Deltabeam*® e o *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) são tipologias mais recentes e a

maioria dos estudos é para confirmar sua capacidade estrutural, consolidando-as como grandes possibilidades para o desenvolvimento e ampliação do uso dos pisos mistos de pequena altura.

Os demais perfis citados na revisão bibliográfica, como o UPE *slimfloor system*, *D-beam*, *iTECH* e a seção composta por dois perfis T invertidos, apresentam estudos recentes e ainda não são usuais. Outros, como o *Slimflor* e o *Integrated Floor Beam*, não apresentaram pesquisas, teóricas e experimentais, suficientes para a realização da análise numérica.

Sendo assim, por meio da revisão bibliográfica e da avaliação da quantidade e qualidade dos trabalhos de cada perfil, foi possível selecionar quatro tipologias para desenvolver o estudo numérico e comparativo, que serão mais detalhadas nos próximos capítulos, sendo elas: a *Asymmetric Slimflor Beam (ASB)*, *Deltabeam®*, *Composite Slim-Floor Beam (CoSFB)* e *Shallow Cellular Composite Floor Beam (SCCFB)*. Além disso, a revisão bibliográfica permitiu verificar quais os aspectos mais relevantes no comportamento do piso misto de pequena altura, servindo de referência para a análise paramétrica do presente trabalho.

3 MODELOS TEÓRICOS

Apesar de iniciais, os trabalhos sobre pisos mistos de pequena altura já vêm incorporando aspectos essenciais para que seja possível concretizar sua construção. Dentre esses aspectos, destaca-se o estudo de métodos para garantir o comportamento misto da estrutura, podendo ser feito de maneira inovadora, utilizando barras de aço por exemplo. O tópico do dimensionamento do *slim floor* também vêm ganhando espaço dentre os estudos, a fim de trazer orientações à prática de projeto, limitando-se, porém, à tipologias com perfil I assimétrico e suas derivações, como a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), *Slimflor Fabricated Beam* (SFB) e *Integrated Floor Beam* (IFB). Uma explanação dos modelos teóricos e um exemplo de aplicação do dimensionamento são apresentados neste capítulo.

3.1 COMPORTAMENTO MISTO

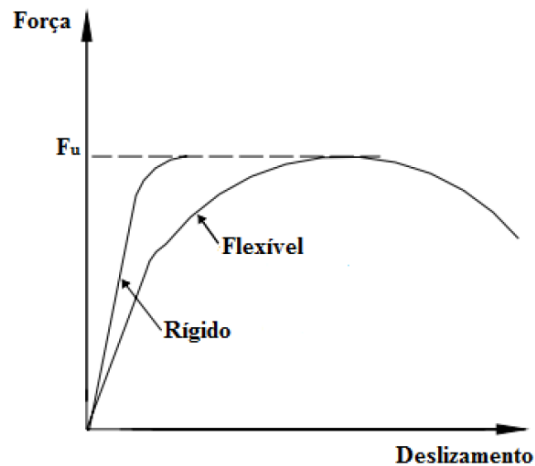
As estruturas de aço e concreto somente podem ser consideradas mistas quando são ligadas de modo a se deformarem como um único elemento. A adesão e o atrito compõem a parcela de aderência natural e são provenientes das ligações físico-químicas na zona de contato entre os materiais durante a cura do cimento. Porém, na maioria dos casos, não são suficientes para resistir às tensões na interface e promover o comportamento misto, sendo necessário recorrer ao uso de dispositivos mecânicos, como conectores de cisalhamento, mossas, saliências ou barras de reforço, dispostos na região de contato entre os materiais.

Os dispositivos mais utilizados para garantir a conexão entre viga e laje em pisos mistos convencionais são os conectores de cisalhamento, responsáveis por absorver as tensões de cisalhamento nas duas direções, impedindo o afastamento vertical (*uplift*) entre os materiais. De Nardin e El Debs (2008) apresentam alternativas para promover o comportamento misto, afirmando que a melhor opção depende de fatores como: conhecimento do comportamento e dos modos de falha do dispositivo e consciência dos critérios de projeto, da facilidade de execução e do custo.

De acordo com a ductilidade da ligação aço-concreto, ou seja, sua capacidade de deformação após ter alcançado a resistência máxima, os conectores de cisalhamento podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. Assim, sob carregamento crescente, o conector flexível continua a se deformar, sem ocorrência de ruptura, mesmo após alcançar sua capacidade resistente, permitindo que os conectores vizinhos também atinjam a sua resistência máxima. Essa flexibilidade permite que os conectores sejam espaçados igualmente e que a ruptura da estrutura

seja do tipo dúctil. Para esse tipo de conector, a curva força-deslizamento, mostrada na Figura 3.1, apresenta um patamar definido (SOUZA, 2016). Já os conectores rígidos, se deformam muito pouco com incremento de carga, e não possibilitam o deslizamento relativo entre o aço e o concreto. Entretanto, quando a estrutura vier a romper, será de maneira frágil, com esmagamento ou cisalhamento do concreto.

Figura 3.1: Diagrama força \times deslizamento relativo Aço-concreto



Fonte: Souza, 2016

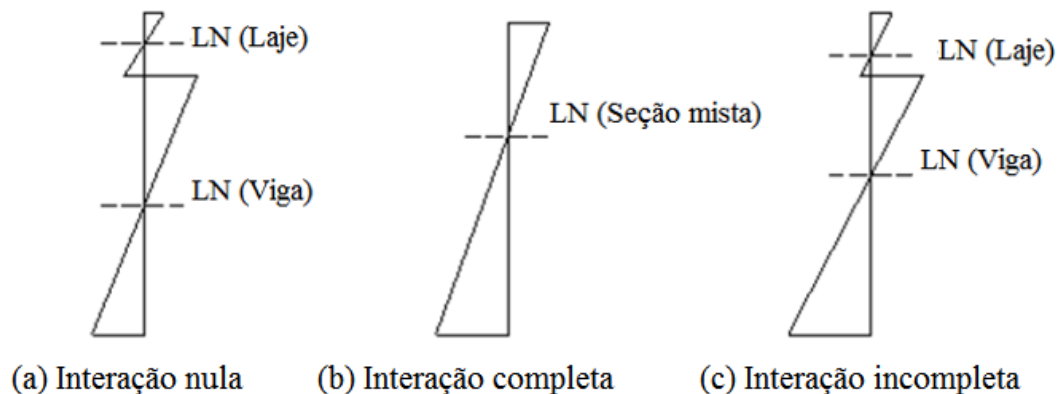
Segundo o Eurocode 4 (2004), a ligação do aço com o concreto provocada pelo conector de cisalhamento pode ser classificada quanto ao grau de conexão e ao grau de interação. O grau de conexão está relacionado à resistência da ligação aço-concreto, podendo ser total, parcial ou nula. Quando o colapso da viga mista se dá pelo escoamento do perfil de aço ou pela ruptura da laje de concreto, a conexão é total, ou seja, pode-se aumentar o número ou a resistência destes conectores, que não influenciará no momento fletor resistente da viga mista. A conexão parcial acontece quando não é utilizado um número suficiente de conectores, assim, quem controlará o momento fletor máximo da viga mista é a capacidade da conexão ao cisalhamento. A conexão nula é quando não são utilizados conectores de cisalhamento e não existe o comportamento misto.

O grau de interação, por sua vez, refere-se ao deslizamento relativo entre a laje e o perfil de aço, podendo ser classificada em completa, incompleta e nula. Na interação completa, o escorregamento (longitudinal e vertical) e a deformação relativa na interface aço-concreto são totalmente impedidos. Assim, a laje e o perfil resistirão aos esforços de flexão como se fossem um elemento único. No caso da interação incompleta, ocorre a deformação dos conectores, verificando-se um escorregamento relativo entre os materiais. Por fim, tem-se a interação nula, em que os elementos trabalham de forma independente, sem transferência de esforços entre as

interfaces e cada material resiste a uma parcela dos esforços de flexão, devido à ausência dos conectores de cisalhamento.

Como é possível observar na Figura 3.2, na interação nula os materiais trabalham de maneira independente, com duas linhas neutras no centro geométrico de cada seção; na interação completa, os materiais se comportam como um só, tendo uma única linha neutra; e na interação incompleta as duas linhas neutras se aproximam da interface (SOUZA, 2016).

Figura 3.2: Distribuições de deformações para os tipos de interações

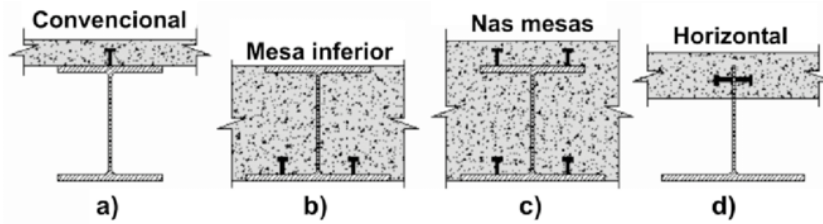


Fonte: Adaptado de Souza, 2016

Para garantir o comportamento misto da estrutura, as vigas mistas utilizam, em sua maioria, os conectores de cisalhamento. Alguns exemplos de conectores são o Perfil U, o *Perfobond* e o do tipo pino com cabeça (*Stud Bold*), sendo este último mais comumente utilizado e previsto pela ABNT NBR 8800 (2008), juntamente com o Perfil U. Por esses motivos, o comportamento do *Stud Bold* e os seus modos de falha já são bem conhecidos, assim como a sua aplicação no perfil de aço, cuja soldagem é feita por eletrofusão. A cabeça do *Stud Bold* apresenta dupla função, além de aumentar a resistência do conector, promovendo o esmagamento de determinadas regiões, impede a separação vertical entre o aço e o concreto.

Inicialmente, nos pisos mistos de pequena altura, apenas o conector do tipo pino com cabeça era utilizado, soldado à mesa superior do perfil, como nos pisos mistos convencionais (Figura 3.3(a)). Porém, estudos como o de De Nardin e El Debs (2008), mostraram que esses conectores podem ser soldados de outros modos, como na mesa inferior do perfil (Figura 3.3(b)), nas duas mesas (Figura 3.3(c)) ou até na alma (Figura 3.3(d)). Foi mostrado que para vigas revestidas, a configuração que apresenta melhores resultados é a com conectores soldados na mesa inferior, sendo mais eficiente em termos de capacidade resistente à flexão e redução do escorregamento aço-concreto.

Figura 3.3: Posição dos conectores em vigas I parcialmente revestidas

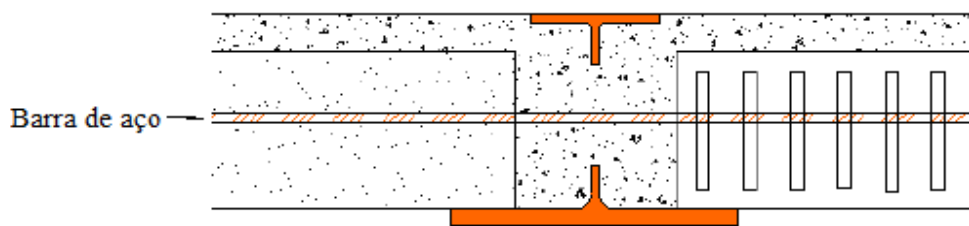


Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs, 2008

Desde o início dos anos 2000, muitas pesquisas foram desenvolvidas analisando outros tipos de dispositivos mecânicos de conexão, como barras de reforço passando através das aberturas do perfil e a combinação entre barras e conectores tipo pino com cabeça, como nos trabalhos de Leskela e Hopia (2000), Paes (2003) e mais recentemente em Limazie e Chen (2016) e Derysz, Lewinski, Wiech (2017). Assim, tem-se inovado nas conexões de cisalhamento utilizadas no piso misto de pequena altura, sendo diferentes daquelas utilizadas no piso misto convencional.

A ligação na interface entre concreto e aço apresenta força adesiva muito pequena, estando sujeita à falhas de corte sob pequenas cargas. Assim, as barras de aço garantem o comportamento misto já que, quando em contato com o concreto moldado no local, são capazes de transferir a força de cisalhamento longitudinal entre a laje de concreto e a viga de aço. Segundo Limazie e Chen (2016), essa conexão será mais eficaz se a viga de aço possuir aberturas, permitindo que as barras e o concreto moldado *in loco* passem entre as aberturas, e assim, quando em contato com a viga e com as barras, o concreto ativará a maior parte do comportamento misto, Figura 3.4.

Figura 3.4: Conexão de cisalhamento através de barras de aço



Fonte: Huo, D'Mello e Tsavdaridis, 2010

Essa conexão de cisalhamento funciona de modo que, à medida que a carga aumenta, a capacidade do concreto de resistir ao cisalhamento é alcançada, ocorrendo um grande deslizamento na interface entre a laje e a viga. Neste ponto, a barra de aço, que também passa pela abertura, ajudará a resistir à tração transversal no pino de concreto. Além disso, essas barras irão aumentar a capacidade de carga do concreto e redistribuir as forças internas na conexão entre o aço, o concreto confinado e a barra de reforço.

Além dos estudos iniciais, trabalhos recentes como Limazie e Chen (2017), Huo e D’Mello (2017) e Chen e Limazie (2018) continuam comprovando a eficiência dessa conexão de cisalhamento, mostrando que, além de melhorar a resistência ao cisalhamento e à flexão da estrutura, contribui para fornecer o desempenho dúctil desejado. Desse modo, no presente trabalho, o comportamento misto foi garantido pela utilização de barras de aço, agindo como conexão de cisalhamento, para as quatro tipologias.

Percebe-se que o piso misto de pequena altura se mostra inovador, inclusive sob aspectos de comportamento misto. Os estudos sobre esse sistema vêm ganhando amplitude e a investigação dos parâmetros para estabelecer critérios de dimensionamento está cada vez mais contundente, como mostrado a seguir.

3.2 DIMENSIONAMENTO

O piso misto de pequena altura não possui recomendações normativas nacionais para seu dimensionamento completo, porém muitos pesquisadores brasileiros já iniciaram estudos nessa área, como Santos, Lima e Sakiyama (2016) e Andrade (2017), baseando-se na ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 8800 (2008). Fundamentaram-se também em estudos internacionais, como Barros (2011) e Cordeiro (2013) e as publicações do *Steel Construction Institute*, Mullet (1992), Mullet e Lawson (1993), Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Mullett e Lawson (1999), que utilizaram como suporte o Eurocode 3 (2005), Eurocode 4 (2004) e a norma britânica BS 5950-1 (2001) e BS 5950-3.1 (2001).

Para o dimensionamento do *slim floor*, deve-se verificar tanto a fase construtiva, quanto a fase de utilização do piso misto de pequena altura. Na etapa de construção, como ainda não se consolidou o comportamento misto da estrutura, o dimensionamento pode ocorrer tanto segundo a ABNT NBR 8800 (2008), quanto de acordo com as normas internacionais em estruturas metálicas, citadas anteriormente. Nesse caso, deve ser verificada a flambagem lateral com torção, a combinação de esforços de flexão com esforços de torção e os efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior.

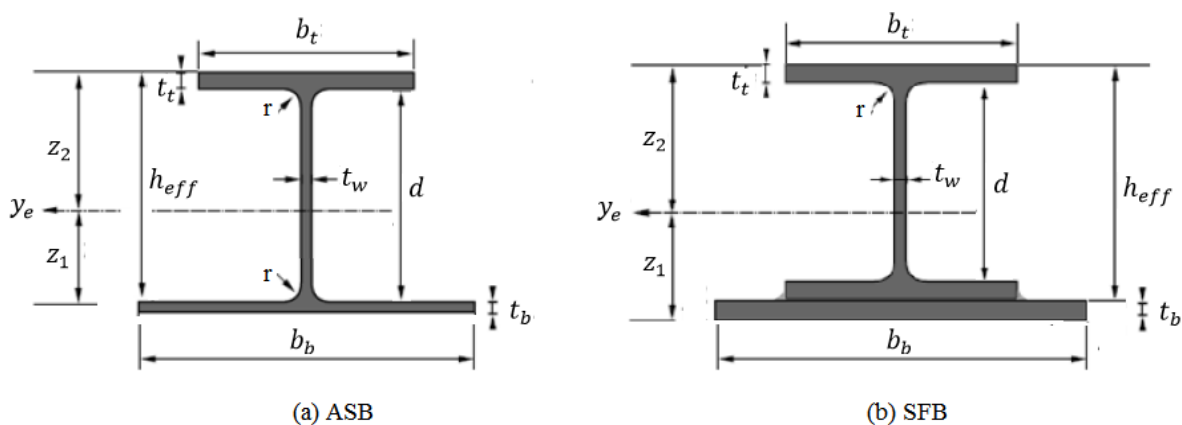
Para a fase de utilização, não existe recomendação normativa nacional que contemple o comportamento misto do piso misto de pequena altura, sendo necessário recorrer ao Eurocode 3 (2005), Eurocode 4 (2004) e as normas britânicas BS 5950-1 (2001) e BS 5950-3.1 (2001). Necessita-se, então, verificar requisitos do Estado Limite Último (ELU), como a resistência da viga frente aos diferentes tipos de esforços, e do Estado Limite de Serviço (ELS), averiguando os efeitos dos deslocamentos e vibrações. Assim, este tópico trata-se de um

estudo teórico-expositivo do dimensionamento do *slim floor*, contemplando tanto a fase de construção quanto de utilização.

Antes de iniciar o dimensionamento, é necessário definir a disposição construtiva do sistema, ou seja, qual será a tipologia de viga e de laje utilizada. Os estudos desenvolvidos até então compreendem, na sua maioria, a utilização do perfil *Slimflor Fabricated Beam* (SFB), *Integrated Floor Beam* (IFB) ou *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB). Alguns estudos internacionais abrangem também vigas com aberturas circulares, como o de Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Mullett e Lawson (1999). Com relação às lajes, tanto a *steel deck* quanto a maciça vêm sendo estudadas e utilizadas.

O presente trabalho se limitará a apresentar as verificações referentes ao dimensionamento do *slim floor* composto pelos perfis I assimétricos, tanto ASB quanto SFB. Para a realização desse procedimento, é interessante padronizar a nomenclatura, como mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5: Denominação das dimensões das duas tipologias estudadas



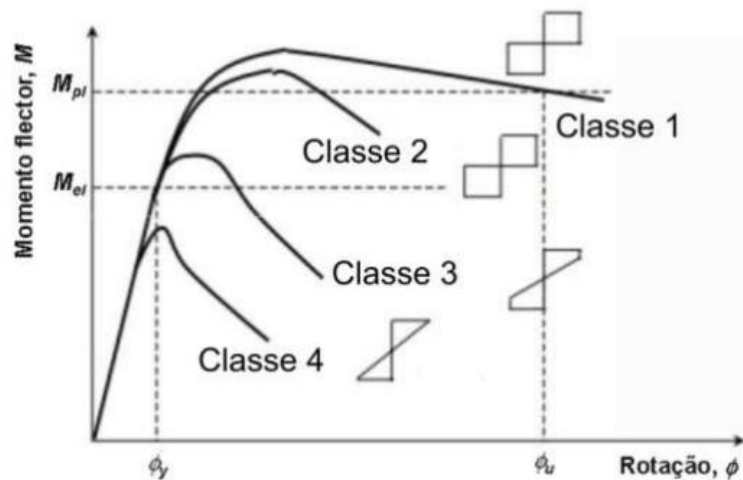
Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Segundo Mullett e Lawson (1993) algumas condições devem ser atendidas para o dimensionamento do piso misto de pequena altura. Primeiramente, a viga deve ser simplesmente apoiada e sujeita a ações uniformemente distribuídas. Além disso, a análise plástica será baseada no diagrama retangular de tensões e os momentos e forças correspondentes serão obtidos através de cargas majoradas. Para as verificações de deslocamentos e vibrações são utilizadas as cargas não majoradas e a tensão na fibra extrema será limitada à tensão de escoamento do aço, f_y .

Além disso, recomenda-se 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. Tal classificação é indicada no Eurocode 3 (2005) e definida em quatro classes, sendo a Classe 1

referente às seções em que se pode formar uma rótula plástica, podendo ser realizada uma análise plástica, sem redução da sua resistência; na Classe 2 tem-se as seções compactas, que podem atingir o momento resistente plástico, porém com capacidade de rotação limitada pela flambagem local; na Classe 3, semicompactas, a tensão de escoamento pode ser atingida, mas o momento resistente plástico é impedido pela flambagem local; na Classe 4 a flambagem local ocorre antes de se atingir a tensão de escoamento em uma ou mais partes da seção transversal. A Figura 3.6 ilustra o comportamento das seções à flexão. A norma BS 5950-3.1 (2001) recomenda um dimensionamento plástico, por isso os perfis serão limitados à seções da Classe 1 ou 2.

Figura 3.6: Comportamento das seções à flexão



Fonte: Adaptado de Eurocode, 1993

3.2.1 Fase de construção

Na fase de construção, ainda não existe comportamento misto entre o aço e concreto, sendo o dimensionamento do *slim floor* feito de maneira semelhante ao piso misto convencional. Assim, nessa primeira etapa, ele pode ser realizado tanto de acordo com norma nacional, ABNT NBR 8800 (2008), quanto conforme normas internacionais, como a BS 5950 (2001) e Eurocode 3 (2005) e 4 (2004). Afim de padronizar o dimensionamento, a seguir são apresentados os passos seguidos segundo as normas internacionais, já que a segunda fase se limita ao seu uso.

Os escoramentos temporários são, por vezes, necessários na fase construtiva para reduzir o carregamento transmitido à viga e diminuir as flechas. Essa técnica possui a desvantagem de causar deslocamentos excessivos quando o escoramento é retirado, porém, enquanto são

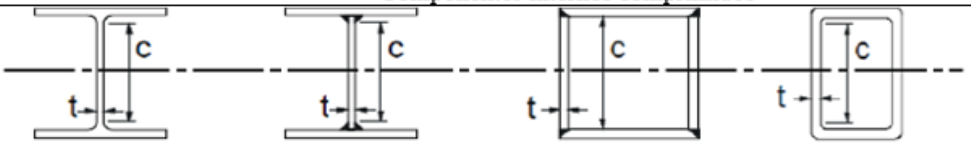
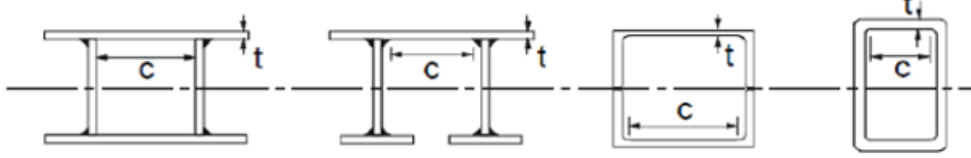
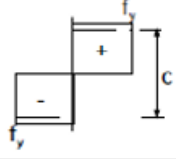
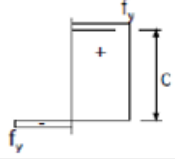
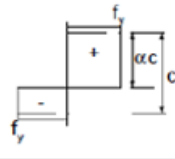
usados, os efeitos de flexão e torção podem ser desprezados (LAWSON; MULLETT; RACKHAM, 1997).

Nessa fase, é exigida a verificação da flambagem lateral com torção, da combinação de esforços de flexão com esforços de torção e dos efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior. Além disso, segundo o Eurocode 3 (2005), apenas as seções pertencentes às classes 1 e 2 são verificadas, assim, o dimensionamento da fase de construção inicia-se com a classificação dessas seções de aço.

- **Classificação das seções de aço**

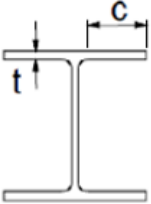

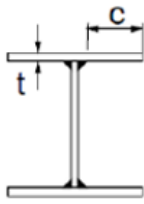
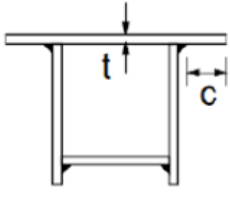
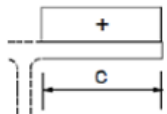
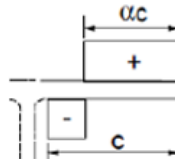
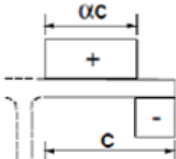
A classificação das seções reflete a forma como a resistência e a capacidade de rotação são influenciadas pela flambagem local da alma ou da mesa dos perfis. Os limites serão apresentados para a Classe 1 e 2, já que se recomenda que apenas essas duas classes sejam utilizadas. As Figura 3.7 e 3.8 mostram a classificação das almas e das mesas, respectivamente. Normalmente, os perfis laminados que utilizam os aços convencionais são de classe 1 e 2 para qualquer solicitação, já os perfis soldados são frequentemente de classe 3 ou 4.

Figura 3.7: Classificação da alma de seções pelo Eurocode 3 (2005)

Componentes internos comprimidos			
			Eixo de flexão
			Eixo de flexão
Classe	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e a compressão
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
I	$c/t \leq 72 \epsilon$	$c/t \leq 33 \epsilon$	Quando $\alpha > 0,5$, $\frac{c}{t} \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ Quando $\alpha \leq 0,5$, $\frac{c}{t} \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$
II	$c/t \leq 83 \epsilon$	$c/t \leq 38 \epsilon$	Quando $\alpha > 0,5$, $\frac{c}{t} \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ Quando $\alpha \leq 0,5$, $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

Fonte: Adaptado de Cordeiro, 2013

Figura 3.8: Classificação da mesa de seções pela norma Eurocode 3 (2005)

Mesas em balanço			
			
Seções laminadas		Seções soldadas	
Classe	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e a compressão	
		Extremidade comprimida	Extremidade tracionada
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)			
I	$c/t \leq 9 \epsilon$	$c/t \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$
II	$c/t \leq 10 \epsilon$	$c/t \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$

Fonte: Adaptado de Cordeiro, 2013

O coeficiente ϵ é calculado por $\sqrt{\frac{275}{f_y}}$ e o valor do coeficiente α é dado pela relação entre a altura da alma à compressão e à tração, através da distribuição de tensões plásticas.

- **Flambagem lateral com Torção (FLT)**

A flambagem lateral com torção pode ocorrer em elementos que não tenham travamento lateral e que estejam solicitados à flexão no eixo principal de maior inércia. Na fase de utilização este fenômeno não será verificado, pois o concreto que envolve a viga não permitirá a flambagem da seção, servindo de contraventamento lateral. Porém, essa flambagem pode ocorrer na fase construtiva, em que apenas a seção de aço resiste aos esforços, e por isso deve ser verificada (CORDEIRO, 2013).

Segundo o Eurocode 3 (2005), o valor de cálculo do momento resistente à flambagem lateral com torção ($M_{b,Rd}$), é definido pela Equação 3.1.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.1)$$

Onde $W_{pl,y}$ é o módulo de flexão plástico da seção em torno do eixo de maior inércia; f_y é a tensão de escoamento do aço; γ_{M1} é o coeficiente parcial de segurança em relação à

flambagem, podendo ser admitido 1,0; χ_{LT} é o coeficiente de redução da flambagem lateral com torção, dado pela Equação 3.2:
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (3.2)$$

Com $\phi_{LT} = 0.5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2)) + \bar{\lambda}_{LT}^2$ (3.3)

Sendo α_{LT} o fator de imperfeição para a flambagem lateral com torção, obtido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Curvas recomendadas de flambagem lateral com torção

Seção transversal	Limites	Curva	α_{LT}
Seções I laminadas	$h/b_h \leq 2$	a	0,21
	$h/b_b > 2$	b	0,34
Seções I soldadas	$h/b_b \leq 2$	c	0,49
	$h/b_b > 2$	d	0,76
Outras seções	-	d	0,76

Fonte: Adaptado do Eurocode 3, 2005

A esbelteza adimensional ($\bar{\lambda}_{LT}$) da flambagem lateral com torção é definida pela Equação 3.4.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (3.4)$$

M_{cr} é o momento crítico elástico de flambagem lateral com torção, dado pela Equação 3.5.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GJ E I_y \left(1 + \frac{\pi^2 E H}{L^2 G J} \right)} \quad (3.5)$$

Sendo L é o comprimento do perfil; G o módulo de distorção do aço estrutural; J a constante de torção da seção estrutural; E o módulo de elasticidade; I_y o momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia; H a constante de empenamento.

A viga resiste à flambagem lateral com torção se a condição 3.6 for verificada:

$$M_{Sd} \leq M_{b,Rd} \quad (3.6)$$

Sendo M_{Sd} o momento atuante máximo da seção.

- **Combinação de esforços de flexão com esforços de torção**

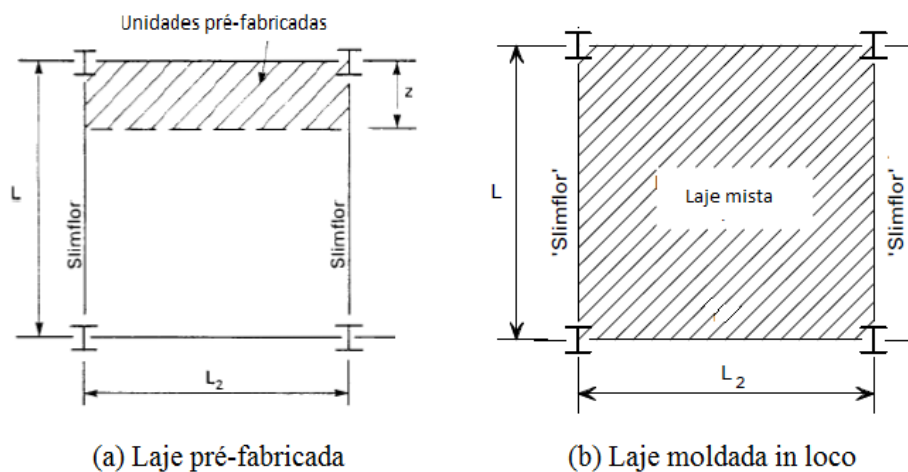
No sistema *slim floor* a laje é apoiada na mesa inferior do perfil de aço, transmitindo cargas para a viga em uma posição fora do centro de cisalhamento e de forma não simétrica. Essa característica pode gerar efeitos de torção, principalmente na fase construtiva. Como já abordado anteriormente, a laje utilizada nesse sistema pode ser tanto pré-fabricada como moldada *in loco*, podendo haver o efeito de torção independente da tipologia adotada. O estudo

desse efeito combinado com a flexão será baseado nos estudos de Mullet (1992), Mullet e Lawson (1993) e Lawson, Mullett e Rackham (1997).

Ao iniciar a instalação das lajes pré-fabricadas ou a concretagem *in loco*, as cargas em desequilíbrio aumentam. Esse desequilíbrio pode se tornar ainda maior à medida que o vão concretado aumenta, causando os efeitos de torção. Nessa verificação, é analisado o caso mais desfavorável possível, em que apenas um dos lados da viga tem a laje totalmente aplicada.

Quando se trata da aplicação de unidades pré-fabricadas, é possível definir um valor limite de módulos aplicados em um lado (z), a partir do qual existe a necessidade de colocar no lado oposto também. Por isso, a verificação do efeito combinado de esforços de flexão com esforços de torção, dependerá do tipo de laje utilizada, como mostrado na Figura 3.9.

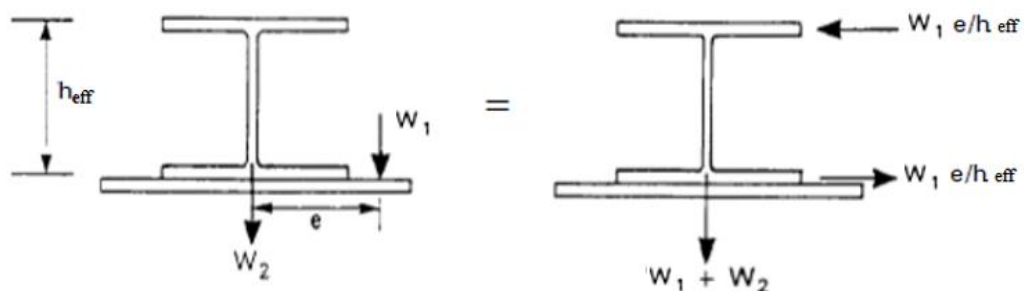
Figura 3.9: Consideração das lajes na verificação do *slim floor*



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Primeiramente, será analisada a aplicação de cargas no sistema formado por lajes pré-fabricadas. A carga W_1 representa o peso próprio das unidades pré-fabricadas somado a sobrecarga na fase de construção. A carga W_2 diz respeito ao peso próprio da viga de aço. O esquema de cargas é mostrado no exemplo da Figura 3.10.

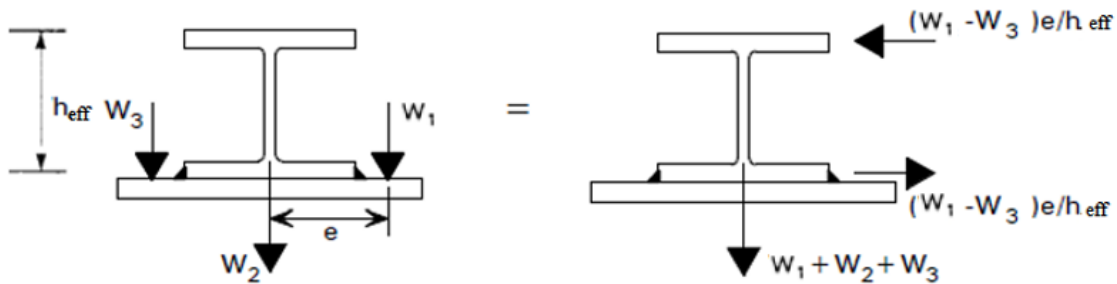
Figura 3.10: Cargas atuantes no sistema composto por lajes pré-fabricadas



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Para o caso da laje moldada *in loco* é considerado W_1 como sendo a soma do peso próprio da chapa, das armaduras e do concreto, atuando apenas em um lado. No lado oposto considera-se que o pavimento ainda não está concretado, possuindo uma carga W_3 , correspondente ao peso próprio da chapa e das armaduras apenas, como visto na Figura 3.11. W_2 diz respeito ao peso próprio da viga de aço.

Figura 3.11: Cargas atuantes no sistema composto por lajes moldadas *in loco*



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

O empenamento também deve ser considerado nos efeitos de torção. Assim, as tensões na mesa superior devido ao empenamento são combinadas com as tensões provenientes da flexão da seção, devendo atender a condição 3.7 para ser verificada.

$$\frac{M_x}{M_{b,Rd}} + \frac{M_y}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (3.7)$$

Sendo M_x o momento atuante segundo a direção x-x; M_y o momento transversal atuante na mesa superior segundo a direção y-y; $M_{b,Rd}$ o momento fletor resistente à flambagem; $M_{y,Rd}$ o momento resistente da mesa superior segundo a direção y-y. Segundo Lawson, Mullett e Rackham (1997), os momentos podem ser calculadas segundo as Equações 3.8, 3.9 e 3.10.

$$M_x = \frac{(W_1 + W_q) \cdot L^2 \cdot b}{16} \quad (3.8)$$

$$M_y = \frac{e}{h_{eff}} \cdot M_x \quad (3.9)$$

$$M_{y,Rd} = \frac{b_t^2 \cdot t_t \cdot f_y}{4} \quad (3.10)$$

Sendo W_q a carga de construção considerada $0,5 \text{ kN/m}^2$ agindo no mesmo lado da viga; e b o valor do espaçamento entre vigas.

Essa verificação despreza as restrições que a ligação viga-pilar confere à torção e ao empenamento, além de desconsiderar a rigidez de torção, o que acarretaria na redução de M_y .

Assim, percebe-se que o processo apresentado é conservativo e por isso é possível considerar o momento transversal atuante segundo a direção y-y como sendo $0,5M_y$ (LAWSON; MULLETT; RACKHAM, 1997).

Nos sistemas com lajes pré-fabricadas, deve-se considerar a condição acima verdadeira, para determinar o valor da extensão da aplicação das unidades pré-fabricadas (z) que não introduza efeitos de torção que comprometam a resistência da viga. Nesse caso, o momento atuante na seção (M_x) é definido pelas cargas W_1 e W_2 e em função z, e o momento transversal atuante na mesa superior (M_y) é definido pela carga aplicada na mesa superior ($W_1 \cdot e/h_{eff}$).

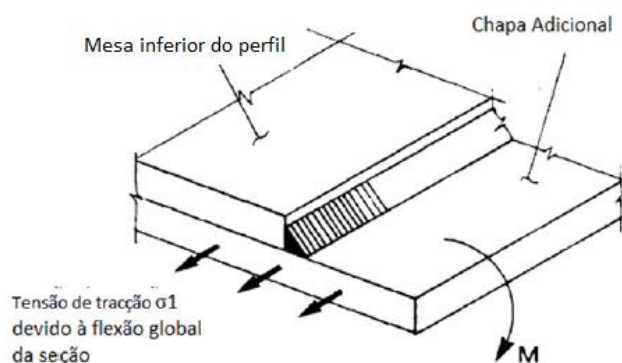
- **Efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior**

O efeito das tensões biaxiais na mesa inferior é verificado apenas nos perfis de aço que possuem chapas adicionais soldadas à mesa inferior, ou seja, à tipologia *Slimflor Fabricated Beam*. Devido ao apoio da laje sobre a mesa inferior e a chapa, desenvolvem-se tensões biaxiais nessas chapas, Figura 3.12, uma vez que é assumido que as cargas estão aplicadas no centro de cisalhamento, ignorando a força de cisalhamento transferida pelas nervuras. A chapa pode estar sujeita à tensões longitudinais (σ_1) e à tensões provocadas pela flexão transversal (σ_2), provocando uma diminuição da sua resistência. Segundo o critério de von Mises, a resistência da chapa é verificada segundo a Equação 3.11.

$$f_y = \sqrt{\sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1^2} \quad (3.11)$$

$$\text{O que leva a uma tensão } \sigma_2 = \frac{\sigma_1 \pm (4f_y^2 - 3\sigma_1^2)^{1/2}}{2} \quad (3.12)$$

Figura 3.12: Tensões plásticas na mesa inferior



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Como visto na Figura 3.13, para σ_1 positivo, e fazendo o equilíbrio de forças atuantes com base na distribuição de tensões plásticas, obtém-se a Equação 3.13.

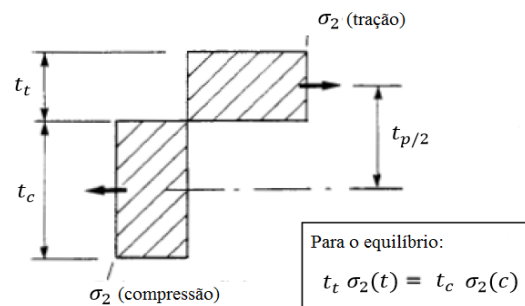
$$\frac{M}{M_p} = \frac{c^2 - \sigma_1^2}{2cf_y} \quad (3.13)$$

Onde M representa o momento transversal máximo aplicado à chapa; c uma constante determinada pela Equação 3.14

$$c = (4f_y^2 - 3\sigma_1^2)^{1/2} \quad (3.14)$$

$$M_p \text{ é o momento plástico resistente da mesa inferior, dado por } M_p = \frac{t_p^2 f_y}{4} \quad (3.15)$$

Figura 3.13: Distribuição de tensões plásticas na mesa inferior



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Assim, para verificar a resistência da chapa, a condição 3.6 deve ser atendida:

$$\frac{M}{M_p} \leq \frac{c^2 - \sigma_1^2}{2cf_y} \quad (3.16)$$

3.2.2 Fase de utilização

Após a cura do concreto e retirado o escoramento quando houver, realiza-se a fase de utilização, em que o comportamento misto deve ser considerado para o dimensionamento do piso misto de pequena altura. Por isso, é empregada a norma britânica, BS 5950-3.1 (2001), e utilizados os estudos de Mullet (1992), Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Mullet e Lawson (1999) como referência. Nessa fase, é necessário verificar a armadura transversal, o momento fletor resistente e a resistência ao esforço cortante para o Estado Limite Último (ELU) de acordo com a conexão de cisalhamento utilizada, além de fazer o controle de deslocamentos e vibrações para o Estado Limite de Serviço (ELS). Assim como na fase construtiva, deve-se iniciar o dimensionamento com a classificação das seções, porém nessa fase são consideradas as seções mistas e não mais as metálicas, como mostrado no tópico a seguir.

- **Classificação das seções mistas**

As seções mistas são classificadas da mesma maneira que as seções de aço, como mostrado nas Figuras 3.5 e 3.6. Porém, existem algumas exceções, como por exemplo, se a linha neutra

da seção estiver localizada a meia-altura, que devem ser classificadas segundo a BS 5950-3.1 (2001), como mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Classificação da alma

Tipo de elemento	Classe 1	Classe 2
Alma com a linha neutra da seção à meia altura	$\frac{d}{t_w} \leq 64 \in$	$\frac{d}{t_w} \leq 76 \in$
Alma, caso geral	$\frac{d}{t_w} \leq \frac{64 \in}{1 + r_1}$	$\frac{d}{t_w} \leq \frac{76 \in}{1 + r_1}$

Fonte: Adaptado de Barros, 2011

Onde d é a altura da alma e r_1 a razão das tensões na alma, sendo dado pela Equação 3.17.

$$r_1 = \frac{F_c}{dt_w f_{yw}} \frac{(b_b t_b - b_t t_t) f_{yf}}{dt f_{yw}} \quad (3.17)$$

Em que F_c é a força de compressão axial (negativa para a tração); b_b é a largura da mesa à tração; b_t é a largura da mesa à compressão; t_b é a espessura da mesa à tração; e t_t a espessura da mesa à compressão. O valor de cálculo da tensão de escoamento das mesas é definido por f_{yf} , enquanto que o valor de cálculo da tensão de escoamento da alma é definida por f_{yw} .

- **Momento fletor resistente**

A verificação da momento fletor resistente do *slim floor* será baseada nas publicações do *Steel Construction Institute* (SCI), considerando o grau de conexão entre os materiais constituintes e utilizando diagramas retangulares de tensão, com a tensão resistente de $0.45f_{cu}$ para o concreto e o valor de cálculo da tensão de escoamento do aço (f_y). A condição 3.18 de momento fletor resistente que deve ser atendida é:

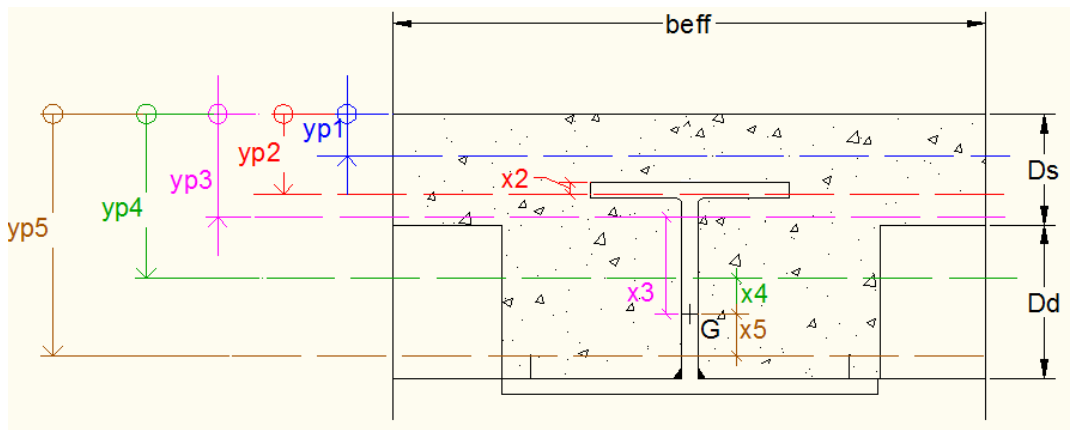
$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd} \quad (3.18)$$

Sendo M_{Sd} o momento atuante máximo da seção; $M_{pl,Rd}$ o momento plástico resistente da seção mista.

Para o cálculo do momento plástico resistente ($M_{pl,Rd}$) é necessário conhecer a posição da linha neutra plástica (y_p) da seção mista, medida a partir do topo da laje de concreto. Em um sistema que utiliza o perfil I assimétrico, essa linha neutra situa-se, geralmente, na alma, porém é necessário fazer o cálculo segundo as publicações de Mullet (1992), Lawson, Mullett e Rackham (1997) ou conforme o equilíbrio de forças de tração e de compressão da seção, definidas a partir dos diagramas de tensão retangulares.

Barros (2011) traz o cálculo da linha neutra plástica e do momento plástico resistente para uma estrutura *slim floor* composta por perfil assimétrico combinado com laje com fôrma de aço incorporada, para $D_d < h_{eff} - t_t$. Essa conformação estrutural pode ter a linha neutra plástica localizada em cinco posições diferentes, como visto na Figura 3.14, e conseqüentemente cinco valores para $M_{pl,Rd}$. Abaixo segue um exemplo da y_p localizada na alma abaixo do centro de gravidade da viga (y_{p5}), calculando sua posição conforme Equações 3.19, 3.20 e 3.21, assim como o cálculo do $M_{pl,Rd}$, de acordo com a Equação 3.22.

Figura 3.14: Posições da linha neutra plástica caso 1, 2, 3, 4 e 5



Fonte: Barros, 2011

$$y_{p5} = (D_s + D_d + t_b - z_1 + (x^+ / x^-)) \quad (3.19)$$

$$x^+ = \frac{f_y \cdot (t_b b_b - b_t t_t - t_w (2 \cdot t_b + h_{eff} - 2z_1 - t_t)) - 0.45 f_{cu} \cdot b_{eff} \cdot D_s}{2 \cdot f_y \cdot t_w} \quad (3.20)$$

$$x^- = \frac{f_y \cdot (t_b b_b - b_t t_t - t_w (2 \cdot t_b + h_{eff} - 2z_1 - t_t)) - A_s \cdot f_{yd}}{2 \cdot f_y \cdot t_w} \quad (3.21)$$

$$M_{pl,Rd} = 0.45 f_{cu} \cdot b_{eff} \cdot D_s \left(y_p - \frac{D_s}{2} \right) + f_y \left(b_t t_t \left(y_p - D_s - D_d + h_{eff} - \frac{t_t}{2} \right) + t_w \left(\frac{(y_p - D_s - D_d + h_{eff} + t_t)^2}{2} \right) + t_w \frac{(D_s + D_d - y_p)^2}{2} + t_b b_b \left(D_s + D_d + \frac{t_t}{2} - y_p \right) \right) \quad (3.22)$$

Como mostrado na Figura 3.12, D_s corresponde à altura de concreto moldado *in loco* acima da chapa nervurada, enquanto D_d é a altura dessa chapa. A_s é a área da armadura da laje para momento negativo e f_{ys} é a resistência à tração da armadura.

De maneira simplificada, a largura efetiva da laje de concreto (b_{eff}) poderá ser de $L/4$ para ligações com conetores ou de $L/8$ para ligações por aderência (LAWSON; MULLETT; RACKHAM, 1997). Porém, existem zonas com grande distância entre perfis, em que as

tensões longitudinais na laje de concreto não são uniformes. Por isso, deve-se obter uma relação de comprimento de concreto que permita considerar a distribuição de tensões como uniforme, determinada segundo o Eurocode 4 (2004), e calculadas com base nas distâncias entre pontos de momento fletor nulo, seguindo a condição 3.23:

$$b_{eff} \leq b_0 + \sum b_{ei} \quad (3.23)$$

Sendo b_0 a distância entre os centros dos conectores; b_{ei} o valor da largura efetiva da laje de concreto de cada lado da alma, considerado igual a $L/4$ ou $L/8$, como já mencionado anteriormente.

- **Conexão de Cisalhamento**

A verificação da conexão de cisalhamento é abordada tanto para conectores do tipo pino com cabeça quanto para a conexão por aderência e barras de aço.

Na verificação da conexão de cisalhamento utilizando conectores do tipo pino com cabeça, será considerada a interação completa. Como já mencionado, essa interação impede totalmente o escorregamento (longitudinal e vertical) e a deformação relativa na interface aço-concreto, acontecendo quando o número de conectores é igual ou superior aos que seriam necessários para assegurar a mobilização do momento plástico resistente da seção mista. Para se calcular a força de ligação ao cisalhamento (F_p), é necessário encontrar a posição da linha neutra plástica (y_p), como já definido anteriormente. Para uma seção de momento positivo, depois de conhecida a posição de y_p , calcula-se a força resistente do concreto (R_c), da mesa inferior ou chapa adicional (R_p) e do restante do perfil de aço (R_s), conforme Equações 3.24, 3.25 e 3.26, respectivamente.

$$R_c = 0.45f_{cu}b_{eff}y_p \quad (3.24)$$

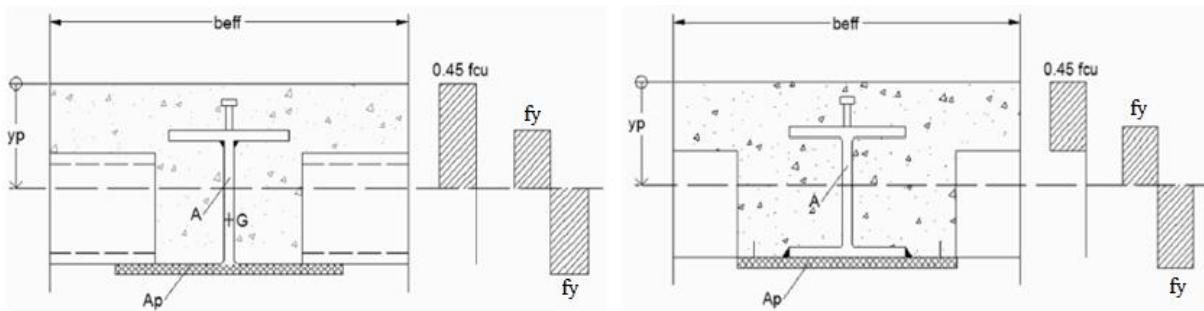
$$R_s = Af_y \quad (3.25)$$

$$R_p = A_p f_y \quad (3.26)$$

Onde f_{ck} é a tensão resistente característica do concreto; b_{eff} é a largura efetiva da laje de concreto; y_p a posição da linha neutra plástica; f_y a tensão de escoamento do aço; A_p é a área da mesa inferior ou chapa adicional e A a área do restante do perfil de aço, como é possível ver na Figura 3.15. Assim, entre uma seção de momento positivo máximo e uma seção de momento nulo, a força de ligação de cisalhamento é dada pela Equação 3.27.

$$F_p = \min(R_c, R_s + R_p) \quad (3.27)$$

Figura 3.15: Distribuição retangular de tensões



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

O número de conectores de cisalhamento necessários (N_p) é definido pela Equação 3.28.

$$N_p = \frac{F_p}{Q_p} \quad (3.28)$$

Onde Q_p é a força resistente dos conectores para a região de momentos positivos, dada pela Equação 3.29.

$$Q_p = 0.8Q_k \quad (3.29)$$

Em que Q_k é a força resistente característica dos conectores.

No caso da utilização de lajes mistas, o concreto contido nas nervuras é desprezado para o cálculo da força de ligação ao cisalhamento, como visto na Figura 3.15. Dessa forma, para o cálculo do número de conectores, é necessário calcular a respectiva força de cisalhamento (F_n), dada segundo a BS 5950-3.1 (2001), pela Equação 3.30.

$$F_n = 0.87f_yA_r \quad (3.30)$$

Onde f_y é a tensão de escoamento da armadura de reforço; A_r é a área da armadura de reforço na seção efetiva de concreto. O número de conectores é dado pela Equação 3.31.

$$N_n = \frac{F_n}{Q_n} \quad (3.31)$$

Sendo Q_n a força resistente dos conectores para a região de momentos negativos, dada pela Equação 3.32.

$$Q_n = 0.6Q_k \quad (3.32)$$

Já no caso de utilizar a conexão por aderência com barras de reforço, a interação completa ocorre quando se assegura a transmissão da resistência a compressão (R_c), considerando a

altura de concreto acima da chapa nervurada (D_s), vide Figura 3.14, dentro da largura efetiva (b_{eff}), seguindo a Equação 3.33.

$$R_c = 0.45f_{cu}b_{eff}D_s \quad (3.33)$$

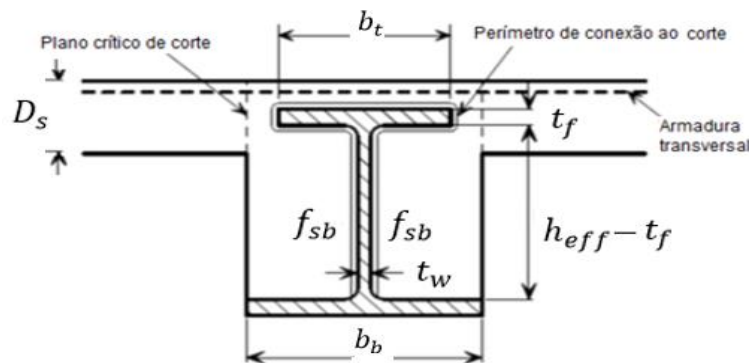
Para assegurar a interação completa por aderência, é necessário comparar a resistência a compressão (R_c) com a força de cisalhamento longitudinal (F_{sb}), sendo a transferência realizada através de tensões que se desenvolvem ao longo da mesa superior do perfil e dos lados da alma (Figura 3.16), definida pela Equação 3.34.

$$F_{sb} = (2b_b - t_w + 2h_{eff})L \frac{f_{sb}}{2} \quad (3.34)$$

Onde f_{sb} representa a resistência média da aderência longitudinal da mesa superior e da alma, que pode ser dado como valor de cálculo de $0,6 \text{ MPa}$ para perfis ASB, segundo os trabalhos do SCI; b_b , t_w e h_{eff} são mostrados na Figura 3.16.

Assim, caso a linha neutra plástica (y_p) se situe abaixo da espessura de concreto (D_s), a interação completa é verificada se $F_{sb} \geq R_c$. Se y_p situar-se na mesa superior do perfil ou na alma, dentro da espessura de concreto, existe interação completa ao corte se $F_{sb} \geq R_c y_p / D_s$.

Figura 3.16: Transferência de corte ao longo da superfície interna da viga de aço



Fonte: Adaptado de Barros, 2011

- **Resistência ao esforço cortante**

Na verificação da resistência ao esforço cortante deve-se obedecer a condição $V_{sd} \leq V_{pl,Rd}$. Segundo Paes (2003), considera-se que somente a seção de aço resiste ao esforço solicitante (V_{sd}), desprezando a contribuição do concreto. A resistência ao esforço transversal ($V_{pl,Rd}$) é dada pela Equação 3.35.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \quad (3.35)$$

Onde f_y é a tensão de escoamento do aço; γ_{M0} o coeficiente parcial de segurança para a resistência da seção, sendo recomendado utilizar 1,0; A_v a área resistente ao esforço transversal, que deve ser obtida de acordo com o tipo da seção, como mostrado a seguir.

Seções laminadas em I, com carga paralela à alma: Equação 3.36.

$$A_v = A_t - 2b_t t_t + (t_w + 2r)t_t \leq \eta dt_w \quad (3.36)$$

Seções soldadas em I e caixão, com carga paralela à alma: Equação 3.37.

$$A_v = \eta \Sigma(dt_w) \quad (3.37)$$

Onde A_t é a área total da seção; b a largura total; h a altura total; η um parâmetro que pode ser considerado igual a 1,0 de forma conservadora.

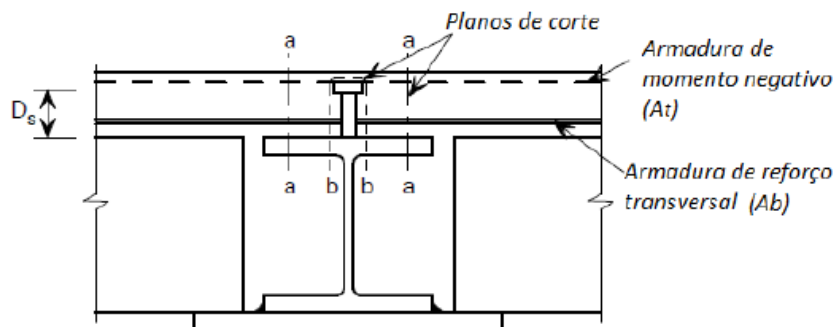
- **Armadura transversal**

É necessário verificar se as armaduras de reforço transversal estão exercendo corretamente suas funções de transferir a força de cisalhamento longitudinal entre a laje e o concreto e de aumentar a resistência. Para o cálculo da resistência ao cisalhamento longitudinal da laje por unidade de comprimento (v_r), o *Steel Construction Institute* (SCI) recomenda utilizar a norma britânica BS 5950-3.1 (2001), que define a Equação 3.38.

$$v_r = 0.7A_{sv}f_{ys} + 0.03\eta A_{cv}f_{ck} \leq 0.8\eta A_{cv}\sqrt{f_{ck}} \quad (3.38)$$

Em que A_{sv} é a área resistente de armadura de reforço que atravessa a superfície de corte (Figura 3.17); f_y a tensão de escoamento da armadura; η é um coeficiente de valor unitário para um concreto de densidade normal; A_{cv} é a área da superfície de cisalhamento por unidade de comprimento e é definida dependendo do plano de corte.

Figura 3.17: Planos de corte



Fonte: Barros, 2011

Caso o corte se dê no plano a, a área de armadura de reforço (A_{sv}) é obtida pela soma da área da armadura de momento negativo (A_n) e da área de armadura de reforço transversal (A_b), por unidade de comprimento. Se o corte se realizar no plano b, para o caso de se utilizar conectores de cisalhamento, a área da armadura de reforço transversal (A_b) será contabilizada duas vezes. Assim, a armadura de reforço é dimensionada, por unidade de comprimento, para uma força igual à que pode ser mobilizada pelos conectores, sendo necessário calcular a força longitudinal gerada (v), dada pela Equação 3.39.

$$v = \frac{NQ}{s} \quad (3.39)$$

Onde s é o espaçamento dos conectores; N o número de conectores na seção; Q o valor de cálculo da força resistente de cada conector.

No caso de conexão de cisalhamento por aderência, existe apenas um plano de corte, identificado na Figura 3.17, e A_{sv} contabiliza somente a área de armadura de reforço transversal (A_b), sendo a força longitudinal gerada por unidade de comprimento (v), determinada de acordo com a Equação 3.40.

$$v = \frac{2F_{sb}(b_{eff}-b_b)r_s}{Lb_{eff}} \quad (3.40)$$

Onde r_s é o fator de redução, uma média da força de cisalhamento longitudinal em uma nervura na extremidade da viga, determinado de acordo com $r_s = \frac{L-2b_s}{L}$, onde b_s é o espaçamento das nervuras, de maneira conservadora igual a 0,85.

- **Deslocamento**

O piso misto de pequena altura possui características que podem causar deslocamentos excessivos no sistema, como a diminuição da altura total do piso e aumento do vão das vigas. Além disso, efeitos como o *shear lag*, fluência, retração e fissuração do concreto, processo construtivo e o tipo de conexão de cisalhamento também influenciam na ocorrência de deslocamentos. Por isso, essa verificação merece especial atenção e visa prevenir fissurações nas seções, mantendo a estrutura adequada frente aos critérios de durabilidade e estética (PAES, 2003). A combinação de ações apropriada na verificação deste efeito deve ser considerada, sendo a rigidez à flexão da viga em situação de serviço o fator mais relevante nesse cálculo.

Segundo Paes (2003), deve-se utilizar o coeficiente de equivalência (α_e), determinado pela relação entre o módulo de elasticidade do aço e o do concreto e o momento de inércia da seção mista não fissurada (I_c) para estimar as flechas da viga, considerando as propriedades elásticas

da seção. Para essas verificações é utilizada a norma BS 5950-3.1 (2001), em que a Equação 3.41 é utilizada para determinar a posição da linha neutra elástica (y_e) e a Equação 3.42 o momento de inércia (I_c).

$$y_e = \left[\frac{\frac{b_{eff}(D_s+D_d-h_{eff})^2}{2\alpha_e} + A_a(D_s+D_d-z_1)}{A_a + \frac{b_{eff}(D_s+D_d-h_{eff})}{10}} \right] \quad (3.41)$$

$$I_c = b_{eff}(D_s + D_d - h_{eff}) \left(\frac{(D_s+D_d-h_{eff})^2}{12} \right) + b_{eff}(D_s + D_d - h_{eff}) \left(\frac{\left(y_e - \frac{(D_s+D_d-h_{eff})}{2} \right)^2}{\alpha_e} \right) + I_y + A_t(D_s + D_d + t_p - z - 1 - y_e)^2 \quad (3.42)$$

Em que D_s é a altura de concreto *in loco* acima da chapa nervurada; D_d é a altura da chapa nervurada; A_t a área total de aço; z_1 a distância da linha neutra elástica do perfil até a superfície externa da mesa inferior; z altura total de seção de aço.

Como já mencionado anteriormente, no processo construtivo do *slim floor*, pode haver ou não o escoramento temporário da viga. Essa característica influenciará no cálculo dos deslocamentos no ELS. Assim, para a viga sem escoramento, o deslocamento (flecha) devida às sobrecargas (δ_q) deve ser baseada nas propriedades da seção mista, enquanto que o deslocamento devido à cargas permanentes (δ_p) deve ser baseada apenas nas propriedades da seção de aço. Contudo, para vigas com escoramentos temporários, todos os deslocamentos devem ser baseadas nas propriedades da seção mista.

Sendo assim, na verificação de uma viga simplesmente apoiada sem escoramentos temporários, δ_q e δ_p são dados pelas Equações 3.43 e 3.44.

$$\delta_q = \frac{5qL^4}{384(EI)_c} \quad (3.43)$$

$$\delta_p = \frac{5pL^4}{384(EI)_m} \quad (3.44)$$

Sendo $(EI)_c$ e $(EI)_m$ as rigidezes da seção mista e da seção de aço, respectivamente.

Segundo a BS 5950-1 (2001), o limite de deslocamento imposto para δ_q é de $L/360$. Deve-se realizar também a verificação da deslocamento total (δ_{tot}), considerando-se a combinação rara de ações, com um limite de $L/200$.

No caso de ser uma viga contínua, o deslocamento devido à sobrecarga deve ser baseada nas cargas aplicadas ao vão e nos momentos na extremidade. Já o deslocamento devido às cargas permanentes baseia-se numa análise elástica da viga. Assim, para a viga sem escoramentos temporários são utilizadas as propriedades da viga de aço, e para vigas com escoramentos, as propriedades da seção mista. O cálculo de deslocamento no meio do vão (δ), considerando um carregamento uniforme ou cargas pontuais simétricas, segundo a BS 5950-3.1 (2001), pode ser determinado pela Equação 3.45.

$$\delta = \delta_0 \frac{(1-0.6)(M_1+M_2)}{M_0} \quad (3.45)$$

Onde δ_0 é o deslocamento no meio do vão para uma viga simplesmente apoiada com o mesmo vão e para o mesmo carregamento; M_0 é o momento máximo na viga simplesmente apoiada; M_1 e M_2 são os momentos nas extremidades da viga contínua. Os limites para o deslocamento são iguais aos referidos anteriormente.

- **Vibrações**

As vibrações também devem ser verificadas, principalmente pelo fato do *slim floor* ser um sistema com espessura reduzida e mais esbelto que o piso misto tradicional, podendo levar a uma maior sensibilidade às vibrações. Assim, é necessário estabelecer um limite inferior para a frequência natural da estrutura (f_n), sendo ele de 3,55 Hz, segundo Mullet (1992).

Para vigas simplesmente apoiadas, a frequência natural é calculada pela Equação 3.46.

$$f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta_w}} \quad (3.46)$$

Sendo que, no cálculo do deslocamento máxima da viga (δ_w), são consideradas todas as ações permanentes (p) e 10% da sobrecarga (q), podendo ser calculada pela Equação 3.47, apresentada em milímetros.

$$\delta_w = \frac{5(p+0.1q)L^4}{384EI} \quad (3.47)$$

Assim, as formulações apresentadas no presente capítulo são contextualizadas e exemplificadas a seguir, através do dimensionamento da *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), tipologia de piso misto de pequena altura analisada numericamente. Além disso, a partir da explanação dos modelos teóricos utilizados no dimensionamento do piso misto de pequena altura, percebe-se que, apesar de ainda não ser normatizado, esse estudo vem ganhando gradativamente mais espaço na construção civil mundial. Isso reflete a preocupação da

comunidade técnico-científica em difundir o conhecimento referente à esse sistema estrutural e abranger cada vez mais tipologias nesse dimensionamento, visando ampliar seu uso.

As dimensões geométricas e propriedades dos materiais utilizadas na exemplificação mostrada a seguir foram baseadas em aplicações reais encontradas na literatura e no trabalho de Rackham, Hicks e Newman (2006) e estão na Tabela 3.3. O perfil utilizado foi o ASB280 – 136 e o dimensionamento foi baseado no trabalho de Lawson, Mullett e Rackham (1997), seguindo as normas internacionais, inclusive para a fase construtiva.

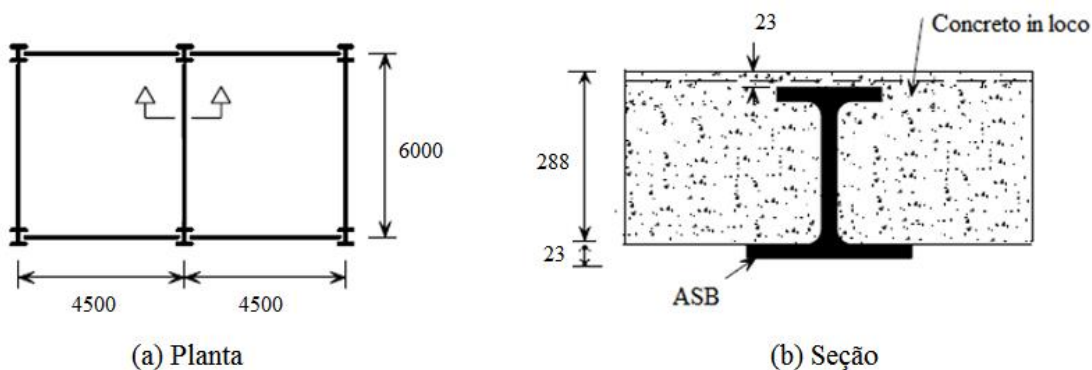
Tabela 3.3: Características padronizadas *Asymmetric Slimflor Beam (ASB)*

Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	G (MPa)	E (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)
Perfil de aço	430	550	80000	200000	-	-
Concreto	-	-	-	32000	30	2,9
Componente	Comprimento (m)	Altura (m)	Condição de contorno		Condição de carregamento	
<i>Slim floor</i>	6,00	0,288	Viga biapoiada		Ensaio de flexão de quatro pontos	

Fonte: Autora, 2020

No presente estudo, o perfil utilizado é laminado, logo, tanto a seção de aço quanto a seção mista, obedecem as condições das Classes 1 e 2. Assim, foi definido um *layout* simples para o dimensionamento do piso misto, como mostrado na Figura 3.18, com vão entre vigas de $b = 4500 \text{ mm}$, e foi determinado o carregamento envolvido no dimensionamento.

Figura 3.18: *Layout* do piso misto de pequena altura (mm)



Fonte: Autora, 2020

- **Carregamento**

Concreto armado: Massa específica: $25 \text{ kN/m}^3 \rightarrow W_{pp} = 25 \cdot 0,288 = 7,20 \text{ kN/m}^2$

Perfil de aço: Peso perfil: $136,4 \text{ kg/m} \rightarrow W_2 = \frac{136,4}{3} \cdot \left(\frac{9,81}{1000}\right) = 0,45 \text{ kN/m}^2$

Carga de construção: $W_q = 0,50 \text{ kN/m}^2$

Carregamento externo: $W_e = 5,00 \text{ kN/m}^2$

- **Fase de construção**

Definida a classificação da seção de aço, o processo de dimensionamento inicia-se com a verificação da flambagem lateral com torção. Lembra-se que não há carga externa aplicada sobre o sistema nessa fase, sendo considerado para essa primeira verificação apenas o peso próprio da viga antes da concretagem. Entretanto, na verificação da combinação de esforços, é considerado também o peso próprio do concreto em apenas um dos lados da laje, somado à um valor de carga de construção. Vale ressaltar também que, como o perfil analisado é o ASB, não é necessário fazer a verificação das tensões biaxiais na mesa inferior, visto que não possui chapa adicional soldada à essa mesa. Assim, são definidas as propriedades geométricas do perfil, disponibilizadas pela Tata Steel (2013) e mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades do perfil de aço

Linha neutra elástica (y_e)	Momento de inércia (I_x)	Momento de inércia (I_y)	Raio de giração (r_y)	Constante de torção (J)	Módulo plástico ($W_{pl,y}$)	Constante de empenamento (H)
16,3 cm	20724,9 cm ⁴	1579,2 cm ⁴	6,0 cm	320 cm ⁴	1806 cm ³	50503,2 cm ⁶

Fonte: Tata Steel, 2013

- Flambagem lateral com torção

A partir das propriedades geométricas do perfil, inicia-se a verificação da flambagem lateral com torção, segundo Eurocode 3 (2005), conforme equações apresentadas anteriormente.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GJ EI_y} \left(1 + \frac{\pi^2 EH}{L^2 GJ} \right) = 471,65 \text{ kN.m}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = 1,28$$

Consultando a Tabela 3.1, tem-se que a seção I é laminada e $h/b_b = 0,96$, logo o valor de α_{LT} é 0,21. Além disso, os coeficientes de segurança para as cargas devem ser considerando, sendo dados por $\gamma_g = 1,4$ para cargas permanentes e $\gamma_q = 1,6$ para cargas variáveis, segundo a norma britânica, BS 5950 (2001).

$$\phi_{LT} = 0.5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2)) + \bar{\lambda}_{LT}^2 = 1,44$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,48 \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y = 47064,12 \text{ kN.cm} = 372,67 \text{ kN.m}$$

$$e_d = b(\gamma_g \cdot W_2 + \gamma_q \cdot W_q) = 3(1,4 \cdot 0,45 + 1,6 \cdot 0,5) = 6,44 \text{ kN/m}$$

$$M_{Sd} = \frac{e_d \cdot L^2}{8} = \frac{4,29 \cdot (4,3)^2}{8} = 28,96 \text{ kN.m}$$

$$M_{Sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow OK!$$

- Combinação de esforços de flexão com esforços de torção

O próximo passo é analisar a combinação de esforços de flexão com esforços de torção, que foi realizado segundo os estudos desenvolvidos por Mullet (1992), Mullet e Lawson (1993) e Lawson, Mullett e Rackham (1997). Essa verificação é realizada considerando a condição mais desfavorável para o acontecimento da combinação de esforços, em que apenas um dos lados da viga tem a laje totalmente aplicada. Assim, o carregamento considerado foi o peso próprio do concreto e a carga de construção, lembrando de considerar os coeficientes de segurança.

$$W_1 = (1,4 \cdot 7,2 + 1,6 \cdot 0,5) = 10,88 \text{ kN/m}^2$$

$$M_x = \frac{W_c \cdot L^2 \cdot b}{16} = 110,16 \text{ kN.m}$$

$$M_y = \frac{e}{(h_{eff} + t_b)} \cdot M_x = 40,16 \text{ kN.m}$$

$$M_{y,Rd} = \frac{b_t^2 \cdot t_t \cdot f_y}{4} = 68,35 \text{ kN.m}$$

$$M_{b,Rd} = 372,67 \text{ kN.m}$$

$$\frac{M_x}{M_{b,Rd}} + \frac{M_y}{M_{y,Rd}} = 0,88 \leq 1$$

- Efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior

Como dito anteriormente, por se tratar de um perfil ASB, não é necessário verificar os efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior. Assim, a Tabela 3.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos no dimensionamento da fase de construção.

Tabela 3.5: Resumo do dimensionamento na fase de construção

	Considerações	Verificação
Flambagem lateral com torção	Momento máximo relativo ao peso próprio da viga.	$M_{Sd} \leq M_{b,Rd} \rightarrow OK!$
Combinação de esforços de flexão com esforços de torção	Laje moldada <i>in loco</i> .	$\frac{M_x}{M_{b,Rd}} + \frac{M_y}{M_{y,Rd}} = 0,88 \leq 1 \rightarrow OK!$
Efeitos das tensões biaxiais na mesa inferior	Não possui chapa soldada à mesa inferior.	Não é necessário verificar.

Fonte: Autora, 2020

- **Fase de utilização**

A segunda etapa do dimensionamento diz respeito às verificações da fase de utilização, na qual já está desenvolvido o comportamento misto da estrutura. Não existem normas brasileiras que tratam desse comportamento, assim, foi empregada a norma britânica, BS 5950-3.1 (2001), e utilizados os estudos de Mullet (1992), Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Mullet e Lawson (1999) como referência.

- Momento fletor resistente

O dimensionamento nessa fase se inicia com a verificação do momento fletor resistente do sistema, devendo-se realizar o cálculo do momento plástico resistente ($M_{pl,Rd}$) e conhecer a posição da linha neutra plástica (y_p) da seção mista. Como mostrado anteriormente, essa linha pode estar situada em cinco diferentes posições na seção. Entretanto, baseado na Tabela fornecida pela Tata Steel (2013) para a seção de aço e sabendo que para o perfil I assimétrico essa linha situa-se na alma, encontra-se a posição da linha neutra plástica, seguindo a equação apresentada a seguir.

Como a laje é moldada *in loco*, não existe fôrma de aço incorporada, ou seja, $D_d = 0$. Além disso, o cálculo da largura efetiva de concreto foi feito considerando ligações por aderência, sendo $b_{eff} = L/8 = 0,75 \text{ m}$ e foi arbitrado um carregamento externo de $W_e = 5,00 \text{ kN/m}^2$.

$$y_{p5} = (D_s + t_b - z_1) = 0,209 \text{ m}$$

$$M_{pl,Rd} = 0.45 f_{cu} \cdot b_{eff} \cdot D_s \left(y_p - \frac{D_s}{2} \right) + f_y \left(b_t t_t (y_p - D_s + h_{eff} - \frac{t_t}{2}) \right) + t_w \left(\frac{(y_p - D_s + h_{eff} + t_t)^2}{2} \right) + t_w \frac{(D_s - y_p)^2}{2} + t_b b_b \left(D_s + \frac{t_t}{2} - y_p \right) = 515,20 \text{ kN.m}$$

$$M_{Sd} = \frac{[(7,65 \cdot 1,4) + (5,5 \cdot 1,6)] \cdot 4,3^2 \cdot 3}{8} = 395,08 \text{ kN.m}$$

$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd} \rightarrow OK!$$

- Conexão de cisalhamento

A conexão de cisalhamento adotada no desenvolvimento do trabalho foi por aderência com barras de reforço. Assim, para se considerar a interação completa deve-se assegurar que a transmissão da resistência a compressão (R_c) esteja dentro da largura efetiva (b_{eff}), comparando-se R_c com a força de cisalhamento longitudinal (F_{sb}). Como a linha neutra

plástica (y_p) se situa na alma da viga, dentro da espessura de concreto (D_s), a interação completa é verificada se $F_{sb} \geq R_c y_p / D_s$.

$$R_c = 0.45 f_{cu} b_{eff} D_s = 3596,40 \text{ kN}$$

$$F_{sb} = (2b_p - t_w + 2h_{eff}) L \frac{f_{sb}}{2} = 1989,00 \text{ kN}$$

$$R_c y_p / D_s = 2609,89 \text{ kN}$$

Logo, $F_{sb} < R_c y_p / D_s$, mostrando que não ocorre interação completa entre as barras de aço e o concreto moldado *in loco*.

- Resistência ao esforço cortante

A próxima verificação a ser realizada é da resistência ao esforço cortante, sendo considerado que somente a seção de aço resiste ao esforço solicitante (V_{sd}).

$$V_{sd} = 263,39 \text{ kN}$$

$$A_v = A_t - 2b_t t_t + (t_w + 2r) t_t = 0,0035 \text{ m}^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 866,43 \text{ kN}$$

$$V_{sd} \leq V_{pl,Rd} \rightarrow OK!$$

- Armadura transversal

Posteriormente, deve-se verificar se a armadura transversal está transferindo a força de cisalhamento longitudinal entre a laje e o concreto. No caso de conexão de cisalhamento por aderência, A_{sv} é a área resistente de armadura de reforço transversal, igual a A_b . O diâmetro da armadura transversal foi de 12,5 mm a cada 150 mm, sendo $A_{sv} = 0,00082 \text{ m}^2/m$.

O comprimento do plano de corte é definido pela altura de concreto acima da mesa superior, ou seja, $A_{cv} = 0,069 \text{ m}^2$.

$$v_r = 0.7 A_{sv} f_y + 0.03 A_{cv} f_{cu} = 401,23 \text{ kN}$$

$$v = \frac{2F_{sb}(b_{eff}-b_b)^{0,85}}{L b_{eff}} = 338,13 \text{ kN}$$

$$v_r \geq v \rightarrow OK!$$

- Deslocamentos

A verificação dos deslocamentos é feita segundo a norma britânica BS 5950-3.1 (2001), sem majoração das cargas. Assim como na verificação ao momento fletor resistente, deve-se determinar a posição da linha neutra, sendo agora a elástica (y_e), e o momento de inércia (I_c) da seção mista. A laje é moldada *in loco*, logo, $D_d = 0$ e o coeficiente de equivalência (α_e) é de 6,25.

$$y_e = \left[\frac{\frac{b_{eff}(D_s - h_{eff})^2}{2\alpha_e} + A_a(D_s - z_1)}{A_a + \frac{b_{eff}(D_s - h_{eff})}{10}} \right] = 0,170 \text{ m}$$

$$I_c = b_{eff}(D_s - h_{eff}) \left(\frac{(D_s - h_{eff})^2}{12} \right) + b_{eff}(D_s - h_{eff}) \left(\frac{\left(y_e - \frac{(D_s - h_{eff})}{2} \right)^2}{\alpha_e} \right) + I_y + A_a(D_s +$$

$$t_p - z - 1 - y_e)^2 = 0,022 \text{ m}^4$$

$$\delta_p = \frac{5pL^4}{384(EI)_m} = 5,94 \text{ mm} \leq L/200 \rightarrow OK!$$

$$\delta_q = \frac{5qL^4}{384(EI)_c} = 0,09 \text{ mm} \leq L/360 \rightarrow OK!$$

$$\delta_{tot} = 6,03 \text{ mm} \leq L/200 \rightarrow OK!$$

- Vibrações

Para o controle de vibrações deve ser calculado o deslocamento máximo da viga, que resulta em $\delta_w = \frac{5(p+0.1q)L^4}{384EI} = 15,02 \text{ mm}$ e a frequência natural do piso, dada por $f_n = \frac{18}{\sqrt{\delta_w}} = 4,64 \text{ Hz}$. A frequência natural é superior ao limite de 3,55 Hz, portanto, é aceitável. A Tabela 3.6 traz um resumo dos resultados obtidos no dimensionamento da fase de utilização.

Tabela 3.6: Resumo do dimensionamento na fase de utilização

	Considerações	Verificação
Momento fletor resistente	Laje moldada <i>in loco</i> .	$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} \rightarrow OK!$
Conexão de cisalhamento	Aderência com barras de reforço.	$F_{sb} \geq R_c y_p / D_s \rightarrow \text{Não ok!}$
Resistência ao esforço cortante	Somente a seção de aço resiste a V_{Sd} .	$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} \rightarrow OK!$
Armadura transversal		$v_r \geq v \rightarrow OK!$
Deslocamentos		$\delta_q \leq L/360 \rightarrow OK!$ $\delta_{tot} \leq L/200 \rightarrow OK!$
Vibrações		$f_n \geq 3,55 \text{ Hz} \rightarrow OK!$

Fonte: Autora, 2020

A partir do exemplo realizado e das Tabelas 3.5 e 3.6, pode-se perceber que o processo de dimensionamento dessa tipologia de piso misto de pequena satisfaz as prescrições necessárias para a aplicação dessa estrutura. Entretanto, os estudos ainda estão em desenvolvimento, sendo notadas algumas limitações nas verificações.

3.2.3 Considerações finais

Como visto anteriormente, o dimensionamento do piso misto de pequena altura é dividido em duas fases: a de construção e de utilização. A primeira fase pode ser feita segundo a ABNT NBR 8800 (2008) ou normas internacionais relativas às estruturas metálicas, já que o comportamento misto da estrutura ainda não está consolidado. Contudo, na fase de utilização, o comportamento misto particular do *slim floor* de fato atua, devendo-se recorrer à trabalhos como o de Lawson, Mullett e Rackham (1997), desenvolvidos segundo o Eurocode 3 (2005), Eurocode 4 (2004) e as normas britânicas BS 5950-1 (2001) e BS 5950-3.1 (2001).

Algumas limitações são encontradas durante esse processo. Os estudos empregados como referência para o dimensionamento, por exemplo, limitam-se ao uso da viga I assimétrica, estendendo-se ao caso da viga I com a chapa de aço soldada à sua base (tipologia SFB). Além disso, as seções, metálicas para a fase construtiva e mistas para a fase de utilização, devem ser classificadas, e o dimensionamento fica limitado às classes 1 e 2 de ambas as fases. Apesar disso, o estudo do dimensionamento do piso misto de pequena altura vem sendo ampliado e, atualmente, já abrange o caso da viga com aberturas circulares na alma. Isso mostra que esse dimensionamento está conseguindo atender a demanda atual da construção e vem sendo expandido para que, aos poucos, contemple todas as tipologias do *slim floor*.

Assim, a fim de contribuir para a disseminação e ampliação desse conhecimento, os capítulos que seguem focam na realização da análise numérica e comparativa de quatro tipologias de *slim floor*, sendo mostrados os estudos utilizados na calibração, as principais características da simulação e os resultados encontrados.

4 TIPOLOGIAS ANALISADAS

A partir do histórico traçado no Capítulo 2, “Piso misto de pequena altura”, observa-se que os pisos mistos de pequena altura podem variar, dentre outros aspectos, de acordo com a seção da viga de aço utilizada, existindo muitas possibilidades de combinações. Dessa forma, para o desenvolvimento da simulação numérica e posterior análise comparativa, foram selecionadas quatro tipologias de *slim floor*, sendo elas: *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), *Deltabeam*®, *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) e *Shallow Cellular Composite Floor Beam* (SCCFB).

A representação numérica de um modelo físico costuma envolver diversas simplificações, fazendo com que o modelo numérico necessite de ajustes baseados em dados experimentais. A essa técnica dá-se o nome de calibração. Para a sua realização, é necessário desenvolver inicialmente um modelo numérico com geometria, propriedades dos materiais, condições de contorno e carregamento iguais às do modelo ensaiado experimentalmente. Então, deve-se ajustar parâmetros numéricos, a fim de se obter resultados na modelagem que representem adequadamente os fenômenos e assemelhem-se aos obtidos experimentalmente.

Neste sentido, são apresentadas as informações utilizadas para a calibração dos modelos numéricos, como geometria, propriedades dos materiais e simplificações adotadas, retiradas de estudos encontrados na literatura e específicos para cada tipologia.

4.1 ASYMMETRIC SLIMFLOR BEAM (ASB)

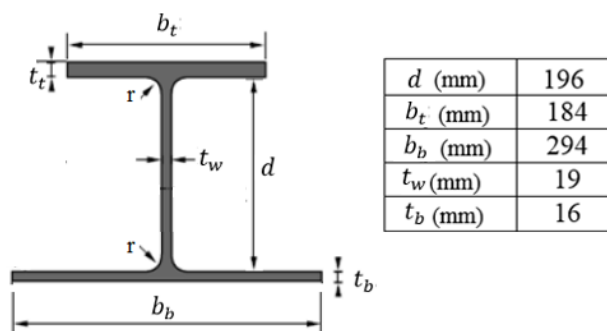
O *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) é um perfil I assimétrico, em que a mesa inferior é maior que a superior e que contém ranhuras na face externa da mesa superior, a fim de melhorar a aderência entre o aço e o concreto. Como o Brasil não tem tradição na fabricação de perfis assimétricos, tem-se como alternativa o *Slimflor*, um perfil laminado tipo I, soldado à uma chapa de aço pela mesa inferior. Essa chapa auxiliar permite que a laje possa ser apoiada na viga, sem a necessidade de efetuar cortes nos elementos estruturais.

Os dois perfis foram estudados por Mullet e Lawson (1992), Mullet e Lawson (1993) e Lawson, Mullet e Rackham (1997), apresentando características semelhantes. A laje mista utilizada em todos os casos foi formada por um perfil do tipo *Comflor* 210, as vigas foram biapoiadas com 7500 mm de vão livre e seção transversal da laje de largura 1000 mm, carregada em quatro pontos, com cargas de mesmo valor. As cargas concentradas foram aplicadas por prensas hidráulicas por meio de perfis de aço que distribuem essa carga em uma área superficial

transversal, para evitar concentração de tensões e rupturas localizadas. Assim, por apresentarem comportamentos semelhantes, o perfil modelado foi o *Asymmetric Slimflor Beam*, devido a sua maior simplicidade geométrica e o estudo utilizado na calibração do modelo foi o de Lawson, Mullet e Rackham (1997).

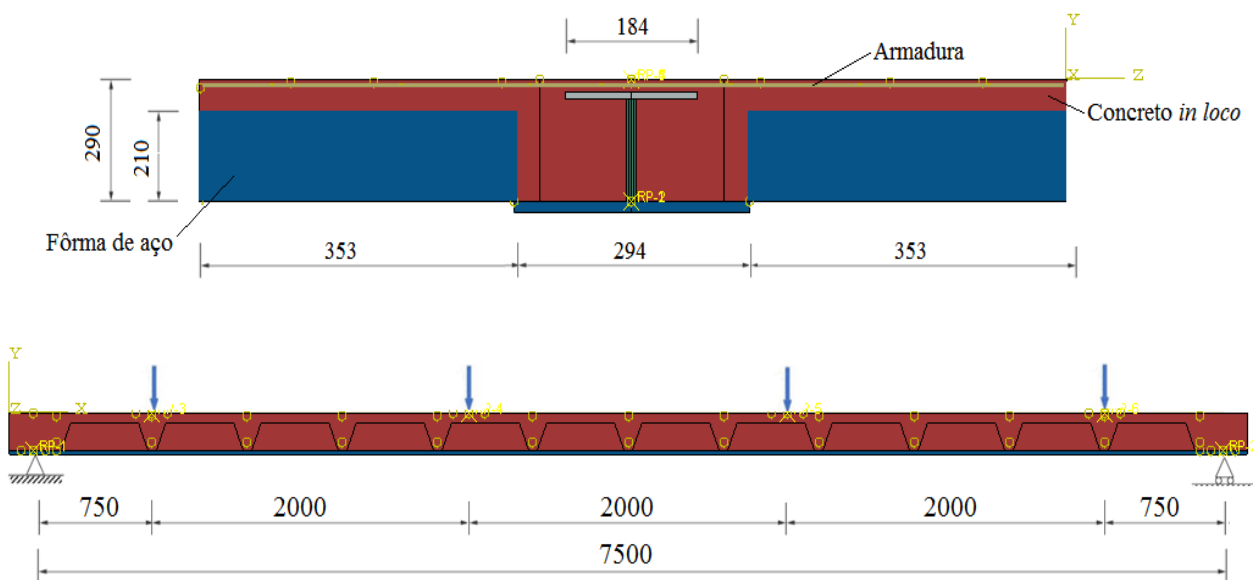
Nesse estudo, o perfil empregado foi o 280ASB 100, suas dimensões são mostradas na Figura 4.1 e o esquema estrutural na Figura 4.2. A *Tata Steel* apresenta uma tabela de dimensões específica para a *Asymmetric Slimflor Beam*.

Figura 4.1: Dimensões *Asymmetric Slimflor Beam* (280ASB)



Fonte: Adaptado de Tata Steel, 2013

Figura 4.2: Modelo físico Lawson, Mullet e Rackham (1997)



(Dimensões em milímetros)

Fonte: Adaptado de Lawson, Mullet e Rackham, 1997

O aço utilizado na confecção do perfil é o S355, com módulo de elasticidade variando de 190 a 200 *GPa*, tensão de escoamento mínima de 355 *MPa* e tensão limite última entre 470 e 630 *MPa*. O concreto é do tipo leve de classe C25/30, porém, os ensaios de caracterização

revelaram características mecânicas equivalentes às de um concreto classe C35/40 (LAWSON; MULLET; RACKHAM, 1997). As propriedades específicas para esse ensaio são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades dos materiais - *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB)

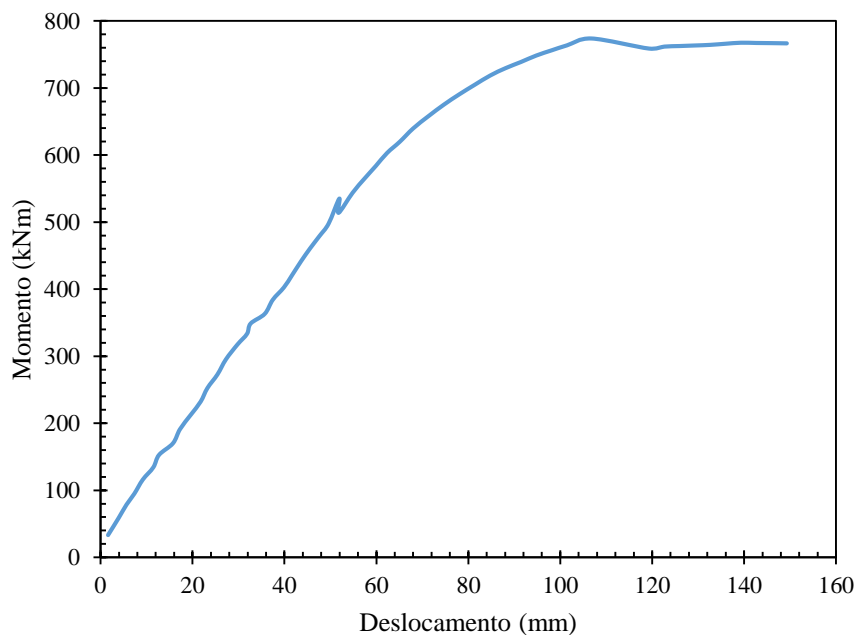
Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)
Alma	384	516	200000	-	-
Mesa Inferior	423	516	200000	-	-
Mesa Superior	410	516	200000	-	-
Concreto	-	-	33837	38	3,15

Fonte: Lawson, Mullet e Rackham, 1997

As fôrmas de aço não foram modeladas, visto que não existe interesse em analisar seu comportamento e nem aspectos da interface entre a fôrma e o concreto. Entretanto, a laje de concreto foi modelada como se houvesse o *steel deck*, pois o seu volume influencia em parâmetros, como a rigidez do sistema. Nos modelos que possuem laje mista, foi atribuído o mesmo critério de simplificação.

O resultado experimental do ensaio é apresentado na Figura 4.3, por meio do gráfico momento fletor \times deslocamento no meio do vão (flecha), o qual foi utilizado para calibração do modelo numérico realizado no presente trabalho. O máximo valor de momento fletor para este ensaio foi de aproximadamente $773,9 \text{ kN.m}$, correspondente a uma flecha no centro do vão de $106,8 \text{ mm}$ (LAWSON; MULLET; RACKHAM, 1997).

Figura 4.3: Gráfico obtido por Lawson, Mullet e Rackham (1997)



Fonte: Adaptado de Lawson, Mullet e Rackham, 1997

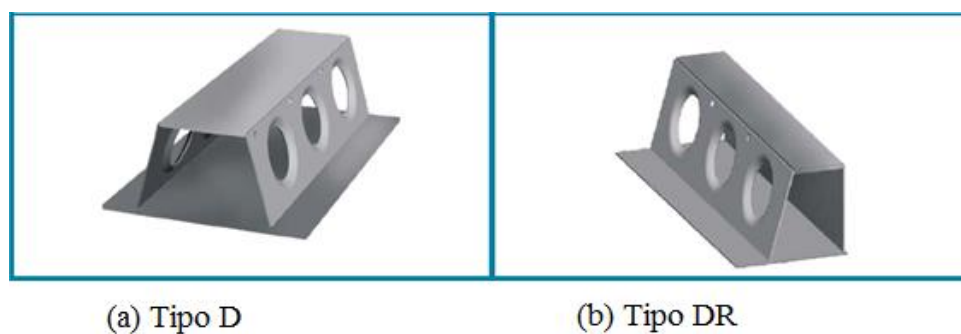
Essa tipologia dispõe também de resultados numéricos já realizados, como o de Ramos (2010), calibrado com o mesmo estudo experimental e modelado com o DIANA, servindo de referência para essa calibração.

4.2 DELTABEAM®

A viga do tipo *Deltabeam*® apresenta duas variações, o tipo D e o tipo DR. A viga tipo D é usualmente utilizada como viga interna, tendo bordas dos dois lados para apoiar as lajes. Já a viga do tipo DR tem uma das almas totalmente na vertical e sem aberturas, para ser usada como viga de borda (PEIKKO, 2014). A Figura 4.4 ilustra as duas tipologias.

O perfil mais utilizado do tipo *Deltabeam*® é composto por quatro chapas de aço soldadas entre si, sendo duas na horizontal e duas inclinadas com aberturas, como visto na Figura 4.4(a). Além de ser capaz de alcançar até 12 m de vão livre, a *Deltabeam*® se mostra muito resistente à ação do fogo, sem qualquer proteção adicional e, por ter um ótimo acabamento, não existe conflito com a passagem de tubos de serviços (PEIKKO, 2014). O sistema de laje alveolar é o mais indicado para ser utilizado nessa tipologia, sendo feita a concretagem *in loco* somente na interface entre viga e a laje (NÁDASKÝ, 2012).

Figura 4.4: Tipos de *Deltabeam*®



Fonte: Adaptado de Peikko, 2014

O interior da viga é completamente preenchido com concreto e, depois do seu endurecimento, o sistema adquire comportamento misto, sem necessidade de conectores de cisalhamento (BARROS, 2011), utilizando, para isso, barras de aço que passam através das aberturas do perfil, e em contato com o concreto, contribuem para a garantia desse comportamento misto.

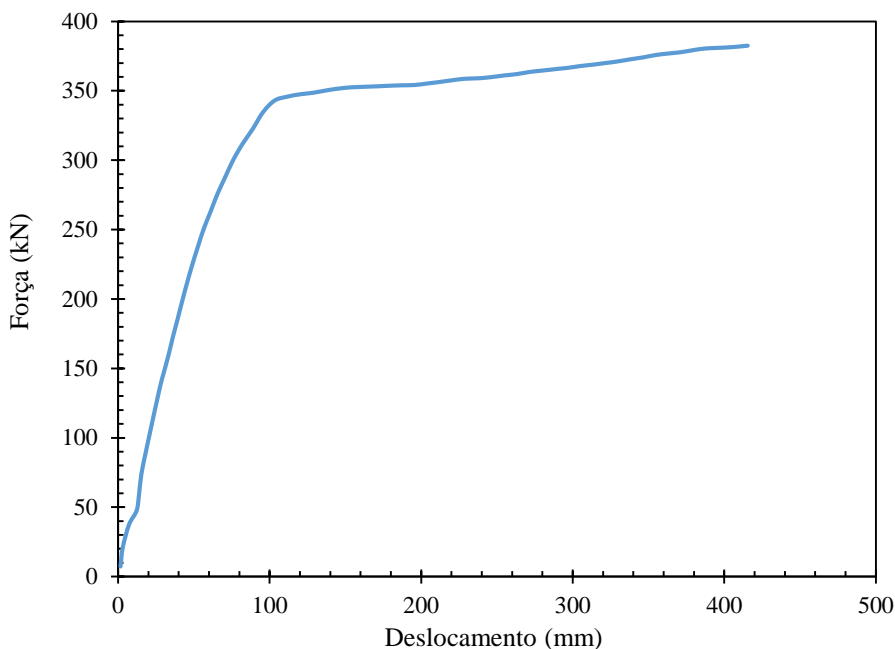
A simulação numérica realizada nesse trabalho foi calibrada a partir do estudo experimental realizado por Peltonen et al. (2016), utilizando o perfil do tipo D. As dimensões utilizadas no trabalho experimental para esse perfil estão mostradas na Figura 4.5 (PEIKKO, 2014). Essa

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais - *Deltabeam*®

Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_t (MPa)
Alma	315	490	180000	-	-
Mesa Inferior	315	490	180000	-	-
Mesa Superior	315	490	180000	-	-
Concreto	-	-	29710	28,2	2,78

Fonte: Adaptado de Peikko, 2007

O gráfico força \times deslocamento no meio do vão (flecha) encontrado no estudo realizado por Peltonen et al. (2016) está mostrado na Figura 4.7. O valor da força máxima foi de 382,6 kN para um deslocamento no meio do vão de 415,5 mm (PELTONEN et al., 2016).

Figura 4.7: Gráfico obtido por Peltonen et al. (2016)

Fonte: Adaptado de Peltonen et al., 2016

Assim, na realização da calibração, esses resultados foram comparados aos encontrados no presente trabalho e os ajustes necessários foram realizados para tornar o modelo mais próximo do real. Além disso, os mesmos autores realizaram um estudo numérico do mesmo modelo físico, que também foi tomado como referência na calibração.

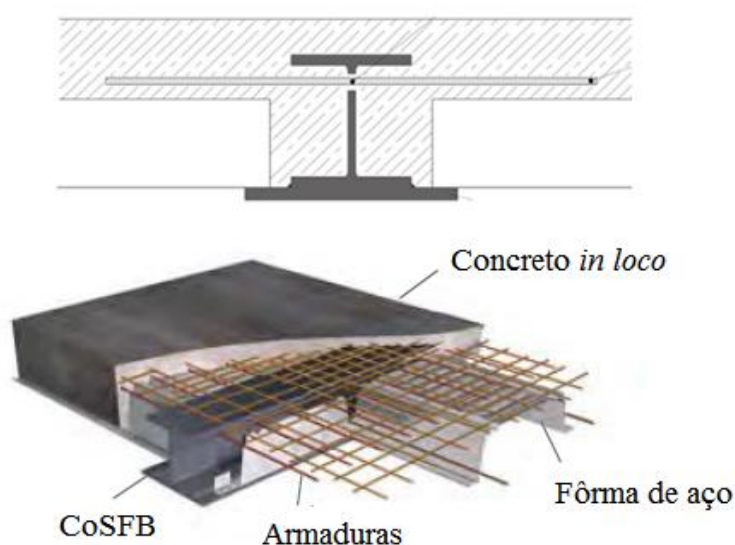
4.3 COMPOSITE SLIM FLOOR BEAM (CoSFB)

O *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) é formado por um perfil de aço assimétrico, do tipo *Slimflor Fabricated Beam*, com o diferencial de possuir pequenas aberturas circulares no topo da alma (Figura 4.8). Essas aberturas possibilitam a passagem de barras de aço, que, em

conjunto com o concreto que passa por essas aberturas, funcionam como conectores de cisalhamento, desenvolvendo a ação mista da estrutura (KUHLMANN, 2012).

Por aumentar a rigidez da viga, esse sistema consegue vencer grandes vãos sem a necessidade de vigas secundárias, ou alternativamente é possível diminuir a seção de aço (LAM et al., 2015). Por isso, o CoSFB é uma forma flexível e muito sustentável de construção, podendo ser combinado com vários tipos de lajes. Atualmente é disponibilizado pela empresa *ArcelorMittal* na Alemanha, França e Luxemburgo (ARCELORMITTAL, 2017).

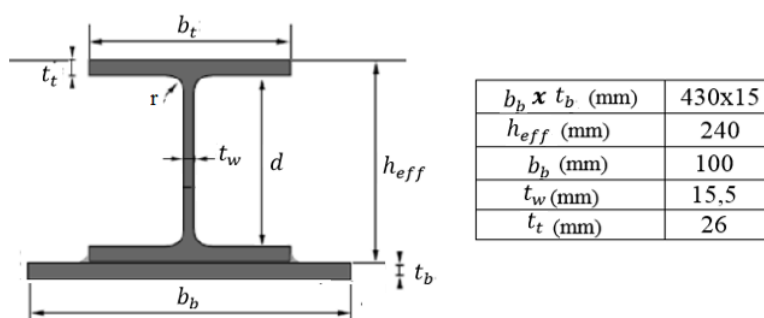
Figura 4.8: *Composite Slim-Floor Beam (CoSFB)*



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

A simulação realizada utilizou o estudo de Hechler et al. (2016) na calibração numérica, que propôs vigas com vãos de 8,0 metros, aberturas introduzidas na alma do perfil com 40 mm de diâmetro e 18 mm de distância da mesa superior, onde foram colocadas barras de aço com 12 mm de diâmetro. O espaçamento entre aberturas foi de 125 mm e a distância da linha do apoio de 100 mm. Além disso, Hechler et al. (2016) utilizou o perfil de aço HEM 220, cujas dimensões são mostradas na Figura 4.9.

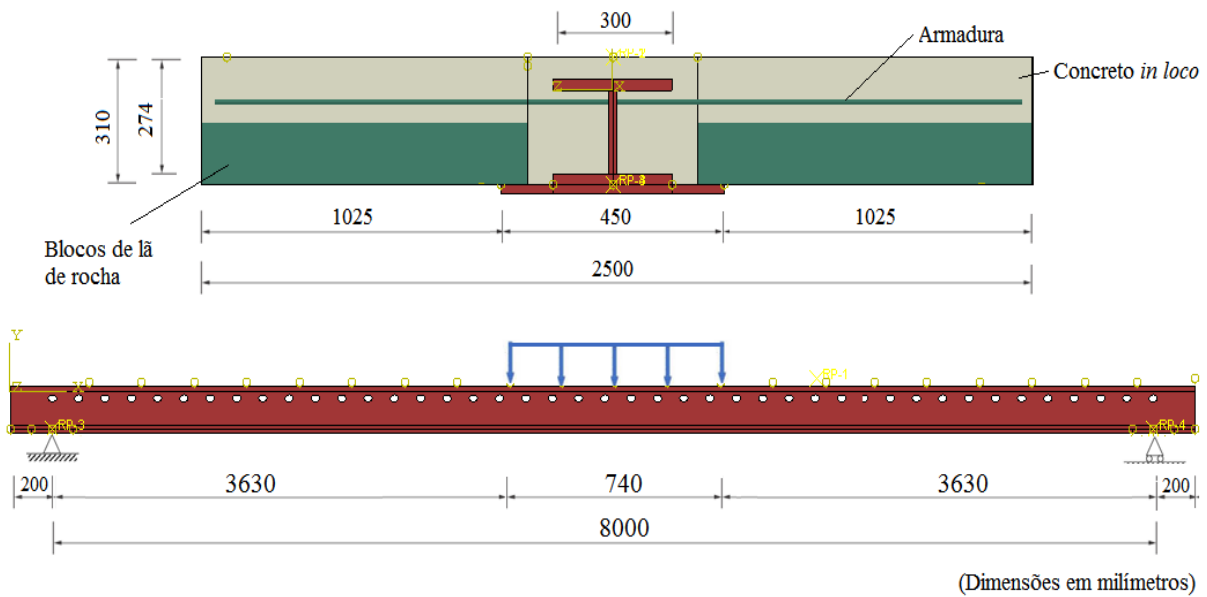
Figura 4.9: Dimensões do *Composite Slim-Floor Beam*



Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

Muitos tipos de laje podem ser utilizados com a CoSFB, como as lajes alveolares (*hallow core*), com fôrma de aço incorporada (*steel deck*) ou moldada *in loco*. Hechler et al. (2016) empregaram no seu estudo a laje mista, utilizando a forma *Cofradal200*, preenchida com blocos de lâ de rocha e um posterior preenchimento com concreto *in loco* na região de contato com a viga. Por se tratar de uma laje completamente preenchida, foi adotada a simplificação de simular a laje como sendo apenas de concreto. O esquema utilizado por Hechler et al. (2016) pode ser visualizado na Figura 4.10.

Figura 4.10: Modelo físico Hechler et al. (2016)



Fonte: Adaptado de Hechler et al., 2016

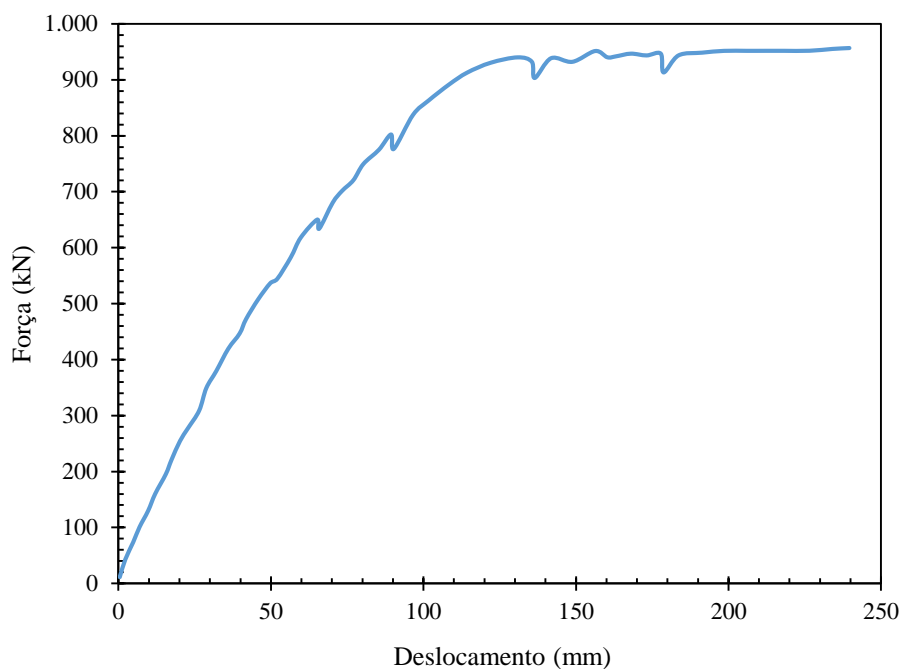
A *ArcelorMittal* emprega na fabricação dos perfis utilizados no CoSFB o aço S355, com módulo de elasticidade variando de 190 a 200 *GPa*, tensão de escoamento mínima de 355 *MPa* e tensão limite última entre 470 e 630 *MPa*, como já citado anteriormente. Os valores empregados no estudo de Hechler et al. (2016) são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Propriedades dos materiais - *Composite Slim-Floor Beam (CoSFB)*

Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_t (MPa)
Alma	430	500	190000	-	-
Mesa Inferior	430	500	190000	-	-
Mesa Superior	430	500	190000	-	-
Concreto	-	-	32000	30,1	2,9

Fonte: Adaptado de ArcelorMittal, 2017

A Figura 4.11 apresenta os resultados encontrados por Hechler et al. (2016). A força máxima alcançada pelo sistema foi de 957 *kN* em um deslocamento no meio do vão de 240 *mm* (HECHLER et al., 2016).

Figura 4.11: Gráfico obtido por Hechler et al. (2016)

Fonte: Adaptado de Hechler et al., 2016

O estudo de Hechler et al. (2016) contou com o ensaio experimental de um segundo sistema estrutural, com as mesmas propriedades e características, confirmando os resultados encontrados.

4.4 SHALLOW CELLULAR COMPOSITE FLOOR BEAM (SCCFB)

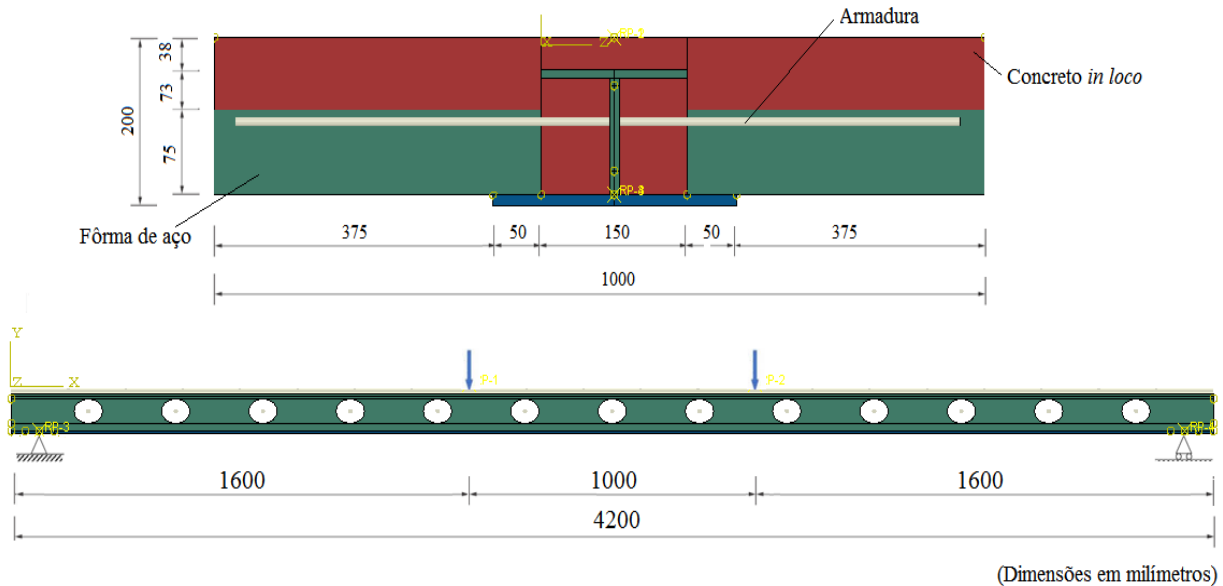
O *Shallow Cellular Composite Floor Beam* (SCCFB), ou também chamado de *Ultra Shallow Floor Beams* (USFB), é o fruto de estudos recentes que vêm se expandindo nos últimos anos. É composto pela soldagem de duas seções T assimétricas, com a mesa inferior maior que a superior e aberturas circulares ao longo da alma, essas aberturas apresentam grande diâmetro, sendo centradas e regularmente espaçadas (LIMAZIE; CHEN, 2015).

Além das vantagens já apresentadas para o sistema *slim floor*, esse tipo de viga apresenta o adicional de conseguir vencer vãos ainda maiores sem a necessidade de vigas secundárias. O método de conexão de cisalhamento entre a viga de aço e a laje de concreto é feito através de barras de aço que passam pelas aberturas na alma. O concreto moldado *in loco* preenche as aberturas e aumenta a interação da laje de concreto com a viga de aço (CHEN; LIMAZIE; TAN, 2015).

A laje empregada em conjunto com o perfil é do tipo mista, porém, as fôrmas de aço foram simplificadas e não foram modeladas. As aberturas são centradas na alma do perfil e possuem

diâmetro de 100 mm. As demais características do estudo realizado por Chen, Limazie e Tan (2015) estão ilustrados na Figura 4.12.

Figura 4.12: Modelo físico Chen, Limazie e Tan (2015)



Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan, 2015

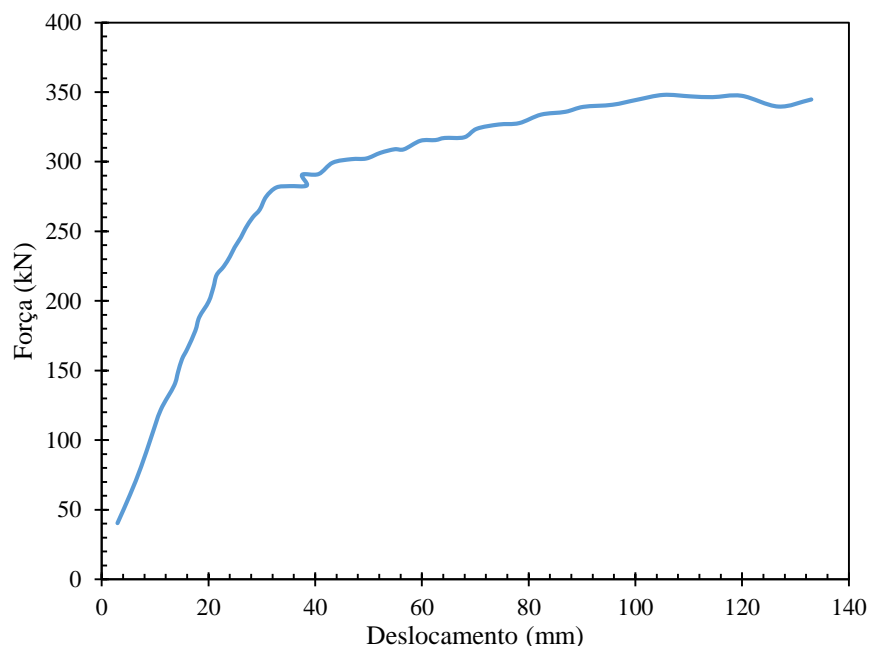
Como o perfil utilizado para a confecção das *Shallow Cellular Composite Floor Beam* é o *Asymmetric Slimflor Beam*, então o aço também é da classe S355. Para calibração do modelo, utilizou-se o estudo experimental de Chen, Limazie e Tan (2015), sendo empregadas as propriedades mecânicas dessa pesquisa, mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Propriedades dos materiais - *Shallow Cellular Composite Floor Beam* (SCCFB)

Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_t (MPa)
Alma	462,9	558,7	188000	-	-
Mesa Inferior	410,5	553,9	185000	-	-
Mesa Superior	462,9	558,7	188000	-	-
Concreto	-	-	32000	29,4	2,8

Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan, 2015

O resultado força aplicada x deslocamento do meio o vão é apresentado na Figura 4.13. A força máxima encontrada foi de 348 kN em um deslocamento no meio do vão de 105,2 mm (CHEN; LIMAZIE; TAN, 2015).

Figura 4.13: Gráfico obtido por Chen, Limazie e Tan (2015)

Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan, 2015

Os mesmos autores realizaram um estudo numérico desse modelo físico, que também foi utilizado como referência para a calibração.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, foram apresentados os estudos experimentais tomados como referência na calibração das quatro tipologias analisadas. A Tabela 4.5 traz um resumo das principais características geométricas e mecânicas utilizadas na calibração. Os valores da tensão de escoamento e da tensão limite última foram tomados como a média, quando encontrados valores diferentes para a alma e as mesas.

Tabela 4.5: Resumo das propriedades geométricas e mecânicas da calibração

		ASB	<i>Deltabeam</i> ®	CoSFB	SCCFB				
Viga	Vão (m)	7,5	7,2	8,0	4,2				
	Aço (MPa)	S355		S420		S355			
		f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u		
		405,7	516	315	490	430	500	436,7	556,3
E (MPa)	200000		200000		190000		185000		
Laje	Tipo	Mista		<i>In loco</i>		Mista		Mista	
	Largura (m)	1,0		0,495		2,5		1,0	
	Altura (m)	0,29		0,275		0,31		0,2	
	E (MPa)	33873		29710		32000		32000	
	f_{ck} (MPa)	34		28,2		30,1		29,4	
	f_t (MPa)	3,15		2,78		2,9		2,8	

Fonte: Autora, 2020

Além das características mostradas na Tabela 4.5, vale destacar o tipo de conexão de cisalhamento utilizada pelas tipologias estudadas. Todas têm em comum o fato de não serem utilizados conectores de cisalhamento, sendo o comportamento misto da estrutura garantido por barras de aço e pela aderência do perfil com o concreto. Três das quatro tipologias estudadas possuem aberturas na alma, permitindo que as barras de aço e o concreto passem por elas, melhorando ainda mais o desempenho misto do sistema. Já a ASB, conta com a presença de ranhuras na face externa da mesa superior, a fim de melhorar a aderência entre o aço e o concreto.

Após o estudo minucioso de cada trabalho experimental e analisando a Tabela 4.5, percebe-se que a etapa de calibração é única para cada tipologia, ou seja, cada modelo tem suas características próprias e deve ser feito isoladamente. Essa etapa visa encontrar a representação do comportamento estrutural que mais se assemelhe do ensaio, utilizando estudos experimentais realizados previamente para determinar parâmetros que, nas fases posteriores, continuarão reproduzindo o comportamento da estrutura.

Observa-se também que cada uma das tipologias possui detalhes geométricos singulares, como as características das aberturas na alma. Assim, após a fase de calibração, as principais dimensões geométricas dos modelos e as propriedades dos materiais foram padronizadas, de modo que fosse possível realizar a comparação entre elas de maneira mais confiável e precisa. As particularidades do processo de simulação numérica são mostradas no próximo capítulo.

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A realização de ensaios experimentais em estruturas é uma solução já bem consolidada no estudo do seu comportamento. Porém, quando existe a necessidade da confecção de muitos modelos ou de modelos bastante refinados, essa prática pode não ser tão acessível. Assim, a simulação numérica se apresenta como uma alternativa à realização de ensaios, devido a sua menor demanda por recursos financeiros, humanos e de tempo, conseguindo alcançar um maior número de avaliações de modelos e variáveis e ampliar a abrangência dos resultados obtidos nos modelos físicos experimentados. Entretanto, para a calibração das modelagens numéricas, se faz necessária a utilização de resultados experimentais realizados previamente, prática denominada calibração.

A simulação numérica destina-se a representar o comportamento de um modelo físico já ensaiado para que, a partir dessa calibração, seja possível analisar outras características e parâmetros. Porém, inserir fielmente todas as particularidades do modelo experimental se torna tarefa muito difícil e trabalhosa, sendo necessário adotar simplificações, que não comprometam a precisão do modelo numérico, mas reduzam seu custo computacional.

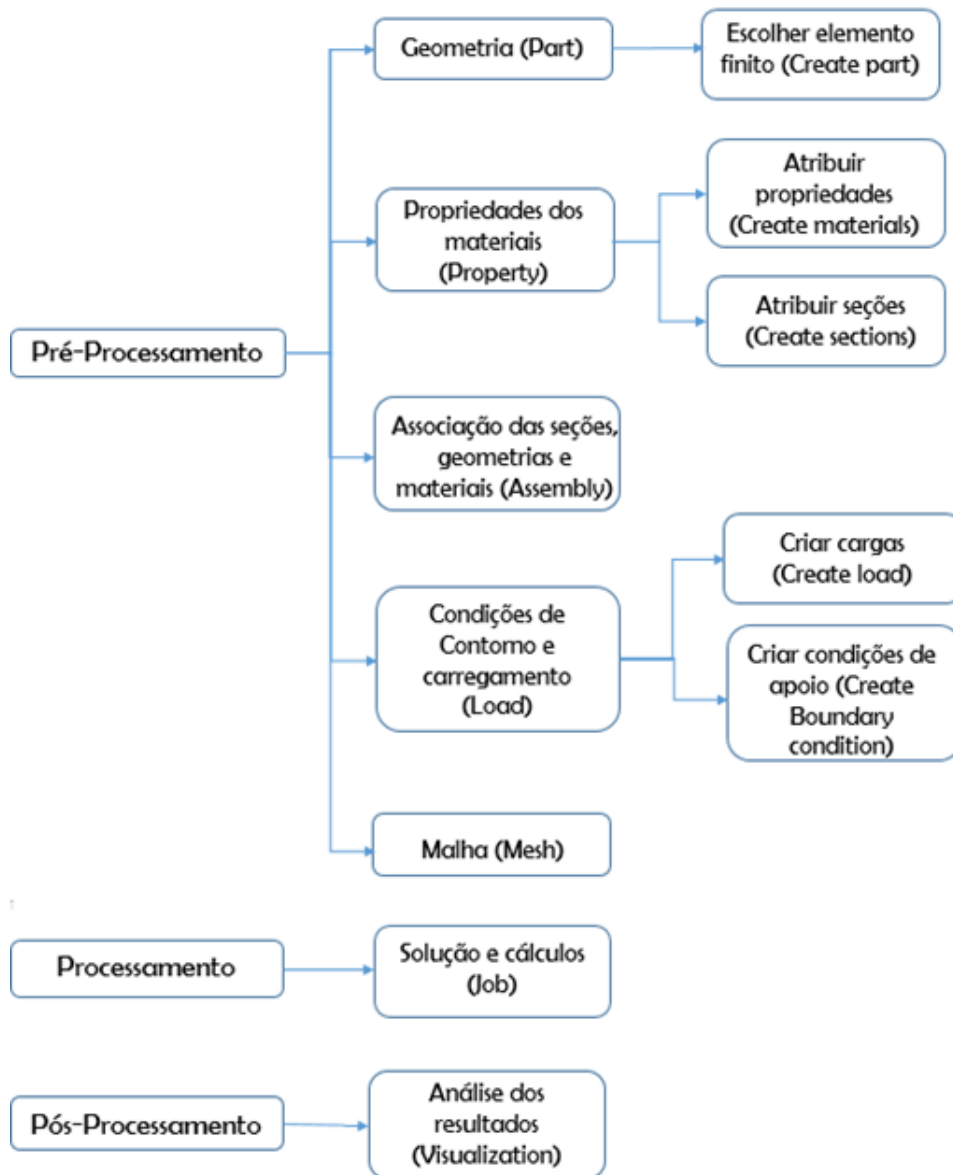
Assim, a modelagem é iniciada com a definição de um problema e criação de um modelo físico. A análise numérica é representada por um sistema de equações (tradução do problema de engenharia para a matemática), simplificado e aproximado por métodos como o de elementos finitos, gerando o modelo final e ocorrendo em três etapas:

- Pré-processamento: consiste na definição dos parâmetros necessários para a execução da análise, gerando o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno e de carregamento e a malha de elementos finitos.
- Processamento: se caracteriza pela execução em si, através de análises que podem ser lineares, não-lineares físicas e/ou geométricas, dinâmica, térmica, entre outras. Envolve a escolha dos critérios de convergência e das técnicas de solução.
- Pós-processamento: possibilita a visualização dos resultados, tanto de maneira gráfica quanto em forma de lista e figuras.

A Figura 5.1 retrata o fluxograma das etapas que compõe uma simulação numérica. Observa-se que a primeira parte, de pré-processamento, é aquela em que são definidos os parâmetros de entrada e que exige mais esforço do analista. Nas fases de processamento e pós-processamento

acontece o oposto, visto que o operador não mais interfere nos parâmetros de entrada e saída, sendo responsável pela análise dos resultados.

Figura 5.1: Fluxograma da análise numérica



Fonte: Adaptado de Estruturas (UFPR), 2017

No processo de simulação numérica desenvolvido, foi utilizado o programa ABAQUS, que é composto pela parte gráfica ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer e o solver ABAQUS/Standard. Tal programa permite a construção, simulação e visualização dos resultados e utiliza o Método dos Elementos Finitos.

Para o correto desenvolvimento da modelagem numérica e a fim de obter resultados mais confiáveis, a simulação das tipologias de pisos mistos de pequena altura foi realizada em três

etapas. Na primeira, foi feita a calibração e validação do modelo numérico, com a definição das propriedades e da geometria, particulares para cada tipologia, como mostrado no capítulo anterior. Na segunda parte, as principais dimensões geométricas dos modelos e as propriedades dos materiais foram padronizadas, a fim de realizar uma posterior comparação entre tipologias. A terceira etapa foi composta pela elaboração de um estudo paramétrico, analisando a influência de quatro parâmetros: altura da capa de concreto, resistência do concreto, espessura da mesa inferior do perfil e resistência do perfil.

Os tópicos seguintes dizem respeito à definição de parâmetros do pré-processamento, como a escolha dos tipos de elementos finitos empregados, relações constitutivas dos materiais, condições de contorno, contato entre componentes e malha. Esses critérios serão determinados e utilizados tanto para a fase de calibração quanto para a de padronização. A geometria do modelo, propriedades dos materiais e condições de carregamento também serão definidos a seguir, porém se diferenciam nas etapas de calibração e de padronização.

5.1 TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS UTILIZADOS

Na criação de um modelo numérico é de suma importância a escolha apropriada do tipo de elemento finito utilizado para cada componente, apresentando características que representem adequadamente seu comportamento. É possível escolher entre os elementos de barra (treliça), viga, chapa, casca e sólido, de modo que ofereça bons resultados e tenha o menor custo computacional possível. A representação do modelo físico pode ser constituída por diferentes elementos finitos, formando um modelo composto.

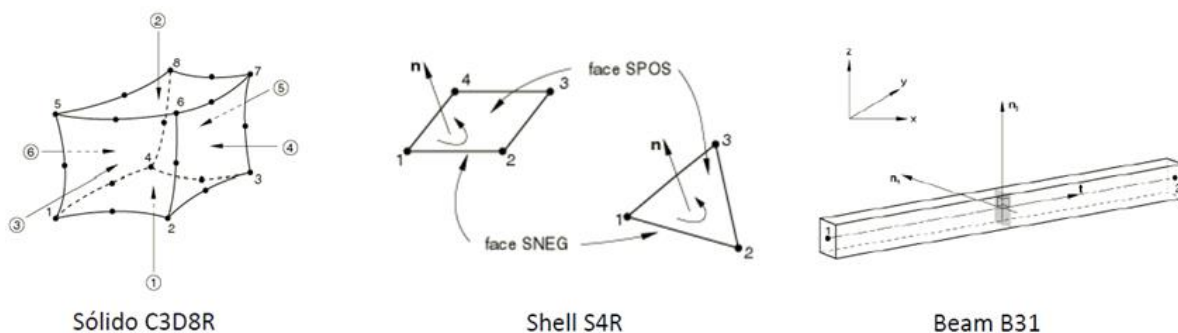
O piso misto de pequena altura é uma estrutura bastante heterogênea. Além de ser composta por diferentes elementos estruturais, como laje, viga e conectores, é também uma estrutura mista, ou seja, formada por diferentes materiais. Dessa forma, é importante definir o elemento finito que melhor represente cada uma dessas características, podendo não ser o mesmo para cada componente estrutural. Essa definição foi realizada com base em trabalhos numéricos encontrados na literatura, como o de Ramos (2010), Leskela et al. (2014), Ellobody (2011) e Limazie e Chen (2016).

Assim, a modelagem da laje de concreto foi feita com o elemento sólido C3D8R, que possui oito nós, três graus de liberdade por nó, referentes às translações segundo os eixos x, y e z e formulação com integração reduzida. Entretanto, os elementos sólidos demandam um grande custo computacional e necessitam de um bom refinamento da malha para se obter soluções

representativas. Por isso, foi utilizado somente para a laje de concreto, que, por suas condições peculiares, é melhor representado por esse elemento finito.

Para o perfil de aço, foi utilizado elemento de casca tipo S4R, com quatro nós, seis graus de liberdade cada (translação e rotação nas direções x, y e z) e formulação com integração reduzida. Apesar do elemento de casca não representar visivelmente alguns aspectos dos perfis, como discernir se o perfil é contínuo ou soldado ou se possui alguma curvatura, nota-se que essas características não influenciaram nos resultados, sendo adotada essa simplificação para obter um menor custo computacional. As barras de aço, tanto as de reforço como as de conexão de cisalhamento, foram modeladas utilizando o elemento de viga B31, dois nós e seis graus de liberdade por nó, tridimensionais com um ponto de interpolação. A Figura 5.2 traz resumidamente os elementos finitos utilizados na modelagem do piso misto de pequena altura.

Figura 5.2: Elementos finitos utilizados na representação dos componentes do *slim floor*



Fonte: Adaptado de Silva e Souza, 2018

A simulação numérica de problemas estruturais exige grande capacidade de memória e tempo de processamento dos computadores, sendo inúmeros os esforços de pesquisadores para minimizar esse problema. Um dos métodos encontrados, foi o de utilizar a formulação com integração reduzida, principalmente em componentes que demandem maior custo computacional, sendo no presente trabalho a laje de concreto (elemento de sólido) e a viga de aço (elemento de casca). Essa opção proporciona a obtenção da matriz de rigidez utilizando pontos de integração suficientes para integrar as contribuições das forças de campo. Esse procedimento reduz o tempo computacional sem comprometer a precisão dos resultados e evita os efeitos de *shear locking*, fenômeno numérico que pode levar a um aumento da capacidade resistente em elementos estruturais submetidos à flexão.

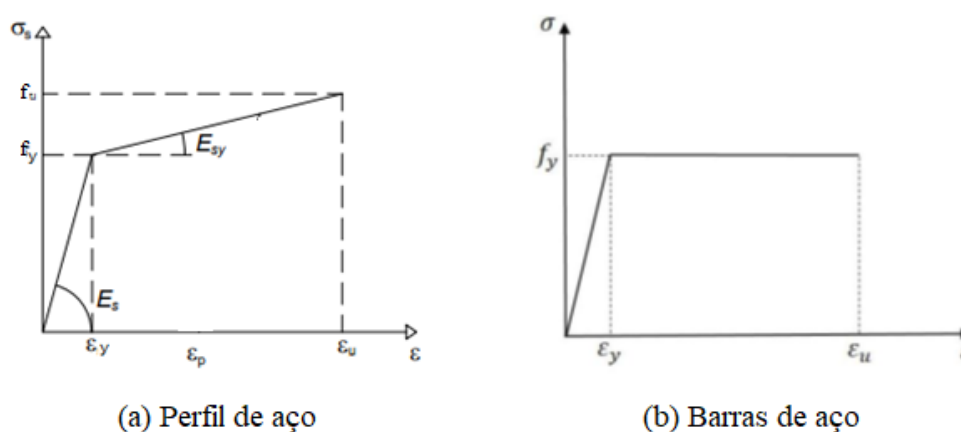
5.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS

Na realização da simulação numérica foi considerado o comportamento não-linear físico dos materiais envolvidos, aço e concreto. A não-linearidade física está relacionada com as propriedades do material e ocasiona relações não-lineares entre tensão e deformação. Os modelos constitutivos são responsáveis por representar essa relação, e por isso, é importante definir modelos que representem adequadamente o comportamento de cada material que compõe a estrutura.

5.2.1 Modelos constitutivos para o aço

O modelo constitutivo adotado para o perfil de aço foi o bi-linear com encruamento isótropo, baseado no critério de plastificação von Mises. A curva tensão \times deformação desse modelo está representada na Figura 5.3(a), sendo elástico-linear até a tensão de escoamento (f_y) e linear com outra inclinação até a tensão limite de resistência (f_u), considerando o encruamento do aço. Para a representação das armaduras, o modelo constitutivo utilizado foi o elasto-plástico perfeito, mostrado na Figura 5.3(b).

Figura 5.3: Modelos constitutivos adotados



Fonte: Kochem, 2018

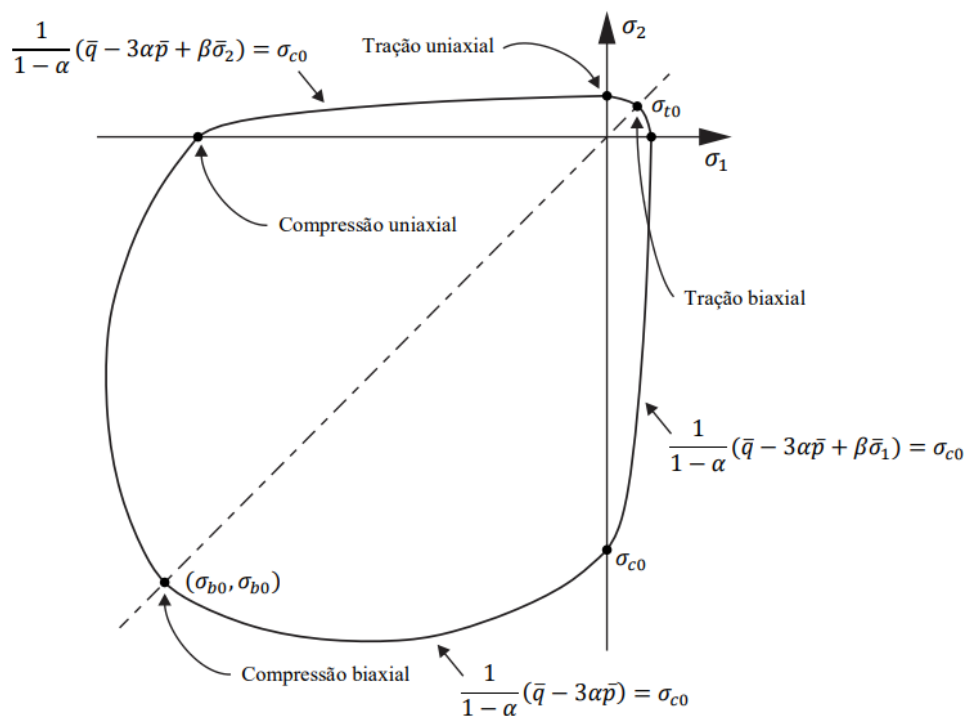
Como definido anteriormente, cada tipologia de piso misto de pequena altura apresenta valores particulares para a tensão de escoamento, tensão limite última e módulo de elasticidade, determinados de acordo com os estudos experimentais utilizados na calibração. Porém, para todos os aços, o coeficiente de Poisson (ν) foi considerado 0,3.

5.2.2 Modelos constitutivos para o concreto

O concreto apresenta características muito peculiares, como a não homogeneidade, anisotropia, baixa resistência à tração, alteração na distribuição de tensões e diminuição da rigidez após a ocorrência de fissuras. Por isso, o desenvolvimento de um modelo constitutivo que represente bem o comportamento do concreto é uma tarefa difícil e uma das que mais influencia na modelagem de estruturas mistas. Os modelos constitutivos adotados na representação do concreto se baseiam na Teoria da Plasticidade e em superfícies limites como as de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager.

Para representar a não-linearidade física do concreto no ABAQUS utilizou-se o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), baseado na Teoria da Plasticidade e na Mecânica do Dano. Foi proposto por Lubliner et al. (1989) e Lee e Fenves (1998) e possui função de plastificação formada pela combinação de dois tipos de funções de Drucker-Prager, conforme ilustrado na Figura 5.4. Além disso, o modelo emprega uma variável de dano para representar a perda de rigidez do concreto a partir do ponto de sua resistência máxima, admitindo também dois mecanismos de falha: ruptura por tração e esmagamento por compressão.

Figura 5.4: Superfície de plastificação do CDP para um estado plano de tensões

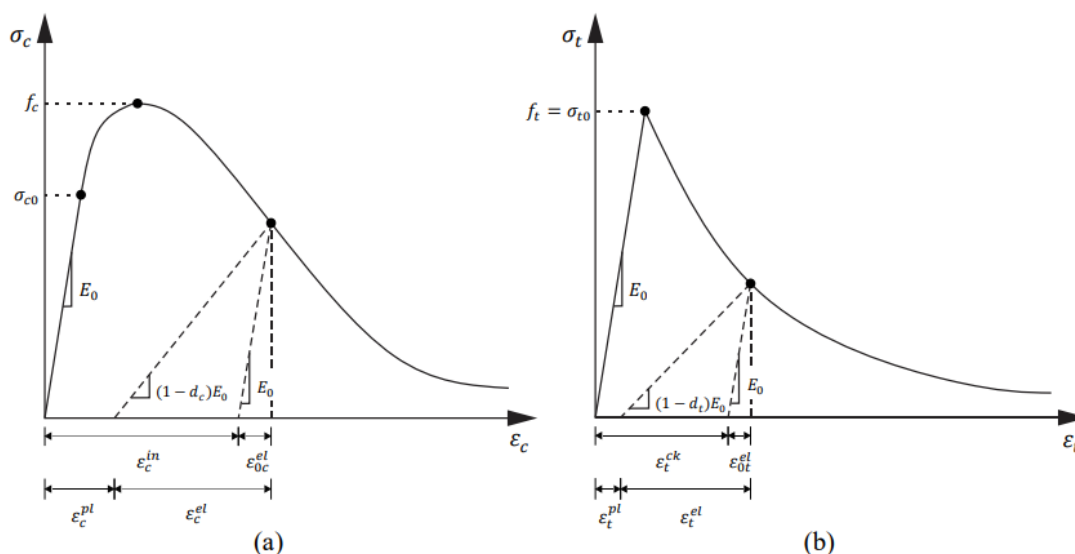


Fonte: Adaptado de Simulia, 2012

Nesse modelo, pressupõe-se o uso de diferentes curvas tensão \times deformação para o concreto comprimido e tracionado, sendo que, para este último, deve-se levar em consideração o efeito

da contribuição do concreto entre fissuras (*Tension Stiffening*). A Figura 5.5(a) e (b) ilustra o comportamento do concreto à compressão e a tração, respectivamente. Além disso, para utilizar o *Concrete Damaged Plasticity* no ABAQUS alguns parâmetros devem ser adotados conforme o tipo de concreto, como ângulo de dilatância, excentricidade, relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial, fator de forma e viscosidade (PETRAUSKI, 2016).

Figura 5.5: Curvas tensão x deformação para o concreto



Fonte: Simulia, 2017

O ângulo de dilatância (ψ) e a excentricidade (ρ) são parâmetros que influenciam na evolução das deformações inelásticas durante o processo de fissuração do concreto. O ângulo de dilatância mede a inclinação que o potencial plástico alcança para altas tensões de confinamento. Malm (2009) definiu que valores pequenos, em torno de 10° , se relacionam à concretos com comportamento frágil, enquanto a adoção de valores altos, por volta dos 40° , representa o comportamento dúctil, concluindo que o valor ideal do ângulo de dilatância está entre 35° e 38° .

A teoria de Drucker-Prager prevê que a superfície de escoamento no plano dos meridianos apresenta a forma de uma reta ($\rho=0$). Porém, o CDP não obedece completamente essa teoria, e ensaios experimentais mostram que a superfície de escoamento assume a forma de uma hipérbole próximo do encontro com o eixo hidrostático ($\rho=0,1$). Essa forma assumida pela superfície de escoamento é chamada de excentricidade (ρ) e valores próximos de zero indicam que a função de potencial plástico se aproxima mais rapidamente de uma assíntota. O ABAQUS indica um valor padrão de $\rho=0,1$.

A relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}) é o parâmetro adotado para descrever o ponto em que o concreto sofre falha devido à compressão biaxial. Kupfer (1969) apresentou boa aproximação para esse valor, encontrando $f_{b0} = 1,16248 f_{c0}$, indicado como padrão pelo ABAQUS. O quarto parâmetro a ser determinado no CDP é o fator de forma (K), utilizado para definir o formato da superfície de falha do concreto, sendo a razão entre a distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e compressão no plano desviador. O valor de K varia entre 0,5 e 1,0, sendo 0,6667 o valor padrão do ABAQUS.

O parâmetro de viscosidade (μ) é utilizado para reparar dificuldades de convergência quando o modelo apresenta degradação da rigidez. Adotar valores pequenos é mais vantajoso para o processo, melhorando a convergência e o tempo de processamento sem comprometer os resultados. A Tabela abaixo traz os valores padrões dos parâmetros que foram utilizados inicialmente na calibração do modelo.

Tabela 5.1: Valores de referência para os parâmetros do *Concrete Damaged Plasticity* (CDP)

Parâmetro	Valor
Ângulo de dilatância	36°
Excentricidade	0,1
f_{b0}/f_{c0}	1,16
Fator de forma	0,6667
Viscosidade	0,0001

Fonte: Autora, 2020

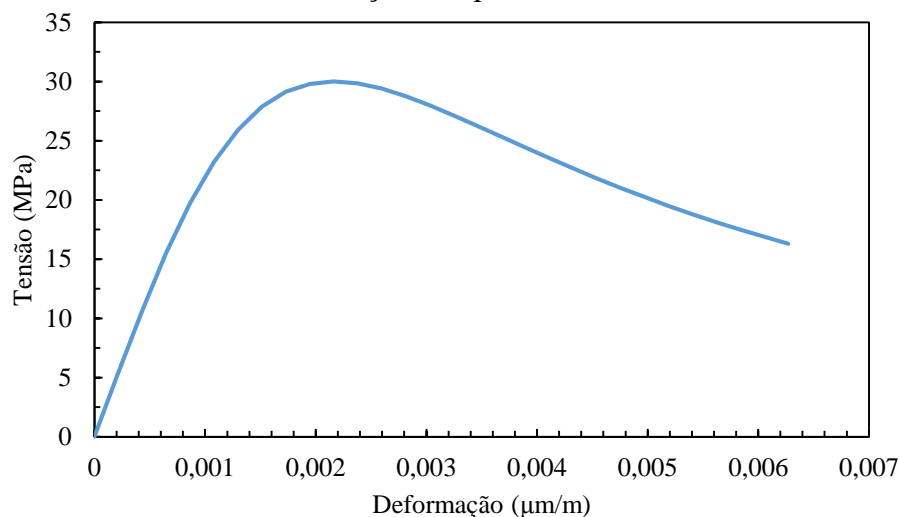
Além dos parâmetros especificados acima, é necessário definir a curva tensão \times deformação correspondente ao comportamento à compressão e à tração do concreto, que serão parâmetros de entrada no ABAQUS. São inúmeros os modelos constitutivos desenvolvidos para representar o comportamento do concreto, porém, a partir da calibração de cada tipologia, deve-se adotar aquele que melhor represente cada comportamento. Assim, para o comportamento do concreto à compressão, o modelo que melhor se adequou as quatro tipologias foi o proposto por Carreira e Chu (1985). O modelo leva em conta o amolecimento do concreto e se baseia nos limites de tensão e deformação. A relação tensão \times deformação é dada segundo as Equações 5.1 e 5.2 e mostrada na Figura 5.6 para valores padronizados das propriedades do concreto, com $f_{cm} = 30 \text{ MPa}$.

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\beta(\varepsilon/\varepsilon'_c)}{\beta - 1 + (\varepsilon/\varepsilon'_c)^\beta} \quad (5.1)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cm}}{\varepsilon'_c E_c}} \quad (5.2)$$

Onde f_{cm} é a resistência média do concreto à compressão; ε'_c a deformação correspondente a resistência média do concreto à compressão e E_c o módulo de elasticidade do concreto.

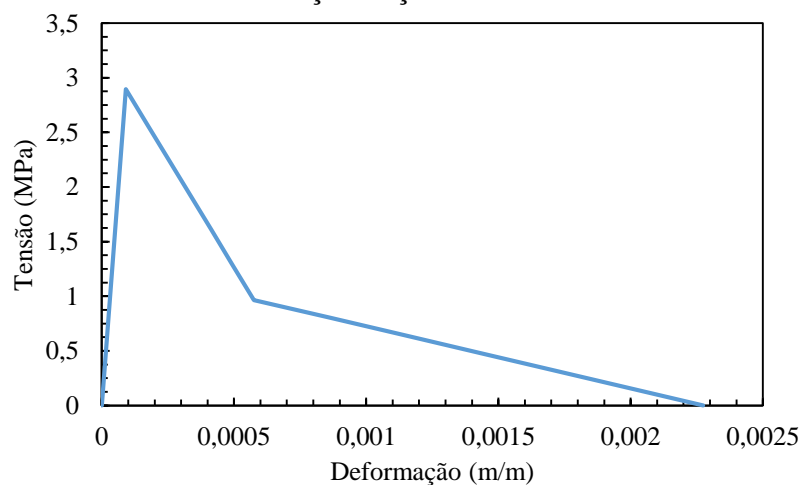
Figura 5.6: Gráfico tensão x deformação compressão - modelo de Carreira e Chu (1985)



Fonte: Autora, 2020

Para o comportamento do concreto à tração foi adotado o modelo de Polak e Genikomsou (2015) para as quatro tipologias, no qual a relação tensão x deformação na tração é linear elástica até o limite da sua resistência f'_t , e depois da abertura de fissura a curva é caracterizada por um processo de perda de rigidez até a deformação ε_u . A relação tensão x deformação é mostrada na Figura 5.7, também para a fase de padronização das propriedades dos materiais, com $f'_t = 2,9 \text{ MPa}$.

Figura 5.7: Gráfico tensão x deformação tração - modelo de Polak e Genikomsou (2015)



Fonte: Autora, 2020

O CDP possibilita a definição de variáveis de dano independentes, que representam a degradação da rigidez do concreto quando submetido a cargas concentradas ou cíclicas. Assim,

o dano à compressão foi adotado segundo o modelo de Birtel e Mark (2006), que penaliza de forma mais pronunciada a rigidez do material, permitindo a evolução do dano desde os estágios iniciais de carregamento. A Equação 5.3 apresenta a relação para determinar esse dano.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_c} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (5.3)$$

Por sua vez, o dano à tração foi calculado segundo o modelo de Pavlovic et al. (2013), especificado para capturar o dano do concreto após atingir sua resistência à tração, permitindo a evolução do dano apenas no ramo pós picos das curvas. A Equação 5.4 usada para a obtenção do dano à tração é mostrada abaixo.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad (5.4)$$

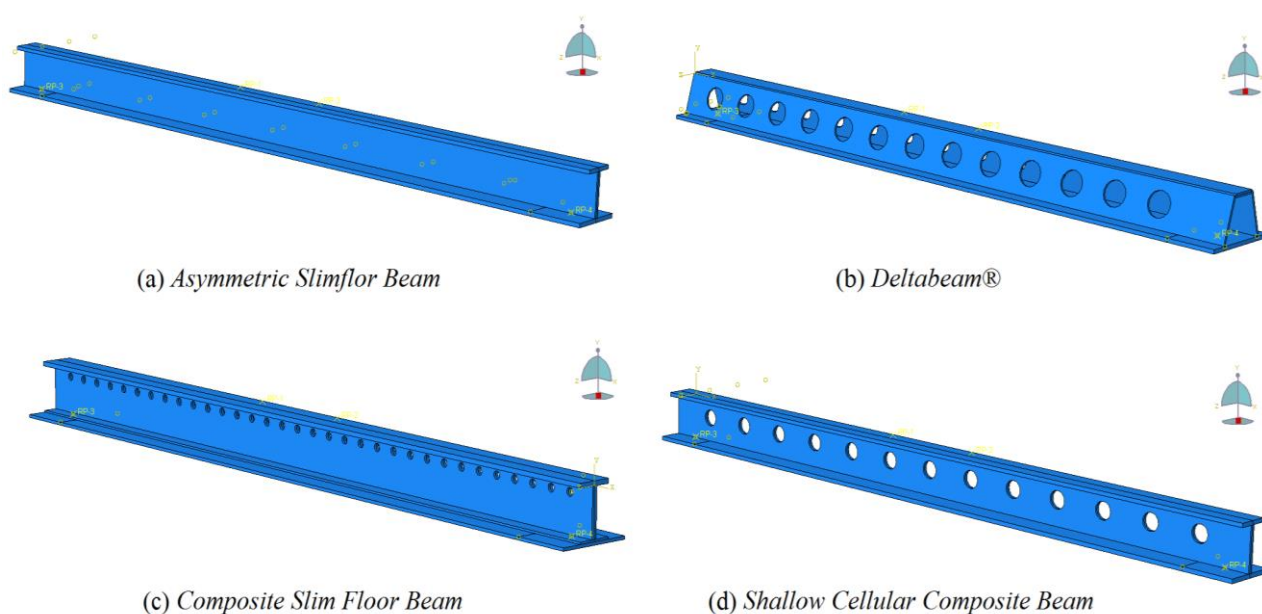
5.3 GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os perfis de aço possuem resistências e, principalmente, geometrias distintas de uma tipologia para a outra, como visto nos estudos experimentais utilizados na calibração. Além disso, o tipo de laje empregada pode ser diferente, com uso de lajes mistas, pré-moldadas alveolares e maciças. Assim, com o objetivo de comparar as tipologias, uma padronização dos modelos se fez necessária, uniformizando as dimensões dos perfis, sem modificar suas características iniciais, e o tipo da laje empregada.

Os esquemas geométricos das tipologias na fase de calibração foram apresentados no Capítulo 3, sendo este tópico destinado a analisar as geometrias após inseridas no programa de elementos finitos (ABAQUS). As propriedades dos materiais, para esta fase, foram mostradas na Tabela 4.5. O presente tópico apresenta também as dimensões e características geométricas das tipologias na fase de padronização, sendo as propriedades dos materiais desta fase descritas no item 5.3.2.

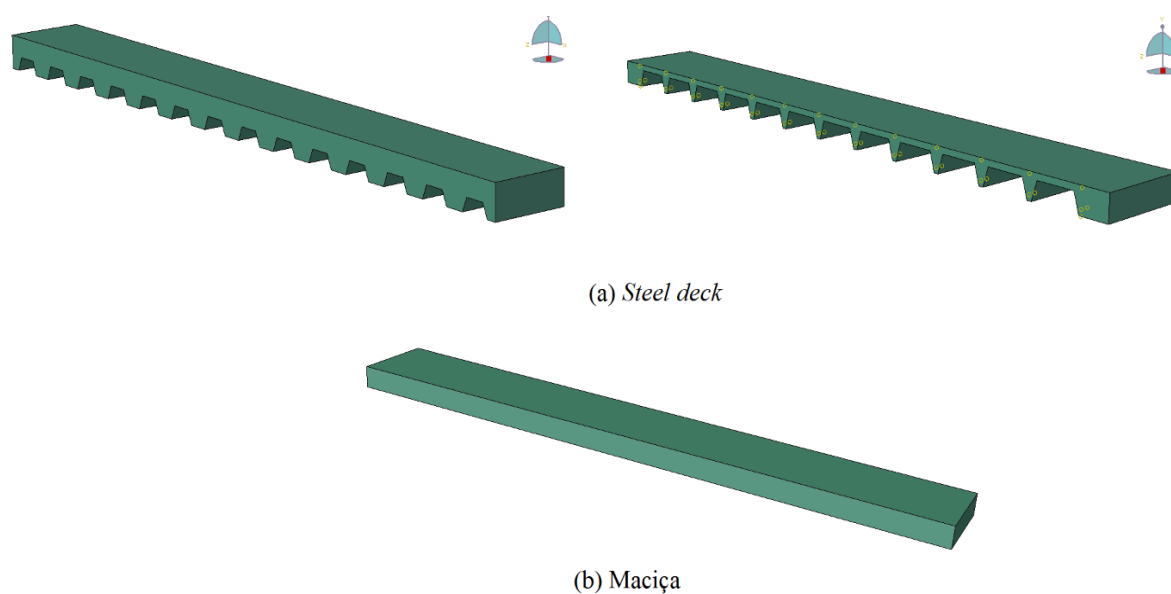
5.3.1 Calibração

As propriedades dos materiais utilizadas na fase de calibração são mostradas na Tabela 4.5. O processo de calibração dos modelos numéricos foi iniciado com a modelagem dos perfis de aço de cada tipologia, utilizando as dimensões descritas nos estudos experimentais. O elemento finito empregado para a modelagem dos perfis foi o elemento de casca, sendo as seções mostradas na Figura 5.8 com a espessura correspondente.

Figura 5.8: Geometria dos perfis de aço

Fonte: Autora, 2020

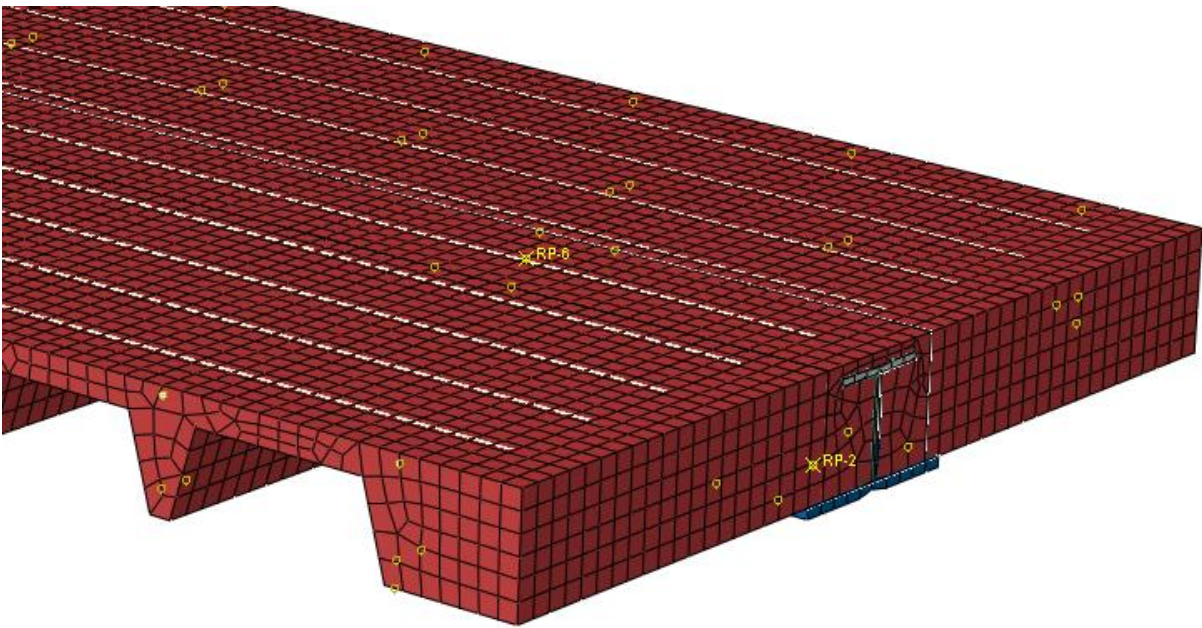
Optou-se por utilizar os modelos completos, sem aplicação da simetria. Além disso, foi adotada como simplificação não modelar as formas de aço das lajes mistas, utilizadas na ASB e SCCFB, já que a influência do *steel deck* no comportamento à flexão mostrou não ter significância e não ser objetivo do trabalho analisar características nessa interface. Entretanto, a laje de concreto foi modelada como se houvesse a forma de aço, como mostrado na Figura 5.9(a). A Figura 5.9(b) ilustra a outra tipologia de laje utilizada, a pré-moldada.

Figura 5.9: Geometria das lajes de concreto

Fonte: Autora, 2020

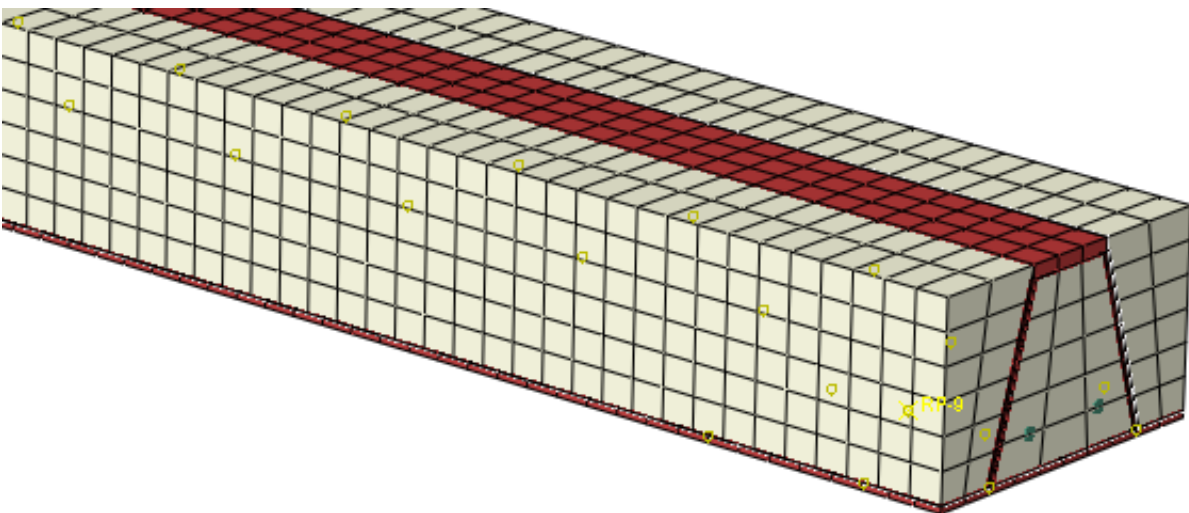
Após a modelagem dos elementos separadamente, iniciou-se a junção dos componentes para formar o *slim floor* completo, Figuras 5.10 a 5.13. Nas Figuras, podem ser observadas as diferenças de cores quanto ao material utilizado e a discretização da malha, sendo de 50 mm para os elementos sólidos e de 35 mm para os elementos em casca e 10 mm para a armadura.

Figura 5.10: Geometria *Asymmetric Slimflor Beam* para calibração



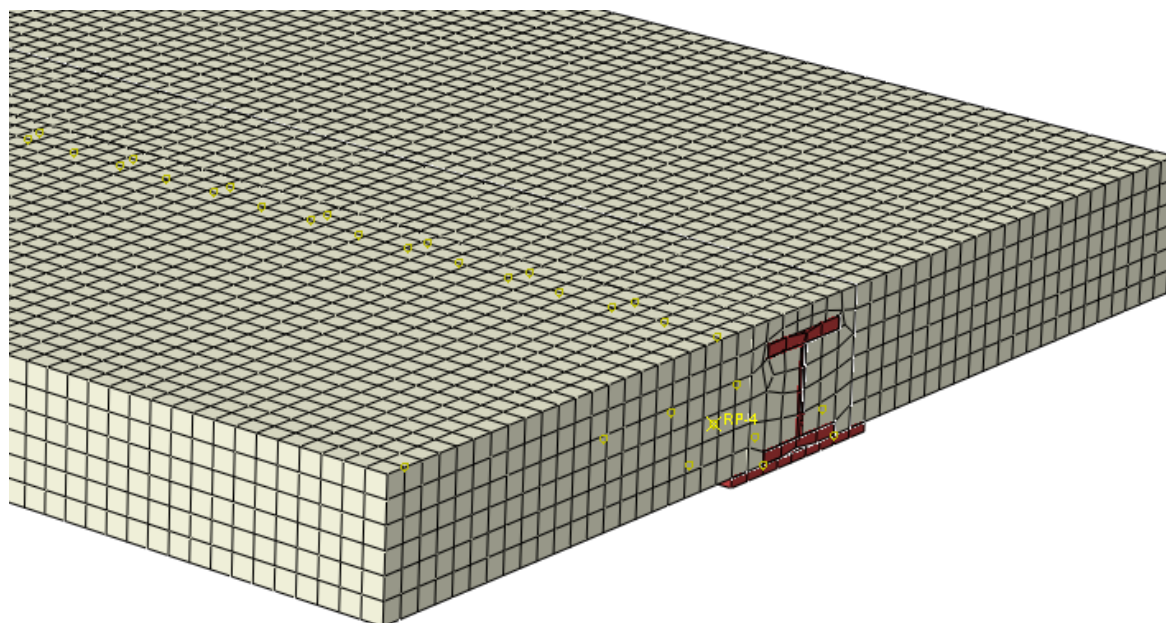
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.11: Geometria *Deltabeam*® para calibração



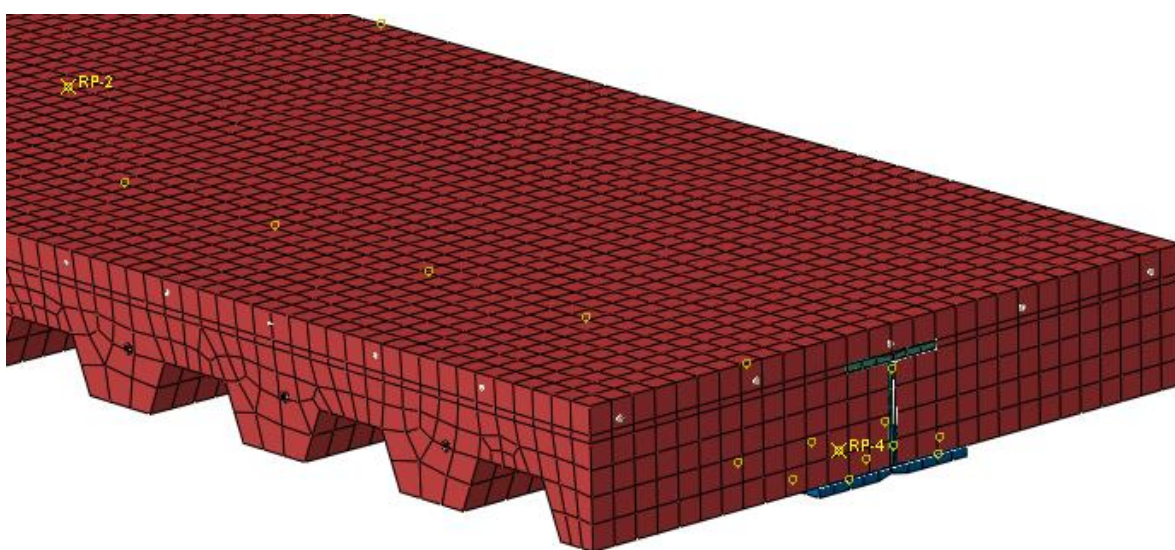
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.12: Geometria *Composite Slim Floor Beam* para calibração



Fonte: Autora, 2020

Figura 5.13: Geometria *Shallow Cellular Composite Beam* para calibração



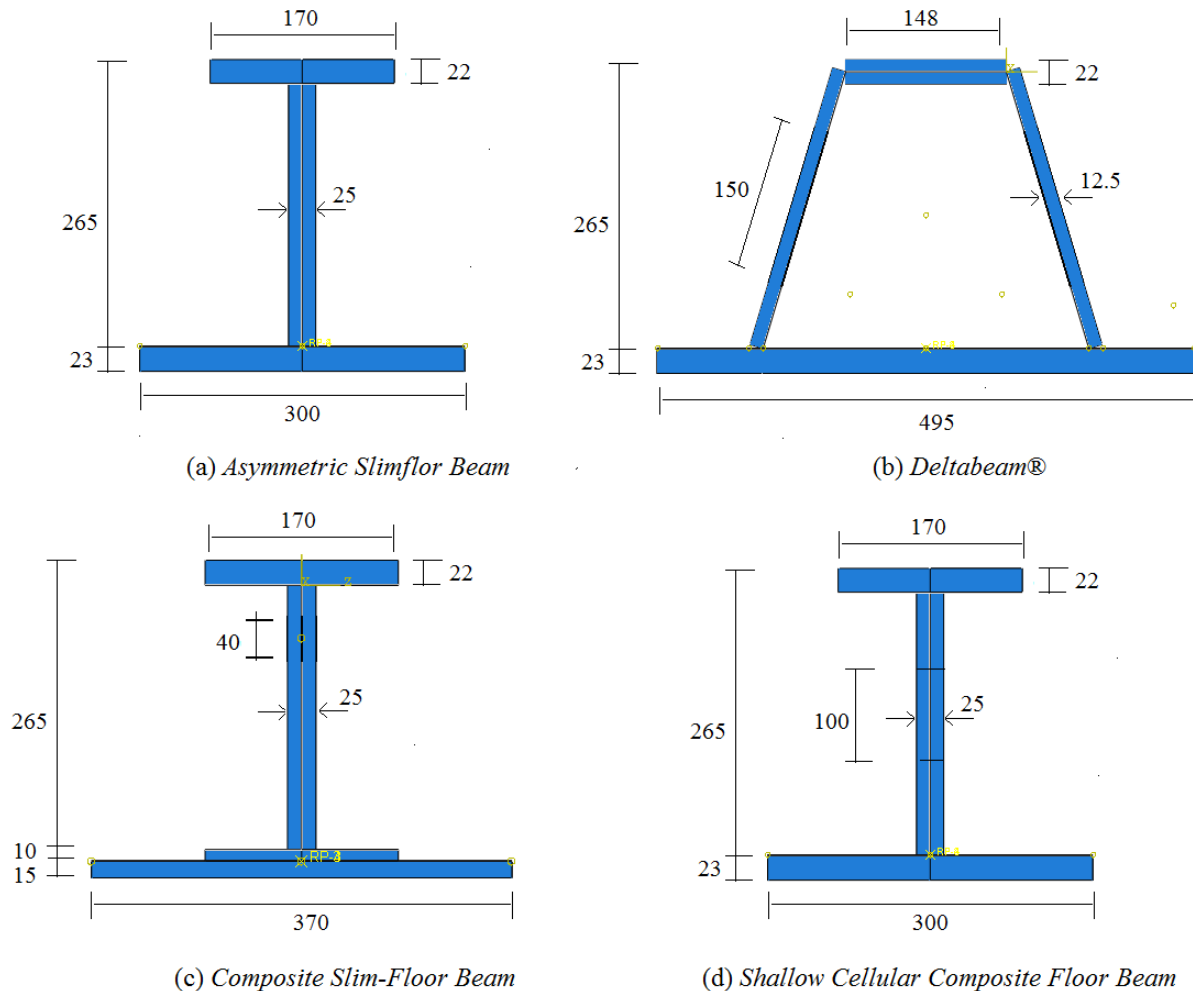
Fonte: Autora, 2020

5.3.2 Padronização

A segunda parte do trabalho, realizada após a calibração das tipologias analisadas, contou com a estratégia de padronização. Dois fatores foram analisados com cautela: as dimensões geométricas e as propriedades dos materiais. Assim, a primeira padronização foi relativa às dimensões básicas dos perfis, pois, mesmo possuindo características particulares, essa uniformização foi necessária para se conseguir fazer uma comparação mais confiável e precisa. As dimensões padronizadas foram: altura do perfil e espessura das mesas e da alma, como

mostrado na Figura 5.14. O comprimento do perfil também foi padronizado em 4300 mm . A largura das mesas, tanto inferior quanto superior, é uma particularidade identificativa de cada perfil, devendo ser respeitada essa diferença.

Figura 5.14: Dimensões padronizadas dos perfis de aço (dimensões em mm)

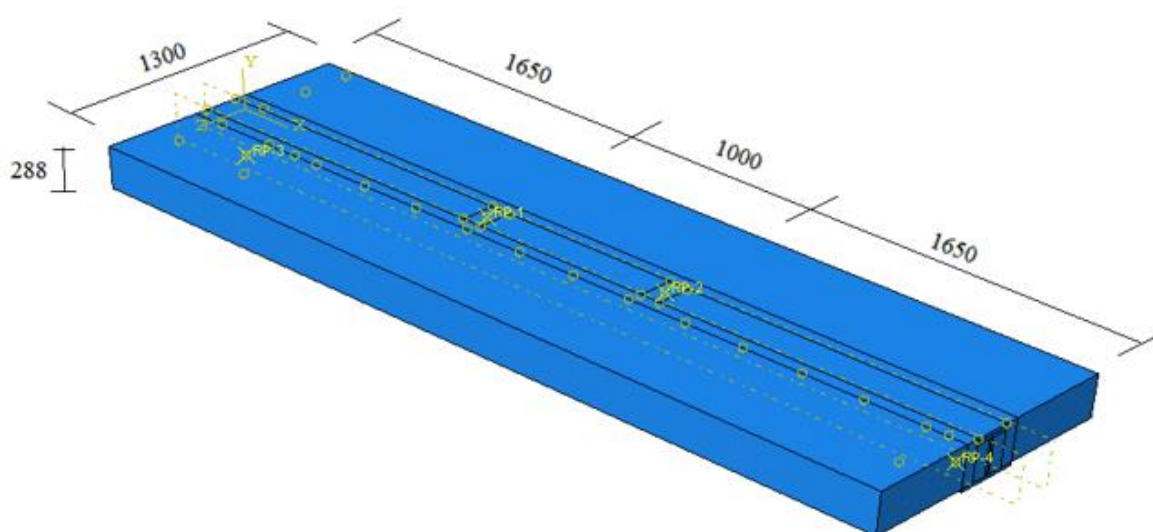


Fonte: Autora, 2020

O *Composite Slim-Floor Beam* é formado pelo perfil *Slimflor*, possuindo uma chapa adicional soldada à mesa inferior do perfil. Dessa forma, a composição da espessura da mesa inferior se dá pela soma das espessuras dos dois componentes. Entretanto, a espessura mínima da chapa é de 15 mm , e, para somar 23 mm , restariam apenas 8 mm para a mesa inferior do perfil de aço, dimensão abaixo das observadas. Para resolver esse problema, e levando-se em conta que a largura dos componentes é diferente, utilizou-se o valor de 10 mm para a mesa inferior do perfil, conseguindo uma equivalência com as áreas das mesas inferiores dos demais perfis. Para o cálculo da espessura da alma da *Deltabeam®* foi adotada a mesma simplificação do procedimento anterior. Ou seja, sendo composta por duas chapas, a espessura de cada uma delas foi de $12,5\text{ mm}$, metade da espessura das almas dos demais perfis.

Além dos perfis, a laje também foi padronizada, visto que na etapa de calibração foram usadas duas tipologias diferentes, a maciça e a mista, com dimensões particulares. Desse modo, foi escolhida a laje maciça para a padronização, com dimensões de 1300 mm de largura, 4300 mm de comprimento e 288 mm de altura, permitindo um cobrimento de 23 mm . Essas dimensões podem ser visualizadas na Figura 5.15 e foram escolhidas baseando-se no levantamento teórico e na análise dos estudos experimentais realizados para o sistema *slim floor* em geral. Observa-se que o volume de concreto variou de uma tipologia para outra, devido às características particulares dos perfis.

Figura 5.15: Dimensões das lajes de concreto (em mm)



Fonte: Autora, 2020

A dimensão das barras de aço utilizadas também foi padronizada. Dessa forma, foram empregadas armaduras paralelas ao perfil (longitudinais) com diâmetro de 10 mm , comprimento de 4000 mm e espaçamento de 250 mm . As armaduras perpendiculares ao perfil, foram de 16 mm , passando pelo centro das aberturas, quando houver, e comprimento de 1000 mm .

Outro fator que mereceu especial atenção foi a definição das propriedades dos materiais. Duas opções foram consideradas e simuladas numericamente para que, a partir da análise dos resultados, fosse escolhida a configuração que mais beneficiasse a comparação das tipologias. Na primeira opção, foram mantidas as propriedades utilizadas na calibração dos modelos, tanto para a laje quanto para o perfil de aço, como visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Propriedades dos materiais – Tipo 1

Tipologia	Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_t (MPa)
ASB	Alma	384	516	200000	-	-
	Mesa Inferior	423	516	200000	-	-
	Mesa Superior	410	516	200000	-	-
	Concreto	-	-	33837	34	3,15
<i>Deltabeam</i> ®	Alma	315	490	200000	-	-
	Mesa Inferior	315	490	200000	-	-
	Mesa Superior	315	490	200000	-	-
	Concreto	-	-	29710	28,2	2,78
CoSFB	Alma	430	500	190000	-	-
	Mesa Inferior	430	500	190000	-	-
	Mesa Superior	430	500	190000	-	-
	Concreto	-	-	32000	30,1	2,9
SCCFB	Alma	462,9	558,7	188000	-	-
	Mesa Inferior	410,5	553,9	185000	-	-
	Mesa Superior	462,9	558,7	188000	-	-
	Concreto	-	-	32000	29,4	2,8

Fonte: Autora, 2020

A partir da Tabela 5.2, percebe-se que parâmetros como o módulo de elasticidade e as resistências dos materiais foram diferentes para cada tipologia. Devido à este fato, encontrou-se dificuldade na realização de uma comparação direta, não conseguindo avaliar se os resultados são decorrentes predominantemente dos valores das propriedades ou das características de cada tipologia. Assim, na segunda opção foram padronizadas também as propriedades dos materiais para fins comparativos. A Tabela 5.3 mostra os valores das propriedades padronizadas.

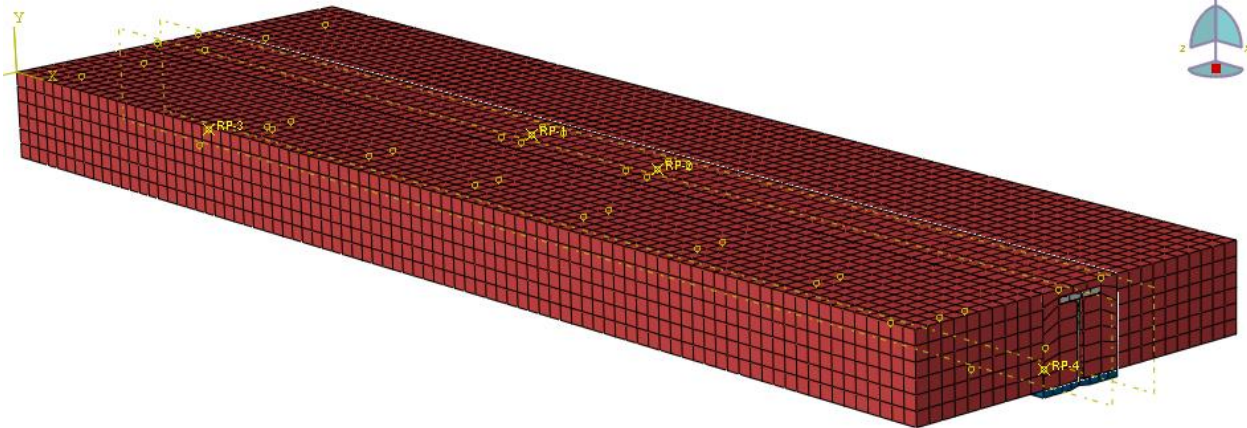
Tabela 5.3: Propriedades dos materiais – Tipo 2

Componentes	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_t (MPa)
Alma	430	550	200000	-	-
Mesa Inferior	430	550	200000	-	-
Mesa Superior	430	550	200000	-	-
Concreto	-	-	32000	30	2,9

Fonte: Autora, 2020

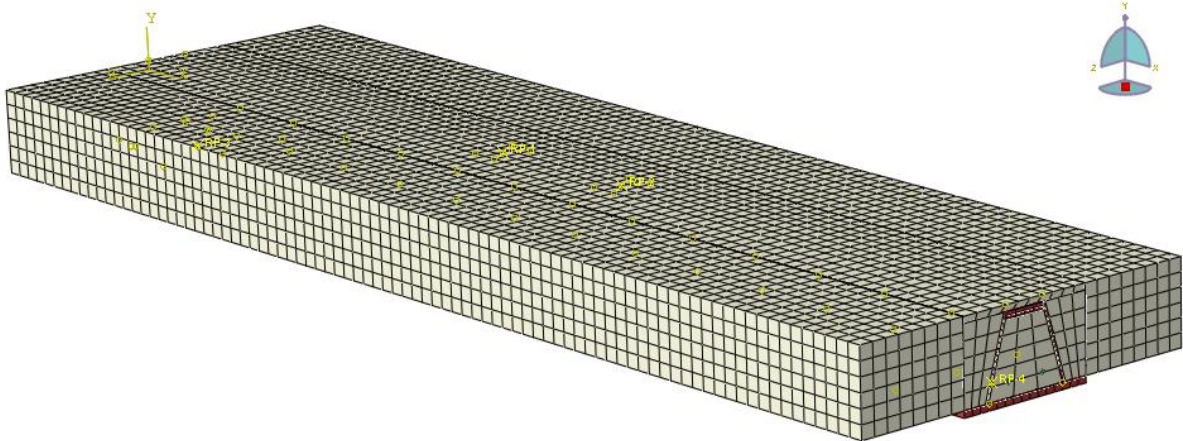
Dessa forma, os sistemas completos e padronizados são mostrados nas Figuras 5.16 a 5.19, assim como a malha utilizada, que segue o padrão estabelecido na calibração de 50 mm para os elementos sólidos, 35 mm para os elementos de casca e 10 mm para as armaduras (elementos de viga).

Figura 5.16: Geometria *Asymmetric Slimflor Beam* padronizada



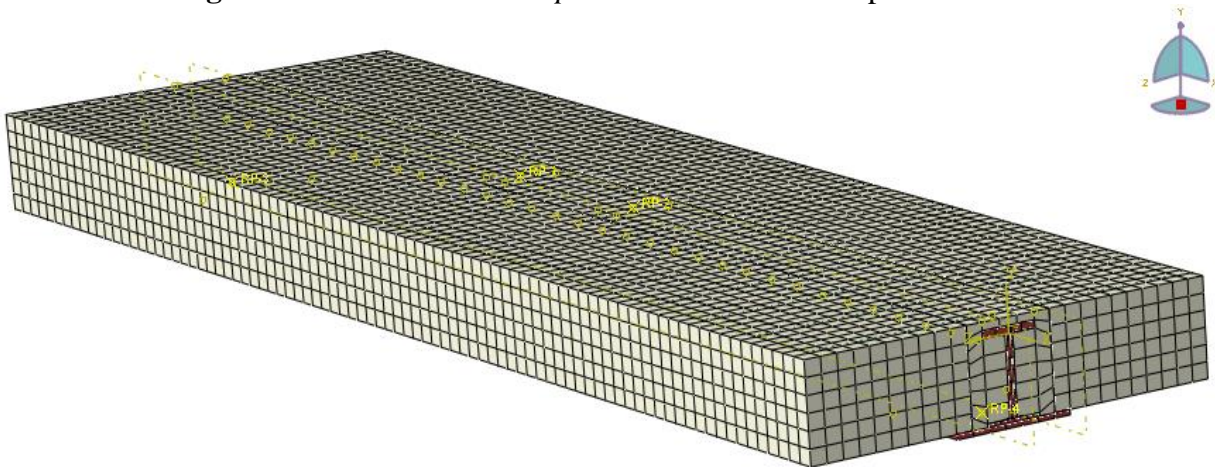
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.17: Geometria *Deltabeam*® padronizada



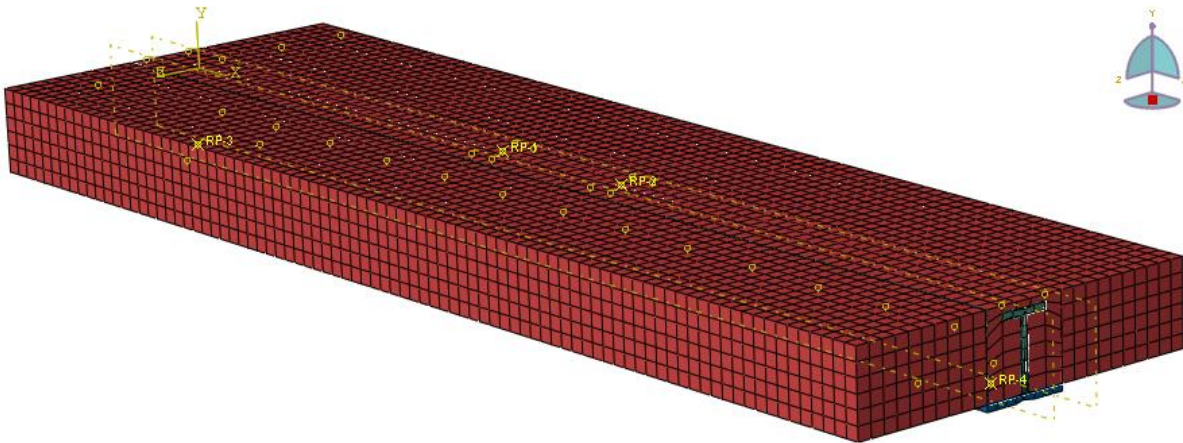
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.18: Geometria *Composite Slim Floor Beam* padronizada



Fonte: Autora, 2020

Figura 5.19: Geometria *Shallow Cellular Composite Beam* padronizada



Fonte: Autora, 2020

5.4 CONTATO ENTRE COMPONENTES

O contato entre componentes se dá quando corpos distintos tendem a ocupar a mesma posição no espaço. De acordo com a teoria da impenetrabilidade, surgem forças de ação e reação entre os componentes, causando alteração nas condições de contorno, que vão sendo determinadas durante o processo de resolução. Essa característica define o fenômeno como não-linear e, em programas de Elementos Finitos, se apresenta em forma de restrições a serem impostas ao sistema e aplicadas nas regiões de contato entre os componentes (PIEADADE NETO, 2009).

A determinação do adequado contato entre componentes em uma estrutura mista exerce forte influência nos resultados da simulação. Em contrapartida, a característica não-linear de contato aumenta o custo computacional, sendo necessário adotar simplificações que diminuam esse custo, sem prejudicar os resultados. Uma das simplificações adotadas nas simulações, foi a de não modelar o perfil *steel deck*, principalmente porque seriam exigidas muitas restrições de contato, que demandariam alto custo computacional, trazendo um nível de detalhamento que não acrescentou precisão aos resultados de interesse. Outra simplificação adotada foi a de considerar interação completa entre as conexões de cisalhamento (barras) e o perfil de aço.

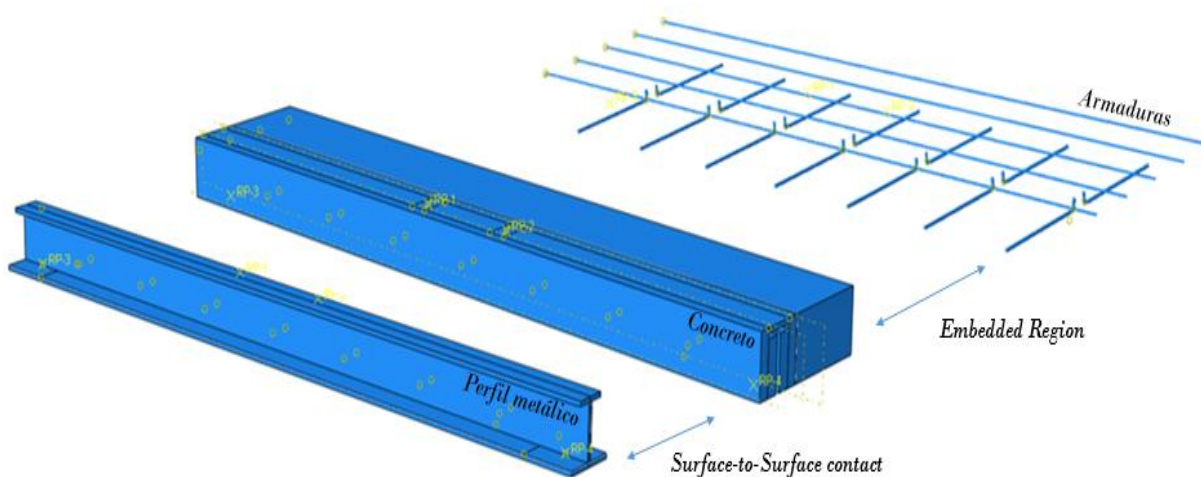
Mesmo com as simplificações, é fundamental garantir que a laje de concreto e o perfil de aço se comportem de maneira conjunta, por meio da efetivação do desempenho dos conectores de cisalhamento. O ABAQUS apresenta inúmeras ferramentas que garantem o contato adequado entre os componentes. Assim, após a definição de todas as geometrias, ocorre o processo de determinação do contato entre os componentes, sendo necessário determinar a interação entre o perfil e a chapa soldada, as barras de aço e a laje de concreto, o concreto que passa pelas aberturas e o perfil e, por fim, a viga de aço e a laje de concreto.

Para as tipologias que apresentam chapas soldadas, como a *Deltabeam®* e a *Composite Slim Floor Beam*, foi utilizada a ferramenta “*Tie*”, que permite transferir tensões entres os dois elementos sem que haja separação ou escorregamento relativo entre as partes, representando bem o comportamento da solda. A vinculação das barras de aço com a laje de concreto se fez pelo comando “*Embedded region*”, simulando a aderência do concreto armado, com as restrições referentes a um corpo embutido em outro.

Para simular o contato entre o perfil de aço e a laje de concreto foi utilizada a ferramenta “*Surface-to-surface contact*”, sendo necessário determinar propriedades referentes ao comportamento na direção normal (*normal behavior*) e na direção tangencial (*tangencial behavior*) na interface. O comportamento normal definido foi o “*Hard contact*” (contato rígido), que faz com que a penetração entre as superfícies seja imperceptível e o atrito desconsiderado. Para o comportamento tangencial, foi selecionada a opção “*Penalty*”, que permite o movimento relativo das superfícies, com coeficientes de atrito definidos na calibração para cada tipologia.

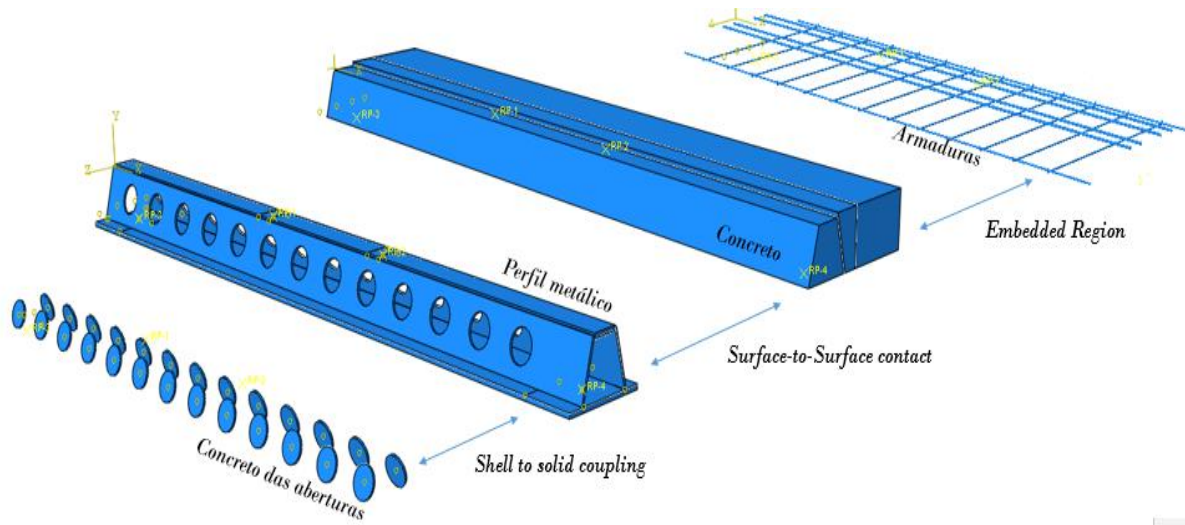
Entretanto, o contato do concreto que passa pelas aberturas com o perfil de aço não pode ser definido pela ferramenta “*Surface-to-surface contact*”, visto que a região do perfil que entrará em contato com esse concreto não é uma superfície e sim uma linha. Dessa forma, foi empregada a simplificação de se considerar interação completa entre esses componentes, utilizando o comando “*Shell to solid coupling*”. Essa ferramenta permitiu conectar elementos de casca (viga) a elementos sólidos (concreto que passa pelas aberturas), acoplando o deslocamento e a rotação dos nós da casca aos nós do sólido. As Figuras 5.20 a 5.23 ilustram as ferramentas utilizadas para garantir o contato entre os componentes de cada tipologia.

Figura 5.20: Contato *Asymmetric Slimflor Beam (ASB)*



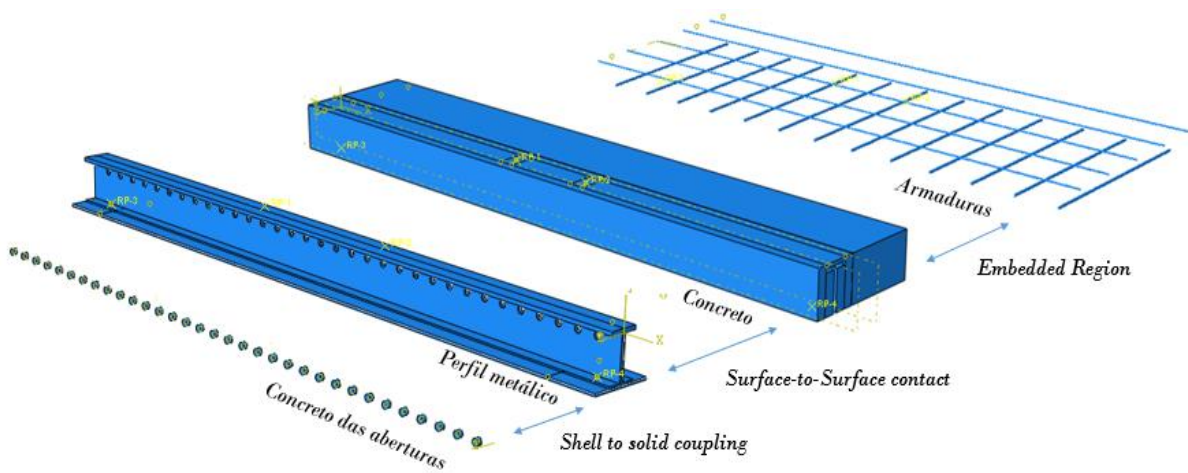
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.21: Contato *Deltabeam*®



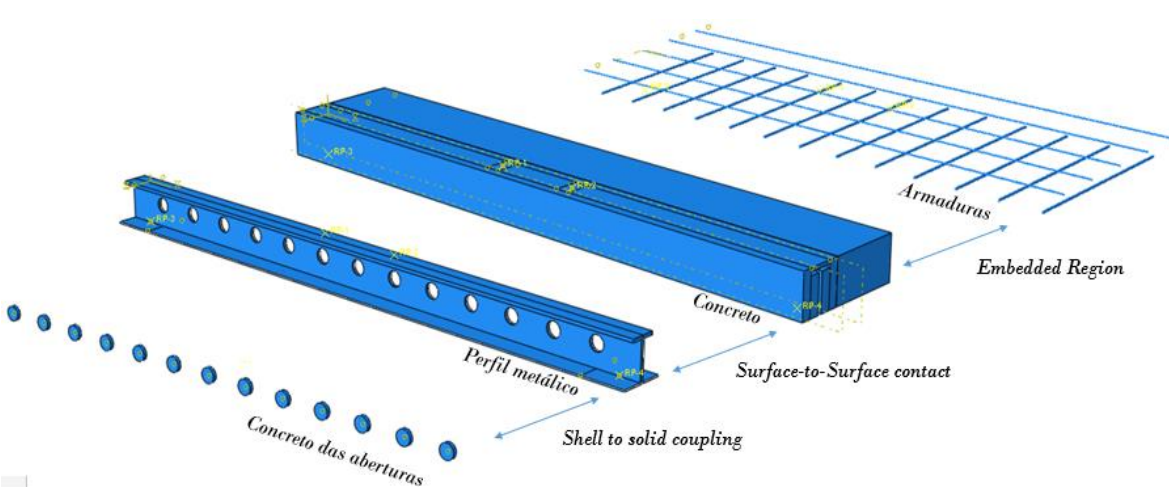
Fonte: Autora, 2020

Figura 5.22: Contato *Composite Slim Floor Beam (CoSFB)*



Fonte: Autora, 2020

Figura 5.23: Contato *Shallow Cellular Composite Beam (SCCFB)*

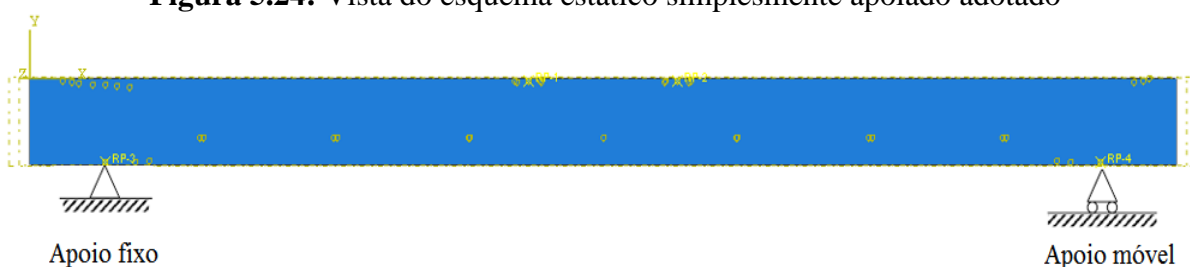


Fonte: Autora, 2020

5.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTO

Na primeira fase do trabalho, as condições de contorno e carregamento foram baseadas nos testes experimentais usados na calibração dos modelos. Em todos os trabalhos a condição de contorno foi de viga biapoiada, assim, tratando-se de uma análise tridimensional, em um dos lados foi impedida a translação em todas as direções (x, y e z) e no outro apenas a translação em x estava livre, como mostrado na Figura 5.24. As características de aplicação do carregamento na fase de calibração variaram para cada tipologia, como mostrado no Capítulo 4, sendo realizadas de maneira incremental sobre a viga e com aplicação de controle força.

Figura 5.24: Vista do esquema estático simplesmente apoiado adotado

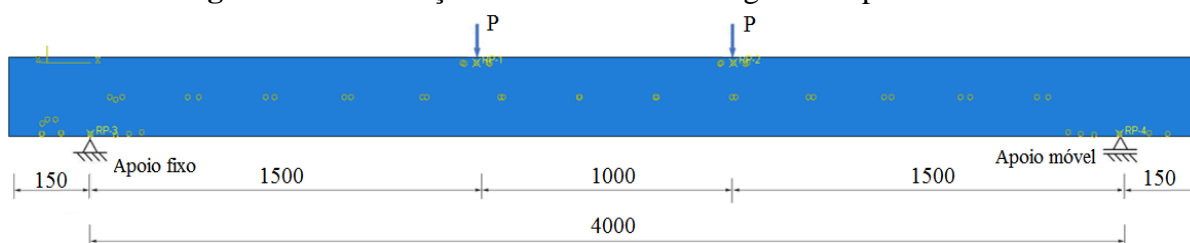


Fonte: Autora, 2020

A fim de evitar efeitos de degradação do material devido a imposição de condições de contorno pontuais, utilizou-se uma ferramenta para acoplar todos os nós da região em que essa condição foi imposta, permitindo que os pontos tenham a mesma rotação e translação. O comando usado para acoplar esses pontos foi o “*Rigid body*”, usando a opção “*Tie (nodes)*”. Após a criação dessa região acoplada, adicionou-se a condição de contorno no ponto de referência, que orientou o comportamento de toda região.

Outro parâmetro uniformizado para a comparação dos modelos foi a condição de carregamento das simulações. Foi aplicado controle de deslocamento, de maneira incremental em dois pontos de aplicação, como no ensaio de flexão de quatro pontos, pois desse modo, o pico de carregamento fica melhor determinado. A Figura 5.25 ilustra essa condição e as dimensões utilizadas na aplicação do carregamento.

Figura 5.25: Condições de contorno e carregamento padronizadas



Fonte: Autora, 2020

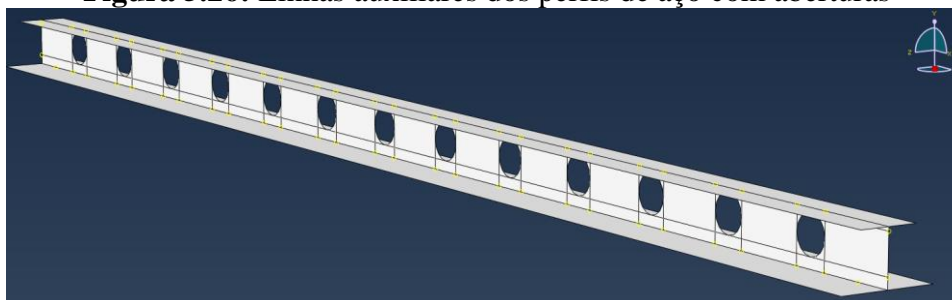
A escolha das medidas foi baseada no levantamento teórico feito, analisando trabalhos experimentais realizados para o piso misto de pequena altura, já que não existem normas para auxiliar o ensaio desse tipo estrutural. Observou-se que em ensaios de flexão de quatro pontos, como em Chen, Limazie e Tan (2015), Huo e D’Mello (2017) e Sheehan et al. (2018), a relação entre a distância entre os dois pontos de aplicação de carga e o comprimento total entre apoios variou de 0,18 a 0,25. Dessa forma, empregou-se a relação de 0,25 (1000/4000) para as análises realizadas na fase de padronização.

5.6 MALHA

O refinamento da malha é um fator de suma importância nos resultados da simulação e espera-se que quanto mais refinada a malha, mais a resposta se aproxime do modelo real. Por outro lado, esse refinamento provoca um custo computacional cada vez maior e, a partir de certa dimensão da malha, o ganho na resposta passa a ser pequeno quando comparado ao consumo de memória e tempo de processamento. Por esse motivo, a escolha da malha deve ser bastante minuciosa, de modo a verificar até que ponto o refinamento justifica o ganho de precisão nos resultados.

Assim, tanto para a fase de calibração quanto de padronização, nas lajes de concreto, em que foi utilizado o elemento finito de sólido, buscou-se criar uma malha regularizada, com as três dimensões medindo 50 *mm*. Para os perfis de aço, que utilizaram o elemento finito de casca, a malha foi discretizada de forma que os elementos se assemelhem a quadrados, com dimensão de 35 *mm*. As armaduras, compostas pelo elemento finito de viga, tiveram malha de 10 *mm*.

No processo de criação da malha, além do refinamento, é interessante também garantir a regularização dos elementos, isto é, que tenham dimensões aproximadamente iguais. Nesse trabalho, cada componente estrutural foi discretizado separadamente, entretanto buscou-se coincidir os nós de cada um na interface entre eles, possibilitando um melhor acoplamento. O efeito das aberturas foi minimizado com a criação de linhas auxiliares, como mostrado na Figura 5.26. Dessa maneira, os elementos ficam uniformizados e, aqueles nas proximidades das aberturas, ficam mais discretizados.

Figura 5.26: Linhas auxiliares dos perfis de aço com aberturas

Fonte: Autora, 2020

Após o refinamento e a regularização adequada da malha, foi realizada a etapa de processamento. Como as geometrias utilizadas na calibração e na padronização foram diferentes para todas as tipologias, a quantidade de elementos em cada componente da estrutura também variou nas duas fases, como mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Quantidade de elementos finitos por componentes

Tipologia	Componentes	Número de elementos	
		Calibração	Padronização
ASB	Perfil de aço	6467	2356
	Laje de concreto	30052	12642
	Armadura	10403	2904
<i>Deltabeam</i> ®	Perfil de aço	7317	4090
	Laje de concreto	8502	14208
	Armadura	10138	3409
CoSFB	Perfil de aço	7037	4459
	Laje de concreto	54960	15388
	Armadura	20824	4848
SCCFB	Perfil de aço	2103	2415
	Laje de concreto	10531	14020
	Armadura	5400	3400

Fonte: Autora, 2020

A quantidade de elementos da fase de calibração se mostrou aleatória, devido às diferenças relativas as condições de ensaios de cada tipologia. Entretanto, considerando a fase de padronização e que o tamanho da malha foi o mesmo em todas as análises, nota-se que as características particulares de cada tipologia são definidoras da quantidade de elementos, sendo a CoSFB aquela com maior número, seguida da *Deltabeam*®, SCCFB e ASB, que é a tipologia mais simples. O número de elementos vai influenciar em outros parâmetros do processamento, como taxa de convergência e tempo necessário até o final da simulação.

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como observado neste capítulo, a simulação numérica foi realizada em duas fases: a calibração e a padronização. Existiram propriedades que foram comuns aos dois procedimentos, como a definição dos elementos finitos, das relações constitutivas, das ferramentas usadas para representar o contato entre os componentes e do tamanho da malha. Entretanto, a geometria, propriedades dos materiais e condições de carregamento foram distintas em cada fase. Notou-se também que, para concretizar a simulação numérica, fez-se necessário adotar simplificações, que contribuiriam para um menor custo computacional, sem comprometer a precisão dos resultados.

Assim, após a definição dos parâmetros descritos neste capítulo, foi desenvolvida a etapa de processamento e pós-processamento. Foram obtidas informações relevantes para a análise dos resultados, que serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações numéricas, divididos em três tópicos. O primeiro deles diz respeito aos resultados encontrados na calibração dos modelos. Posteriormente, é apresentada a análise comparativa do comportamento à flexão das quatro tipologias de *slim floor* estudadas, de acordo com os resultados numéricos da padronização. No terceiro tópico é realizado um estudo paramétrico, mostrando como a resistência característica do concreto (f_{ck}), a altura da capa de concreto (h_c), a resistência do perfil de aço (f_y) e a espessura da mesa inferior do perfil (t_b) podem influenciar no comportamento à flexão de cada tipologia analisada.

6.1 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

A calibração dos modelos foi fundamentada nos estudos experimentais discutidos no Capítulo 4. Como foi visto, para a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), o trabalho utilizado foi o de Lawson, Mullet e Rackham (1997) e, para a *Deltabeam*®, o de Peltonen et al. (2016). A calibração da *Composite Slim Floor Beam* (CoSFB) foi baseada no trabalho de Hechler et al. (2016) e o da *Shallow Cellular Composite Beam* (SCCFB) no de Chen, Limazie e Tan (2015).

Nessa fase, foram feitas simulações para cada uma das tipologias trabalhadas, até que fossem obtidos os modelos numéricos que representassem satisfatoriamente o comportamento experimental. Assim, foi necessário adicionar no ABAQUS as propriedades fornecidas em cada estudo experimental e variar parâmetros envolvidos na modelagem que ajudaram a definir o comportamento da estrutura. Dentre eles, foram variados os parâmetros de plasticidade do CDP, aspectos da interação de contato, como o coeficiente de atrito, e foi refinada a malha dos componentes da estrutura.

O processo de calibração foi feito a partir da comparação das curvas força x deslocamento no meio do vão (flecha) dos estudos experimentais com os numéricos desenvolvidos no presente trabalho, até que elas apresentassem comportamentos e valores semelhantes. Para a realização desse procedimento, foi executado um estudo de cada parâmetro separadamente, analisando sua influência no comportamento da estrutura, para que, posteriormente, fosse feita a variação combinada dos parâmetros. Foram realizadas análises preliminares, fixando parâmetros que não exerciam influência significativa e variando aqueles que ajudavam a definir melhor o modelo, até que o resultado fosse compatível com o experimental. A Tabela 6.1 apresenta o

resumo dos parâmetros mais sensíveis na variação, mostrando quais foram utilizados no modelo final de cada tipologia.

Tabela 6.1: Parâmetros variados para a calibração

	Parâmetro	Modelo Base	Modelo Final		
Malha	Concreto	70 mm	50 mm		
	Perfil de aço	50 mm	35 mm		
	Armaduras	10 mm	10 mm		
CDP	ψ	38°	36°		
	f_{b0}/f_{c0}	1,16	1,16		
	K	0,667	0,667		
	μ	0,001	0,0001		
	ρ	0,10	ASB	0,10	
			Deltabeam®	0,06	
			CoSFB	0,06	
SCCFB			0,10		
Concreto à compressão	Comportamento	Model Code (2010)	Carreira e Chu (1985)		
	Dano	Birtel e Mark (2006)	Birtel e Mark (2006)		
Concreto à tração	Comportamento	Polak e Genikomsou (2015)	Polak e Genikomsou (2015)		
	Dano	Birtel e Mark (2006)	Pavlovic et al. (2013)		
Contato entre componentes	Coeficiente de atrito	0,50	ASB	0,40	
			Deltabeam®	0,40	
			CoSFB	0,50	
			SCCFB	0,30	

Fonte: Autora, 2020

A Tabela 6.1 explicita como foi iniciado o refinamento da malha e o seu valor final. Para chegar na malha considerada mais adequada, foram necessárias três modificações, sendo os testes iniciados com a malha de 70 mm para a laje e 50 mm para a viga. Posteriormente, os elementos da laje foram refinados para 50 mm e da viga para 35 mm, obtendo resultado satisfatório e com um custo computacional aceitável, mesmo para a CoSFB, que, por ter maiores dimensões, necessitou de mais tempo para a análise, comparativamente às demais tipologias. Em continuação, refinou-se um pouco mais a malha dos componentes, chegando a 40 mm para a laje e 25 mm para a viga, porém o custo computacional foi mais elevado, sem grandes ganhos nos resultados, optando-se por utilizar a malha anterior. A malha utilizada para as armaduras foi fixada em 10 mm.

Assim, após encontrar a malha apropriada para as simulações e inserindo no ABAQUS as propriedades dos materiais encontradas dos estudos experimentais, iniciou-se a variação dos parâmetros. Percebeu-se que aqueles retratados na Tabela 6.1 foram os mais influentes no comportamento, necessitando de maior atenção na sua variação, até encontrar o valor mais representativo.

Na fase de calibração, a simulação foi feita com incremento de carga, apresentando configurações de ensaio diferentes para cada tipologia, de acordo com os trabalhos experimentais. É possível observar na Tabela 6.2 o passo final de carga atingido por cada tipologia, o deslocamento no meio do vão no momento em que o modelo parou de convergir e o tempo necessário para o fim da simulação de cada modelo, comparados para uma mesma máquina. O processador do computador utilizado foi o Intel Core i5-2400, com memória RAM de 8 GB e 4 núcleos ativados.

Tabela 6.2: Passo de carga final

Tipologia	Incremento de carga	Passo de carga final	Deslocamento final atingido u_y (mm) – meio do vão	Tempo da simulação
ASB	4 pontos: 240 kN	0,97	- 208,3	7h 18'
<i>Deltabeam</i> [®]	1 ponto: 385 kN	1,00	- 500,0	6h 21'
CoSFB	2 pontos: 500 kN	0,96	- 167,9	14h 5'
SCCFB	2 pontos: 185 kN	1,00	- 90,4	8h 33'

Fonte: Autora, 2020

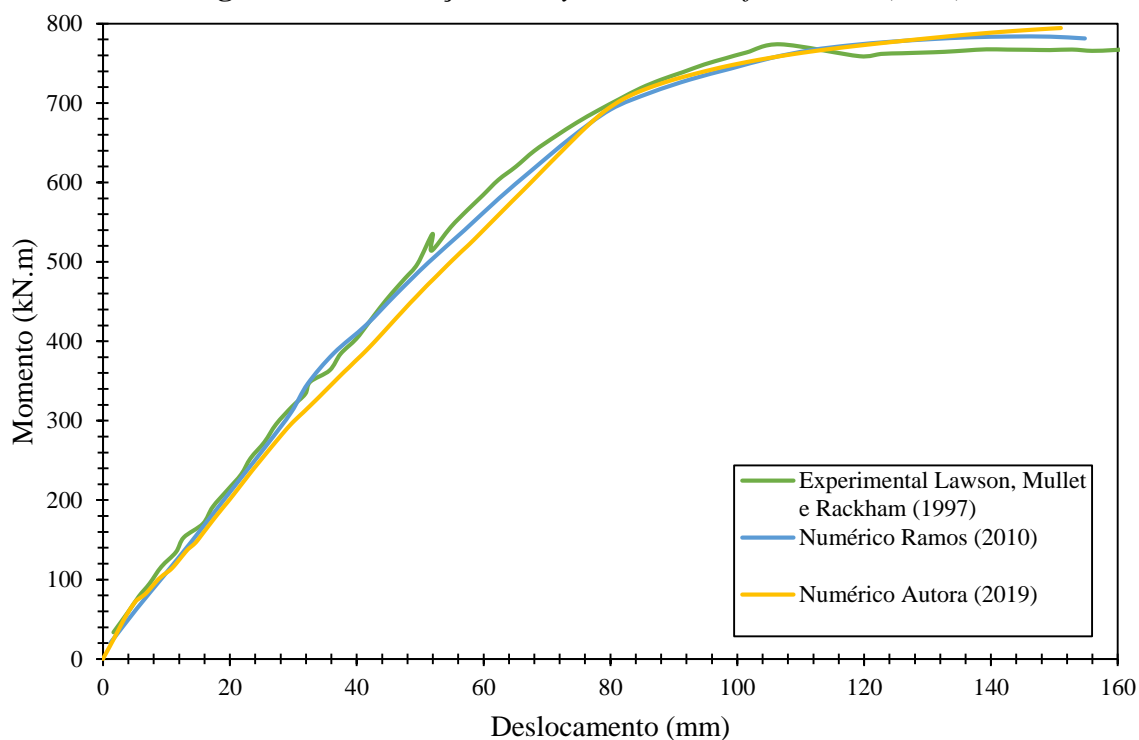
O valor dos deslocamentos atingidos são distintos, visto que as estruturas simuladas apresentam geometria, propriedades dos materiais e condições de carregamento completamente diferentes, seguindo o modelo estabelecido por cada estudo experimental. O tempo de simulação também apresentou grande divergência para cada tipologias, devido às características particulares de cada uma, somada às diferentes não-linearidades encontradas em cada modelo. Assim, o modelo da CoSFB foi aquele com maior tempo de processamento, seguida da SCCFB, ASB e *Deltabeam*[®].

Após a definição de todos os parâmetros, foram realizadas as simulações, obtendo os gráficos das calibrações de cada tipologia. É importante atentar-se que, para a calibração da *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB), foi empregado o gráfico momento x deslocamento, ambos no meio do vão, enquanto que para as demais tipologias foi utilizado o gráfico força x deslocamento no meio do vão. Além disso, por possuírem dimensões geométricas e condições de ensaio diversas, as escalas dos gráficos são diferentes.

Nota-se também que existem três curvas nos gráficos apresentados. Isso porque, para as quatro tipologias, além dos resultados numéricos obtidos nesse trabalho e dos experimentais, é mostrada a curva numérica encontrada por outros autores que desenvolveram simulações para as mesmas estruturas ensaiadas experimentalmente. Esses resultados são ilustrados para confirmar a coerência da calibração.

Para a comparação quantitativa entre as curvas numéricas e experimentais foi utilizado o cálculo do erro relativo à força máxima aplicada, sendo definido como a relação entre a diferença da força máxima aplicada experimental e numérica e a força máxima aplicada experimental $((F_{exp} - F_{num})/F_{exp})$. Na Figura 6.1 é apresentado o gráfico da calibração da ASB.

Figura 6.1: Calibração da *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB)



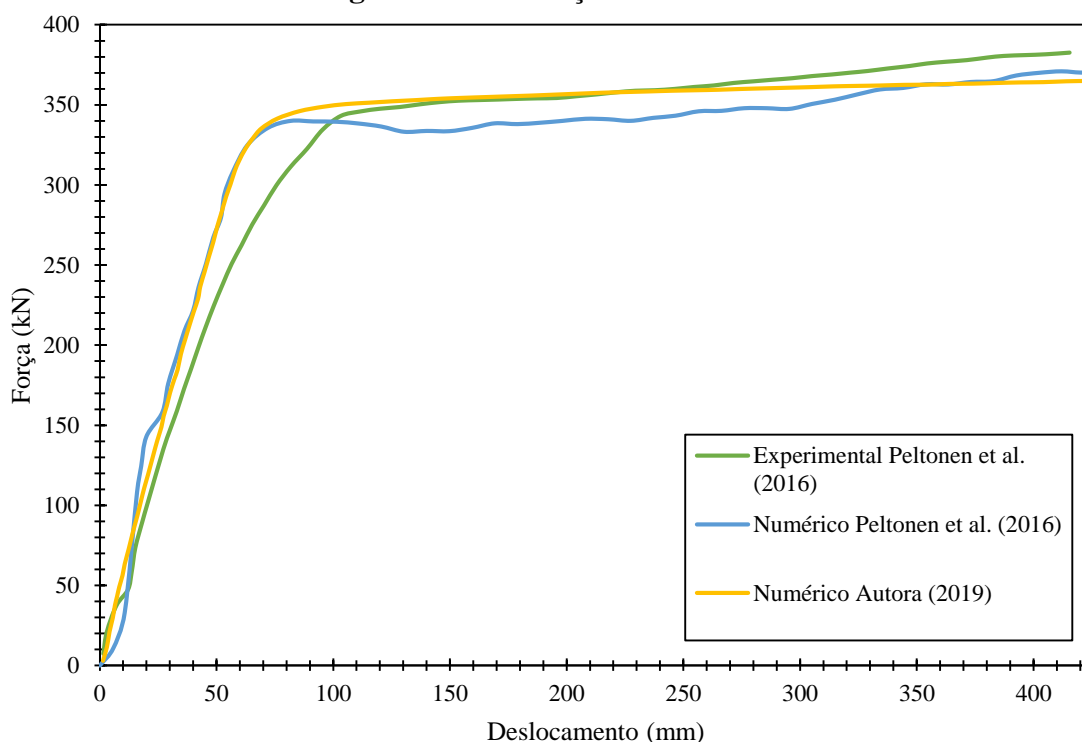
Fonte: Autora, 2020

A calibração da ASB mostrou que o modelo numérico desenvolvido no presente trabalho apresentou resultados compatíveis com o experimental, com erro relativo à força máxima de apenas 5,4%. Na fase linear, as curvas numérica e experimental ficaram quase sobrepostas, estando também de acordo com a análise numérica desenvolvida por Ramos (2010), como mostrado na Figura 6.1. Mesmo com grande quantidade de elementos, a simulação da ASB teve boa velocidade de convergência, pois, dentre as tipologias, é aquela que apresenta menos não-linearidades de contato, devido à ausência de aberturas.

Os modos de falha também foram comparados, a fim de comprovar que o comportamento desenvolvido pelo modelo numérico está de acordo com o experimental. Assim, observou-se que em ambos os estudos, a falha ocorreu quando o momento no meio do vão atingiu aproximadamente 790 kN.m, com o esmagamento do concreto, apresentando fissuras longitudinais no topo da laje, na região sobre a mesa do perfil de aço.

A Figura 6.2 traz os resultados obtidos para a calibração da *Deltabeam*®. Nessa tipologia, foi necessário um maior número de modificações dos parâmetros, executando mais simulações para se chegar em um resultado considerado adequado para a validação do modelo. Isso ocorreu devido ao fato da *Deltabeam*® ser muito influenciada pelas propriedades do concreto, sendo mais sensível aos parâmetros que definem a não-linearidade física desse material.

Figura 6.2: Calibração da *Deltabeam*®



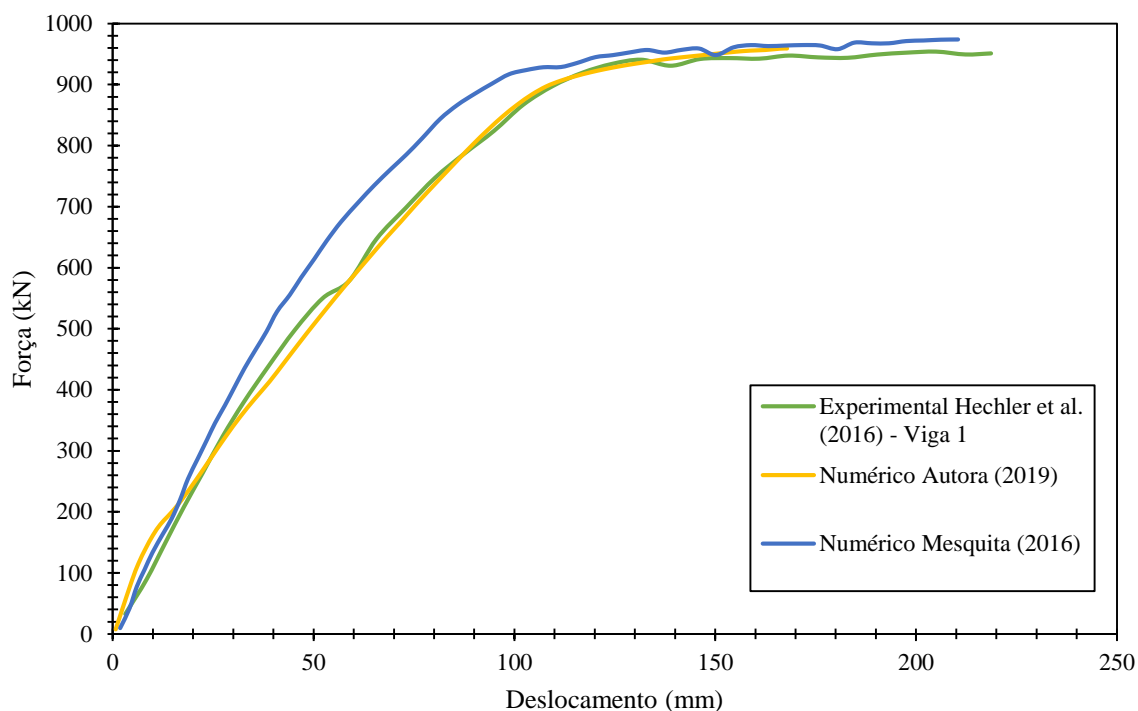
Fonte: Autora, 2020

O erro encontrado entre a força máxima do estudo experimental e do numérico foi de apenas 4,6%. Entretanto, é possível notar uma pequena diferença na rigidez da estrutura quando comparada ao experimental. Quando comparada ao resultado numérico desenvolvido pelo próprio autor (PELTONEN et al., 2016), notou-se que os resultados foram muito semelhantes. A simulação apresentou rápida convergência, devido à menor quantidade de elementos.

O modo de falha observado no estudo numérico esteve de acordo com o experimental, em que foi identificado o esmagamento do concreto. Ele foi iniciado na região próxima a aplicação da carga e, ao final do ensaio, notou-se a perda de pequena parte da cobertura de concreto. Fissuras verticais de tração na parte inferior da laje também foram evidenciadas nos dois estudos. O trabalho experimental destaca a importância do confinamento do concreto dentro do perfil, para o retardamento do esmagamento do concreto e proteção do perfil.

A terceira tipologia calibrada foi a CoSFB e o seu resultado está retratado na Figura 6.3. Esse modelo apresentou o maior custo computacional e, ainda assim, não conseguiu atingir o deslocamento do estudo experimental. Essa característica ocorreu devido, principalmente, à complexidade geométrica do sistema, com grandes dimensões e muitas não-linearidades envolvidas. Entretanto, o resultado alcançado foi bastante satisfatório, como mostrado na Figura 6.3.

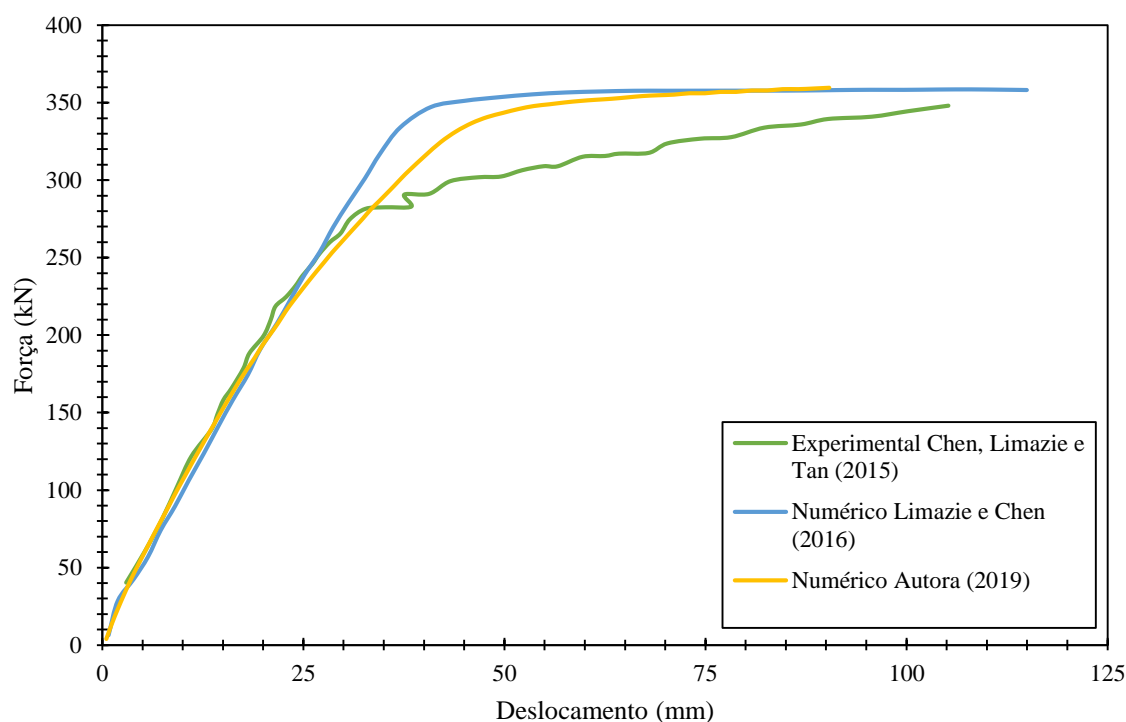
Figura 6.3: Calibração da *Composite Slim Floor Beam* (CoSFB)



Fonte: Autora, 2020

Essa tipologia foi a que apresentou menor erro em relação à força máxima aplicada, de apenas 0,2%, e comportamento bastante semelhante ao do estudo experimental. Nota-se que tanto a fase linear quanto a não-linear apresentaram excelente correlação entre os resultados experimentais e o numérico. Assim como nas demais tipologias, o modo de falha indicado no ensaio experimental foi o esmagamento do concreto, sendo identificado esse comportamento também na análise numérica, com maiores tensões perto dos pontos de aplicação da carga.

A última tipologia a ser calibrada foi a SCCFB e o resultado é mostrado na Figura 6.4. Essa tipologia também não conseguiu atingir o deslocamento imposto no estudo experimental.

Figura 6.4: Calibração da *Shallow Cellular Composite Beam* (SCCFB)

Fonte: Autora, 2020

A SCCFB foi a tipologia que mais divergiu quando comparada ao experimental, principalmente na fase não-linear do gráfico. Entretanto, os resultados da fase linear foram perfeitamente compatíveis. Apesar do erro referente à carga máxima ter sido de apenas 3,3%, percebe-se pela Figura 6.4 que o modelo experimental entrou na fase não-linear muito antes do modelo numérico. O estudo experimental relata um escoamento precoce da mesa inferior da viga, porém o ensaio não foi refeito. A inconsistência entre o resultado experimental e numérico também foi encontrada pelos próprios autores (LIMAZIE; CHEN, 2016). A curva numérica dos autores apresentou comportamento muito próximo à do presente trabalho.

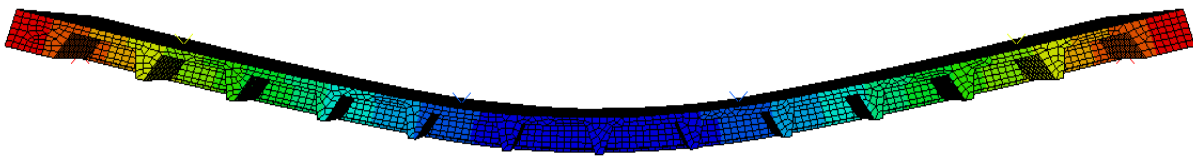
A SCCFB ensaiada falhou com esmagamento de concreto na zona de compressão. A análise numérica também evidenciou tal comportamento. No estudo experimental foram observadas fissuras na região de flexão pura, sobre os pontos de carregamento, além de fissuras verticais de tração nas proximidades da fôrma de aço incorporada.

Percebe-se que a calibração das quatro tipologias foi satisfatória e com excelente precisão. Acredita-se que o erro encontrado entre os valores das cargas máximas do modelo experimental e numérico se deve às limitações da simulação, que podem ser relativas às diferenças entre as propriedades reais e as estimadas no modelo numérico, quando não

fornecidos no ensaio de caracterização dos materiais, ou às simplificações adotadas na simulação, como não modelar a fôrma de aço da laje mista.

Para confirmar a coerência nos resultados da calibração, observou-se também a situação da estrutura deformada. As análises feitas dizem respeito aos sistemas submetidos à ensaio de flexão, desse modo, o comportamento apresentado para todas elas é o mesmo mostrado no exemplo da Figura 6.5, estando de acordo com os estudos experimentais utilizados na calibração, com os maiores deslocamentos no meio do vão. Entretanto, a escala do deslocamento é diferente para cada tipologia, devido às particularidades de cada ensaio.

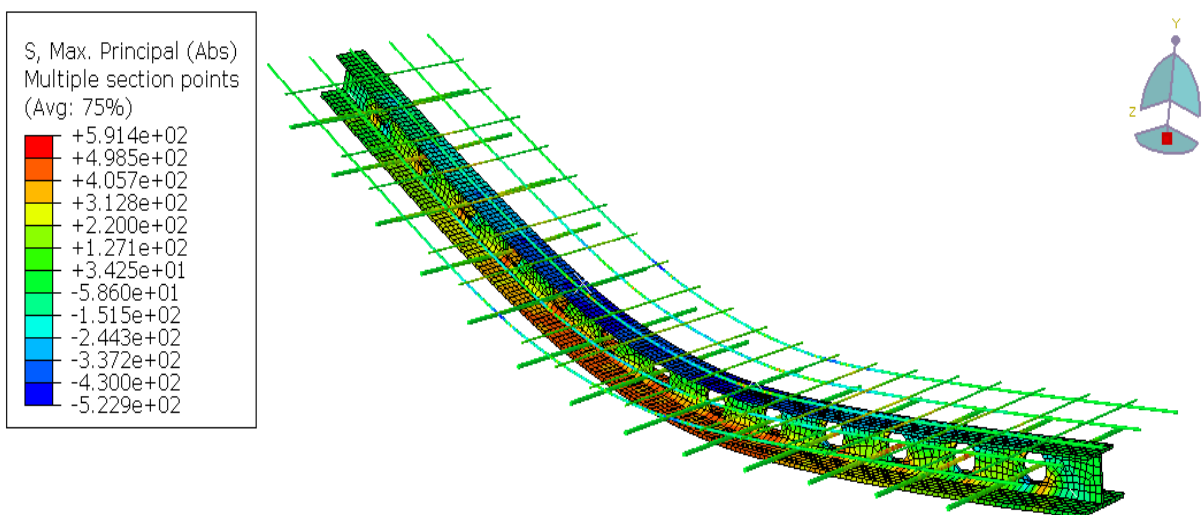
Figura 6.5: Estrutura deformada – Exemplo *Asymmetric Slimflor Beam*



Fonte: Autora, 2020

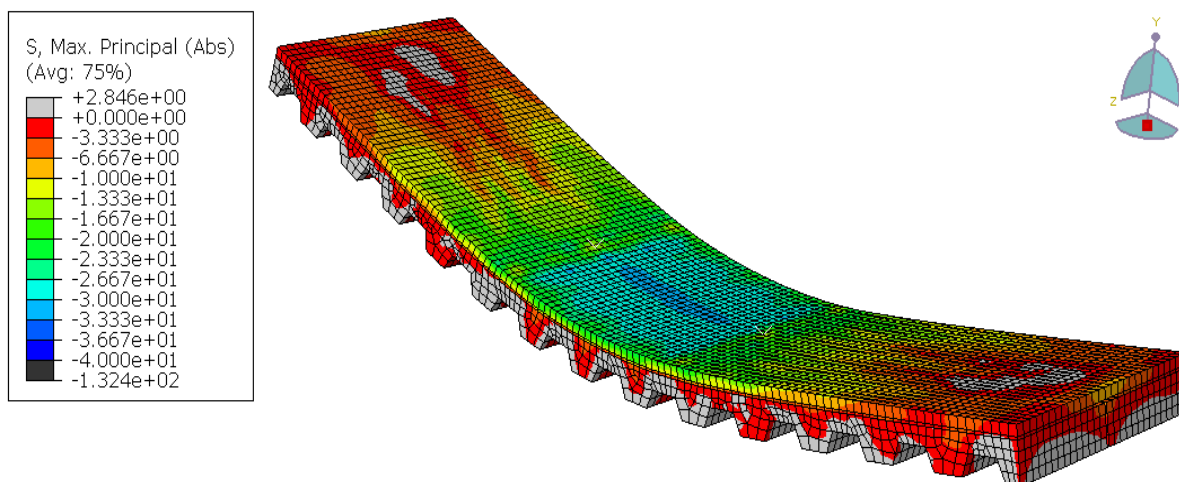
A distribuição de tensões seguiu o exemplo apresentado da SCCFB para todas as tipologias, com as maiores tensões concentradas na parte central das mesas do perfil de aço, como visto na Figura 6.6(a), ou no centro superior da laje de concreto (Figura 6.6(b)). Nas tipologias com aberturas, o concreto e as barras de aço que passam pelas aberturas se comportam como conectores de cisalhamento e impedem que haja concentração de tensões ao redor das aberturas. Ao analisar as tensões máximas na seção transversal do perfil, percebe-se que acontecem no meio do vão, e que, para todas as tipologias, plastificaram-se as mesas do perfil.

Figura 6.6: Tensões máximas (MPa) – *Shallow Cellular Composite Beam*



(a) Perfil de aço

Figura 6.6: Tensões máximas (MPa) – *Shallow Cellular Composite Beam* (Continuação)



(b) Laje de concreto

Fonte: Autora, 2020

Nota-se, a partir do exemplo e analisando as demais tipologias, que as tensões desenvolvidas na laje de concreto atingem o f_{ck} estabelecido para cada tipologia. Também aparecem tensões de tração na laje, principalmente na parte inferior, como mostrado na Figura 6.6(b), porém, a laje está majoritariamente comprimida, contribuindo para sua eficiência.

Assim, observando as Figuras 6.1 a 6.6 e as análises apresentadas nesse tópico, percebe-se que os resultados numéricos calibrados mostraram boa concordância com aqueles obtidos no estudo experimental. Pode-se concluir então que os modelos numéricos desenvolvidos são reprodutíveis, suficientemente precisos e podem ser usados para prever o comportamento a flexão das tipologias estudadas.

6.2 ESTUDO COMPARATIVO

Com o propósito de atender o objetivo geral do trabalho, de realizar um estudo comparativo das tipologias de piso misto de pequena altura, foi feita a análise numérica das quatro tipologias, selecionadas conforme revisão bibliográfica, e avaliado o comportamento à flexão de cada uma delas. Dessa forma, após a calibração dos modelos, as tipologias foram padronizadas segundo às dimensões geométricas básicas e às propriedades dos materiais, como mostrado no Capítulo 5, Figuras 5.14 a 5.19 e Tabela 5.3, visando elaborar uma comparação fundamentada e confiável.

Para a realização da comparação, foi necessário determinar um valor limite para o deslocamento. Como não existe norma regulamentadora para ensaios do *slim floor*, utilizou-se como base o Eurocode 4 (2004) para lajes mistas convencionais, que indica que a força

utilizada na análise deve ser o maior valor entre a força máxima aplicada durante o ensaio e a força correspondente à flecha $L/50$. Assim, o comportamento força x deslocamento no meio do vão foi limitado ao deslocamento máximo de 86 mm.

O Eurocode 4 (2004) foi escolhido para basear o estudo comparativo, visto que, de acordo com o dimensionamento do *slim floor*, apresentado no Capítulo 3, o limite do deslocamento para as condições de aceitação de estado limite de serviço é de $L/200$. Esse valor corresponderia a 21,5 mm, ou seja, para todas as tipologias, as vigas de aço ainda estariam no regime elástico, limitando o estudo comparativo em termos de capacidade resistente última. Entretanto, é importante ressaltar que, mesmo não sendo usado no estudo comparativo, esse é o valor que deve ser obedecido no dimensionamento do piso misto de pequena altura.

O carregamento da simulação numérica da etapa de padronização foi realizada por meio de incremento de deslocamento, a fim de captar o comportamento pós-pico das estruturas. Para isso, foi aplicado controle de deslocamento prescrito de $u_y = -80$ mm em dois pontos simétricos de maneira incremental, como detalhado no Capítulo 5, Figura 5.25. A Tabela 6.3 apresenta o valor do deslocamento máximo no meio do vão atingido no incremento final e, de maneira comparativa, os tempos necessários de simulação de cada tipologia para as mesmas condições computacionais.

Tabela 6.3: Passo de deslocamento final padronização

Tipologia	Passo de deslocamento final	Deslocamento final atingido u_y (mm) – meio do vão	Tempo da simulação
ASB	0,76	- 66,6	4h 02'
<i>Deltabeam</i> ®	0,77	- 66,7	10h 17'
CoSFB	1,00	- 86,1	8h 25'
SCCFB	1,00	- 87,1	8h 53'

Fonte: Autora, 2020

A partir da Tabela 6.3, observa-se que a *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) foi a tipologia que atingiu um patamar de comportamento mais rapidamente e parou de convergir, seguida da *Deltabeam*®. A ASB é aquela com menor capacidade resistente última, logo, antes de atingir o deslocamento aplicado de $u_y = -80$ mm, a estrutura já apresenta danos irreparáveis. Além disso, nota-se que o tempo dessa simulação foi o menor dentre as tipologias, principalmente devido à menor quantidade de não-linearidades de contato, pois não possui aberturas.

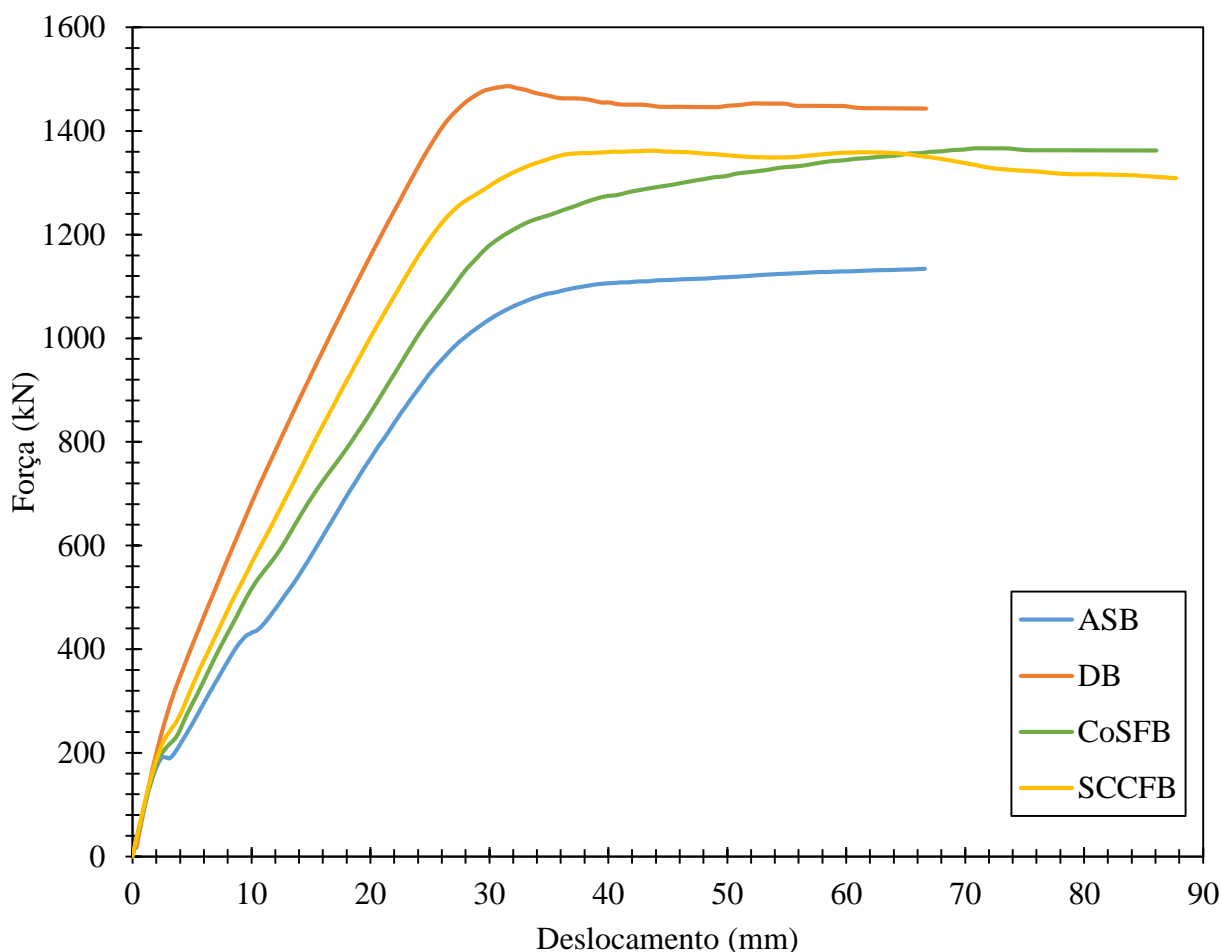
Em relação à convergência da *Deltabeam*®, suas características geométricas particulares impõem na estrutura muitas não-linearidades de contato e fazem com que ela seja muito

influenciada pelas propriedades do concreto, material de comportamento não-linear, que comanda o modo de falha da estrutura. Essas peculiaridades demandaram mais da simulação, empregando um tempo maior e, ainda assim, a convergência para atingir o deslocamento incremental prescrito não foi alcançada.

A *Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) e *Shallow Cellular Composite Beam* (SCCFB) são duas tipologias muito semelhantes, com não-linearidades físicas e de contato comparáveis. Dessa forma, além de apresentarem tempos de simulação próximos, foram as duas tipologias que convergiram até o deslocamento prescrito, mesmo apresentando-se bastante fissuradas.

Assim, as quatro tipologias padronizadas foram submetidas a uma análise de flexão, obtendo-se os gráficos força \times deslocamento no meio do vão, mostrados comparativamente na Figura 6.7. A partir desse gráfico é possível notar diferenças significativas entre os resultados do comportamento à flexão das quatro tipologias, principalmente com relação à rigidez e à capacidade resistente última.

Figura 6.7: Gráfico comparativo do comportamento à flexão das tipologias



Fonte: Autora, 2020

A partir do gráfico (Figura 6.7), percebe-se que até a carga aplicada de 200 kN, todas as tipologias apresentaram o mesmo comportamento, estando no regime elástico linear. Após esse ponto, ocorreu modificação da rigidez, característica que foi admitida devido ao início da fissuração do concreto. A partir daí, a *Deltabeam*® mostrou-se mais rígida, seguida da SCCFB, CoSFB e, por fim, a ASB.

Apesar de ser a tipologia que apresentou o menor valor para a força máxima, a ASB é aquela mais empregada quando se trata de piso misto de pequena altura, estando já consolidada na construção desse sistema. Isso ocorre devido ao fato da sua execução ser mais simples e o perfil assimétrico estar mais disponível no mercado internacional. Assim, a ASB foi utilizada como parâmetro para calcular, percentualmente, o aumento da força máxima das tipologias, sendo aplicada também como referência durante as demais comparações. A Tabela 6.4 mostra o valor da força máxima alcançada por cada sistema e o respectivo aumento percentual.

Tabela 6.4: Comparação da força máxima (F_m)

Tipologia	F_m (kN)	Aumento (%)
ASB	1134,1	-
<i>Deltabeam</i> ®	1486,6	+ 31,08
CoSFB	1380,1	+ 21,69
SCCFB	1358,3	+ 19,33

Fonte: Autora, 2020

Os resultados possibilitaram estimar que a *Deltabeam*® tem capacidade resistente 30% acima da ASB, enquanto, a CoSFB e SCCFB, tiveram valores da ordem de 20% superiores a ASB. Observa-se que essas duas tipologias apresentaram resultados muito semelhantes em termos de carga máxima, mas a CoSFB exibiu menor rigidez.

Verificou-se, ao longo do trabalho, que as quatro tipologias apresentam características geométricas bem diferenciadas e, como as propriedades dos materiais e condições de contorno e carregamento foram padronizadas, essas particularidades geométricas se mostraram definidoras da capacidade resistente e da rigidez dos pisos mistos de pequena altura. Dentre as tipologias analisadas, a ASB é a mais simples, empregando um perfil I assimétrico, com ranhuras na parte de cima da mesa superior, que contribuem para a aderência entre aço e concreto. O perfil é revestido pela laje de concreto, que fica apoiada nas mesas inferiores e, para garantir o comportamento misto, pode ser utilizado conector de cisalhamento.

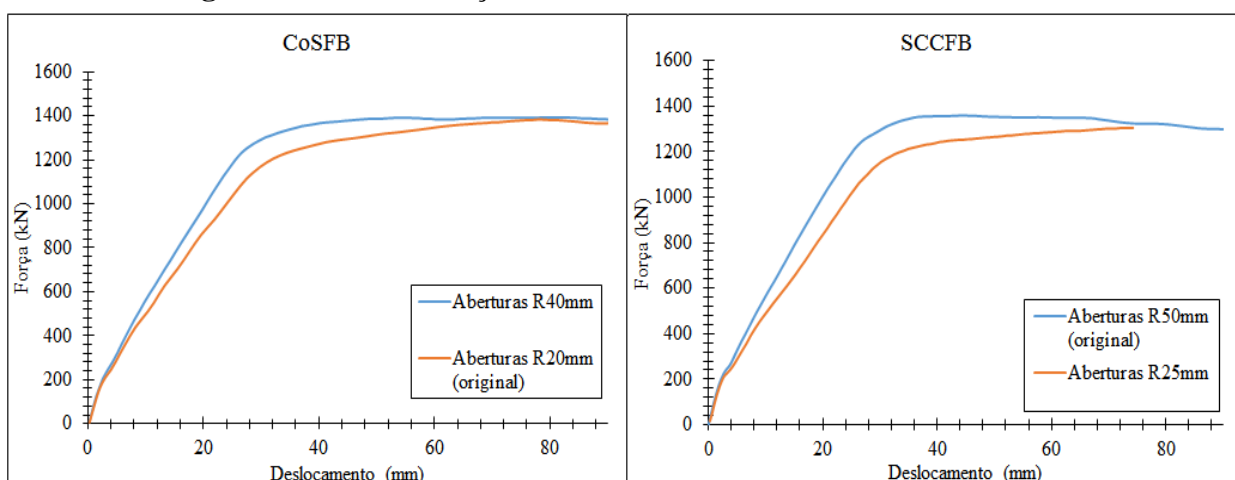
A segunda tipologia estudada, a *Deltabeam*®, é considerada a mais complexa. Apresenta características geométricas bem particulares, como o formato de Delta, que possibilita o preenchimento interno da viga com concreto, e a presença de aberturas, que permite a

passagem de barras de aço. O preenchimento interno da *Deltabeam*® faz com que a viga esteja completamente revestida pelo concreto, o que proporciona maior rigidez ao sistema, minimiza os efeitos de instabilidade do perfil e melhora a capacidade resistente à flexão, quando comparada às demais tipologias. A passagem do concreto e das barras de aço pelas aberturas, além de viabilizar o comportamento misto da estrutura, também contribui para o aumento da capacidade resistente, como comprovado durante a análise comparativa e já mostrado no estudo realizado por Sheehan et al. (2018). Percebe-se assim que seu formato de Delta, apesar de aumentar o peso próprio da estrutura, garante um melhor comportamento em situações de grandes solicitações.

As outras duas tipologias, CoSFB e SCCFB, são bastante similares, sendo compostas por um perfil I assimétrico (ASB ou SFB), com aberturas na alma. A diferença entre elas está no tamanho e na posição das aberturas, tendo a SCCFB grandes aberturas centradas na alma, enquanto a CoSFB possui pequenas aberturas no topo da alma. Percebe-se, porém, que a SCCFB é mais rígida que a CoSFB e que atinge um pico na capacidade resistente última, com pós-pico decrescente. Entretanto, a CoSFB possui um crescente aumento dessa capacidade, sendo maior que a SCCFB para o limite da análise estipulado, com patamar definido e praticamente horizontal.

Assim, a fim de justificar a diferença nos resultados encontrados entre a CoSFB e a SCCFB, foram realizadas simulações numéricas, em que foi diversificado o tamanho das aberturas dessas duas tipologias. Para isso, foi mantido o modelo original de cada uma delas, variando o raio das aberturas da CoSFB de 20 mm (original) para 40 mm e da SCCFB de 50 mm (original) para 25 mm. O resultado encontrado para esta análise pode ser visto na Figura 6.8.

Figura 6.8: Gráfico força x deslocamento - tamanho das aberturas



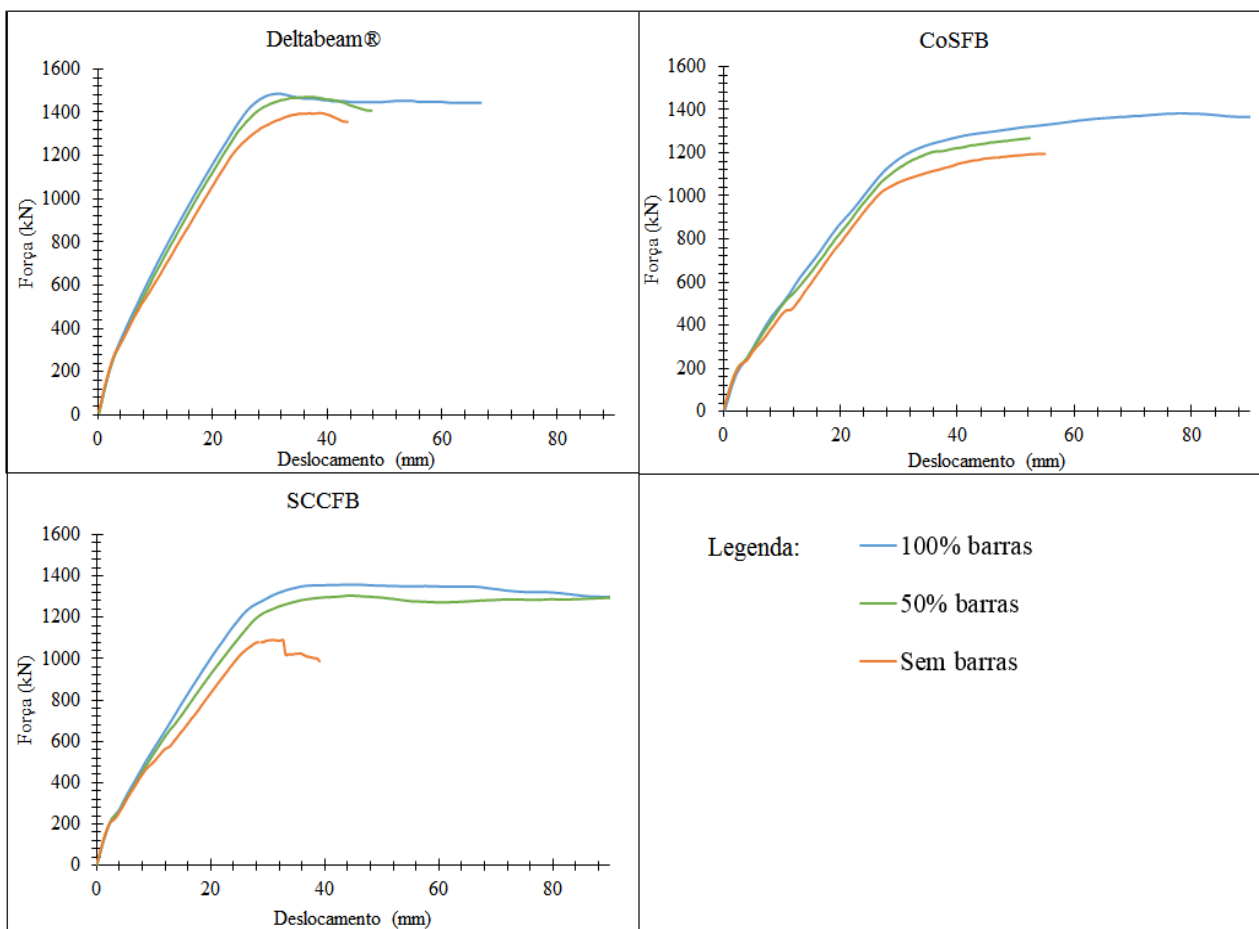
Fonte: Autora, 2020

A partir desse estudo, pode-se concluir que, quanto maior o diâmetro das aberturas, maior a rigidez e capacidade resistente inicial do sistema. Entretanto, menores aberturas mantêm o comportamento crescente da capacidade resistente, enquanto que, em sistemas com diâmetros maiores, a força aplicada começa a cair após a plastificação da viga de aço. Isso acontece, pois quanto maior o diâmetro, maior o volume de concreto no comprimento da viga, deixando o sistema mais suscetível às consequências trazidas pelo esmagamento do concreto, como a queda da capacidade resistente.

Assim, pode-se atribuir a maior rigidez e capacidade resistente inicial da SCCFB ao diâmetro das suas aberturas, que leva a um volume de concreto de $V_{SCCFB} = 0,00255 \text{ m}^3$ dentro do comprimento da viga, enquanto na CoSFB é aproximadamente metade desse valor. Além disso, devido às menores aberturas da CoSFB, a capacidade resistente dessa tipologia é menos afetada pelo esmagamento do concreto, se mantendo crescente até o limite estipulado.

Como visto no decorrer do trabalho, o comportamento misto de três tipologias analisadas, a *Deltabeam*®, CoSFB e SCCFB, é garantido pela passagem do concreto e das barras de aço pelas aberturas no perfil. Entretanto, além de funcionar como conexão de cisalhamento, essa conformação contribui também para o aumento da rigidez e capacidade resistente do sistema (SHEEHAN et al, 2018).

Assim, diante dessa observação, avaliou-se a influência dessas inovadoras conexões de cisalhamento no comportamento à flexão da *Deltabeam*®, CoSFB e SCCFB, variando a quantidade de armadura que passa pelas aberturas. Foram analisados três casos: o caso “100% barras”, que representa o sistema com barras de aço passando por todas as aberturas; o caso “50% barras”, sendo metade das aberturas atravessadas por armaduras; o caso “sem barras”, em que nenhuma barra passa pelas aberturas. Os resultados são ilustrados na Figura 6.9, através dos gráficos força \times deslocamento.

Figura 6.9: Gráfico força \times deslocamento – quantidade de barras de aço

Fonte: Autora, 2020

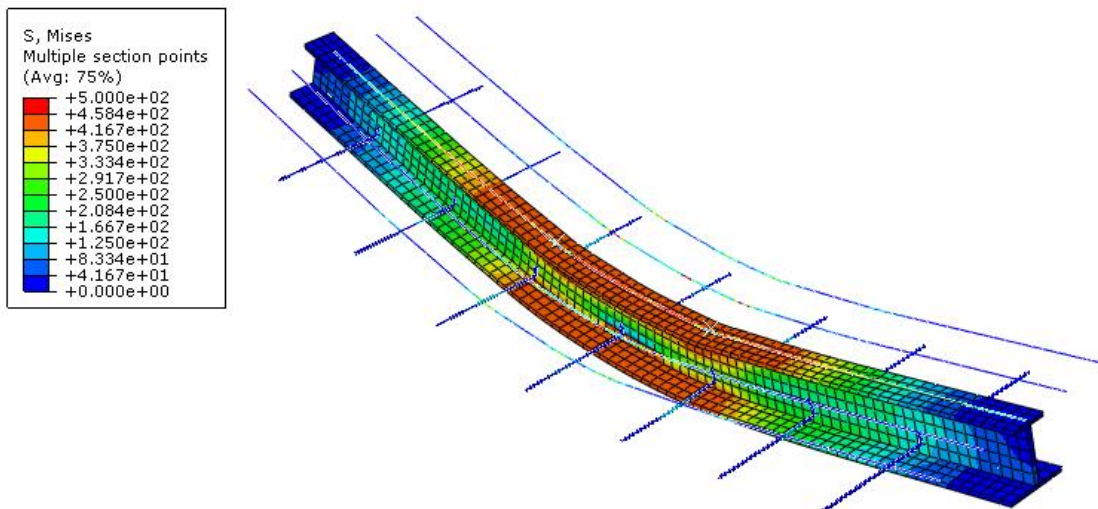
Essa análise permitiu concluir que, para as três tipologias analisadas, *Deltabeam*®, CoSFB e SCCFB, à medida que se reduz a quantidade de barras passando pelas aberturas, ocorre redução da rigidez e da capacidade resistente do sistema, como mostrado na Figura 6.9. A convergência da simulação também mostrou-se prejudicada pela redução do número de barras que passam pelas aberturas. A *Deltabeam*® foi a tipologia que revelou ser menos influenciada por essa variação, mas, ainda assim, apresentou um acréscimo de 6% da capacidade resistente última, comparando a configuração com 100% de barras de aço passando pelas aberturas e sem barras.

A CoSFB apresentou a mesma tendência de comportamento, atingindo uma redução de 15% da capacidade resistente última quando sem armaduras. Essa se mostrou a tipologia mais influenciada pela conexão de cisalhamento, quando considerada a existência de barras de aço. Entretanto, comparativamente ao sistema sem armaduras, a SCCFB foi a mais afetada, apresentando um comportamento à flexão ineficiente quando da ausência de barras de aço, indicando uma ruptura frágil. Isso se deve ao fato de, sem essas armaduras, ocorrer o

esmagamento do concreto logo nas primeiras fases de plastificação da viga, principalmente na região dentro da abertura. Fica claro por meio dessa análise, que a passagem de barras de aço pelas aberturas contribuiu para melhorar o comportamento à flexão das três tipologias.

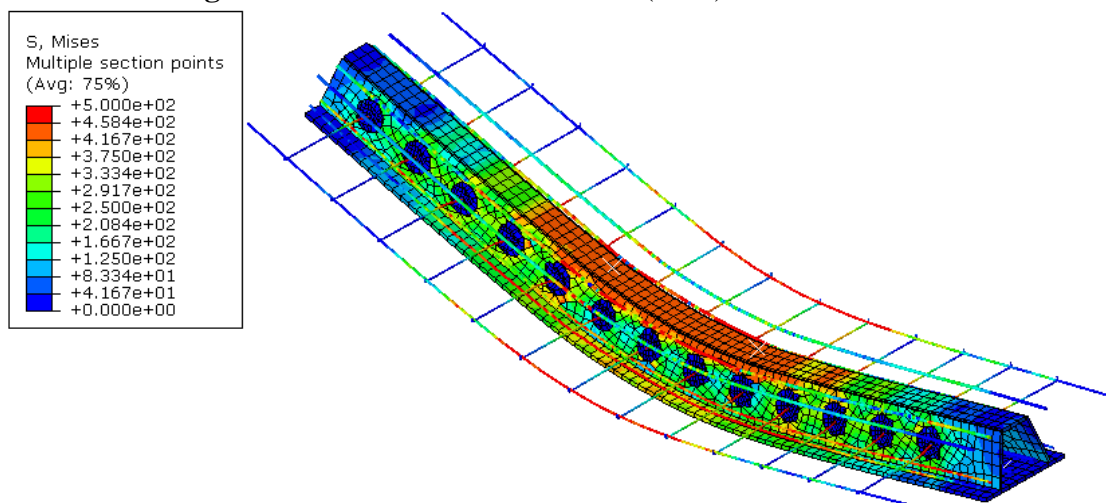
Prosseguindo com a comparação entre as tipologias, é interessante analisar as tensões nos perfis de aço, tomado como base o critério de von Mises, as tensões principais nas lajes de concreto, o padrão de fissuração e as deformações plásticas na estrutura. As escalas das Figuras mostradas nesse tópico foram uniformizadas, para que os resultados das tensões e deformações sejam visualizados de maneira semelhante. A análise gráfica dos resultados é iniciada pelas Figuras 6.10 a 6.13, que mostram a distribuição da tensão de von Mises para os quatro perfis no último passo de deslocamento atingido por cada tipologia.

Figura 6.10: Tensões de von Mises (MPa) – *Asymmetric Slimflor Beam*



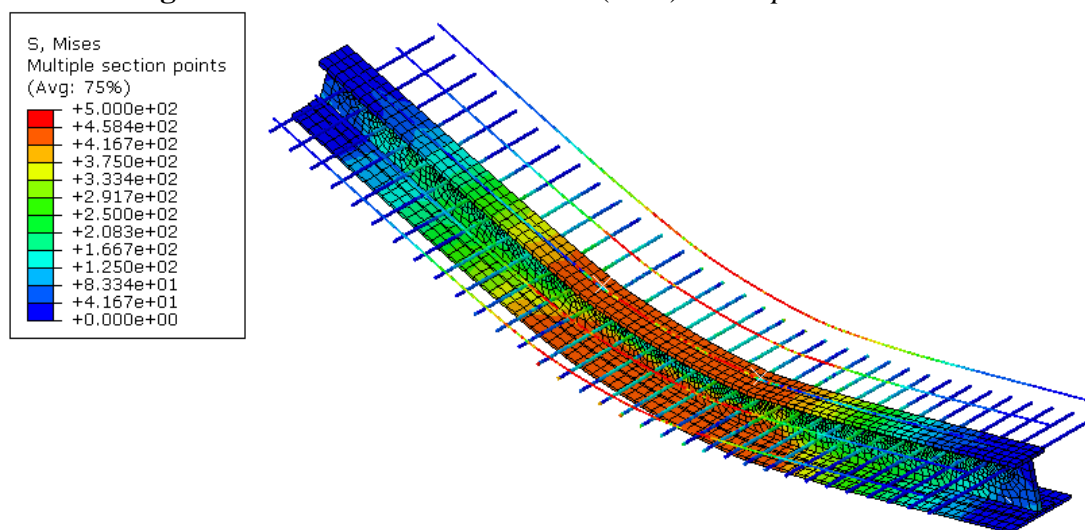
Fonte: Autora, 2020

Figura 6.11: Tensões de von Mises (MPa) – *Deltabeam®*



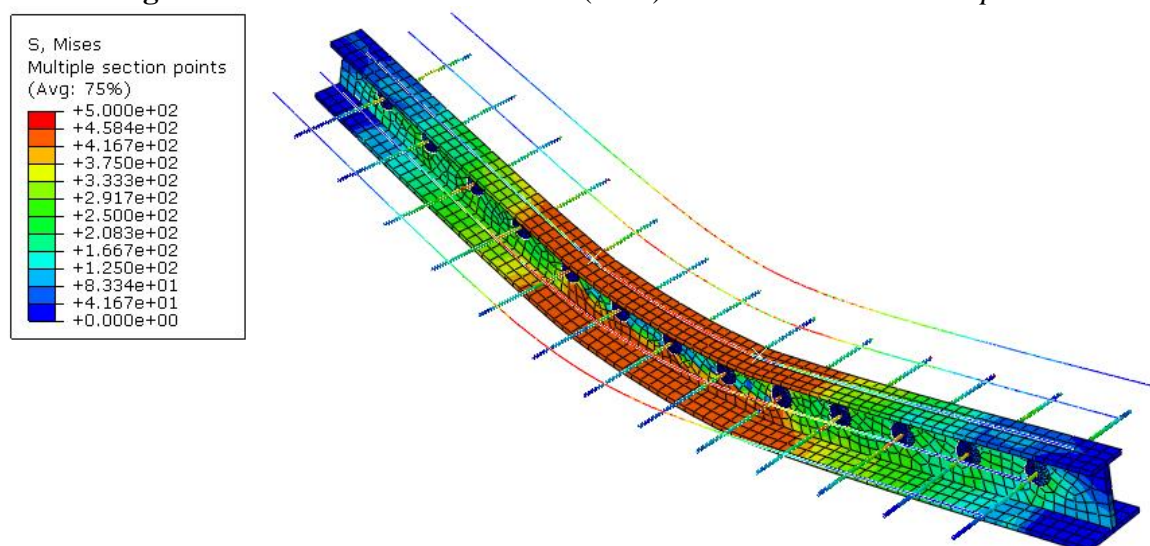
Fonte: Autora, 2020

Figura 6.12: Tensões de von Mises (MPa) – *Composite Slim Floor Beam*



Fonte: Autora, 2020

Figura 6.13: Tensões de von Mises (MPa) – *Shallow Cellular Composite Beam*



Fonte: Autora, 2020

Por meio da observação das Figuras 6.10 a 6.13, percebe-se que as três tipologias que utilizam o perfil I, assimétrico ou simétrico com chapa de aço soldada à mesa inferior, apresentaram maiores tensões na parte central das mesas do perfil. Entretanto, os perfis assimétricos, utilizados na ASB e SCCFB, foram um pouco mais solicitados na mesa superior, enquanto a CoSFB, composta pela chapa de aço soldada, distribuiu regularmente essa tensão entre as duas mesas e a chapa. A *Deltabeam*®, por sua vez, concentra maior tensão na parte central da mesa superior do perfil, e, devido ao preenchimento interno da viga com concreto e à maior quantidade de aço da mesa inferior, ela se mostrou menos solicitada.

A alma da ASB e as chapas inclinadas (almas) da *Deltabeam*® apresentam baixos valores de tensões. Entretanto, as almas da CoSFB e da SCCFB mostram relativa solicitação, diminuindo

nas proximidades das aberturas. Observa-se que, para as tipologias que possuem aberturas, não há concentração de tensões em seus entornos, visto que o concreto garantirá a rigidez necessária para que essa parte da estrutura não funcione como concentrador de tensões. Além disso, apesar de bastante solicitados, percebe-se através da escala das Figuras 6.10 a 6.13 que nenhum dos quatro perfis atinge a tensão limite última de 550 MPa , definida nas propriedades dos materiais, na Tabela 5.3.

Nas Figuras 6.10 a 6.13 podem ser observados dois tipos de armaduras: as paralelas ao perfil, e as perpendiculares ao perfil. Dessa forma, nota-se que as armaduras paralelas da *Deltabeam*®, CoSFB e SCCFB foram bastante solicitadas, atingindo a tensão de escoamento do aço na parte central. Por outro lado, na ASB, essas armaduras foram pouco solicitadas, já que a carga máxima suportada por esse sistema é menor que as demais.

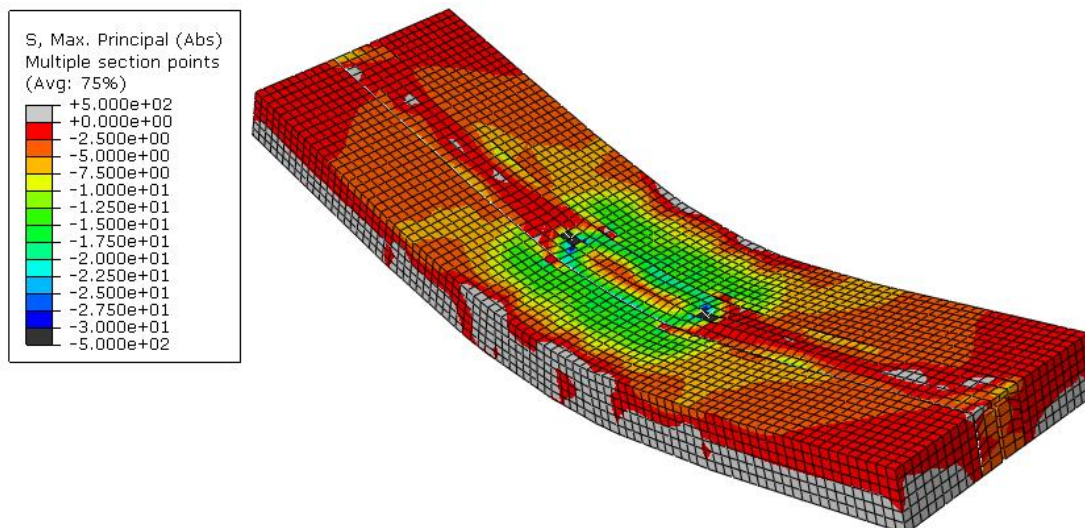
As armaduras perpendiculares apresentaram, nos perfis que possuem aberturas, tensão máxima na região que passa por essas aberturas, ou seja, no contato com o concreto confinado. Como dito anteriormente, as barras de aço influenciam no comportamento à flexão do sistema e, por isso, é importante avaliar o seu desempenho, inclusive após atingirem a tensão de escoamento do aço. Assim, analisando essas armaduras na CoSFB, percebe-se que alcançaram a tensão de escoamento em um incremento correspondente ao deslocamento no meio do vão de $84,5 \text{ mm}$. Essa foi a tipologia que apresentou o melhor desempenho das armaduras, entrando na fase de regime plástico apenas no final da análise.

Na SCCFB, as armaduras perpendiculares alcançaram a tensão de escoamento no deslocamento no meio do vão de $30,8 \text{ mm}$. Esse deslocamento é bem próximo daquele correspondente ao início do regime não-linear do sistema, mostrando que a plastificação das armaduras pode ter ajudado nesse processo. Na *Deltabeam*®, como a região do concreto confinado é maior, as armaduras perpendiculares ao perfil sofreram influência direta do início do esmagamento do concreto. Elas começaram a escoar quando a estrutura atingiu um deslocamento no meio do vão de $31,6 \text{ mm}$ e essa tensão evoluiu rapidamente. Nesse ponto, a capacidade resistente última estava decaindo, ou seja, já estava ocorrendo o esmagamento do concreto, inclusive da região das aberturas, que transferiu altas tensões para as armaduras.

As Figuras 6.14 a 6.17 apresentam as tensões principais de compressão nas lajes de concreto, sendo a escala limitada pelo f_{ck} do concreto na compressão e zero na tração. Assim, as partes em vermelho correspondem à laje com tensão em torno de zero, as partes em cinza claro às regiões da laje tracionada, em verde e azul às regiões da laje comprimida e em cinza escuro as

regiões da laje comprimida com valores maiores que o f_{ck} . A Figura 6.14 apresenta as tensões principais de compressão para a ASB para o passo final de deslocamento alcançado.

Figura 6.14: Tensões principais de compressão (MPa) – *Asymmetric Slimflor Beam*

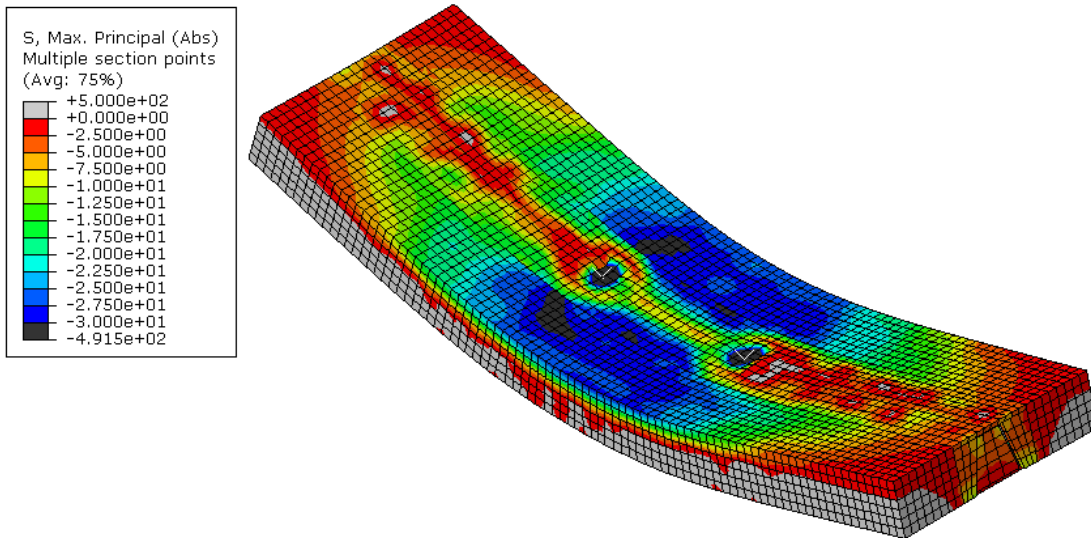


Fonte: Autora, 2020

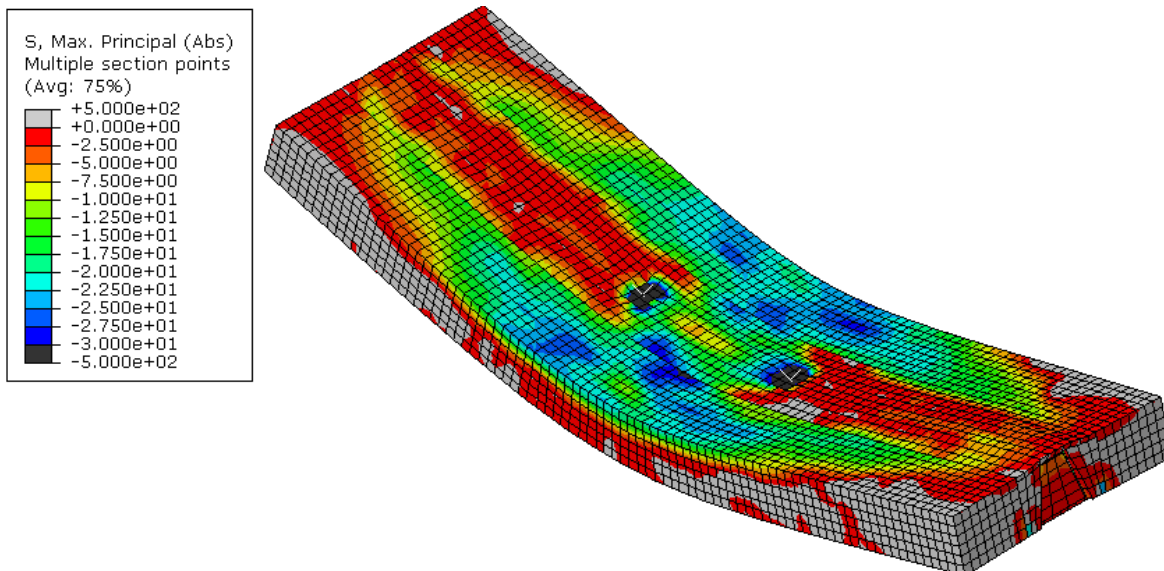
Para a ASB as maiores tensões de compressão acontecem no passo final de deslocamento, sendo a Figura 6.14 relativa à esse incremento. Nota-se que, para o deslocamento de 66,6 mm, o sistema já apresenta características de esmagamento do concreto na parte superior da laje, principalmente nas proximidades da aplicação da carga, e fissuras verticais na parte inferior da laje, relativas às tensões de tração, dificultando a convergência na simulação. Além disso, percebe-se que nas proximidades do perfil, as tensões no concreto ainda são de compressão, mostrando que a viga está exercendo corretamente seu papel de resistir às tensões de tração.

A partir da Figura 6.7, percebeu-se que a *Deltabeam*® e a SCCFB apresentaram força máxima aplicada em estágios de carregamento anteriores ao passo final. Nesse ponto, ocorreu a maior tensão de compressão e, após atingir esse valor, a capacidade resistente última começa a diminuir, devido a fatores relacionados ao esmagamento do concreto, fissuras de tração na laje e plastificação do perfil de aço, ocorrendo a redistribuição de tensões. Desse modo, para essas tipologias, são mostradas nas Figuras 6.15 e 6.17 as configurações de tensões principais do concreto para o incremento em que ocorreu a maior tensão de compressão (Figura 6.15(a)) e para o passo final de deslocamento (Figura 6.15(b)).

Figura 6.15: Tensões principais de compressão (MPa) – *Deltabeam*®



(a) Tensões no incremento relativo à força máxima



(b) Tensões no incremento final

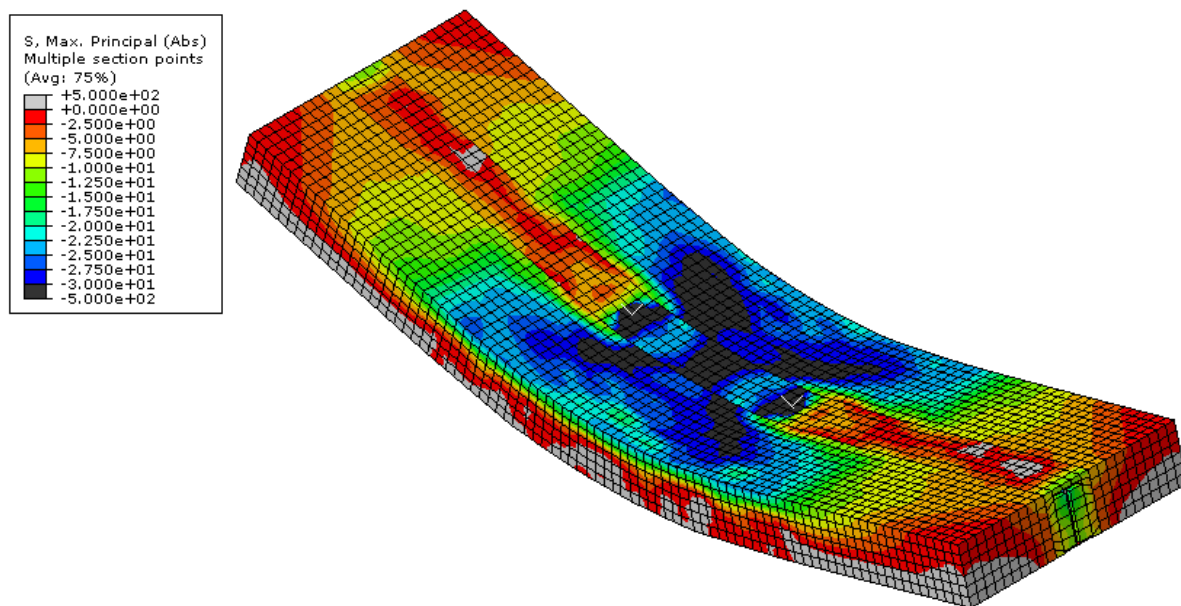
Fonte: Autora, 2020

A *Deltabeam*® apresenta maior tensão de compressão da laje nos incrementos próximos à carga máxima, atingindo valores superiores a 30 MPa, f_{ck} do concreto (Figura 6.15(a)). Nesse ponto, observa-se altas tensões de compressão na parte central da laje, indicando esmagamento do concreto. Perto do incremento final, a região tracionada evolui consideravelmente (Figura 6.15(b)), contribuindo com a queda de resistência apresentada na Figura 6.7. Nesse momento, a viga já está bastante danificada, fato que colaborou com a dificuldade de convergência da simulação dessa tipologia. Assim, percebe-se que a *Deltabeam*® trabalha bem no regime elástico da viga de aço, até alcançar sua força máxima, que é bastante elevada. Entretanto,

depois do pico de carga, a capacidade resistente começa a cair, devido ao esmagamento do concreto e, posteriormente, pela fissuração da laje causada pelas tensões de tração.

A Figura 6.16 apresenta as tensões principais de compressão da CoSFB, sendo as máximas registradas no passo final de deslocamento alcançado na simulação.

Figura 6.16: Tensões principais de compressão (MPa) – *Composite Slim Floor Beam*

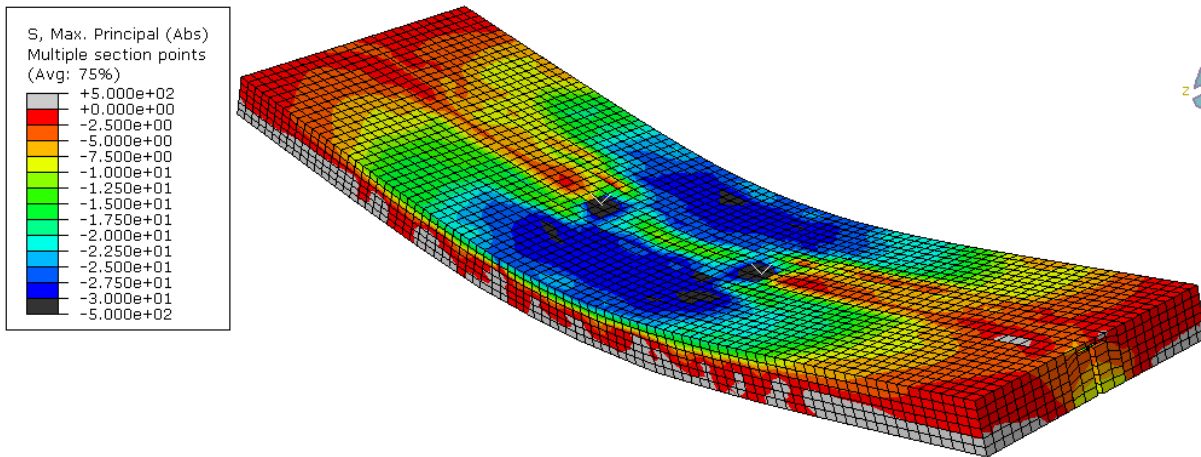


Fonte: Autora, 2020

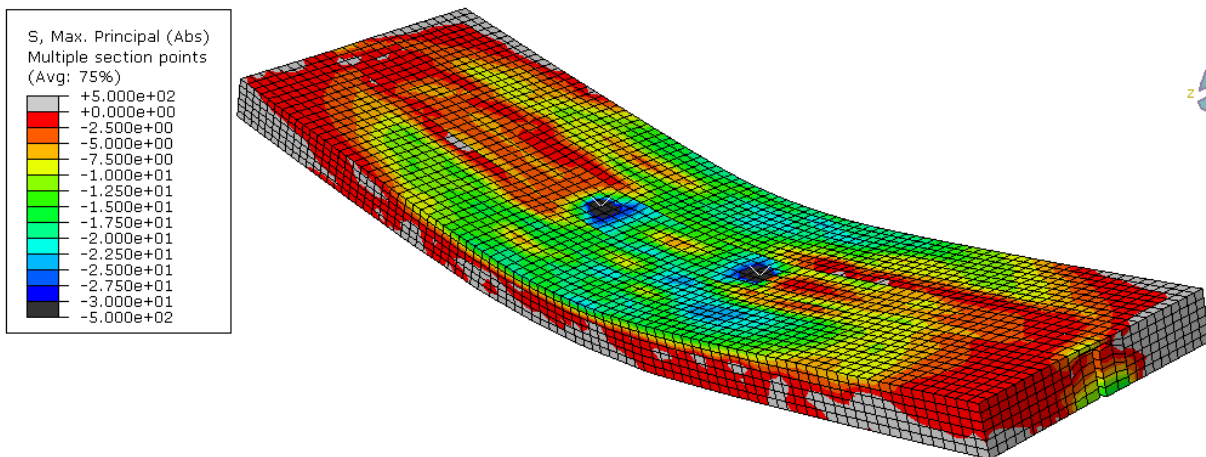
A CoSFB foi a tipologia que apresentou as maiores tensões principais de compressão, ultrapassando consideravelmente a resistência característica do concreto (f_{ck}). Esse ponto de maior compressão coincidiu com o incremento final de deslocamento, equivalente ao deslocamento no meio do vão de 83,6 mm. Assim, pode-se considerar que o modo de falha do sistema se dá por compressão, com o esmagamento do concreto. A CoSFB é a tipologia que apresenta menor área do concreto tracionado ao final da análise, o que é bastante benéfico para o sistema. Nesse incremento, a mesa superior do perfil está submetida à compressão, e a mesa inferior, mesmo já iniciado o escoamento, não atingiu a tensão limite última. Por isso, percebe-se que essa tipologia exibe bom comportamento, mesmo quando a viga entra no regime plástico, e a perda de capacidade resistente à flexão acontece em um estágio já bastante avançado de deslocamento.

Assim como a *Deltabeam*®, a SCCFB apresentou maior tensão de compressão em um incremento anterior ao final. A Figura 6.17 mostra as duas configurações de tensões principais do concreto, no incremento em que ocorreu a maior tensão de compressão (Figura 6.17(a)) e no passo final de deslocamento (Figura 6.17(b)).

Figura 6.17: Tensões principais de compressão (MPa) – *Shallow Cellular Composite Beam*



(a) Tensões no incremento relativo à força máxima

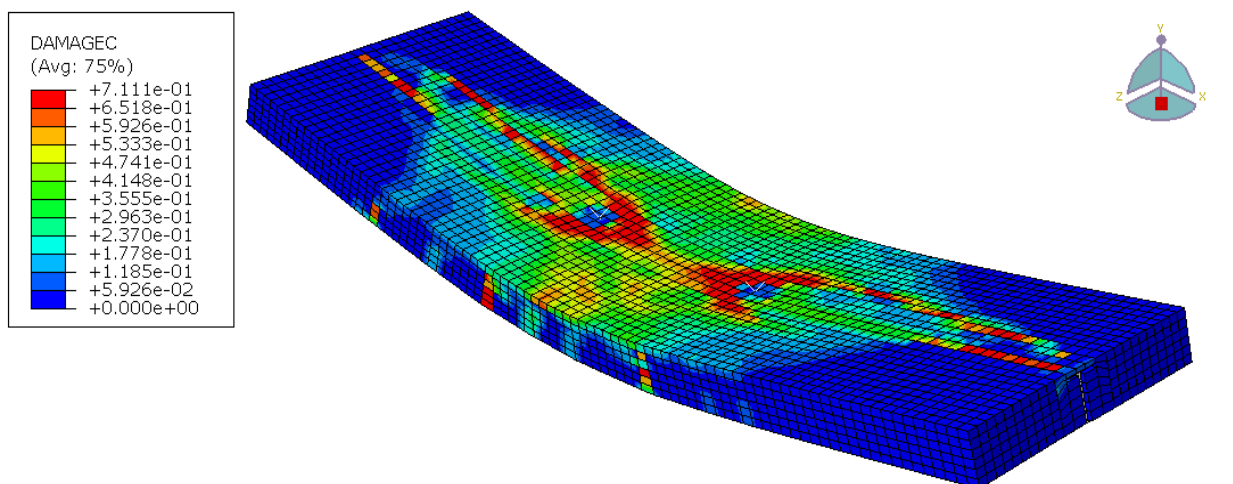


(b) Tensões no incremento final

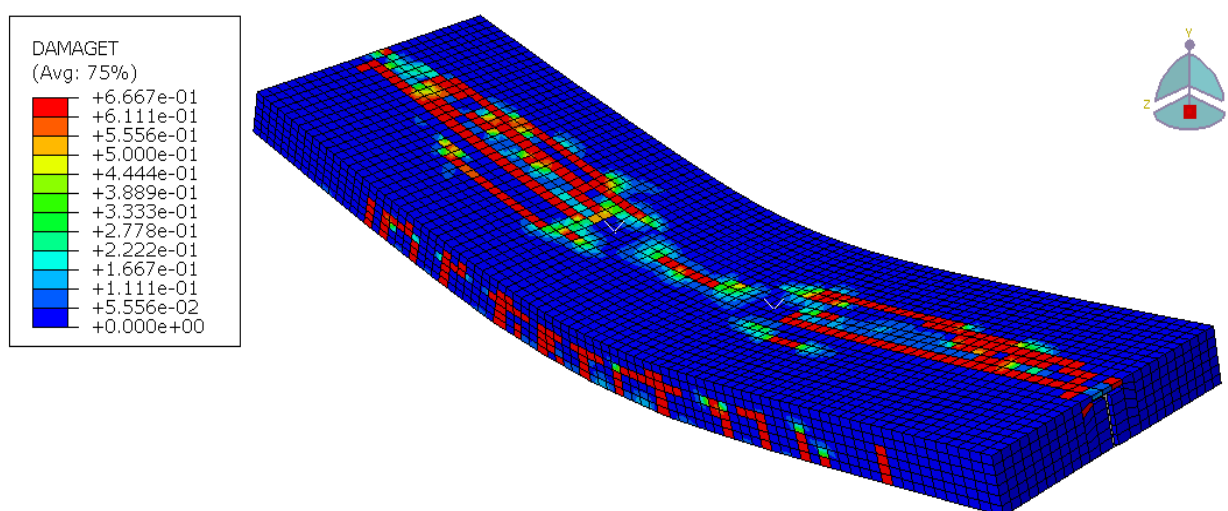
Fonte: Autora, 2020

A SCCFB apresenta maiores tensões principais de compressão no instante que atinge a carga máxima. Nesse incremento, ocorre o esmagamento do concreto na parte superior da laje, estando a parte inferior submetida à tração (Figura 6.17(a)). Depois desse passo de deslocamento, o sistema perde capacidade resistente e observa-se que a tensão de compressão diminui e a de tração aumenta, ficando boa parte da laje submetida à tração (Figura 6.17(b)).

A partir das Figuras 6.10 a 6.17, percebe-se que as quatro tipologias exibem um padrão semelhante de tensões e conseqüentemente, fissuração. Para confirmar esse comportamento, é apresentada a Figura 6.18, que mostra o padrão de fissurações de compressão (Figura 6.18(a)) e de tração (Figura 6.18(b)) para as lajes de concreto. Vale ressaltar que a Figura traz o exemplo da SCCFB, que apresenta o mesmo padrão para as demais tipologias, mas a escala varia para cada uma delas.

Figura 6.18: Padrão de fissuração

(a) Fissuras de compressão



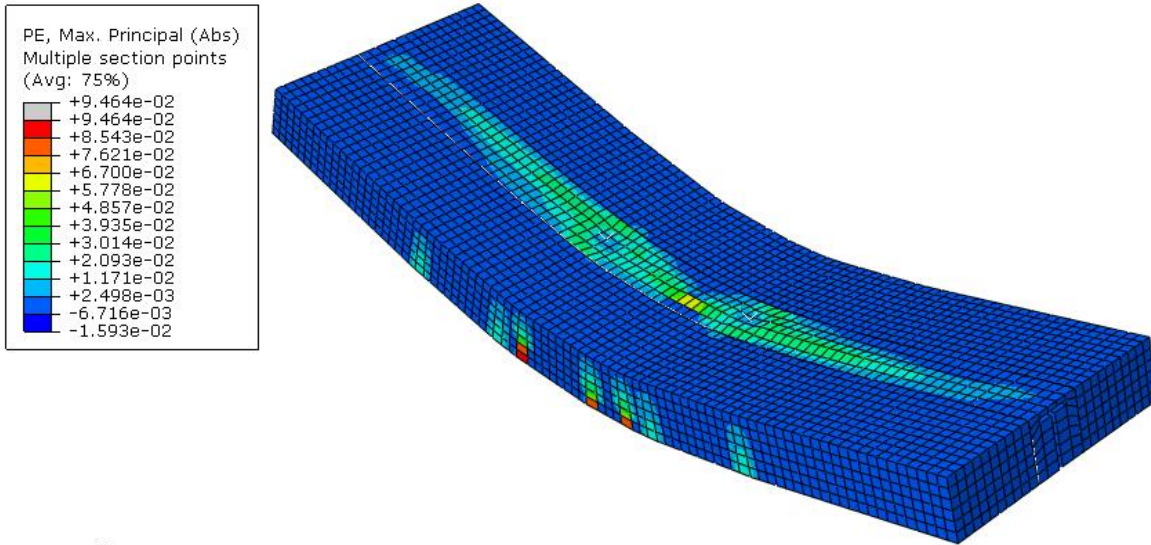
(b) Fissuras de tração

Fonte: Autora, 2020

Para todas as tipologias ocorre inicialmente o esmagamento do concreto no centro superior da laje, principalmente nas proximidades dos pontos de aplicação da carga (Figura 6.18(a)) e, posteriormente, fissuras verticais de tração começam a aparecer na parte inferior da laje (Figura 6.18(b)). Os perfis entram no regime plástico, mas suportam bem às solicitações alcançadas, sem atingir a tensão limite última.

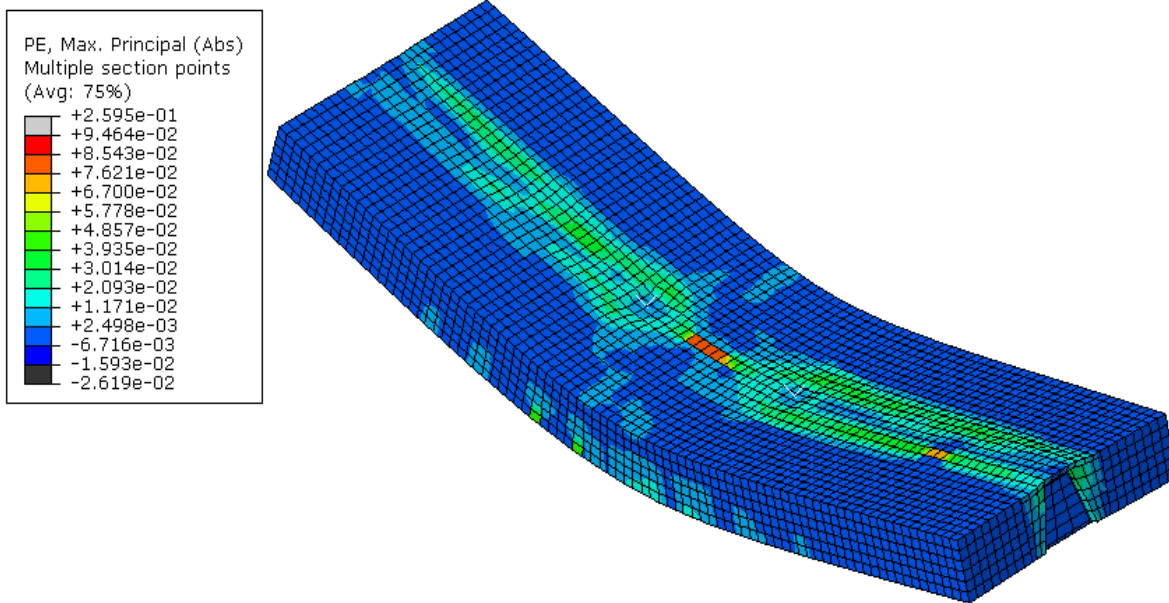
Também confirmando os comportamentos descritos até aqui, realizou-se como avaliação gráfica final, análises das deformações plásticas no passo final de deslocamento alcançado por cada tipologia, sendo mostradas nas Figuras 6.19 a 6.22. A escala foi padronizada para facilitar a comparação quantitativa das deformações.

Figura 6.19: Deformações plásticas – *Asymmetric Slimflor Beam*



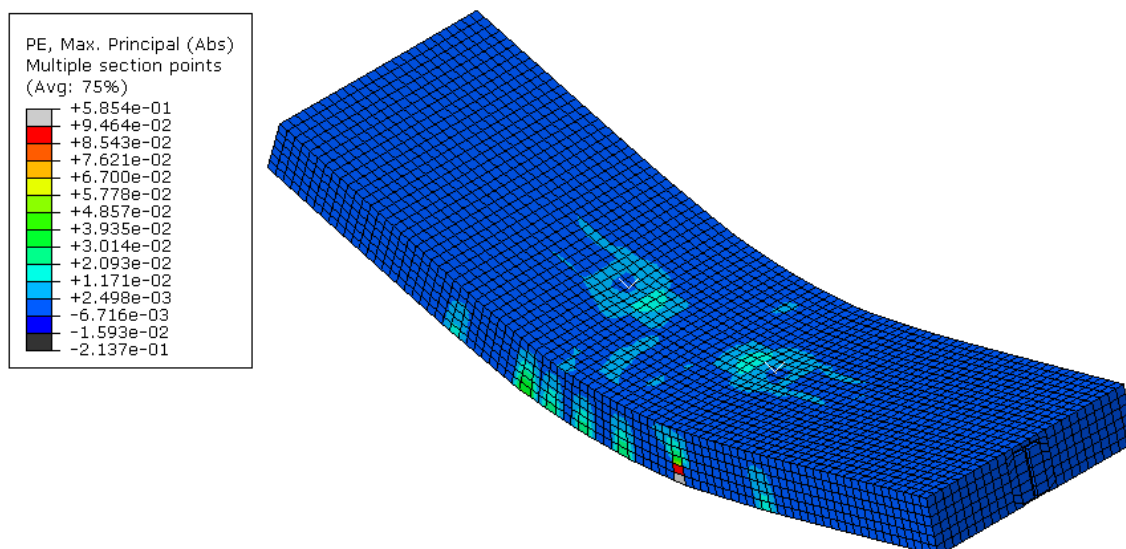
Fonte: Autora, 2020

Figura 6.20: Deformações plásticas – *Deltabeam®*



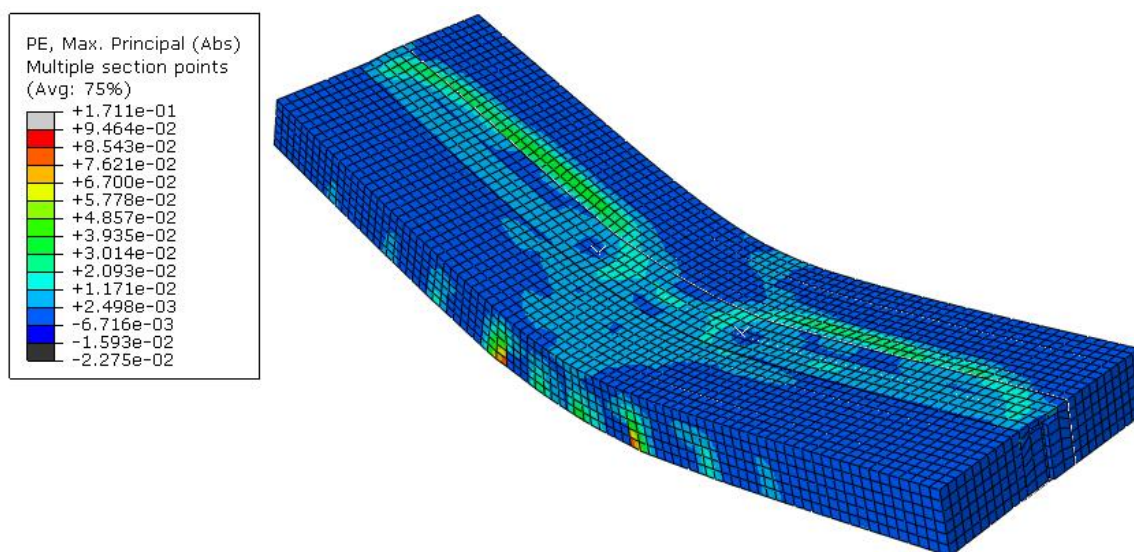
Fonte: Autora, 2020

Figura 6.21: Deformações plásticas – *Composite Slim Floor Beam*



Fonte: Autora, 2020

Figura 6.22: Deformações plásticas – *Shallow Cellular Composite Beam*



Fonte: Autora, 2020

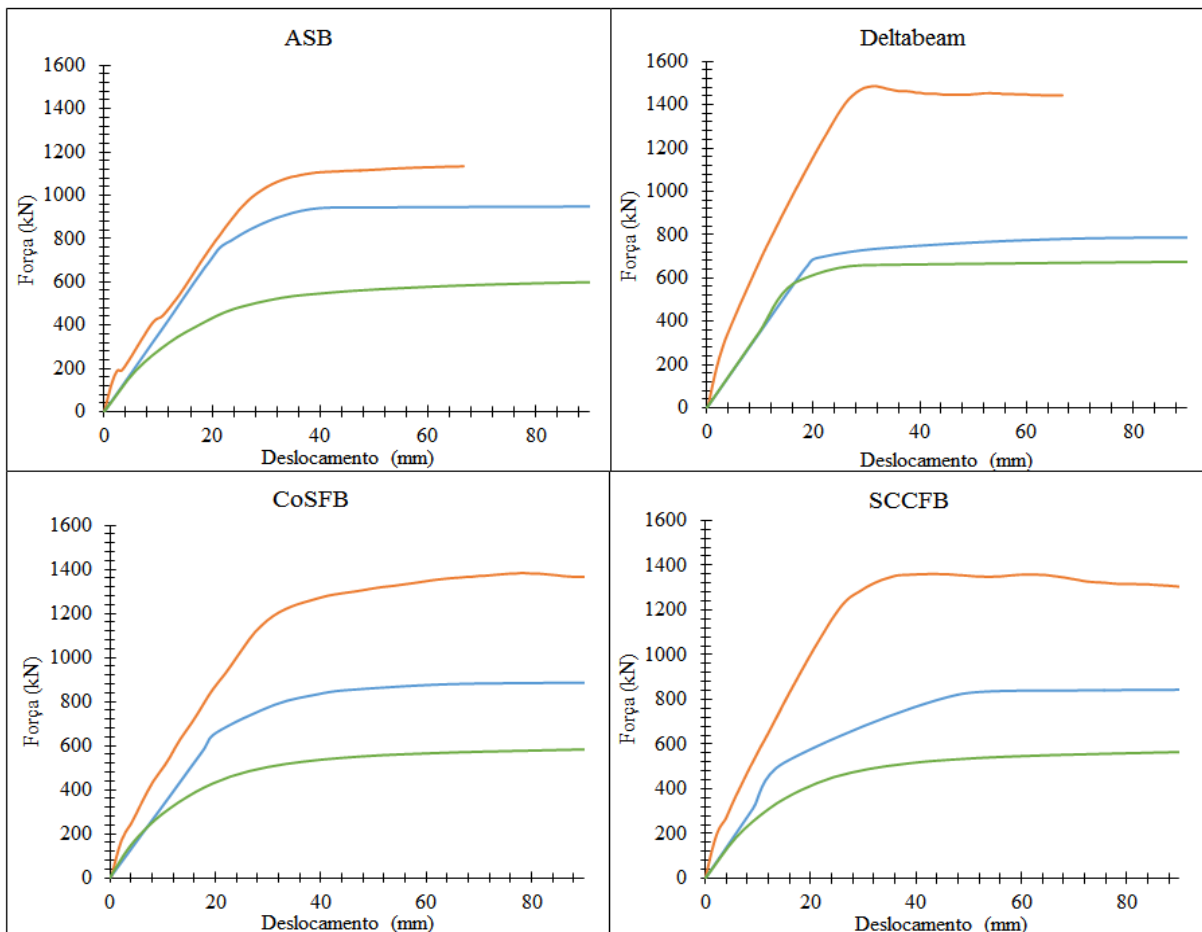
Para todas as tipologias, as deformações plásticas começam na parte inferior da laje, nas proximidades do ponto de aplicação das cargas, causadas pelas tensões de tração. No decorrer da simulação, surgem também no comprimento central da laje, na parte superior, decorrentes das tensões de compressão. Ao analisar as deformações plásticas nos perfis de aço, nota-se que são muito pequenas comparadas com as da laje, estando concentradas no centro da viga, mais expressivamente nas proximidades dos pontos de aplicação de carga.

Dentre as quatro tipologias, a *Deltabeam*[®] é aquela com deformações plásticas mais acentuadas, seguida da ASB e SCCFB. Porém, deve-se levar em conta que, na ASB, essas deformações correspondem ao deslocamento no meio do vão de 66,6 mm enquanto que a

Deltabeam® está submetida a um carregamento aproximadamente 30% maior, para o mesmo deslocamento. Na SCCFB essa análise se refere ao deslocamento no meio do vão de 87,1 mm, estando nesse ponto já bastante solicitada. A CoSFB foi aquela que apresentou menores deformações plásticas, mostrando ser uma tipologia que responde bem à altos carregamentos.

Além da comparação das tipologias entre si, foi realizada também a comparação com cada perfil de aço isolado. Foram feitas análises não-lineares dos perfis e análises de instabilidade sob flexão, considerando imperfeições geométricas iniciais, de acordo com o trabalho de Morkhade e Gupta (2015). Foi observado que o primeiro modo de flambagem foi o lateral com torção (FLT), para todas as tipologias. Os gráficos comparativos dos sistemas mistos com o perfil de aço isolado, em ambas as análises, podem ser vistos na Figura 6.23.

Figura 6.23: Gráficos comparativos das tipologias com os perfis de aço isolados



- Legenda:
- Piso misto de pequena altura
 - Perfil isolado - análise não linear
 - Perfil isolado - análise de instabilidade

A Figura 6.23 evidencia a mesma tendência de comportamento nas três análises realizadas para os quatro sistemas. Todos atingem a carga crítica de flambagem antes de entrarem na plasticidade e apresentam rigidez e capacidade resistente muito maiores quando adicionada a laje de concreto. A ASB foi o sistema que apresentou menor ganho de rigidez e capacidade resistente quando adicionada essa laje, em torno de 20%. Contudo, esse valor não leva em consideração a flambagem do perfil, que, quando analisada, revela uma carga crítica aproximadamente 50% menor que a carga máxima da ASB, mostrando que o concreto contribui não só com o aumento da rigidez e da resistência, mas também para a atenuação de instabilidades do perfil.

A CoSFB e a SCCFB seguem o mesmo padrão da ASB quanto ao fenômeno de instabilidade, apresentando carga crítica bastante inferior à carga máxima dos sistemas mistos. Quando comparada apenas com a análise não-linear, a CoSFB teve a resistência aumentada em 56% e a SCCFB em 61%, enquanto que, analisando a carga crítica de flambagem, esse aumento foi em torno de 138% e 142%, respectivamente. Essas diferenças consideráveis nos valores das cargas máximas, quando comparado ao perfil da ASB, mostram que as aberturas nos perfis isolados dessas duas tipologias contribuem para o aceleração da instabilidade, porém no piso misto de pequena altura fazem com que a viga ganhe rigidez e capacidade resistente.

Em comparação à análise não-linear do perfil de aço isolado, a tipologia que se mostrou mais influenciada pela incorporação da laje de concreto foi a *Deltabeam*®, com um ganho de 89% de capacidade resistente. O grande acréscimo na resistência da *Deltabeam*® deveu-se principalmente ao fato da viga ter seu interior preenchido com o concreto, deixando também o sistema mais rígido. Entretanto, o comportamento relativo às instabilidades sob flexão dessa tipologia não seguiu a mesma tendência das demais, sendo a carga crítica apenas um pouco menor que a carga máxima da análise não-linear, mostrando que esse perfil está menos sujeito às instabilidades, devido à maior inércia.

A Tabela 6.5 mostra resumidamente as forças máximas encontradas para as quatro tipologias de piso misto de pequena altura e seus perfis isolados, tanto na análise não-linear física quanto na análise geométrica de instabilidade. Além disso, é retratado, percentualmente, o aumento nas cargas máximas dos pisos mistos de pequena altura comparadas as cargas máximas das análises não-lineares do perfil isolado e quanto as análises não-lineares são maiores que às cargas críticas.

Tabela 6.5: Comparação da força máxima (F_m)

Tipologia	Slim floor - F_m (kN)	Perfil isolado - F_m (kN)				
		Análise não-linear		Análise de instabilidade		
		F_m (kN)	Comparação slim floor	F_m (kN)	Comparação slim floor	Comparação análise não-linear
ASB	1134,1	944,2	20,1%	596,2	90,2%	58,4%
Deltabeam®	1486,6	786,4	89,1%	669,4	122,1%	17,5%
CoSFB	1380,1	884,8	56,0%	579,7	138,1%	52,6%
SCCFB	1358,3	842,1	61,3%	562,5	141,5%	49,7%

Fonte: Autora, 2020

A partir da Tabela 6.5 é possível confirmar que a *Deltabeam®* foi aquela com maior ganho de capacidade resistente e menos sujeita a instabilidades, enquanto a ASB foi a que obteve menor ganho de capacidade resistente. A Tabela 6.5 também permite comprovar o comportamento semelhante da CoSFB com a SCCFB, com grande aumento da capacidade resistente quando adicionada a laje de concreto, estando mais sujeitas à instabilidades que a ASB.

6.2.1 Considerações finais

Com base nas análises gráficas dos resultados, foi possível realizar um vasto estudo comparativo entre as quatro tipologias, tanto em relação à rigidez e à capacidade resistente última, quanto à tensões, deformações e modos de falha. Desse modo, pode-se concluir que a tipologia que apresenta maior rigidez e capacidade resistente é a *Deltabeam®*, mostrando, porém, melhor desempenho enquanto o perfil de aço encontra-se no regime elástico, com brusca queda da capacidade resistente no início da plasticidade desse componente. Vale ressaltar que o perfil trabalha no regime elástico até altos valores de carga, e por isso a *Deltabeam®* pode ser indicada para situações de alta solicitação, comparativamente às demais tipologias.

A ASB é aquela com menor rigidez e capacidade resistente, com altas deformações plásticas e pouco indicada para ser submetida à altos carregamentos. Entretanto, devido a sua geometria mais simples, possui facilidade de execução, de dimensionamento e maior semelhança com os pisos mistos convencionais, por ser normalmente usada com conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça e não possuir aberturas, contribuindo para que esse seja o tipo de *slim floor* mais utilizado internacionalmente.

A SCCFB e a CoSFB apresentam, quantitativamente, resultados semelhantes, porém mostram algumas diferenças no comportamento, inclusive na distribuição da tensão de von Mises, na rigidez e no comportamento pós plastificação da viga de aço, devido principalmente ao

tamanho das aberturas. Após o esmagamento do concreto, que atinge mais efetivamente as aberturas da SCCFB, ocorre a queda de capacidade resistente do sistema antes de atingir o limite de deslocamento imposto. A CoSFB, por outro lado, possui carga máxima crescente, mostrando que essa tipologia é mais estável em situações de grandes carregamentos.

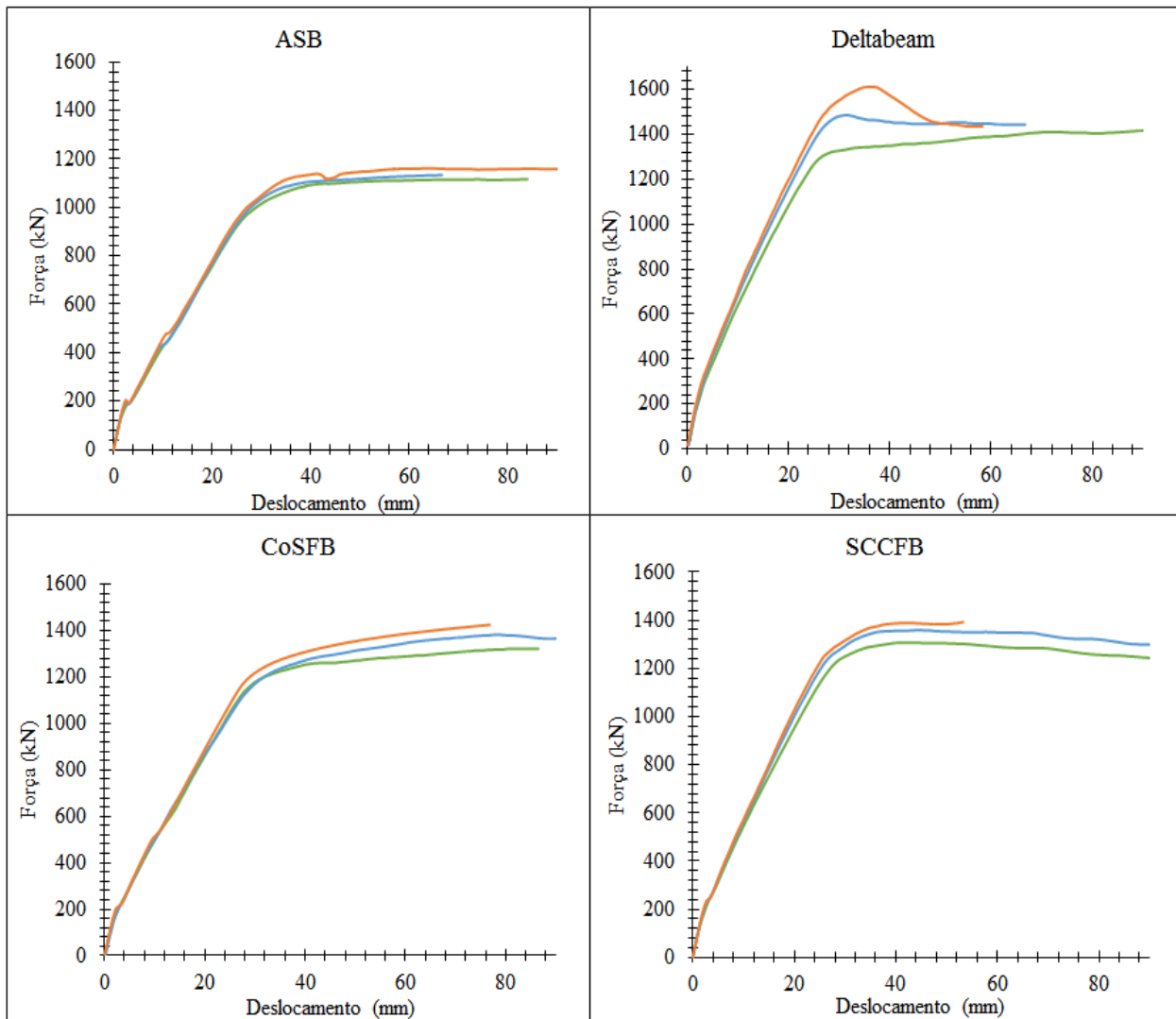
6.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Após a realização do estudo comparativo, avaliou-se como variações em alguns parâmetros influenciam nas tipologias estudadas. Assim, por meio de revisão bibliográfica, foram escolhidos quatro parâmetros principais, sendo eles a resistência característica do concreto (f_{ck}), altura da capa de concreto (h_c), resistência mecânica do perfil de aço (f_y) e espessura da mesa inferior do perfil (t_b). O estudo paramétrico foi realizado em relação à curva força x deslocamento no meio do vão e foi utilizado como referência o modelo padronizado para cada tipologia, com resistência do concreto de 30 MPa, capa de concreto com altura de 23 mm, tensão de escoamento do aço de 430 MPa e mesa inferior com espessura de 23 mm.

Os valores comparados no decorrer do capítulo dizem respeito à força máxima última aplicada. Foi determinado o mesmo critério de aplicação de carregamento, por controle de deslocamento e utilizado o Eurocode 4 (2004) para limitar o valor de análise, sendo utilizado o maior valor entre a força máxima aplicada durante o ensaio e a força correspondente à flecha $L/50$, ou seja, a força considerada no deslocamento de 86 mm, caso não haja valor máximo antes desse deslocamento.

6.3.1 Resistência característica do concreto

A fim de avaliar a influência do concreto no comportamento à flexão do *slim floor*, foram variados dois parâmetros desse material, a resistência característica (f_{ck}) e a altura da capa sobre o perfil de aço (h_c). Nesse tópico, apresentam-se os resultados da avaliação da resistência característica do concreto, em que foram analisados outros dois valores para o f_{ck} , de 20 MPa e 40 MPa, além daquele utilizado na padronização do modelo, de 30 MPa. Assim, a Figura 6.24 mostra os gráficos força x deslocamento para cada tipologia.

Figura 6.24: Gráficos força x deslocamento – Resistência do concreto

Legenda:

- 20 MPa
- 30 MPa
- 40 MPa

Fonte: Autora, 2020

Observou-se que as quatro tipologias de *slim floor* analisadas apresentam o mesmo comportamento quanto à variação da resistência característica do concreto: com o aumento da resistência do concreto, aumenta-se a força máxima, sem afetar consideravelmente a rigidez da estrutura. A Tabela 6.6 apresenta os valores das forças máximas e a porcentagem desse aumento para cada tipologia.

Tabela 6.6: Comparação da força máxima (F_m) - resistência característica do concreto

Tipologia	Resistência do concreto - F_m (kN)			Variação (%) da capacidade resistente em relação à referência	
	20 MPa	30 MPa (Referência)	40 MPa	20 MPa	40 MPa
ASB	1116,71	1134,13	1159,22	-1,53	2,21
<i>Deltabeam</i> [®]	1412,01	1486,55	1611,22	-5,01	8,38
CoSFB	1322,46	1383,60	1425,48	-4,42	3,03
SCCFB	1306,42	1358,37	1392,34	-3,82	2,50

Fonte: Autora, 2020

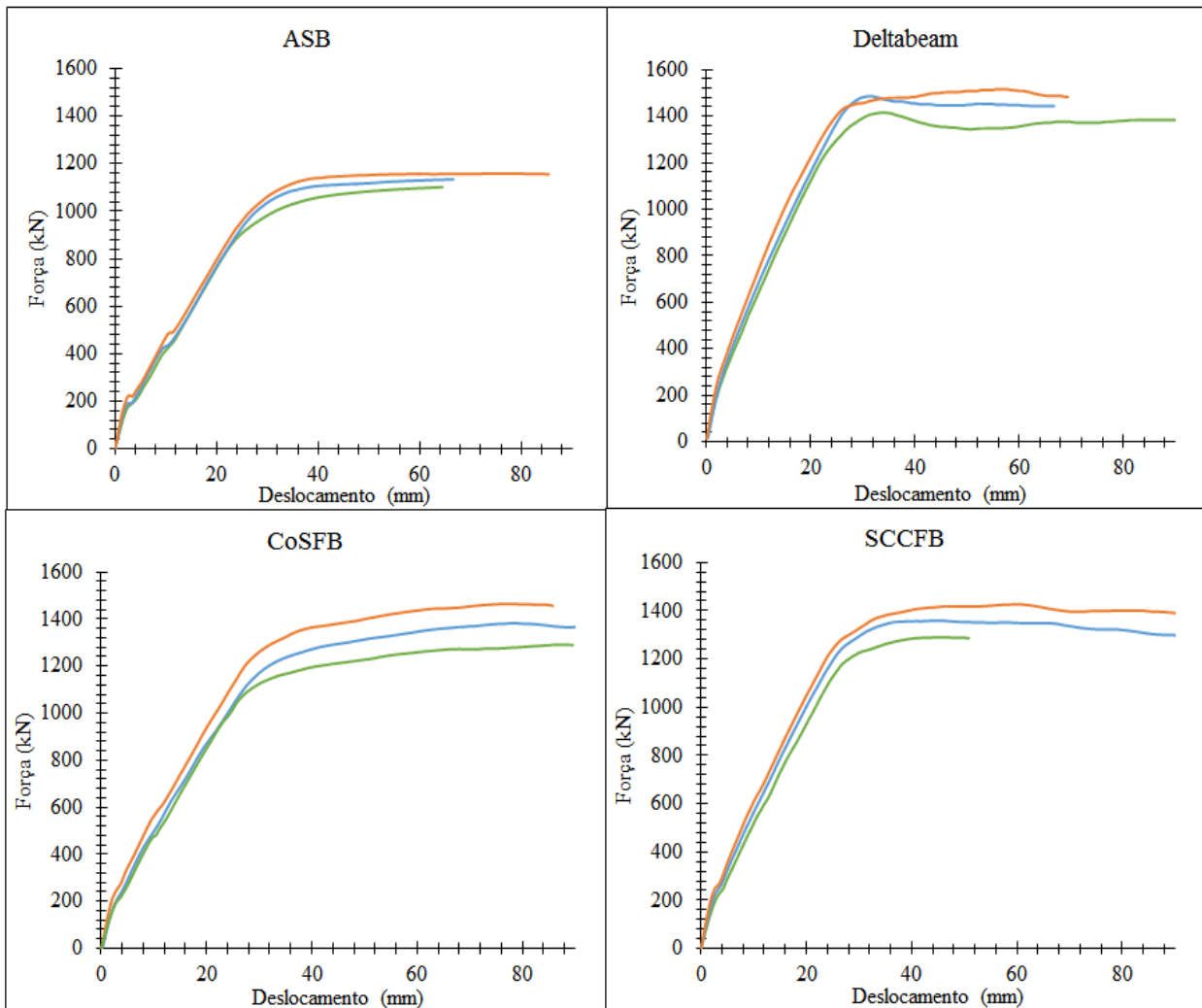
Observando os gráficos da Figura 6.24 e os valores da Tabela 6.6, nota-se que esse parâmetro não exerce influência significativa no comportamento à flexão das tipologias, sendo a ASB a menos influenciada. A CoSFB e SCCFB apresentam comportamentos semelhantes, inclusive quanto à porcentagem de acréscimo da capacidade resistente.

A *Deltabeam*[®] foi aquela mais sensível a este parâmetro, com maiores acréscimos na carga máxima, com o aumento da resistência característica do concreto. Apesar disso, o aumento do f_{ck} (analisando a curva de 40 MPa) trouxe também uma brusca queda na capacidade resistente da *Deltabeam*[®] logo após o pico de carga máxima, mostrando que esse aumento pode não ser tão benéfico para o sistema.

6.3.2 Altura da capa de concreto

Para avaliar a influência da altura da capa de concreto (h_c) no *slim floor* foram feitas três análises: sem capa, capa utilizada na padronização, de 23 mm de altura, e uma capa de 46 mm. É importante lembrar que a principal característica do piso misto de pequena altura é ter uma pequena ou nula capa de concreto sobre o perfil de aço, assim, esses valores devem ser os menores possíveis.

Com a variação desse parâmetro no ABAQUS, foram obtidos os gráficos força aplicada x deslocamento no meio do vão para cada tipologia, mostrados na Figura 6.25. A Tabela 6.7 indica os valores da força máxima encontrados para cada tipologia, e, percentualmente, o aumento da capacidade resistente para cada uma delas.

Figura 6.25: Gráficos força x deslocamento – Altura da capa de concreto

Legenda:

- Sem capa
- 23 mm
- 46 mm

Fonte: Autora, 2020

Tabela 6.7: Comparação da força máxima (F_m) - altura da capa de concreto

Tipologia	Altura da capa de concreto - F_m (kN)			Variação (%) da capacidade resistente em relação à referência	
	Sem capa	23 mm (Referência)	46 mm	Sem capa	46 mm
ASB	1101,11	1134,13	1158,31	-2,91	2,13
<i>Deltabeam</i> ®	1414,89	1486,55	1515,88	-4,82	1,97
CoSFB	1291,21	1383,60	1464,57	-6,68	5,85
SCCFB	1289,37	1358,37	1426,17	-5,08	4,99

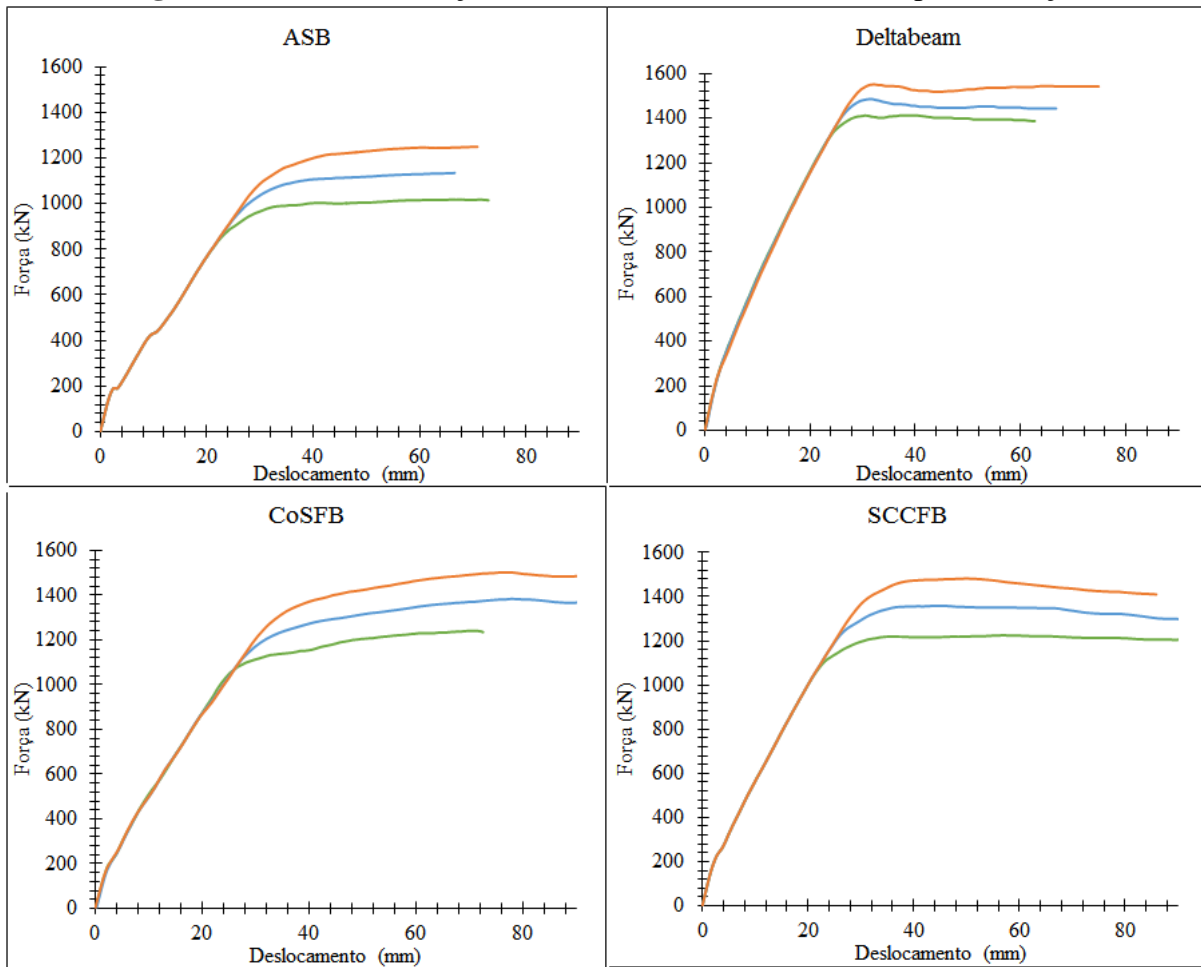
Fonte: Autora, 2020

Esse parâmetro também não se mostrou muito significativo, principalmente na variação da altura de 23 mm para 46 mm, como pode ser visto na Tabela 6.7. A porcentagem, apesar de ainda pequena, é mais expressiva na variação em que a estrutura passa de uma configuração sem concreto sobre a viga para uma composição com a presença do concreto. Por meio das Tabelas 6.6 e 6.7, nota-se que a variação da altura da capa de concreto foi mais significativa que a variação da resistência característica do concreto.

Observa-se ainda que a ASB foi a tipologia menos influenciada pela altura da capa de concreto, enquanto a CoSFB foi mais sensível à essa variação, assim como a SCCFB. A *Deltabeam*® teve um comportamento peculiar: com o aumento da altura da capa de concreto, o pico de carga máxima vai ficando mais suave, até não ocorrer. Isso mostra que essa capa ajuda a minimizar o modo de falha do sistema, por esmagamento do concreto, melhorando seu comportamento no regime plástico. Essa tendência também é perceptível na SCCFB, apesar de mais branda.

6.3.3 Resistência do perfil de aço

Após a análise da influência do concreto no comportamento à flexão das tipologias, foi realizada a avaliação de dois parâmetros do perfil de aço, a resistência, através da variação da tensão de escoamento (f_y) e a espessura da mesa inferior (t_b). Para ser avaliada a influência dessa resistência, foram escolhidos três valores para a tensão de escoamento do perfil: 380 MPa, 430 MPa (referência) e 480 MPa, sendo fixada a tensão limite última em 550 MPa. A Figura 6.26 retrata o comportamento das tipologias e a Tabela 6.8 apresenta, quantitativamente, essa influência.

Figura 6.26: Gráficos força \times deslocamento – Resistência do perfil de aço

Legenda:

- 380 MPa
- 430 MPa
- 480 MPa

Fonte: Autora, 2020

Tabela 6.8: Comparação da força máxima (F_m) - resistência do perfil de aço

Tipologia	Resistência do perfil - F_m (kN)			Variação (%) da capacidade resistente em relação à referência	
	380 MPa	430 MPa (Referência)	480 MPa	380 MPa	480 MPa
ASB	1014,80	1134,13	1248,78	-10,52	10,11
<i>Deltabeam</i> ®	1412,39	1486,55	1543,54	-4,99	3,83
CoSFB	1234,80	1383,60	1484,32	-10,75	7,28
SCCFB	1224,61	1358,37	1481,64	-9,85	9,07

Fonte: Autora, 2020

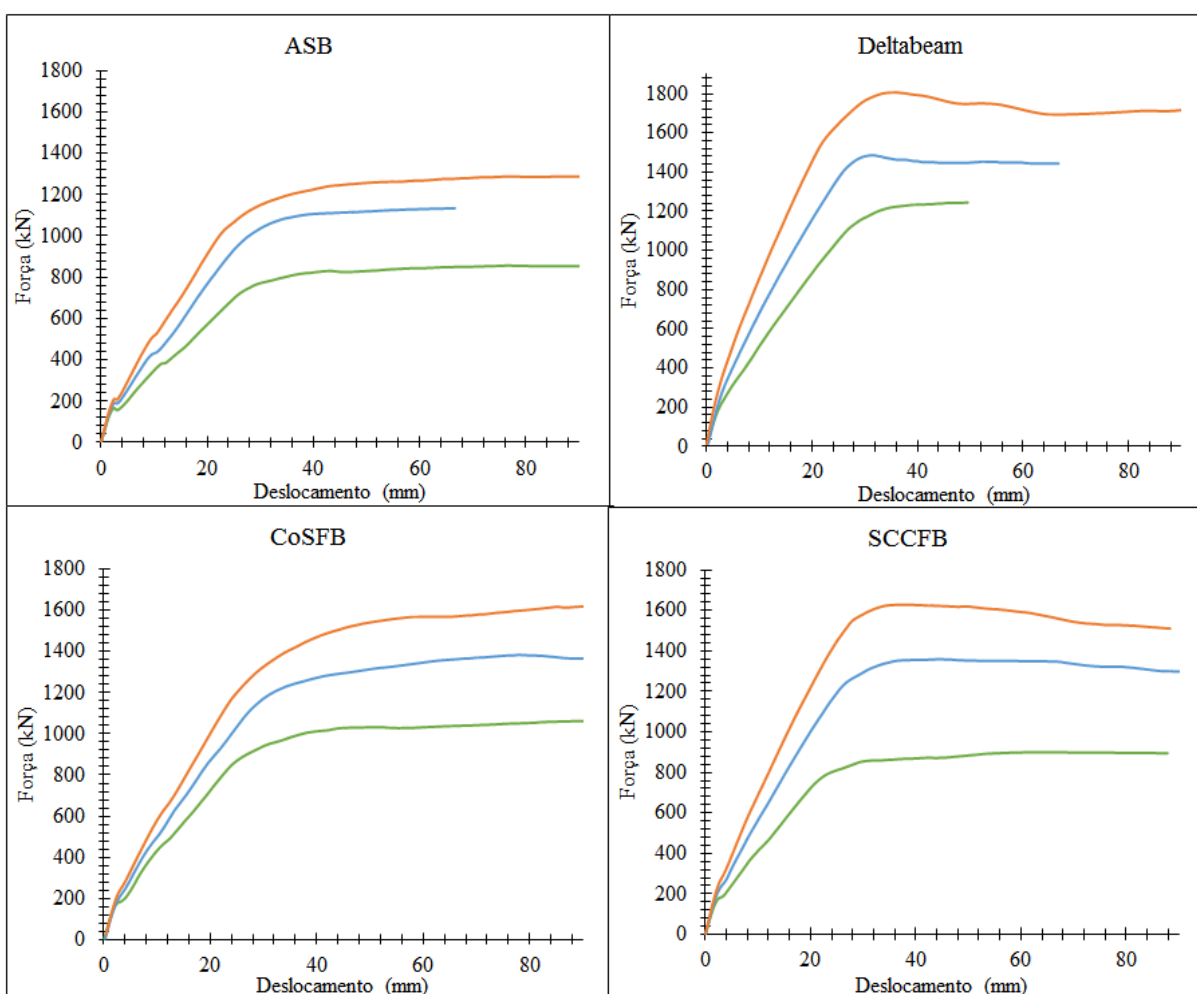
Por meio dos resultados apresentados nesse estudo, observa-se que as curvas de cada tipologia mantêm o mesmo comportamento, ou seja, aumentando o valor da tensão de escoamento, aumenta-se a capacidade resistente sem afetar a rigidez. A *Deltabeam*® foi a tipologia menos influenciada pela variação dessa tensão. A ASB foi consideravelmente afetada com a variação,

ao contrário do que vinha acontecendo com os parâmetros do concreto. A CoSFB e SCCFB também apresentaram significativa sensibilidade a esse parâmetro, com variações percentuais bem semelhantes. Percebe-se que esse parâmetro tem mais influência na capacidade resistente última dos pisos mistos de pequena altura que os parâmetros do concreto analisados até aqui.

6.3.4 Espessura da mesa inferior do perfil de aço

A espessura da mesa inferior do perfil é de grande relevância no estudo do *slim floor*, pois o concreto é apoiado nesse componente estrutural, fazendo com que ele seja consideravelmente solicitado. Sendo assim, verificam-se três casos para a espessura da mesa inferior do perfil: de 11,5 mm, 23 mm (referência) e 34,5 mm. A Figura 6.27 ilustra o comportamento das quatro tipologias.

Figura 6.27: Gráficos força \times deslocamento – Espessura da mesa inferior do perfil de aço



Legenda:

- 11,5 mm
- 23 mm
- 34,5 mm

A variação desse parâmetro mostrou que aumentando a espessura da mesa inferior, ocorre um acréscimo considerável na capacidade resistente e na rigidez de todos os sistemas. A Tabela 6.9 permite observar quantitativamente esses aumentos.

Tabela 6.9: Comparação da força máxima (F_m) - espessura da mesa inferior do perfil

Tipologia	Espessura da mesa inferior - F_m (kN)			Variação (%) da capacidade resistente em relação à referência	
	11,5 mm	23 mm (Referência)	34,5 mm	11,5 mm	34,5 mm
ASB	853,47	1134,13	1286,72	-24,75	13,45
Deltabeam®	1245,15	1486,55	1805,79	-16,24	21,48
CoSFB	1059,13	1383,60	1613,85	-23,45	16,64
SCCFB	900,18	1358,37	1628,28	-33,73	19,87

Fonte: Autora, 2020

A partir da Tabela 6.9, nota-se que a tipologia que se mostrou mais sensível a esse parâmetro foi a SCCFB, com redução da capacidade resistente de aproximadamente 34%, reduzindo em 50% a espessura em relação ao referencial e um ganho de 20% aumentando em 50% essa espessura. A ASB e CoSFB também se beneficiaram com o aumento da espessura da mesa inferior. Nessa análise, a *Deltabeam®* foi a tipologia que menos variou percentualmente, mostrando, ao contrário das demais, uma maior variação percentual da carga máxima na segunda variação (aproximadamente 22%).

6.3.5 Considerações finais

A partir do estudo paramétrico realizado, conclui-se que as variações de parâmetros do perfil de aço contribuem mais efetivamente para o ganho de capacidade resistente em todas as tipologias. Ao avaliar como cada tipologia foi influenciada pelos parâmetros, percebeu-se que a *Deltabeam®* foi aquela que apresentou mais sensibilidade à parâmetros relacionados ao concreto, sendo também a menos suscetível às variações do perfil. Isso está relacionado ao fato do seu formato de Delta possibilitar o preenchimento interno da viga com concreto, sendo esse material mais relevante nessa tipologia que nas outras.

Por outro lado, a ASB apresenta a menor sensibilidade aos parâmetros do concreto, estando relacionado ao fato desse perfil não apresentar aberturas ou mecanismos que possibilitem o preenchimento do perfil com o concreto. Percebe-se que as tipologias CoSFB e SCCFB tem os valores de carga máxima bastante semelhantes entre si em todas as análises realizadas, sendo bastante sensíveis às variações relacionadas ao perfil de aço, apresentando pequena influência dos parâmetros analisados do concreto.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o de avaliar o comportamento à flexão de quatro tipologias de pisos mistos de pequena altura e compará-las entre si. Para atingi-lo, foram realizadas as etapas de revisão bibliográfica, execução da análise numérica com calibração e padronização dos modelos, comparação das tipologias e análise paramétrica.

O ponto inicial da pesquisa foi a realização de ampla revisão bibliográfica sobre o tema, a fim de adquirir conhecimento sobre os pisos mistos de pequena altura e comprovar o potencial do trabalho. Assim, observou-se que em comparação com o piso misto convencional, esse sistema aumenta a rigidez e a capacidade resistente à flexão, contribui para maior estabilidade estrutural, diminui a altura do pavimento e permite a utilização de barras de aço para garantir o comportamento misto da estrutura, método que foi usado nas tipologias estudadas.

Foi possível constatar também que os estudos sobre o piso misto de pequena altura ainda são iniciais, principalmente quando considerada a diversidade de tipologias existentes. No Brasil, as pesquisas são recentes, com necessidade de normatização e novos trabalhos para a expansão deste campo de estudo. Dessa forma, entende-se que o presente trabalho contribui para o avanço e disseminação das pesquisas dos piso misto de pequena altura e colabora com a maior utilização desse sistema, principalmente no Brasil.

A segunda etapa do trabalho foi a execução da análise numérica, desenvolvida no programa computacional ABAQUS. Inicialmente, foi realizada a calibração dos modelos numéricos, comparando os resultados das simulações com aqueles obtidos experimentalmente para cada tipologia. Após a validação, dimensões básicas dos perfis e das lajes foram padronizadas, sendo elas a altura do perfil e as espessuras das mesas e da alma, além da uniformização das propriedades dos materiais e condições de contorno e carregamento para uma comparação mais fundamentada e confiável. Por fim, realizou-se um estudo paramétrico, analisando quatro parâmetros dos componentes, dois da laje de concreto e dois do perfil de aço.

Na fase de calibração dos modelos, concluiu-se a partir dos gráficos obtidos, que as simulações numéricas das quatro tipologias foram capazes de reproduzir o comportamento força \times deslocamento no meio do vão dos modelos experimentais. Para confirmar a coerência da calibração, os resultados numéricos foram comparados com o comportamento à flexão encontrado por outros autores em simulações numéricas desenvolvidas, baseando-se nas mesmas estruturas ensaiadas experimentalmente. Além disso, foi analisada a configuração deformada dos pisos mistos de pequena altura, a distribuição de tensões e o modo de falha,

mostrando que as quatro tipologias apresentaram o mesmo comportamento dos estudos experimentais.

As pequenas divergências entre os resultados experimentais e numéricos se devem às limitações da simulação, tanto relativas às diferenças entre as propriedades reais e as estimadas no modelo numérico, quanto às simplificações adotadas na simulação. Assim, entende-se que os modelos numéricos desenvolvidos são confiáveis, suficientemente precisos e podem ser usados para prever o comportamento a flexão das tipologias analisadas, estando os modelos calibrados e preparados para serem utilizados na fase seguinte, de padronização.

Para a realização do estudo comparativo, foi necessário padronizar as principais dimensões dos componentes de cada tipologia, as propriedades dos materiais e as condições de carregamento. Então, foi feita a simulação numérica com foco nos resultados referentes ao comportamento à flexão, sendo as principais conclusões do estudo comparativo sintetizadas a seguir.

A ASB foi a tipologia que apresentou menor rigidez e capacidade resistente, com altas deformações plásticas e uma grande região da laje tracionada no final da simulação, sendo indicada para situações de baixos carregamentos, quando comparada às demais. A *Deltabeam*® apresentou, dentre as quatro tipologias, maior rigidez e capacidade resistente, com melhor desempenho durante o regime elástico da viga de aço, resistindo à altas solicitações. É um sistema com grande eficiência em condições que não alcancem sua carga máxima, visto que, quando atingida, exibe altas tensões de compressão na parte superior da laje. Nesse ponto, a capacidade resistente começa a cair devido ao esmagamento do concreto, plastificação do perfil e à alta fissuração causada pelas tensões de tração.

A CoSFB apresentou carga máxima crescente até elevado nível de plastificação do perfil. Esse sistema exibiu no incremento final, altas tensões de compressão, indicando a ocorrência do esmagamento do concreto. Dentre as quatro tipologias, mostrou a menor região de concreto tracionado e as menores deformações plásticas, aproveitando da resistência do concreto à compressão e do aço à tração.

A SCCFB apresentou resultados quantitativos bastante próximos à CoSFB. Entretanto, não apresenta capacidade resistente crescente, fazendo com que a maior tensão principal de compressão seja no instante que atinge a carga máxima, com posterior queda. Sendo assim, essa tipologia trabalha bem à flexão até a viga de aço atingir o regime plástico, ocorrendo posteriormente o esmagamento do concreto, aberturas de fissuras de tração na parte inferior da laje e diminuição da capacidade resistente.

Para embasar o estudo comparativo, foram realizadas duas análises adicionais. A primeira visou avaliar a influência do tamanho das aberturas no comportamento à flexão da CoSFB e SCCFB, mostrando que quanto maior o diâmetro, maior a rigidez e capacidade resistente inicial do sistema. Entretanto, aberturas menores têm a vantagem de manter o comportamento crescente da capacidade resistente, pois estão menos suscetíveis as consequências advindas do esmagamento do concreto.

A segunda análise avaliou a influência das conexões de cisalhamento empregadas nesse trabalho, barras de aço passando pelas aberturas, no comportamento à flexão da *Deltabeam*®, CoSFB e SCCFB. Para isso, foram analisados três casos: todas as aberturas com barras de aço atravessando-as, apenas metade das aberturas com barras atravessando-as, e sem barras atravessando as aberturas. Foi possível concluir que, para as três tipologias, à medida que se reduz a quantidade de barras, ocorre redução da rigidez e da capacidade resistente última dos sistemas, indicando um modo de falha frágil quando se retiram todas as barras de aço.

Além disso, foi realizado um estudo comparativo entre cada tipologia e seu perfil isolado, executando uma análise não-linear física e de instabilidade sob flexão. Notou-se que todas as tipologias apresentaram um grande ganho de capacidade resistente com a adição do concreto, porém apenas as tipologias com aberturas tiveram um significativo aumento da rigidez. Na análise não-linear, a ASB foi a tipologia que apresentou menor acréscimo de carga máxima, enquanto a *Deltabeam*® foi a que se mostrou mais influenciada pela adição do concreto, devido principalmente ao preenchimento do interior da viga, deixando o sistema mais rígido e resistente.

A análise de instabilidade sob flexão foi importante para avaliar se os perfis atingiriam a carga crítica antes de entrar na plasticidade. Para todas as tipologias isso aconteceu, sendo que os perfis da ASB, CoSFB e SCCFB revelaram uma carga crítica bastante baixa, mostrando que o concreto contribui não só com o aumento da rigidez e da capacidade resistente, mas também para a atenuação de instabilidades do perfil. Além disso, pode-se concluir que as aberturas nos perfis isolados da CoSFB e SCCFB colaboraram para a antecipação da ocorrência de instabilidades, porém no piso misto de pequena altura fizeram com que a viga ganhasse rigidez e resistência. A carga crítica da *Deltabeam*® não seguiu a mesma tendência das demais, sendo apenas um pouco menor que a carga máxima da análise não-linear física, mostrando que esse perfil está menos sujeito as instabilidades.

Por fim, executou-se a análise paramétrica, variando dois parâmetros relativos ao concreto, resistência característica e altura da capa, e dois parâmetros relativos ao perfil de aço, resistência do perfil, variando a tensão de escoamento do aço, e espessura da mesa inferior. Foi possível concluir que as variações de parâmetros referentes ao perfil contribuem mais significativamente para o ganho de capacidade resistente dos pisos mistos de pequena altura. Notou-se que o parâmetro que menos influenciou as tipologias foi a variação da resistência característica do concreto, seguido da altura da capa de concreto.

Dentre os parâmetros do perfil de aço, a variação da espessura da mesa inferior foi muito mais influente que a resistência do perfil, sendo este parâmetro ainda mais significativo que aqueles relacionados ao concreto. Além disso, ficou claro que as quatro tipologias, mesmo mostrando a mesma tendência de comportamento para todos os parâmetros, apresentam, percentualmente, variações diferentes dessa capacidade.

Com esse estudo, percebeu-se que a *Deltabeam*® é a tipologia que apresenta mais sensibilidade à parâmetros relacionados ao concreto, sendo também a menos vulnerável às variações do perfil de aço. Acredita-se que isso está relacionado ao fato do seu formato de Delta possibilitar o preenchimento interno da viga com concreto, fazendo com que esse material seja mais relevante nessa tipologia que nas outras. A ASB apresenta a menor sensibilidade aos parâmetros do concreto, devido à ausência de aberturas no perfil, porém alta suscetibilidade às variações do perfil, assim como a CoSFB e SCCFB.

Quanto à simulação numérica, foi encontrada dificuldade na convergência dos modelos, tanto na fase de calibração quanto nas fases de comparação e estudo paramétrico, devido ao alto grau de não-linearidades envolvidas, demandando grande custo computacional. Apesar disso, e como discutido anteriormente, os resultados foram bastante satisfatórios nas três fases, mostrando que a simulação numérica é uma alternativa eficiente aos ensaios experimentais.

Diante das conclusões obtidas, entende-se que o estudo comparativo das tipologias e a análise paramétrica apresentaram resultados compatíveis com os encontrados na literatura, principalmente quanto à rigidez e capacidade resistente última das tipologias. Além disso, deve-se frisar que não existe uma tipologia melhor que a outra, mas cada uma delas pode se mostrar mais adequada dependendo do uso e do ambiente que será empregada. Assim, concluiu-se que o objetivo geral de avaliar o comportamento à flexão de quatro tipologias de piso misto de pequena altura e compará-las entre si foi atingido, assim como os objetivos específicos do trabalho.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de contribuir com ampliação e aperfeiçoamento dos estudos sobre os pisos mistos de pequena altura, são apresentadas, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Realizar ensaios experimentais das tipologias apresentadas;
- Incorporar a avaliação do processo construtivo no estudo comparativo, analisando as vantagens e desvantagens de cada uma;
- Investigar o comportamento ao cisalhamento;
- Abranger outras tipologias no estudo comparativo;
- Ampliar a análise paramétrica para cada tipologia, variando, por exemplo, o tipo de laje (laje mista, alveolar) e o tipo de concreto utilizado (concreto leve, com fibras).

Dessa forma, acredita-se que a continuidade das pesquisas relativas aos pisos mistos de pequena altura proporcionará a disseminação das suas vantagens, das características construtivas, de critérios de dimensionamento e do comportamento estrutural, contribuindo para a maior aplicação desse sistema.

REFERÊNCIAS

- AHMED, I. M.; TSAVDARIDIS, K. D. The evolution of composite flooring systems: applications, testing, modelling and Eurocode design approaches. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 155, p.286-300, abr. 2019. Elsevier BV.
- ALAM, N.; NADJAI, A.; ALI, F.; NADJAI, W. Structural response of unprotected and protected slim floors in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 142, p.44-54, mar. 2018. Elsevier BV.
- ALBERO, V.; ESPINÓS, A.; SERRA, E.; ROMERO, M.L.; HOSPITALER, A. Experimental study on the thermal behaviour of fire exposed slim-floor beams. **Proceedings 12th International Conference On Advances In Steel-concrete Composite Structures - ASCCS 2018**, [s.l.], 27 jun. 2018. Universitat Politècnica València.
- ALBERO, V.; ESPINÓS, A.; SERRA, E.; ROMERO, M.L.; HOSPITALER, A. Numerical study on the flexural behaviour of slim-floor beams with hollow core slabs at elevated temperature. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 180, p.561-573, fev. 2019. Elsevier BV.
- ALBERO, V.; ESPINÓS, A.; SERRA, E.; ROMERO, M.L.; HOSPITALER, A. Innovative solutions for enhancing the fire resistance of slim-floor beams: Thermal experiments. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 165, p.105897-105908, fev. 2020. Elsevier BV.
- ANDRADE, D. M. **Comparativo de dimensionamento de pavimento misto de steel deck com o sistema slim floor utilizando o software CoSFB**. 2017. 69p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- ARCELORMITTAL. **Slim floor – an innovative concept for floors**. Catálogo de fabricante, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- BAILEY, C. G. The behaviour of asymmetric slim floor steel beams in fire. **Journal of Constructional Steel Research**. v. 50, p. 235-257, 1999.
- BALDASSINO, N.; ROVERSO, G.; RANZI, G.; ZANDONINI, R. Service and Ultimate Behaviour of Slim Floor Beams: An Experimental Study. **Structures**, [s.l.], out. 2018. Elsevier BV.
- 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.
- BIRTEL, V.; MARK, P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure. **Proceedings of the 19th Annual International ABAQUS Users' Conference**. Boston, [sn], pp. 95–108, 2006.

BRITISH STANDARD. **BS 5950-1**. Structural use of steelwork in building - Part 1: Code of practice for design-Rolled and welded sections. 2001.

BRITISH STANDARD. **BS5950-3**: Structural use of steelwork in buildings – Part 3: Code of practice for design of simple and continuous composite beams. London, 1982.

BRITISH STANDARD. **BS 5950-3.1**: Design in composite structures - Part 3.1: Code of practice for design of simple a continuous composite beams. 2001.

BRAUN, M.; HECHLER, O.; OBIALA, R.; KUHLMANN, U.; EGGERT, F.; HAUF, G.; KONRAD, M. Experimentelle Untersuchungen von Slim-Floor-Trägern in Verbundbauweise. **Stahlbau**, [s.l.], v. 83, n. 10, p.741-749, out. 2014. Wiley.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, vol. 82, pp. 797–804. 1985.

CAVALCANTI, L. A. (2010). 151p. **Estudo teórico-experimental da contribuição da armadura para a capacidade resistente de vigas parcialmente revestidas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CEN. **EN1992-1-1**. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.

CEN. **EN1993-1-1**. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.1: General rules and rules for building. 2005.

CEN. **EN1994-1-1**. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for building. 2004.

CHEN, S.; LIMAZIE, T.; TAN, J. Flexural behavior of shallow cellular composite floor beams with innovative shear connections. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 106, p.329-346, mar. 2015. Elsevier BV.

CHEN, S.; LIMAZIE, T. Composite slim floor beams with innovative shear connections. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Structures And Buildings**, [s.l.], v. 171, n. 1, p.29-37, jan. 2018. Thomas Telford Ltd.

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

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. C. Composite connections in slim-floor system: An experimental study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 68, n. 1, p. 78–88, 2012.

DE NARDIN, S; EL DEBS, A. L. H. C. Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas. **Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v.61, n.2, p.239-247, 2008.

DERKOWSKI, W.; SKALSKI, P. New concept of slimfloor with prestressed composite beams International. **Procedia Engineering**. v. 193, p. 176–183, 2017.

DERYSZ, J.; LEWINSKY, P.; WIECH, P. New concept of composite steel-reinforced concrete floor slab in the light of computational model and experimental research. **Procedia Engineering**. v. 193, p. 168–175, 2017.

ELLOBODY, E. Composite slim floor stainless steel beam construction exposed to different fires. **Engineering Structures**, [s.l.], v. 36, p.1-13, mar. 2012. Elsevier BV.

ELLOBODY, E. Nonlinear behaviour of unprotected composite slim floor steel beams exposed to different fire conditions. **Thin-walled Structures**, [s.l.], v. 49, n. 6, p.762-771, jun. 2011. Elsevier BV.

FRIEDRICH, J. T. **Análise teórico-experimental de pisos mistos de pequena altura**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

GIRDER-SLAB TECHNOLOGIES. **The Girder-Slab System LRFD Version: Design Guide**. 3. ed. USA: Girder-Slab Technologies, 2015. 32 p.

GRIFFIS, L. G. (1994). The 1994 T.R. Higgins Lecture: Composite frame construction. In: **National Steel Construction Conference**, Pittsburgh, Pennsylvania, 18-20 may, 1994. Proceedings. New York, AISC. V.01, p.1.1-1.72.

HECHLER, O.; BRAUN, M.; OBIALA, R.; KUHLMANN, U.; EGGERT, F.; HAUF, G. CoSFB - Composite Slim-Floor Beam: Experimental Test Campaign and Evaluation. **Composite Construction in Steel and Concrete VII**, [s.l.], p.158-172. 2016.

HEGGER, J; ROGGENDORF, T; KERKENI, N. Shear capacity of prestressed hollow core slabs in slim floor constructions. **Engineering Structures**. Elsevier Ltd, v.31, n., p. 551-559, 2009.

HUO, B. Y.; D'MELLO, C.; TSAVDARIDIS, K. D. Experimental and Analytical Study of Push-out Shear Tests in Ultra Shallow Floor Beams. **Iabse Symposium Report**, [s.l.], v. 97, n. 34, p.31-38, 2010. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).

HUO, B. Y.; D'MELLO, C. A. Push-out tests and analytical study of shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 88, p.191-205, set. 2013. Elsevier BV.

HUO, B. Y.; D'MELLO, C. A. Shear Transferring Mechanisms in a Composite Shallow Cellular Floor Beam with Web Openings. **Structures**, [s.l.], v. 9, p.134-146. 2017. Elsevier BV.

- JU, Y. K., KIM, D.; KIM, S.; YOON, S.; LEE, Y.; KIM, D. Dynamic Characteristics of the New Composite Floor System. **Steel structures**. V. 8, p. 347-356. 2008.
- JU, Y. K.; KANG, Y.; CHUN, S.; LEE, Y.; KIM, S.; KIM, D.; CHUNG, K.; YOON, S. Experimental assessment of floor vibration using I-TECH composite beam. **CTBUH – Council on Tall Buildings and Urban Habitat**. p. 488-495. 2004.
- JU, Y. K.; CHUN, S.; KIM, D.; KIM, D.; KIM, S.; CHUNG, K. Structural performance of I-TECH composite beam steel with web openings. **CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings**. p. 411-418. 2003.
- JU, Y. K.; CHUN, S.; KIM, S. Flexural Test of a Composite Beam Using Asymmetric Steel Section with Web Openings. **Journal of Structural Engineering**, [s.l.], v. 135, n. 4, p.448-458, 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- JU, Y. K.; KIM, D.; KIM, S. Experimental assessment of the shear strength of an asymmetric steel composite beam with web openings. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s.l.], v. 32, n. 2, p.314-328. Canadian Science Publishing. 2005.
- 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. **Modelagem numérica de piso misto de aço e concreto de pequena altura: ênfase à ligação viga-pilar**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2018.
- KUHLMANN, U. **Training Course "Composite Construction - Slim-floor systems"**. Oslo, Noruega: Institute of Structural Design, 2012. 273 slides, color.
- LAM, D.; DAI, X.; KUHLMANN, U.; RAICHLE, J.; BRAUN, M. Slim-floor construction - design for ultimate limit state. **Steel Construction**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.79-84, 2015. Wiley.
- LAWSON, R. M.; LIM, J.; HICKS, S. J.; SIMMS, W.I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 62, n. 6, p.614-629, 2006. Elsevier BV.
- 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.
- LESKELÄ, M. V.; HOPIA, J. **Steel Sections for Composite Shallow Floors**. Report RLT 0053E. University of Oulu, Structural Engineering Laboratory. Oulu, Finland, 2000.
- LESKELA, M. V.; PELTONEN, S.; ILIOPOULOS, A.; KIRIAKOPOULOS, P. Numerical and experimental investigations on the vertical shear resistance of boxed steel cross-sections with concrete infill (Deltabeams). **EUROSTEEL 2014**. Naples, Italy. 2014.

- LIMAZIE, T.; CHEN, S. Numerical procedure for nonlinear behavior analysis of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 106, p.209-219, mar. 2015. Elsevier BV.
- LIMAZIE, T.; CHEN, S. FE modeling and numerical investigation of shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 119, p.190-201, 2016. Elsevier BV.
- LIMAZIE, T.; CHEN, S. Effective shear connection for shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 128, p.772-788, jan. 2017. Elsevier BV.
- LU, X.H., MAKELAINEN, P. "Parametric studies on steel-concrete composite beams in slim floors", **Proceedings of the 1st European Conference on Steel Structures**, EUROSTEEL'95, Athens, Greece. 1995.
- MA, Z.; MAKELAINEN, P. Behavior of composite slim floor structures in fire. **Journal of Constructional Engineering**, v. 126, p.830-837. 2000.
- MAKELAINEN, P.; MA, Z. Fire resistance of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, [s.l.], v. 54, p.345-363. 2000. Elsevier BV.
- MALITE, M. **Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. São Carlos. 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1993.
- MALM, R. **Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method**. 2009. 64 f. Ph.D.Thesis - Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2009.
- MARAVEAS, C.; SWAILES, T.; WANG, Y. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire. **Steel Construction**, [s.l.], v. 5, n. 3, p.191-198, ago. 2012. Wiley.
- MARAVEAS, C.; TSAVDARIDIS, K. D.; NADJAI, A. Fire Resistance of Unprotected Ultra Shallow Floor Beams (USFB): A Numerical Investigation. **Fire Technology**, [s.l.], v. 53, n. 2, p.609-627, 23 mar. 2016. Springer Nature.
- 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.
- MORKHADE, S. G.; GUPTA, L. M.. An experimental and parametric study on steel beams with web openings. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.249-260, 2015. Springer Nature.
- MULLET, D. L. Slim Floor Design and Construction. **Relatório Técnico P110**. The Steel Construction Institute, 1992.

MULLET, D.L.; LAWSON, R.M. Slim floor Construction using Deep Decking. **Relatório Técnico P127**. The Steel Construction Institute, 1993.

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

NÁDASKÝ, P. Steel-Concrete Composite Beams for Slim Floors—Specific Design Features in Scope of Steel Frames Design. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 40, p.274-279, 2012. Elsevier BV.

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.

PAVLOVIĆ, M.; MARKOVIĆ, Z.; VELJKOVIĆ, M.; BUĐEVAC, D. Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. **Journal of Constructional Steel Research**. 88: 134–149. 2013.

PEIKKO. DeltaBeam. **Slim Floor Structures**. Technical Manual, 2014. Disponível em: <<https://media.peikko.com/file/dl/i/qS6c7g/rRibebLCUQJvj7DtCwoE4w/DELTABEAMPeikkoGroup8-2014>>. Acesso em: 29 set. 2018.

PELTONEN, S.; LESKELA, M. V.; KIRIAKOPOULOS, P.; ILIOPOULOS, A.; VAYAS, I.; SPYRAKOS, K. Experimental and numerical investigations on the flexural behaviour of boxed steel beams encased in concrete. **The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures**. Timisoara, Romania. 2016.

PETRAUSKI, M. C. **Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores CRESTBOND**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

PIEIDADE NETO, D. **Sobre estratégias de resolução numérica de problemas de contato**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

POLAK, M. A.; GENIKOMSOU, A. S. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**. n. 98, p. 38-48, 2015.

RACKHAM, J. W; HICKS, S. J; NEWMAN, G. M. Design of asymmetric slimflor beams with precast concrete slabs. **The Steel Construction Institute**, 2006.

RAMOS, A. L. **Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

ROCHA, F. M. **Modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto pertencentes a sistemas de pisos mistos de pequena altura em situação de incêndio**. 2012. 267p. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

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.

SHEEHAN, T.; DAI, X.; YANG, J.; ZHOU, K.; LAM, D. Flexural behaviour of composite slim floor beams. **Proceedings 12th International Conference on Advances in Steel-concrete Composite Structures - ASCCS 2018**, [s.l.], p.137-144. 2018. Universitat Politècnica València.

SILVA, E. N.; SOUZA, A. S. C. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.52-68. 2018. Universidade Federal de Goiás.

SIMULIA. **ABAQUS User's Manual**. Simulia Corporation ABAQUS v. 6.14. Providence, Rhode Island, USA: Dassault Systèmes. (2017).

SOUZA, P. T. **Análise teórica e experimental de pisos mistos de pequena altura compostos por vigas metálicas e lajes alveolares de concreto**. 2016. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. **Best Practice in Steel Construction - Commercial Buildings**. 2009.

TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C.; HAWES, M. Experimental Study of Ultra Shallow Floor Beams (USFB) with Perforated Steel Sections. NSCC2009 - **Nordic Steel Construction Conference**. 2009. Malmö, Sweden.

YU, Y.; WEI, B.; YANG, Y.; XUE, Y.; XUE, H.. Experimental study on flexural performance of steel-reinforced concrete slim floor beams. **Advances In Structural Engineering**, [s.l.], v. 22, n. 11, p.2406-2417, 29 abr. 2019. SAGE Publications.