

VITOR DE CASTRO MINHANELI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS PARA
SISTEMAS DE PISO TIPO *SLIM FLOOR* FORMADAS POR PERFIS DE AÇO COM
GRANDES ABERTURAS NA ALMA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M663a
2018

Minhaneli, Vitor de Castro, 1991-
Avaliação do comportamento estrutural de vigas mistas
para sistemas de piso tipo *slim floor* formadas por perfis de aço
com grandes aberturas na alma / Vitor de Castro Minhaneli. –
Viçosa, MG, 2018.
xiii, 145f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.141-145.

1. Vigas. 2. Construção mista. 3. Aço - Estruturas.
4. Engenharia de estruturas. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22 ed. 624.1821

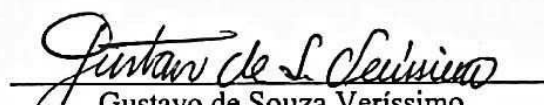
VITOR DE CASTRO MINHANELI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS PARA SISTEMAS DE PISO TIPO *SLIM FLOOR* FORMADAS POR PERFIS DE AÇO COM GRANDES ABERTURAS NA ALMA


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 23 de fevereiro de 2018.


José Lutz Rangel Paes
(Coorientador)


Gustavo de Souza Veríssimo
(Coorientador)


Geraldo Donizetti de Paula


José Carlos Lopes Ribeiro
(Orientador)

Dedico este trabalho aos meus pais, Conceição e Tarcísio, à minha irmã Isabella, e a todos os queridos amigos, familiares e professores que sempre torceram, motivaram e me inspiraram.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Tarcísio e Conceição, e à minha irmã, Isabella, por todo amor, incentivo e companheirismo em todos os momentos. Pelo nível mais sincero de amizade que alguém pode ter.

Ao professor Dr. José Luiz Rangel Paes, pela oportunidade de trabalharmos em equipe e por toda orientação, seja no âmbito do mestrado, da academia, na vida pessoal e profissional. Por toda disposição em ajudar, pelos conselhos e pela parceria.

Ao professor Dr. Gustavo de Souza Veríssimo, agradeço pela coorientação, ensinamentos, oportunidades, experiências transmitidas e confiança depositada. Por todos os conselhos e por ensinar um raulsoarense a andar em São Paulo.

Ao professor Dr. José Carlos Lopes Ribeiro pela contribuição na minha formação acadêmica e por suas importantes contribuições como membro da banca examinadora.

Ao professor Dr. Geraldo Donizetti de Paula por se dispor a ler, avaliar, compor a banca examinadora e contribuir com este trabalho.

Ao engenheiro Me. Mateus Petruski, pela amizade e por todos os ensinamentos sobre simulação numérica e conhecimentos transmitidos, momentos descontraídos e conversas.

Ao engenheiro Me. Leonardo Mesquita, pelo trabalho numérico que proporcionou a realização deste trabalho e também pelos conhecimentos em simulação numérica transmitidos.

Aos amigos do mestrado, Arlan, Alba, Ricardo, Larice, Márcia, Beatryz, Marina, Priscilla, Lorena, Elder, Elisa, agradeço pelos momentos de descontração e incentivo.

À professora Dr.^a Rita de Cássia Alvarenga, pelos ensinamentos durante as disciplinas, que contribuíram para minha formação como engenheiro.

Ao professor Dr. José Maria Franco de Carvalho, agradeço por todas as experiências passadas e conversas que me incentivaram a ingressar no meio acadêmico.

À minha querida academia Wutao KungFu, em especial ao Jessé, Juliana e Valdeli, fundamentais para minha saúde mental, emocional e física durante todos esses anos.

A todos os meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para este momento.

Expresso também minha gratidão para com todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, pelas contribuições na jornada acadêmica.

Finalmente, à CAPES pelo apoio financeiro.

“Clareza interna e quietude externa. Essa é a tranquilidade da pura contemplação. Quando se cala o desejo e a vontade se aquieta, o mundo se manifesta enquanto pura idéia.”

I Ching, O Livro das Mutações

Lista de figuras

Figura 1.1 - Tipologia de um sistema de piso misto convencional.....	2
Figura 1.2 - Tipologia de um sistema de piso misto tipo <i>slim floor</i> (PAES, 2003).	2
Figura 1.3 - Esquema geral do sistema ITECH.....	3
Figura 1.4 - Aspecto de uma viga mista tipo SCSFB, com aberturas circulares na alma.	4
Figura 2.1 - Vigas de <i>slim floor</i> ensaiadas por Ju, Chun e Kim (2009).	10
Figura 2.2 - Viga isolada ensaiada por Ju, Chun e Kim (2009).	10
Figura 2.3 – Viga alveolar usada por Hou (2012).....	11
Figura 2.4 - Composição do perfil assimétrico alveolar.	11
Figura 2.5 - Meios de conexão estudados por Hou (2012) – (a) aberturas preenchidas com concreto, (b) aberturas preenchidas com concreto e barras de aço passantes, (c) aberturas com dutos passantes e (d) aberturas preenchidas com concreto e conectores soldados na alma.	12
Figura 2.6 - Aspecto do modelo de viga ensaiado por Hou (2012).	13
Figura 2.7 - Esquemas de ensaios utilizados por Hou (2012).....	13
Figura 2.8 - Teste de flexão nas vigas mistas de <i>slim floor</i> do sistema CoSFB.....	14
Figura 2.9 - Pinos virtuais de concreto.	15
Figura 2.10 - Características geométricas da seção transversal dos modelos experimentais: (a) SCSFB 1; (b) SCSFB 2; (c) SCSFB 3; (d) SCSFB 4.....	16
Figura 2.11 - Esquema da interface aço-concreto nos modelos desenvolvidos por Paes (2003). ..	17
Figura 2.12 - Modelo de elementos finitos – (a) perfil de aço; (b) laje de concreto e (c) interface aço-concreto.....	18
Figura 2.13 - Diagrama Momento x Flecha para o modelo SCI-300 ASB.	18
Figura 2.14 - Diagrama Momento x Flecha para o modelo experimental 280 ASB 100 ensaiado por Lawson, Mullett e Rackham (1997).	20
Figura 2.15 - Características geométricas de um dos modelos experimentais de viga mista de <i>slim floor</i> que compõem o sistema CoSFB, estudado por Braun, Hechler e Obiala (2014).....	20
Figura 2.16 - Modelo de elementos finitos de uma viga de <i>slim floor</i> do sistema CoSFB.....	21
Figura 2.17 - Malha de elementos do modelo desenvolvido por Limazie e Chen (2016).	23
Figura 2.18 - Diagramas Carga × Flecha obtidos na calibração e validação dos modelos numéricos.....	24
Figura 2.19 - Diagramas Tensão x Deformação para o aço estrutural: (a) Modelo elasto-plástico perfeito; (b) modelo elasto-plástico com encruamento.....	26
Figura 2.20 - Modelo constitutivo para o aço com presença de tensões residuais.....	27
Figura 2.21 - Diagrama Tensão x Deformação para o concreto comprimido apresentado pelo <i>Model Code</i> 2010: (a) diagrama completo; (b) detalhe do trecho inicial.....	27
Figura 2.22 - Diagrama Tensão x Deformação para o concreto comprimido proposto por Pavlovic <i>et al.</i> (2013).....	28
Figura 2.23 - modelo proposto pelo <i>Model Code</i> 2010 e por Hordijk (1992).	30
Figura 2.24 - Força × Deslizamento proposto por Paes (2003) para a interface do tipo S.....	32
Figura 3.1 - Esquema do sistema <i>I-TECH</i>	34
Figura 3.2 - Viga tipo <i>D-Beam</i> produzida pela <i>Girder-Slab Technologies</i> nos Estados Unidos. ..	35
Figura 3.3 - Características geométricas dos modelos ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009): (a) B-C1P15; (b) B-Slim; (c) B-C0P15.....	36
Figura 3.4 - Configuração do ensaio realizado de Ju, Chun e Kim (2009).....	37
Figura 3.5 - Resultados dos modelos B-C1P15, B-Slim e B-C0P15.	38
Figura 3.6 – Esquema geral dos ensaios de flexão de Chen, Limazie e Tan (2015).....	39
Figura 3.7 - Aspecto geral do ensaio de flexão em modelos tipo SCSFB	39
Figura 3.8 - Modelos com abertura circulares na alma (SCSFB1 e SCSFB2).....	40
Figura 3.9 - Modelos com aberturas semicirculares na alma (SCSFB3 e SCSFB4).	40
Figura 3.10 - Características geométricas da seção transversal dos modelos experimentais: (a) SCSFB 1; (b) SCSFB 2; (c) SCSFB 3; (d) SCSFB 4.....	41
Figura 3.11 - Diagrama Carga × Flecha para os modelos de viga mista de <i>slim floor</i> ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015).	43
Figura 3.12 - Modelo geométrico de uma viga tipo <i>D-Beam</i> , utilizada no sistema <i>I-TECH</i>	45
Figura 3.13 - Modelo geométrico da laje mista utilizada no sistema <i>I-TECH</i>	46

Figura 3.14 - Modelo geométrico da armadura da laje para o modelo C1P15.	46
Figura 3.15 - Aspecto geral do modelo geométrico para as vigas mistas do sistema <i>I-TECH</i>	47
Figura 3.16 - Modelo geométrico de uma viga de aço com seção transversal assimétrica, com aberturas circulares na alma, que compõe o sistema SCSFB.	47
Figura 3.17 - Modelo geométrico de uma da laje de concreto usada no sistema SCSFB.	48
Figura 3.18 - Modelo geométrico da armadura da laje para o modelo SCSFB.	48
Figura 3.19 - Aspecto geral do modelo geométrico para as vigas mistas tipo SCSFB.	49
Figura 3.20 - Tipos de elementos finitos utilizados nos modelos.	49
Figura 3.21 - Identificação das regiões para os tipos de elementos finitos usados no sistema <i>I-TECH</i>	50
Figura 3.22 - Identificação das regiões para os tipos de elementos finitos usados viga mista tipo SCSFB.	50
Figura 3.23 - Partições definidas nos modelos de viga mista do sistema <i>I-TECH</i> : (a) partições na laje de concreto; (b) partições na viga de aço.	51
Figura 3.24 - Partições definidas para os modelos de viga mista tipo SCSFB: (a) partições na laje de concreto; (b) partições na viga de aço.	52
Figura 3.25 - Malha de elementos finitos para os modelos de viga mista do sistema <i>I-TECH</i>	52
Figura 3.26 - Malha de elementos finitos para os modelos de viga mista tipo SCSFB.	53
Figura 3.27 - Relação tensão \times deformação para o aço tracionado e comprimido.	54
Figura 3.28 - Representação da curva Tensão (σ_c) \times Deformação (ϵ_c) para o concreto sob compressão uniaxial.	57
Figura 3.29 - Relação Tensão (σ_t) \times Aberturas de fissuras (w) para concreto sob tração uniaxial.	59
Figura 3.30 - Diagrama Dano à compressão uniaxial (D_c) \times Deformação (ϵ_c).	60
Figura 3.31 - Diagrama Dano à tração uniaxial (D_t) \times Abertura de fissuras (w).	61
Figura 3.32 - Distribuição dos elementos de conexão na seção transversal do modelo C1P15.	61
Figura 3.33 - Posição dos elementos de conexão na viga de aço do modelo C1P15.	62
Figura 3.34 - Distribuição dos elementos de conexão na seção transversal do modelo SCSFB1.	62
Figura 3.35 - Posição dos elementos de conexão na viga de aço do modelo SCSFB1.	62
Figura 3.36 - Diagrama força \times deslizamento proposto por Paes (2003) para a interface do tipo S.	63
Figura 3.37 - Interação do tipo <i>embedded</i> entre a armadura e a laje para o modelo C1P15.	64
Figura 3.38 - Regiões com interação tipo <i>Hard Contact</i> no perfil de aço do modelo C1P15.	65
Figura 3.39 - Regiões correspondentes da interação tipo <i>Hard Contact</i> na laje do modelo C1P15.	65
Figura 3.40 - Região com interação tipo <i>tie</i> entre a chapa de carregamento e a laje de concreto.	65
Figura 3.41 - Condição de apoio impedindo deslocamentos verticais, ao longo do eixo y.	66
Figura 3.42 - Condição de simetria em relação ao plano y-z.	66
Figura 3.43 - Condição de simetria em relação ao plano x-y.	67
Figura 3.44 - Região de aplicação do carregamento determinado.	67
Figura 3.45 - Propriedades geométricas do modelo experimental B-C1P15.	68
Figura 3.46 - Configuração do ensaio.	69
Figura 3.47 - Malha de elementos finitos do modelo numérico B-C1P15.	69
Figura 3.48 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre do modelo C1P15.	70
Figura 3.49 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.	71
Figura 3.50 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.	71
Figura 3.51 - Detalhe do deslizamento relativo entre o aço e o concreto.	72
Figura 3.52 - Observação da fissuração no modelo experimental (JU, CHUN e KIM, 2009) e no numérico.	72
Figura 3.53- Comparação entre o modelo numérico com interação completa e o de referência da viga mista do sistema <i>I-TECH</i>	73
Figura 3.54 - Características do modelo experimental B-Slim analisado por Ju, Chun e Kim (2009).	76
Figura 3.55 - Modelo numérico B-Slim.	77
Figura 3.56 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo B-Slim.	77
Figura 3.57 - Distribuições de tensões normais no aço para modelo B-Slim, em MPa.	78

Figura 3.58 - Distribuição de tensões normais no concreto para modelo B-Slim, em MPa.	78
Figura 3.59 - Padrão de fissuração: (a) modelo experimental; (b) modelo numérico.....	79
Figura 3.60 - Características do modelo experimental C0P15 analisado por Ju, Chun e Kim (2009).....	81
Figura 3.61 - Modelo numérico em elementos finitos da viga C0P15.....	81
Figura 3.62 - Diagrama Carga × Flecha no centro do vão livre para o modelo C0P15.....	82
Figura 3.63 - Distribuições de tensões normais no aço no modelo C0P15, em MPa.	82
Figura 3.64 - Análise experimental do modelo C0P15.....	83
Figura 3.65 - Propriedades geométricas do modelo experimental SCSFB 1.....	84
Figura 3.66 - Configuração do ensaio das vigas ensaiadas por Chen, Limazie e Tan (2015).....	85
Figura 3.67 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 1.....	85
Figura 3.68 - Diagrama Carga × Flecha no centro do vão livre do modelo SCSFB 1.....	86
Figura 3.69 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.	86
Figura 3.70 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.	87
Figura 3.71 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.....	87
Figura 3.72 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.	88
Figura 3.73 - Esmagamento do concreto observado no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b).....	89
Figura 3.74 - Fissuração do concreto no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b). .	90
Figura 3.75 - Comparação entre o modelo de viga mista numérico com interação completa e o de referência tipo SCSFB.	91
Figura 3.76 - Características do modelo experimental SCSFB 2 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015).....	94
Figura 3.77 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 2.....	94
Figura 3.78 - Diagrama Carga × Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB2.....	95
Figura 3.79 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.	95
Figura 3.80 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.	96
Figura 3.81 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.....	96
Figura 3.82 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.	97
Figura 3.83 - Características do modelo experimental SCSFB 3 analisado por Chen, Limazie e Tan (2015).....	99
Figura 3.84 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 3.....	99
Figura 3.85 - Diagrama Carga × Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB3.....	100
Figura 3.86 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.	100
Figura 3.87 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.	101
Figura 3.88 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.....	101
Figura 3.89 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.	102
Figura 3.90 - Fissuração do concreto no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b).103	
Figura 3.91 - Características do modelo experimental SCSFB 4 analisado por Chen, Limazie e Tan (2015).....	104
Figura 3.92 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 4.....	105
Figura 3.93 - Diagrama Carga × Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB 4.....	106
Figura 3.94 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.	106
Figura 3.95 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.	107
Figura 3.96 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.....	107
Figura 3.97 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.	108
Figura 3.98 - Dano à compressão sofrido pelo concreto no modelo SCSFB 4.....	109
Figura 4.1 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do diâmetro da barra passante nas aberturas.....	114
Figura 4.2 - Diagramas Carga × Flecha para o estudo de variação dos meios de conexão.	117
Figura 4.3 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.....	121
Figura 4.4 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação da área das aberturas.	124
Figura 4.5 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do diâmetro das aberturas....	127
Figura 4.6 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas circulares.....	130
Figura 4.7 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação da posição das aberturas.....	132

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades dos aços ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009)	37
Tabela 3.2 - Características mecânicas dos aços das vigas e das armaduras utilizadas nos modelos experimentais.	42
Tabela 3.3 - Características mecânicas dos concretos utilizados nos modelos experimentais.....	42
Tabela 3.4 - Cargas medidas no momento do escoamento e do colapso dos modelos de vigas mistas de <i>slim floor</i> ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015).	43
Tabela 3.5 - Propriedades do aço com imperfeições.....	55
Tabela 3.6 - Valores dos módulos de elasticidade do concreto para os modelos criados.	56
Tabela 3.7 - Parâmetros plásticos do CDP para os modelos de vigas mistas do sistema <i>I-TECH</i>	57
Tabela 3.8 - Parâmetros do comportamento do concreto sob compressão para as vigas mistas do sistema <i>I-TECH</i>	58
Tabela 3.9 - Parâmetros do comportamento do concreto sob compressão para as vigas mistas tipo SCSFB.	58
Tabela 3.10 - Parâmetros do comportamento do concreto sob tração para as vigas mistas do sistema <i>I-TECH</i>	60
Tabela 3.11 - Parâmetros do comportamento do concreto sob tração para as vigas mistas tipo SCSFB.	60
Tabela 4.1 - Modelos considerados no estudo de variação dos diâmetros das barras de aço. ...	113
Tabela 4.2 - Modelos considerados no estudo de variação dos meios de conexão da viga mista de <i>slim floor</i>	116
Tabela 4.3 - Carga Máxima obtida na avaliação das formas de ativação do comportamento misto.	118
Tabela 4.4 - Modelos considerados no estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.	120
Tabela 4.5 - Carga Máxima obtida na avaliação do espaçamento entre as aberturas.	122
Tabela 4.6 - Modelos considerados no estudo de variação da área das aberturas.....	124
Tabela 4.7 - Carga Máxima obtida na avaliação da variação da área das aberturas.	125
Tabela 4.8 - Modelos considerados no estudo de variação do diâmetro das aberturas.....	127
Tabela 4.9 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para estudo de variação do diâmetro.	128
Tabela 4.10 - Modelos considerados no estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.....	129
Tabela 4.11 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para análise do espaçamento entre aberturas.	130
Tabela 4.12 - Modelos considerados no estudo de variação da posição das aberturas.	132
Tabela 4.13 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para análise do posicionamento das aberturas.....	133

Resumo

MINHANELI, Vitor de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Avaliação do comportamento estrutural de vigas mistas para sistemas de piso *slim floor* formadas por perfis de aço com grandes aberturas na alma.** Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro. Coorientadores: José Luiz Rangel Paes e Gustavo de Souza Veríssimo.

As vigas mistas de *slim floor* fazem parte de um tipo de sistema de piso que possui como principal característica a viga de aço embutida na laje de concreto, resultando em uma redução na altura total do piso, quando comparado a sistemas mistos convencionais. Nos sistemas *slim floor*, existem múltiplas interfaces de contato entre aço e concreto e diversos meios para ativar o comportamento misto entre os elementos. Particularmente, nos sistemas que utilizam vigas de aço com aberturas na alma, o comportamento estrutural é normalmente governado pelos meios de conexões de cisalhamento presentes no concreto confinado nas aberturas, combinado com uma barra de aço passante, mais a aderência que ocorre nas interfaces entre os elementos de aço e concreto. Neste trabalho, os meios de conexão utilizados nos estudos realizados se baseiam no sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma, e no sistema SCSFB, com aberturas circulares na alma. Assim, avaliou-se o comportamento estrutural à flexão de vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma a partir de modelos de elementos finitos que foram criados com o auxílio do programa computacional Abaqus, e da metodologia proposta por Paes (2003). Os modelos numéricos foram validados de acordo com os experimentos de vigas mistas de *slim floor* feitos por Ju, Chun e Kim (2009), com aberturas trapezoidais, e Chen, Limazie e Tan (2015), com aberturas circulares. A comparação entre as análises indicou boa concordância com os resultados experimentais. Portanto, os modelos numéricos são capazes de representar o comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor*. Após a validação, um extenso estudo de variação de parâmetros foi conduzido para investigar a influência que os diversos parâmetros, relacionados aos meios de conexão, possuem no comportamento estrutural da viga mista de *slim floor* com aberturas na alma. Com esses estudos, constatou-se que os meios de conexão, em especial as aberturas na alma, exercem significativa influência na ativação do comportamento misto entre os elementos da viga mista de *slim floor*, e constituem características de projeto relevantes ao desempenho do sistema de piso.

Abstract

MINHANELI, Vitor de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Structural behavior of composite slim floor beams with large web openings.** Adviser: José Carlos Lopes Ribeiro. Co-Advisers: José Luiz Rangel Paes and Gustavo de Souza Veríssimo.

Composite floor systems with slim floor beams mainly consist of a steel profile encased in the concrete slab, thus reducing the overall floor depth compared to conventional composite systems. In these systems, there are several shear transfer mechanisms at the contact interfaces between the concrete slab and the encased steel beam to achieve a composite behavior of the materials. In slim floor systems with openings in the web, the shear connection mechanisms consist of concrete dowels passing through web openings with embedded steel reinforcing tie-bars and the bond strength at the contact interfaces between the steel beam and concrete slab. In the design of these systems the connection strength is a critical factor. In this research, the chosen slim floor beams were based on the I-TECH system, with trapezoidal web openings, and the SCSFB system, with circular web openings. Finite element models were created to evaluate the flexural structural behavior of the slim floor beams with web openings. The numerical models were calibrated and validated against experimental tests. The comparison indicated that the analyses results of the finite element models agree with the experimental tests, and are able to predict the structural behavior of the composite slim floor beams. An extensive parametric study was conducted to investigate the influences of the parameters related to the shear transfer mechanisms on the structural behavior of slim floor beams with web openings. Through the studies it was found that shear connections, especially the web openings of the steel profile, have a significant influence on the composite behavior between the elements of the slim floor beams and are relevant design features to the performance of the entire floor system.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Justificativa e relevância do tema.....	5
1.3. Estrutura da dissertação	6
Capítulo 2 – Fundamentação teórica	8
2.1. Considerações iniciais	8
2.2. Estudos experimentais	9
2.2.1. Estudo realizado por Ju, Chun e Kim (2009).....	9
2.2.2. Estudo realizado por Hou (2012).....	11
2.2.3. Estudo realizado por Braun, Hechler e Obiala (2014).....	14
2.2.4. Estudos realizados por Chen, Limazie e Tan (2015).....	15
2.3. Estudos numéricos.....	16
2.3.1. Estudos numéricos realizados por Paes (2003).....	16
2.3.2. Estudos numéricos realizados por Ramos (2010).....	17
2.3.3. Estudos numéricos realizados por Mesquita (2016).....	19
2.3.4. Estudos numéricos realizados por Limazie e Chen (2016).....	22
2.4. Aspectos relevantes da simulação numérica	25
2.4.1. Comportamento elasto-plástico do aço	25
2.4.2. Comportamento do concreto submetido à compressão uniaxial.....	27
2.4.3. Comportamento do concreto submetido à tração uniaxial.....	29
2.4.4. Dano do concreto à compressão e à tração	31
2.4.5. Interface aço-concreto	31
Capítulo 3 – Modelos numéricos.....	33
3.1. Considerações preliminares.....	33
3.2. Descrição dos modelos de referência	34

3.2.1.	Modelos de referência ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009)	34
3.2.2.	Modelos de referência ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015).....	39
3.3.	Definição da geometria do modelo de elementos finitos	45
3.3.1.	Viga mista do sistema <i>I-TECH</i> – com aberturas trapezoidais.....	45
3.3.2.	Viga mista tipo SCSFB – com aberturas circulares	47
3.4.	Malha de elementos finitos.....	49
3.4.1.	Tipos de elementos utilizados	49
3.4.2.	Partições do modelo e geração da malha	51
3.4.3.	Estudo de refinamento de malha	53
3.5.	Características dos materiais	53
3.5.1.	Modelo Constitutivo para o aço do perfil	54
3.5.2.	Modelo constitutivo para o concreto.....	55
3.5.3.	Variáveis de dano para o concreto comprimido e tracionado	60
3.6.	Aderência na interface aço × concreto	61
3.7.	Condições de contorno e carregamento.....	63
3.7.1.	Interações presentes nos modelos numéricos.....	64
3.7.2.	Condições de apoio e de simetria.....	66
3.8.	Carregamento	67
3.9.	Estudos de validação	67
3.9.1.	Estudo 1 – Modelo C1P15	68
3.9.2.	Estudo 2 – Modelo B-Slim.....	76
3.9.3.	Estudo 3 – Modelo C0P15	80
3.9.4.	Estudo 4 – Modelo SCSFB 1	84
3.9.5.	Estudo 5 – Modelo SCSFB 2	93
3.9.6.	Estudo 6 – Modelo SCSFB 3	98
3.9.7.	Estudo 7 – Modelo SCSFB 4	104

Capítulo 4 – Estudos de variação de parâmetros.....	111
4.1. Considerações iniciais	111
4.2. Variação de parâmetros em vigas mistas de <i>slim floor</i> com aberturas trapezoidais 112	
4.2.1. Diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas.....	112
4.2.2. Formas de ativação do comportamento misto.....	115
4.2.3. Espaçamento entre as aberturas	119
4.2.4. Variação da área da abertura	123
4.3. Variação de parâmetros em vigas mistas de <i>slim floor</i> com aberturas circulares	126
4.3.1. Diâmetro das aberturas.....	126
4.3.2. Espaçamento entre as aberturas	129
4.3.3. Posição das aberturas	131
Capítulo 5 - Conclusões	135
5.1. Considerações finais.....	135
5.2. Conclusões específicas	137
5.2.1. Variação de parâmetros em vigas mistas de <i>slim floor</i> com aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço.....	137
5.2.2. Variação de parâmetros em vigas mistas de <i>slim floor</i> com aberturas circulares na alma do perfil de aço.....	139
5.3. Sugestões para trabalhos futuros	140
Referências bibliográficas	141

Capítulo 1

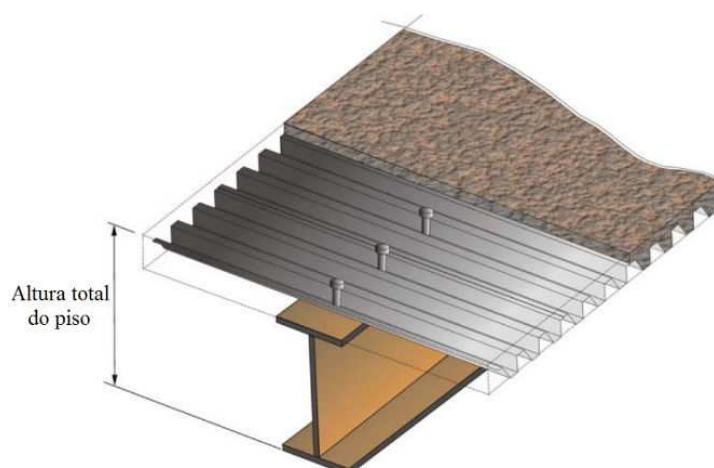
Introdução

Os sistemas de pisos mistos de aço e concreto têm se destacado cada vez mais no âmbito da construção civil nacional e internacional. Graças à interação entre os materiais, diversas vantagens são proporcionadas aos sistemas construtivos mistos, o que tem contribuído com a difusão do seu uso na construção de edifícios e pontes.

Para os sistemas de piso, o bom comportamento do concreto à compressão e a boa resistência do aço quando submetido a esforços de tração levaram ao desenvolvimento de soluções construtivas combinando esses dois materiais. Para que seja possível obter um elemento estrutural misto é necessário promover a interação entre aço e concreto, o que se consegue com diferentes meios de conexão.

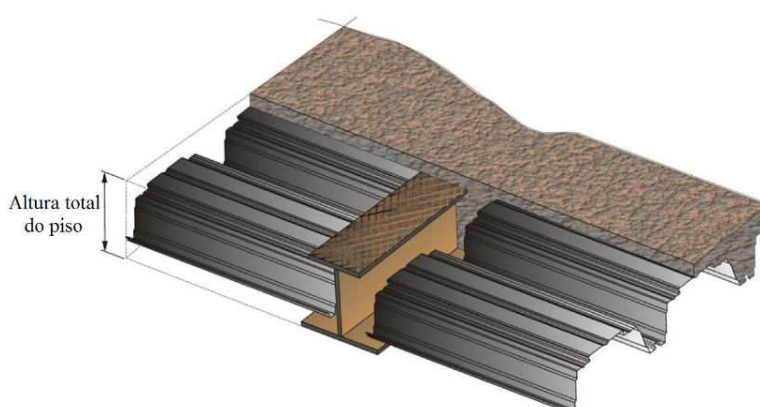
Os pisos mistos convencionais (Figura 1.1) são formados por vigas de aço de alma cheia e lajes apoiadas sobre a mesa superior das vigas. Nesses sistemas, normalmente utilizam-se lajes de concreto ou lajes mistas com forma de aço incorporada (*Steel Deck*). Deste modo, a altura total do piso é a soma da altura do perfil com a altura da laje de concreto e o comportamento misto destes sistemas é ativado por meio de conectores de cisalhamento dispostos entre a viga e a laje.

Figura 1.1 - Tipologia de um sistema de piso misto convencional.



Fonte: Paes (2003)

Ao longo do tempo, outros sistemas de pisos mistos de aço e concreto foram apresentados no cenário internacional da construção civil, com destaque para os sistemas de piso misto tipo *slim floor*. O termo *slim floor* é utilizado para descrever um sistema de piso que se caracteriza fundamentalmente por apresentar uma viga de aço embutida na altura total da laje de concreto, resultando em uma aparência plana (Figura 1.2). Devido à sua aparência e suas características construtivas positivas, os sistemas *slim floor* têm sido utilizados em diversos projetos pelo mundo, como construções com fins comerciais e residenciais, hospitais e escolas.

Figura 1.2 - Tipologia de um sistema de piso misto tipo *slim floor* (PAES, 2003).

Fonte: Paes (2003).

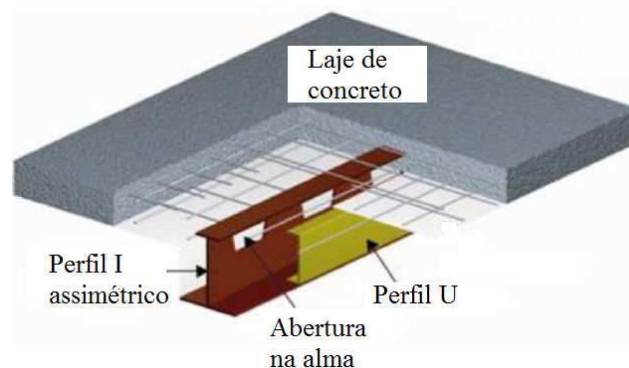
Por permitir uma maior flexibilidade construtiva ao possibilitar a obtenção de um teto liso ou com poucas descontinuidades, os sistemas *slim floor* possuem outras vantagens. Dentre essas vantagens, podem-se destacar as seguintes: possibilitam uma redução na altura total da edificação (aspecto significativamente importante em centros urbanos);

devido ao embutimento da viga de aço na altura total da laje, o sistema proporciona certa capacidade estrutural na região de momento positivo para que seu efeito seja menos nocivo; dispensam o uso de conectores de cisalhamento como nos pisos mistos convencionais; têm a capacidade de vencer grandes vãos sem o uso de vigas secundárias; apresentam resistência intrínseca ao fogo, promovida pelo revestimento da laje de concreto; além de outras vantagens já oferecidas pelos sistemas de piso misto tradicionais.

No contexto das estruturas mistas de aço e concreto, um fator relevante da solução utilizada nos sistemas de piso misto tipo *slim floor* é a forma com que o comportamento misto entre esses dois materiais é ativado. Nos sistemas convencionais o comportamento misto é ativado por conectores de cisalhamento dispostos na mesa superior do perfil de aço. Já nos sistemas *slim floor*, existem múltiplas interfaces de contato entre aço e concreto e diversas formas de ativar o comportamento misto. Dentre os meios de conexão utilizados para ativar o comportamento misto pode-se destacar os conectores de cisalhamento, as pequenas nervuras introduzidas sobre a mesa superior do perfil de aço, as barras de aço passantes através de furos na alma do perfil e as aberturas na alma do perfil, em associação com barras de aço passantes através da mesma.

Ao longo dos anos, vários sistemas *slim floor* foram propostos, com diferentes meios de conexão para transferência de esforços entre aço e concreto. O presente trabalho se centra nos sistemas *slim floor* onde os meios de conexão consistem basicamente em grandes aberturas na alma do perfil de aço, em associação com barras de aço passantes através da mesma, como utilizado nos sistemas *I-TECH* (inovador, técnico, econômico e convenientemente híbrido) (Figura 1.3) e no sistema SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*) (Figura 1.4).

Figura 1.3 - Esquema geral do sistema ITECH.



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Figura 1.4 - Aspecto de uma viga mista tipo SCSFB, com aberturas circulares na alma.



Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

O sistema *I-TECH* foi desenvolvido na Coreia do Sul e utiliza vigas de aço do tipo *D-Beam*, com grandes aberturas trapezoidais na alma, que atuam como meio de conexão. Já o sistema SCSFB, em desenvolvimento na China nos dias atuais, utiliza grandes aberturas circulares na alma do perfil de aço como meio de conexão para ativar o comportamento misto. Esses sistemas, que ainda se encontram em desenvolvimento, são exemplos da busca de estratégias e meios de conexão que proporcionem maior eficiência que os dos sistemas de piso misto convencionais já consolidados no cenário nacional e internacional.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural de vigas mistas para sistemas de piso misto tipo *slim floor* formadas por perfis de aço com grandes aberturas na alma.

Para alcançar este objetivo principal, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar as possibilidades de composição de vigas mistas de *slim floor* formadas por perfis de aço com grandes aberturas na alma;
- avaliar estratégias para simulação numérica dos mecanismos de ativação do comportamento misto em vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma;
- elaborar modelos de elementos finitos para simulação do comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas na alma;

- validar os modelos numéricos desenvolvidos, comparando seus resultados com resultados experimentais obtidos por Ju, Chun e Kim (2009) e Chen, Limazie e Tan (2015);
- avaliar a influência de parâmetros relativos aos meios de conexão adotados no comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas trapezoidais ou circulares na alma do perfil de aço.

1.2. Justificativa e relevância do tema

O sistema de piso misto composto por laje mista com fôrma de aço incorporada ainda é a tipologia mais comumente difundida no âmbito das construções mistas de aço-concreto. Apesar do desenvolvimento experimentado pelos sistemas *slim floor* em várias regiões do mundo, especialmente na Europa, seu uso limitado é em alguns países devido à falta de especificações de projeto e procedimentos práticos de análise. Seu emprego no Brasil, por exemplo, é praticamente inexistente.

Para composição de um sistema de piso misto tipo *slim floor* pode-se utilizar diversos tipos de perfis de aço e lajes de concreto para ativar o comportamento misto entre aço e concreto. Ao longo dos últimos anos foram realizadas diversas pesquisas com o objetivo de desenvolver novas tipologias de lajes e vigas para compor os sistemas *slim floor* (Kuhlmann, 2012). Estas pesquisas resultaram nas vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma e contribuíram para que os sistemas de piso misto tipo *slim floor* atingissem vãos cada vez maiores.

O principal fator que contribuiu para essa evolução na eficiência do comportamento estrutural do *slim floor* foi o desenvolvimento de novas estratégias para transferências do fluxo de cisalhamento entre aço e concreto. Os meios de conexão, como aberturas feitas no perfil de aço, barras de aço passantes através destas aberturas e aderência entre aço e concreto, permitiram às vigas mistas de *slim floor* atingir diferentes graus de interação. Porém, os sistemas *slim floor* que usam de aberturas na alma como meio de conexão, quando comparados com os sistemas de piso misto convencionais e com os sistemas *slim floor* que não usam aberturas na alma, ainda necessitam de mais estudos para melhor entendimento do seu comportamento estrutural.

O bom entendimento do comportamento estrutural dos sistemas *slim floor* é essencial para consolidação desses sistemas e disseminação do seu uso nos contextos nacional e internacional. A simulação numérica é uma ferramenta essencial para avaliação do comportamento estrutural desses sistemas, com um destaque especial para a consideração do comportamento misto.

Portanto, este trabalho tem a intenção de contribuir com o estado do conhecimento atual sobre os sistemas de piso misto do tipo *slim floor* com grandes aberturas na alma. Por meio da investigação sobre o comportamento estrutural desses sistemas, busca-se também ampliar o interesse pelo uso dos sistemas *slim floor* no cenário nacional. Por fim, este trabalho também tem o intuito de contribuir com a formação de profissionais capazes de desenvolver o projeto desses sistemas.

1.3. Estrutura da dissertação

De forma a apresentar o trabalho desenvolvido, este documento divide-se em cinco capítulos, nos quais se descrevem as etapas do estudo realizado.

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução ao tema das vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma, os objetivos propostos no trabalho, a justificativa e relevância do tema e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, apresenta-se uma visão geral sobre sistemas *slim floor* desenvolvidos por outros autores, abrangendo uma contextualização histórica, tipologias construtivas e vantagens destes sistemas. Em sequência, tem-se uma revisão de literatura sobre os estudos experimentais com vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma. Apresentam-se também estudos numéricos sobre vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma e estratégias de simulação do comportamento misto desenvolvido em diferentes tipos de interfaces aço-concreto. Por fim, são tratados os aspectos relevantes para a simulação numérica dessas vigas com auxílio do programa computacional Abaqus.

No Capítulo 3 -Modelos numéricos, são apresentados os modelos de referência utilizados como base para desenvolvimento dos modelos de elementos finitos, a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos modelos numéricos e os estudos de validação destes modelos.

No Capítulo 4 - Estudos de variação de parâmetros, são realizados estudos para avaliar a influência da variação de algumas características geométricas sobre o comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas na alma. Para esses estudos considera-se um modelo de referência que compõe o sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma, e um modelo do sistema SCSFB, com grandes aberturas circulares na alma.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais e específicas obtidas a partir dos estudos realizados e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

2.1.Considerações iniciais

Neste Capítulo apresenta-se uma síntese dos trabalhos identificados no âmbito nacional e internacional que tratam dos sistemas de piso misto tipo *slim floor*, com ênfase naqueles em que são utilizados perfis com grandes aberturas na alma. São apresentados estudos experimentais, estudos numéricos e considerações sobre a simulação numérica do comportamento estrutural dos sistemas *slim floor* desenvolvidos por outros autores.

Para que seja possível compreender o atual estado de desenvolvimento dos sistemas *slim floor*, é necessário conhecer sua evolução histórica, o que pode ser visto em trabalhos como Lawson, Owens e Mullett(1992), Mullett (1992), Schleich (1997), Bailey (1999), Leskelä e Hopia (2000), Paes (2003), Barros (2011), Kuhlmann (2012), Mesquita (2016), dentre outros.

As vigas mistas de *slim floor* formadas por perfis de aço com grandes aberturas na alma representam a tipologia mais recente utilizada nos sistemas de piso misto tipo *slim floor* no âmbito internacional. De maneira sintética, nessas vigas tira-se proveito das grandes aberturas na alma do perfil para ativar o comportamento misto, abrindo-se grandes possibilidades de melhorar o grau de interação entre aço e concreto.

2.2. Estudos experimentais

No âmbito das vigas mistas de *slim floor* formadas por perfis de aço com grandes aberturas na alma podem-se destacar quatro estudos experimentais recentes desenvolvidos no contexto internacional:

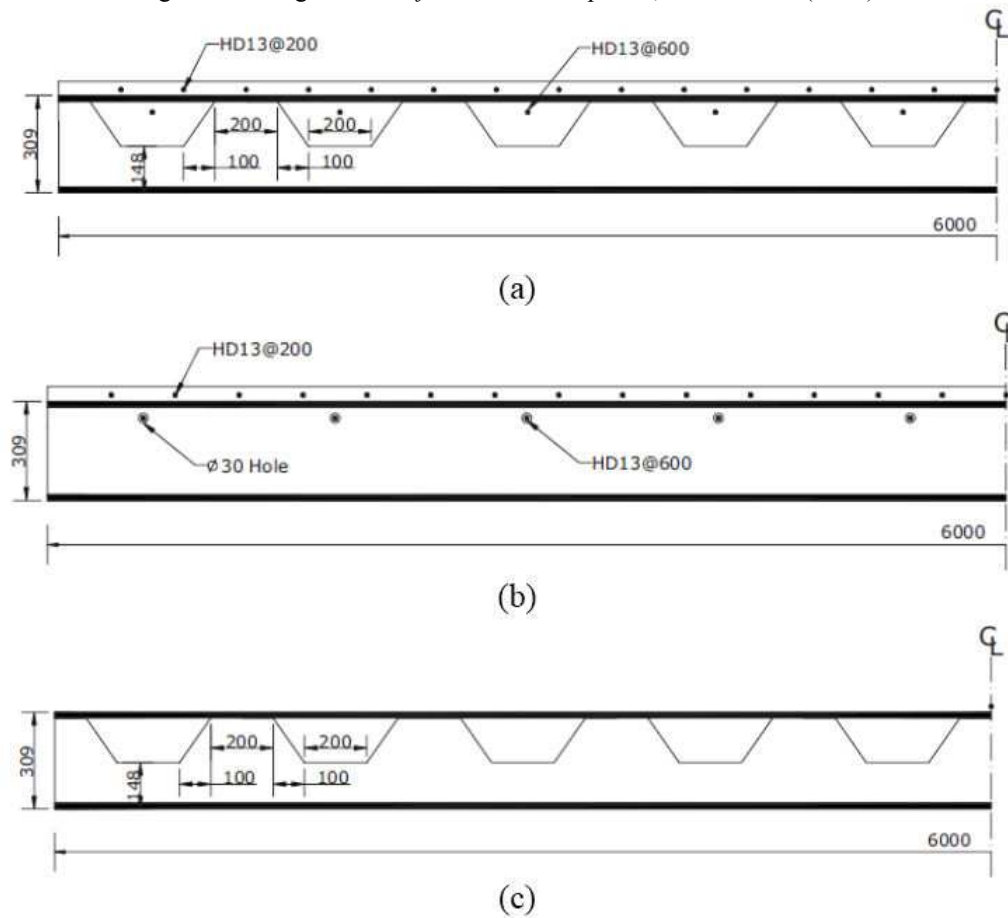
- Ju, Chun e Kim (2009) - vigas mistas de *slim floor* que compõem o sistema *I-TECH*, composto por vigas de aço tipo *D-Beam*, com aberturas trapezoidais na alma, desenvolvido na Coreia do Sul;
- Hou (2012) - vigas mistas de *slim floor* que compõem o sistema USFB (*Ultra Shallow Floor Beam*), composto a partir de perfis alveolares de aço;
- Braun, Hechler e Obiala (2014) - vigas mistas de *slim floor* que compõem o CoSFB (*Composite Slim floor Beam*), com aberturas circulares na alma do perfil de aço;
- Chen, Limazie e Tan (2015) - vigas mistas de *slim floor* que compõem o sistema SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), com grandes aberturas circulares na alma.

2.2.1. Estudo realizado por Ju, Chun e Kim (2009)

Ju, Chun e Kim (2009) desenvolveram uma viga mista de *slim floor* com aberturas na alma, seção transversal assimétrica e sem conectores de cisalhamento (Figura 1.3). Neste caso, o comportamento misto foi obtido através da aderência entre o aço e o concreto, do confinamento do concreto na região da abertura na alma e de armaduras passantes pela alma.

Nesse estudo, Ju, Chun e Kim (2009) avaliaram o comportamento à flexão da viga mista de *slim floor* através do ensaio de flexão simples. Para isso, utilizaram três modelos: o primeiro com aberturas na alma e armaduras passantes (Figura 2.1a) denominado B-C1P15, o segundo somente com armaduras passantes pela alma (Figura 2.1b) denominado B-Slim, e o terceiro somente com aberturas na alma e sem a laje de concreto (Figura 2.1.c) denominado B-C0P15.

Figura 2.1 - Vigas de *slim floor* ensaiadas por Ju, Chun e Kim (2009).



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Além de verificar o comportamento das vigas mistas de *slim floor*, os autores avaliaram também o comportamento da viga de aço isolada, visando simular o comportamento da viga durante a etapa construtiva (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Viga isolada ensaiada por Ju, Chun e Kim (2009).



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Com base nesse estudo, Ju, Chun e Kim (2009) verificaram que a viga mista de *slim floor* proposta apresentou bom comportamento misto. Constatou-se também que no ensaio de

flexão os modelos com armadura passante suportaram um carregamento da ordem de quatro vezes o carregamento alcançado para o modelo da viga de aço isolada (modelo B-COP15 da Figura 2.1c).

2.2.2. Estudo realizado por Huo (2012)

Huo (2012) investigou o mecanismo de transferência de cisalhamento longitudinal em vigas mistas de *slim floor*. Nessa pesquisa, o autor ensaiou uma viga mista de *slim floor* com perfil de aço alveolar (Figura 2.3), que compõe o sistema *Ultra Shallow Floor Beam* (USFB).

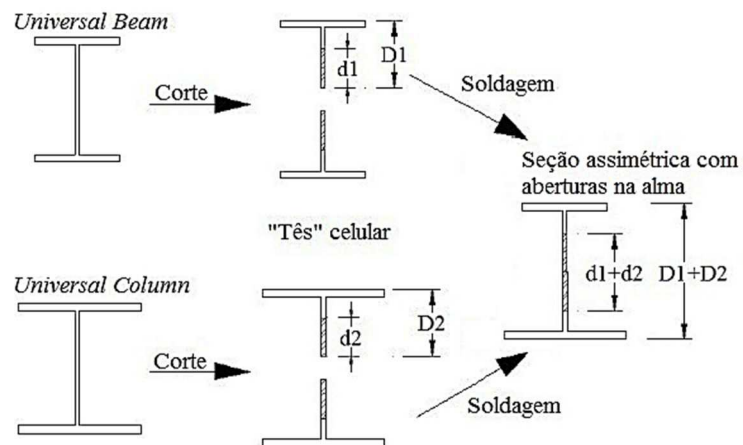
Figura 2.3 – Viga alveolar usada por Hou (2012).



Fonte: Hou (2012).

Huo (2012) testou quatro meios de conexão para vigas mistas de *slim floor* USFB. As amostras foram fabricadas a partir de um perfil assimétrico (Figura 2.4) integrado a uma laje de concreto moldada no local.

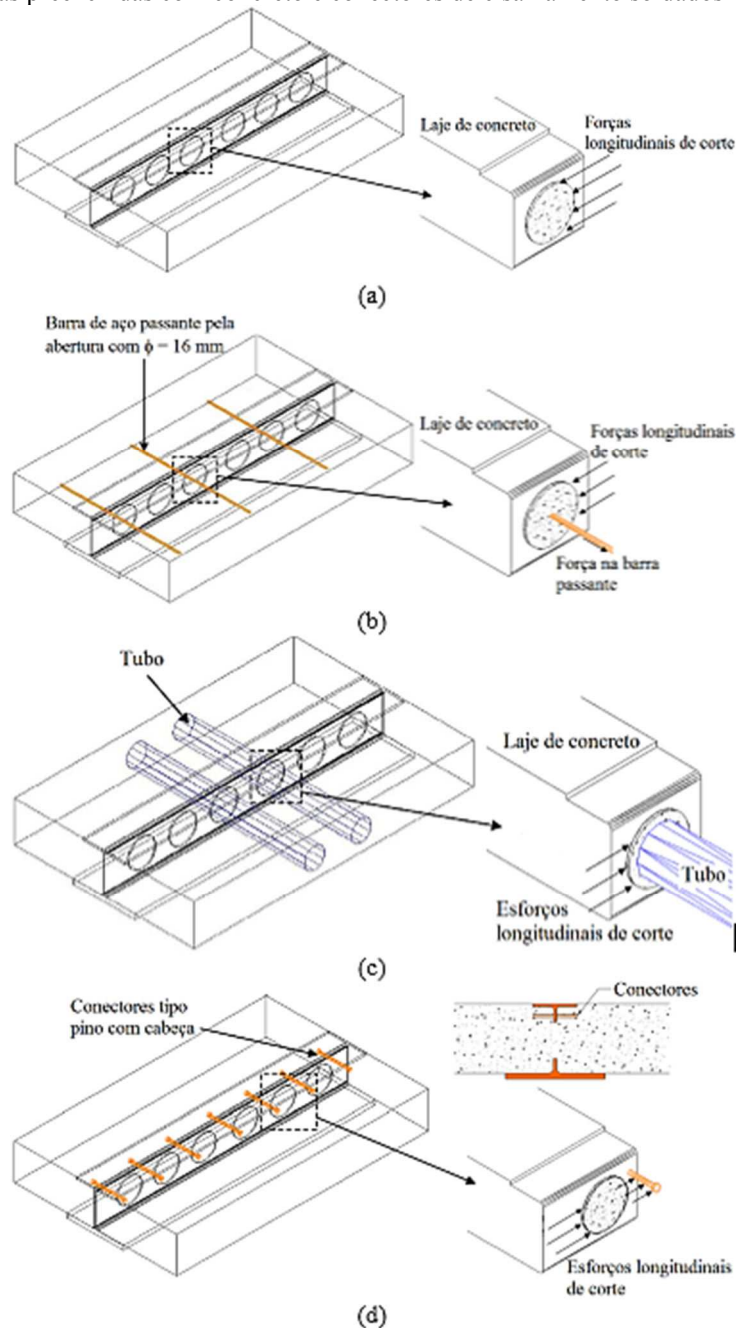
Figura 2.4 - Composição do perfil assimétrico alveolar.



Fonte: Hou (2012).

Para avaliar os meios de conexão entre aço e concreto foram feitos 24 ensaios *push-out*: seis modelos com aberturas preenchidas com concreto, seis com aberturas preenchidas com concreto e barras de aço passantes, seis modelos com aberturas e dutos passantes e seis modelos com aberturas preenchidas com concreto e conectores de cisalhamento soldados na alma do perfil (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Meios de conexão estudados por Huo (2012) – (a) aberturas preenchidas com concreto, (b) aberturas preenchidas com concreto e barras de aço passantes, (c) aberturas com dutos passantes e (d) aberturas preenchidas com concreto e conectores de cisalhamento soldados na alma do perfil.



Fonte: Adaptado de Huo (2012).

Além de avaliar os meios de conexão entre aço e concreto por meio de ensaios *push-out*, Huo (2012) realizou um ensaio de flexão em uma viga mista com aberturas preenchidas com concreto e barras de aço passantes através da alma (Figura 2.6).

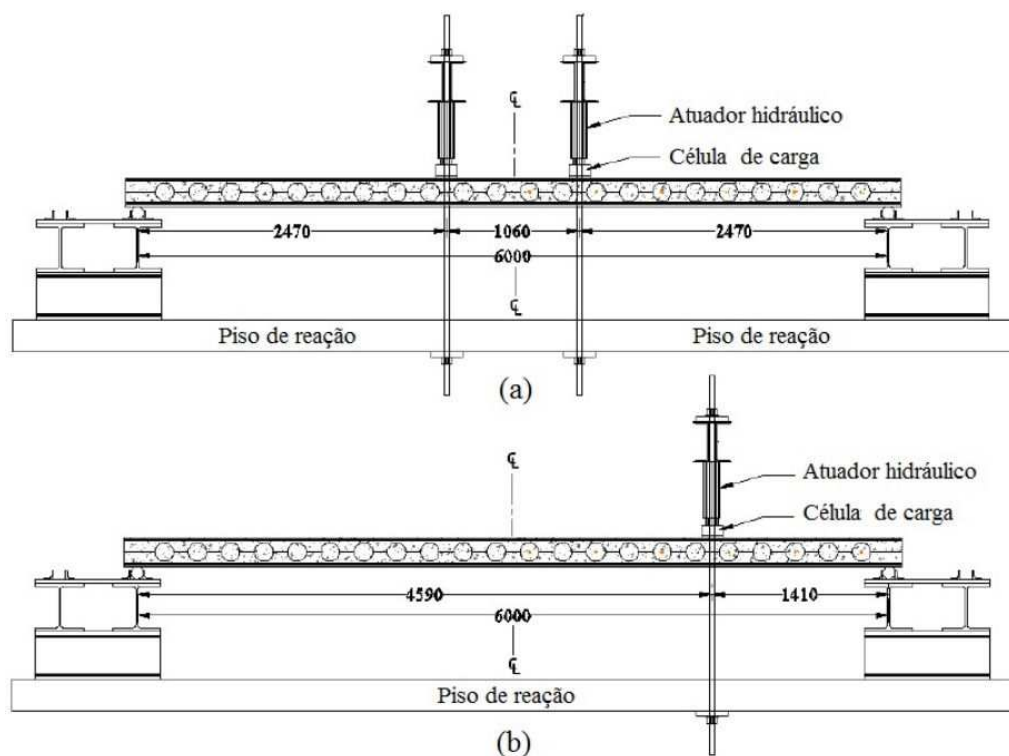
Figura 2.6 - Aspecto do modelo de viga ensaiado por Huo (2012).



Fonte: Huo (2012).

Este ensaio foi realizado em duas etapas. Na primeira, a viga foi solicitada até a laje apresentar as primeiras fissuras (Figura 2.7-a). Na segunda, a viga foi solicitada até o colapso para as condições mostradas (Figura 2.7-b).

Figura 2.7 - Esquemas de ensaios utilizados por Huo (2012).



Fonte: Huo (2012).

2.2.3. Estudo realizado por Braun, Hechler e Obiala (2014)

Na Universidade de Stuttgart, na Alemanha, o sistema *slim floor Composite Slim-Floor Beam* (CoSFB) começou a ser desenvolvido em 2009, em parceria com a ArcelorMittal. Para avaliar o desempenho deste sistema, Braun, Hechler e Obiala (2014) realizaram uma campanha experimental para avaliar o comportamento à flexão de quatro vigas mistas de *slim floor* do tipo CoSFB (Figura 2.8).

As vigas mistas de *slim floor* foram fabricadas a partir de um perfil do tipo HEM 220 e uma laje mista formada por painéis pré-fabricados e concreto moldado no local.

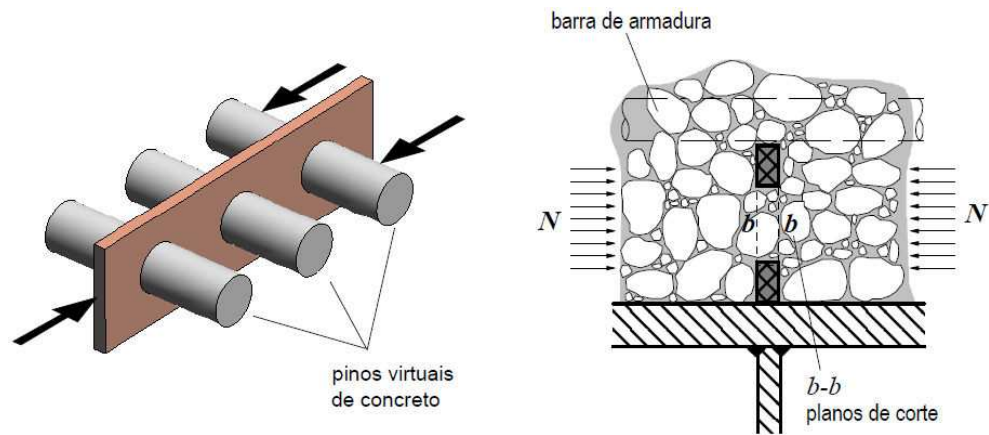
Figura 2.8 - Teste de flexão nas vigas mistas de *slim floor* do sistema CoSFB



Fonte: Braun, Hechler e Obiala (2014).

Neste sistema, o comportamento misto foi ativado por meio de pequenas aberturas circulares na alma do perfil preenchidas com concreto, de barras de aço passando pelas aberturas na alma e da aderência entre aço e concreto. O meio de conexão utilizado neste sistema apresenta um comportamento similar ao conector *Perfobond*, usado nas vigas mistas tradicionais. Segundo Veríssimo (2007), nos conectores *Perfobond*, o concreto nas aberturas forma pinos virtuais com dois planos de corte, que proporcionam resistência ao cisalhamento na direção longitudinal (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Pinos virtuais de concreto.



Fonte: Verissimo (2007).

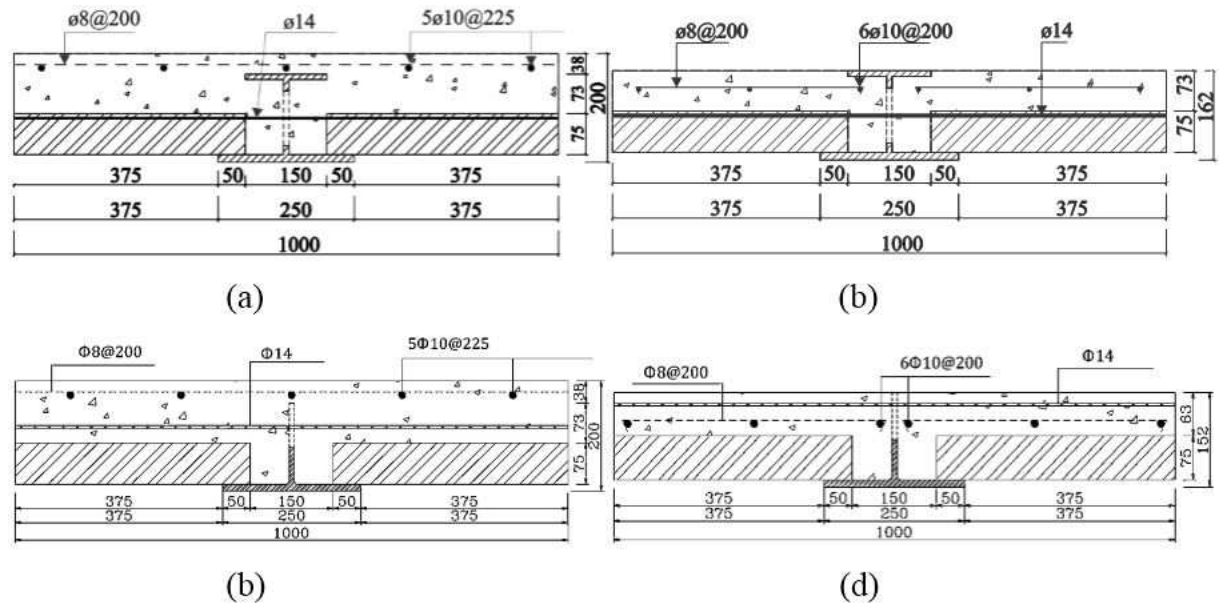
2.2.4. Estudos realizados por Chen, Limazie e Tan (2015)

O estudo experimental realizado por Chen, Limazie e Tan (2015) teve como objetivo investigar o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas circulares na alma (Figura 1.4). Para isso, foram propostos quatro modelos experimentais em escala real de vigas mistas que compõem o sistema SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), a fim de avaliar a comportamento à flexão e a capacidade de transferência de esforços de cisalhamento longitudinais com os meios de conexão adotados.

Os modelos de viga utilizados nos ensaios à flexão realizados por Chen, Limazie e Tan (2015) consistiram de quatro vigas mistas biapoiadas do tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), com vão livre de 4,0 m. Neste trabalho foram avaliados três parâmetros: o formato da seção transversal, a abertura na alma do perfil de aço e a espessura da capa de concreto acima da viga de aço. Os modelos foram denominados SCSFB 1, SCSFB 2, SCSFB 3 e SCSFB 4.

As características geométricas da seção transversal dos modelos de viga considerados neste trabalho são mostradas na Figura 2.10, na qual pode-se observar também a posição das barras passantes pelas aberturas na alma do perfil de aço.

Figura 2.10 - Características geométricas da seção transversal dos modelos experimentais: (a) SCSFB 1; (b) SCSFB 2; (c) SCSFB 3; (d) SCSFB 4.



Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

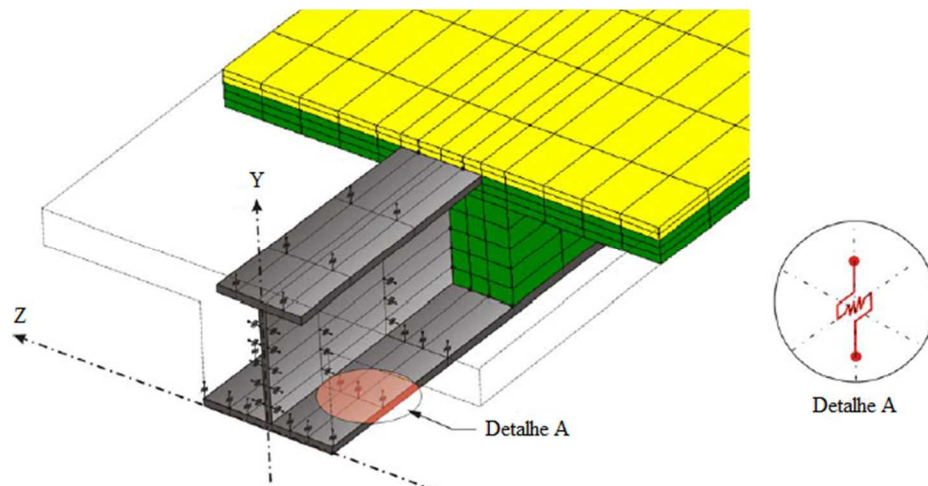
2.3. Estudos numéricos

2.3.1. Estudos numéricos realizados por Paes (2003)

Com o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento estrutural dos sistemas *slim floor* e estabelecer algumas recomendações de projeto, Paes (2003) realizou um estudo numérico sobre esses sistemas construtivos. Para isso, foram desenvolvidos modelos numéricos de elementos finitos capazes de simular o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* estudadas por Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Leskelä e Hopia (2000).

Nos modelos de elementos finitos desenvolvidos por Paes (2003) na Universidade Politécnica da Catalunha - Espanha, o comportamento da interface aço-concreto foi considerado por meio de um elemento de mola espacial conectado entre nós da malha do perfil de aço e nós da malha da laje de concreto (Figura 2.11), de forma a simular as interfaces típicas utilizadas nesse sistema. Neste estudo, foram usados os programas computacionais GiD, para definir a geometria e a malha de elementos finitos, e ANSYS para realizar as análises numéricas. Esta mesma estratégia para simular o comportamento das interfaces foi empregada por Mesquita (2016) e também foi adotada no presente trabalho, ambos com auxílio do programa computacional Abaqus.

Figura 2.11 - Esquema geral da interface aço-concreto nos modelos desenvolvidos por Paes (2003).



Fonte: Paes (2003).

De acordo com Paes (2003), um determinado tipo de interface, como a interface lisa (Tipo S) estudada por Leskelä e Hopia (2000), pode ser representado com a curva Força \times Deslizamento que define este comportamento. Além da interface lisa, ainda pode-se representar interfaces com nervuras superficiais (Tipo R), interfaces com superfície lisa e armadura passante na alma (Tipo SR) e interfaces com nervuras superficiais e armadura passante na alma (Tipo RR). Maiores detalhes sobre o comportamento da cada tipo de interface podem ser vistos em Paes (2003).

De uma forma geral, os resultados numéricos obtidos por Paes (2003) apresentaram boa concordância com os resultados experimentais obtidos por Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Leskelä e Hopia (2000). Em função disso, Paes (2003) concluiu que os modelos de elementos finitos desenvolvidos foram capazes de representar de forma adequada o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com diferentes tipos de interface aço-concreto.

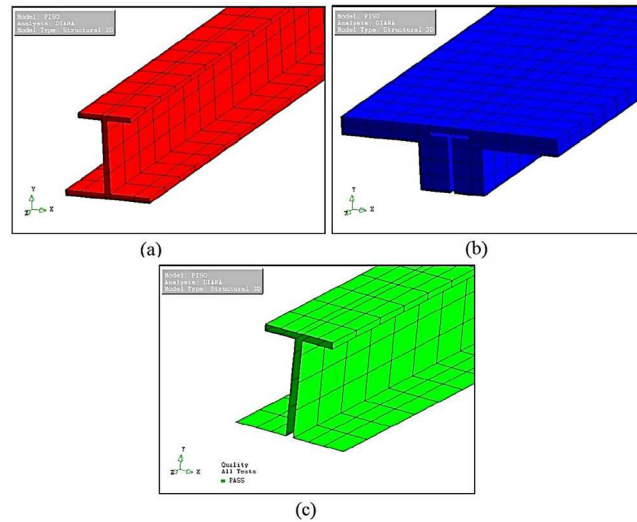
2.3.2. Estudos numéricos realizados por Ramos (2010)

Ramos (2010) realizou uma análise numérica do comportamento estrutural de sistemas *slim floor*, com base em Paes (2003) e nos experimentos de Lawson, Mullett e Rackham (1997). Essa pesquisa, desenvolvida na Universidade de São Paulo, foi feita com dois modelos de elementos finitos criados com o programa computacional TNO DIANA.

Para representar a interação na região da interface entre a viga de aço e a laje de concreto foi utilizado um elemento de interface contínua. Na Figura 2.12 pode-se observar os

modelos de elementos finitos desenvolvidos para simular a interface aço-concreto, o perfil de aço e a laje de concreto.

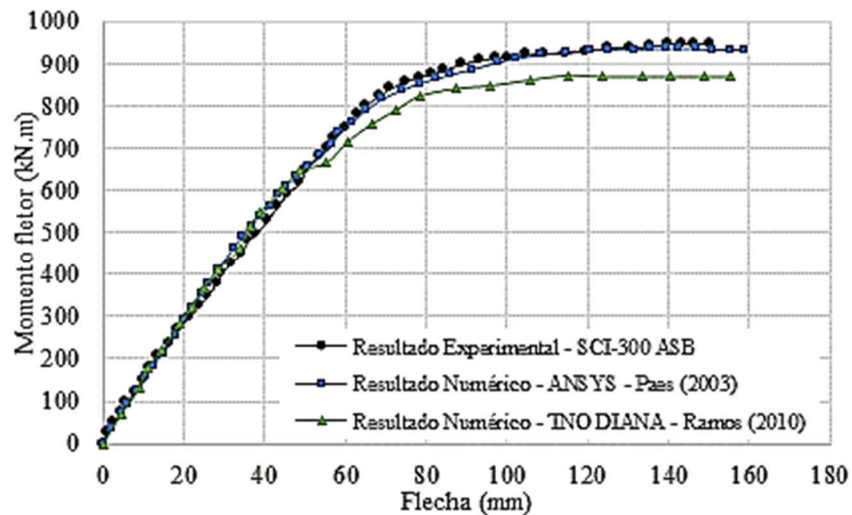
Figura 2.12 - Modelo de elementos finitos – (a) perfil de aço; (b) laje de concreto e (c) interface aço-concreto.



Fonte: Ramos (2010).

No diagrama Momento x Flecha da Figura 2.13 são exibidos os resultados obtidos por meio dos modelos de elementos finitos desenvolvidos por Ramos (2010) e Paes (2003) e os resultados experimentais obtidos por Lawson, Mullett e Rackham (1997).

Figura 2.13 - Diagrama Momento x Flecha para o modelo SCI-300 ASB.



Fonte: Ramos (2010).

A partir dos resultados apresentados no diagrama Momento \times Flecha da Figura 2.13, pode-se afirmar que representar o comportamento da interface aço-concreto por meio de elementos de mola em um modelo de elementos finitos, conectando os nós das superfícies

de contato conforme realizado por Paes (2003), levou a resultados bastante coerentes com o comportamento experimental observado.

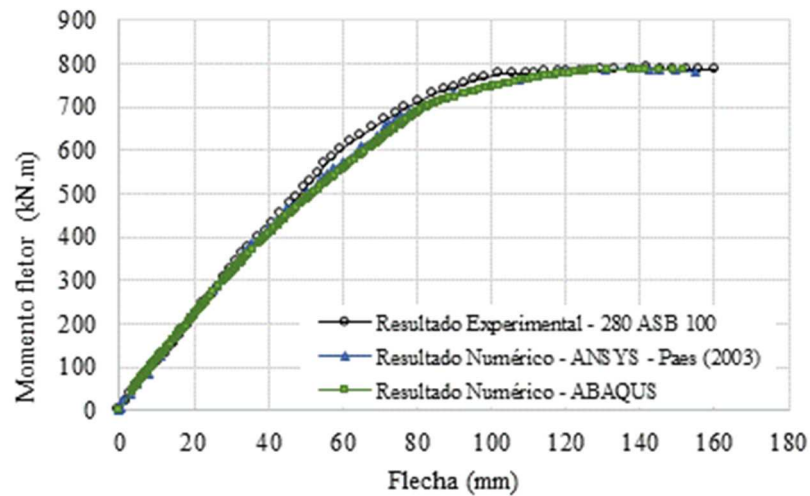
2.3.3. Estudos numéricos realizados por Mesquita (2016)

Mesquita (2016) desenvolveu um modelo numérico com o objetivo principal de avaliar o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma. Para isso, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos para verificar a aplicabilidade da metodologia proposta por Paes (2003) para simular o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma, utilizando-se o programa computacional Abaqus.

Os estudos de validação dos modelos numéricos de Mesquita (2016) envolveram a comparação dos resultados da simulação numérica com resultados experimentais obtidos por Lawson, Mullett e Rackham (1997), Leskelä e Hopia (2000) e Braun, Hechler e Obiala (2014).

Mesquita (2016) optou por desenvolver inicialmente dois modelos de elementos finitos no Abaqus, que também foram avaliados por Paes (2003) com auxílio do programa computacional ANSYS. Na Figura 2.14 apresenta-se o Diagrama Momento x Flecha para o modelo experimental 280 ASB 100 ensaiado por Lawson, Mullett e Rackham (1997) e os resultados numéricos obtidos por meio dos modelos de elementos finitos desenvolvidos por Paes (2003) e Mesquita (2016). De forma semelhante, Mesquita (2016) também comparou os seus resultados numéricos e os de Paes (2003) com os resultados experimentais de um modelo de viga mista de *slim floor* ensaiado por Leskelä e Hopia (2002), tendo obtido também boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

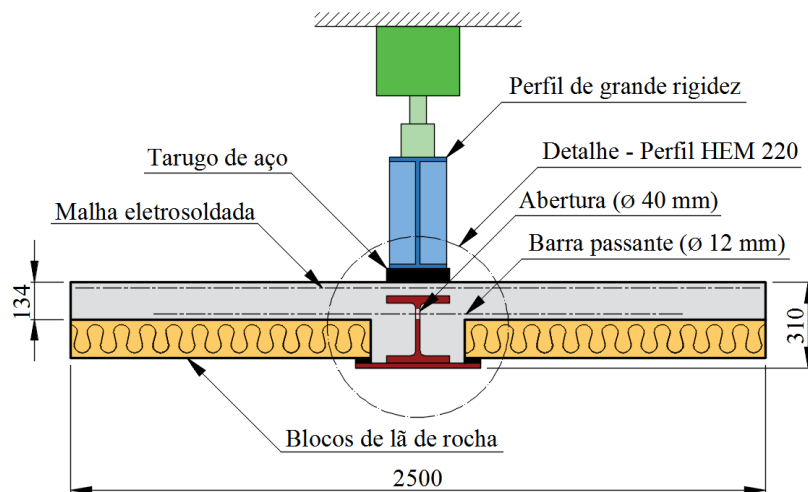
Figura 2.14 - Diagrama Momento x Flecha para o modelo experimental 280 ASB 100 ensaiado por Lawson, Mullett e Rackham (1997).



Fonte: Mesquita (2016).

Com base na metodologia proposta inicialmente por Paes (2003), foram desenvolvidos quatro modelos numéricos de elementos finitos para simular o comportamento estrutural dos modelos experimentais de vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma, que compõem o sistema CoSFB, ensaiados por Braun, Hechler e Obiala (2014) (Figura 2.15).

Figura 2.15 - Características geométricas de um dos modelos experimentais de viga mista de *slim floor* que compõem o sistema CoSFB, estudado por Braun, Hechler e Obiala (2014).

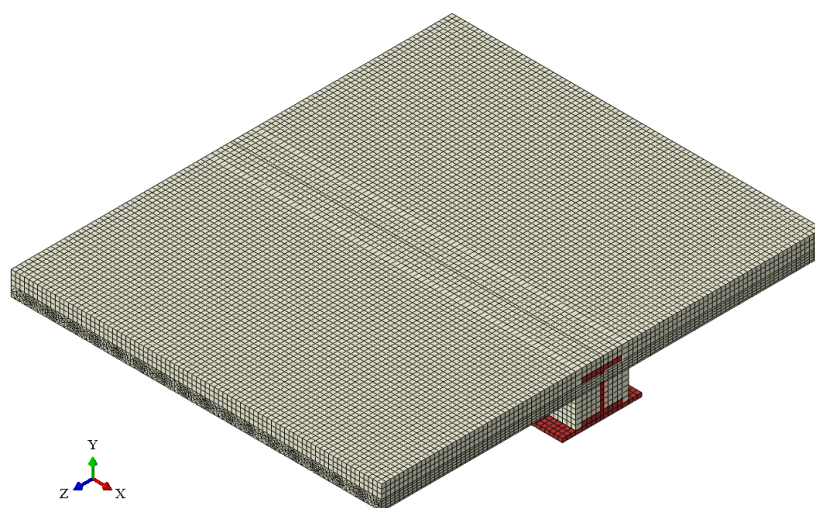


Fonte: Mesquita (2016).

Nos modelos numéricos desenvolvidos por Mesquita (2016) foram representadas as estratégias para ativação do comportamento misto desse sistema, ou seja, aberturas circulares na alma do perfil preenchidas com concreto, barras passantes através da alma e a aderência nas interfaces de contato entre aço e concreto. Os resultados obtidos por meio da simulação numérica desenvolvida apresentaram boa concordância com os

resultados experimentais, validando as estratégias de simulação numérica para vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares na alma, que compõem o sistema CoSFB (*Composite Slim floor Beam*). Na Figura 2.16, mostra-se o aspecto geral de um dos modelos de elementos finitos desenvolvidos por Mesquita (2016).

Figura 2.16 - Modelo de elementos finitos de uma viga de *slim floor* do sistema CoSFB.



Fonte: Mesquita (2016).

Além da validação dos modelos numéricos desenvolvidos, Mesquita (2016) realizou um estudo de variação de parâmetros, com o objetivo de avaliar a influência da variação de algumas características físicas e mecânicas sobre o comportamento estrutural à flexão de vigas mistas de *slim floor* que compõem o sistema CoSFB. Estes estudos foram feitos para modelos numéricos com vãos livres de 4,0 e 8,0m, divididos em três grupos:

- estudos de variação de parâmetros geométricos;
- estudos de variação de parâmetros característicos dos meios de conexão;
- estudos de variação das propriedades mecânicas dos materiais.

Os estudos de variação de parâmetros geométricos foram divididos em estudo de variação da largura efetiva da mesa de concreto comprimido e estudo de variação da espessura da alma do perfil de aço. Com relação à influência da largura efetiva, concluiu-se que as prescrições sobre largura efetiva apresentadas pelas normas técnicas em vigor (ABNT NBR 8800:2008 e EN 1994-1-1:2004) para vigas mistas convencionais podem ser aplicadas às vigas mistas de *slim floor*.

Nos estudos de variação de parâmetros característicos dos meios de conexão avaliou-se a influência de quatro variáveis sobre o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim*

floor com aberturas na alma, a saber: os meios de conexão, ou seja, a influência que a presença das barras passantes, da aderência e das aberturas exercem na ativação do comportamento misto do sistema; o diâmetro das aberturas; o espaçamento entre aberturas e o diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas.

Por fim, foram realizados estudos de variação das propriedades mecânicas dos materiais, com o objetivo de avaliar a influência da resistência do concreto e do aço sobre o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma. De forma geral, o estudo desenvolvido por Mesquita (2016) contribuiu significativamente para a consolidação das estratégias de simulação numérica de vigas mistas de *slim floor* e também para compreensão do comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com pequenas aberturas circulares na alma.

2.3.4. Estudos numéricos realizados por Limazie e Chen (2016)

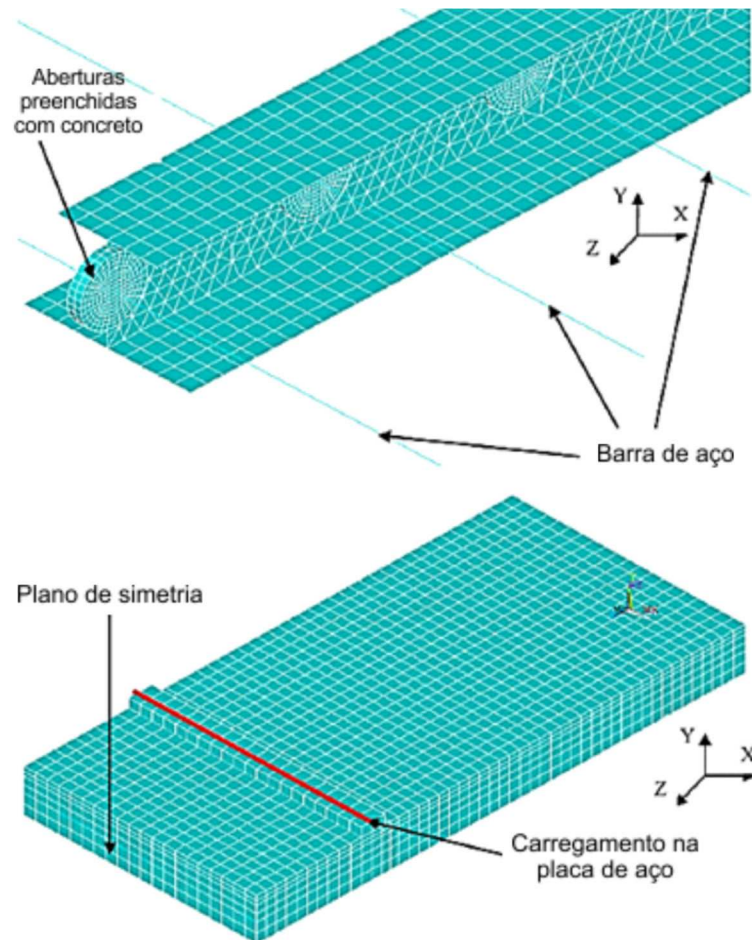
No trabalho produzido por Limazie e Chen (2016) foi proposto um modelo numérico de elementos finitos para simular o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB. Neste estudo considerou-se a transferência de esforços longitudinais com auxílio de meios de conexão mecânicos e das interações nas interfaces de contato.

As simulações numéricas realizadas por Limazie e Chen (2016) foram realizadas com auxílio do programa computacional ANSYS, onde foram criados quatro modelos numéricos para simular os modelos experimentais de Chen, Limazie e Tan (2015). Devido à simetria dos modelos, representou-se somente a metade da viga mista, considerando-se um plano de simetria. Além disso, foi usada uma laje de concreto sólida, desconsiderando-se a presença das nervuras, fato que, de acordo com os autores, não exerceu influência significativa nos resultados das análises numéricas.

Para o modelo de elementos finitos foram utilizados elementos sólidos (*solid*) para o concreto, elementos tipo casca (*shell*) para a viga de aço e elementos de barra para representar as barras da armadura. As malhas dos modelos foram criadas atribuindo-se tamanhos de 25×25 mm para os elementos do perfil de aço, 50×50 mm para os elementos de concreto, e 50 mm para os elementos lineares, como pode ser visto na Figura 2.17.

Para representação das características da interface entre os elementos de aço e concreto que compõem a viga mista, os autores atribuíram valores de tolerância à penetração entre os elementos de contato e valores de rigidez de contato entre as superfícies definidas em cada um dos elementos.

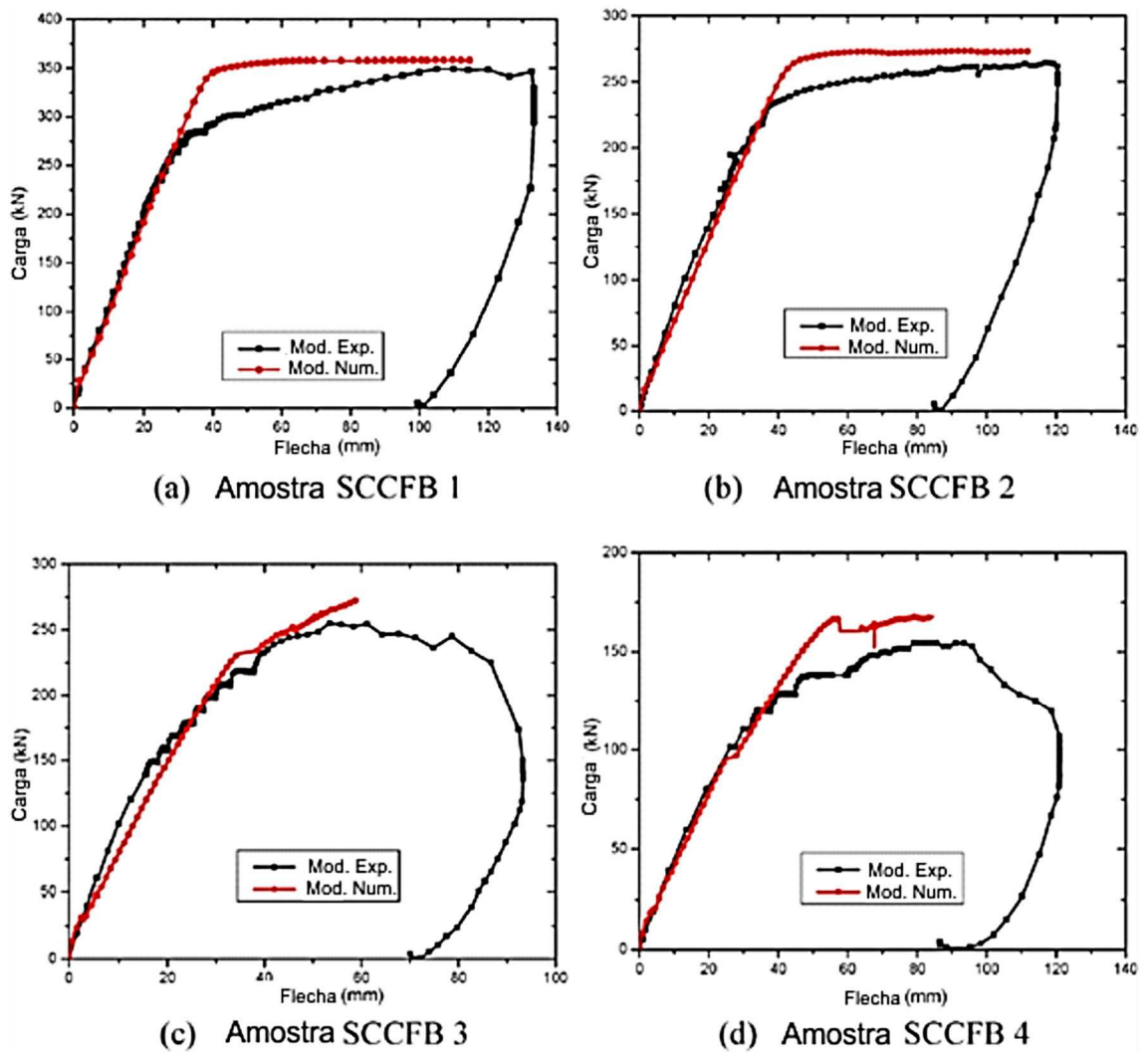
Figura 2.17 - Malha de elementos finitos do modelo desenvolvido por Limazie e Chen (2016).



Fonte: Adaptado de Limazie e Chen (2016).

Com os resultados das simulações, os modelos numéricos foram calibrados e validados com base nos ensaios de flexão realizados por Chen, Limazie e Tan (2015). Observou-se que os resultados da simulação numérica concordaram de forma satisfatória com os resultados experimentais, como exibido na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Diagramas Carga \times Flecha obtidos na calibração e validação dos modelos numéricos.



Fonte: Adaptado de Limazie e Chen (2016).

Após a validação dos resultados, foram realizados estudos de variação de parâmetros com base no modelo numérico SCSFB 2, que não apresenta capa de concreto sobre a viga de aço. Com o objetivo de formular recomendações para projeto e investigar a influência que algumas características geométricas e mecânicas dos materiais exercem sobre o comportamento estrutural, foram avaliadas a influência da variação dos parâmetros: largura efetiva da laje de concreto; espessura da capa de concreto sobre a mesa superior do perfil; espessura da mesa inferior do perfil de aço; dimensão da abertura na viga de aço; espessura da alma; espaçamento entre aberturas. Para detalhes específicos sobre os resultados obtidos nas análises numéricas realizadas nesses estudos, recomenda-se consultar Limazie e Chen (2016).

2.4.Aspectos relevantes da simulação numérica

Neste item são apresentados aspectos relevantes para o desenvolvimento dos modelos numéricos de elementos finitos propostos neste trabalho. Para isto são retratados fundamentos que se relacionam com o comportamento mecânico dos materiais e com o comportamento de interfaces típicas entre aço e concreto presentes nos modelos de viga de *slim floor* com grandes aberturas na alma.

Primeiramente, são apresentados os modelos constitutivos para o aço usados na simulação numérica, considerando o comportamento elasto-plástico do material. Na sequência apresentam-se os modelos constitutivos para o concreto submetido à compressão e à tração uniaxial. Por fim, apresentam-se modelos constitutivos para simulação do comportamento da interface aço e concreto, com indicação dos estudos que fundamentaram a adoção da interface usada neste trabalho.

Além dos modelos constitutivos para simular o comportamento uniaxial do concreto, para os modelos numéricos desenvolvidos no presente trabalho considera-se também o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), que está disponível na biblioteca do Abaqus (SIMULIA, 2012). Esse modelo é capaz de representar o comportamento do concreto e outros materiais frágeis sujeitos a ações estáticas ou dinâmicas. O termo *Concrete Damaged Plasticity* pode ser interpretado como “modelo de plasticidade com dano para o concreto”, visto que esse modelo foi elaborado a partir da teoria da plasticidade e utiliza uma variável escalar, chamada variável de dano, para representar a perda de rigidez do concreto submetido a um estado de tensão. Os aspectos relativos ao CDP são discutidos no Capítulo 3, ao longo da apresentação dos modelos de elementos finitos. Para uma consulta mais detalhada sobre o CDP, recomenda-se consultar os trabalhos de Mesquita (2016) e Petruski (2016), bem como o manual do Abaqus (SIMULIA, 2012).

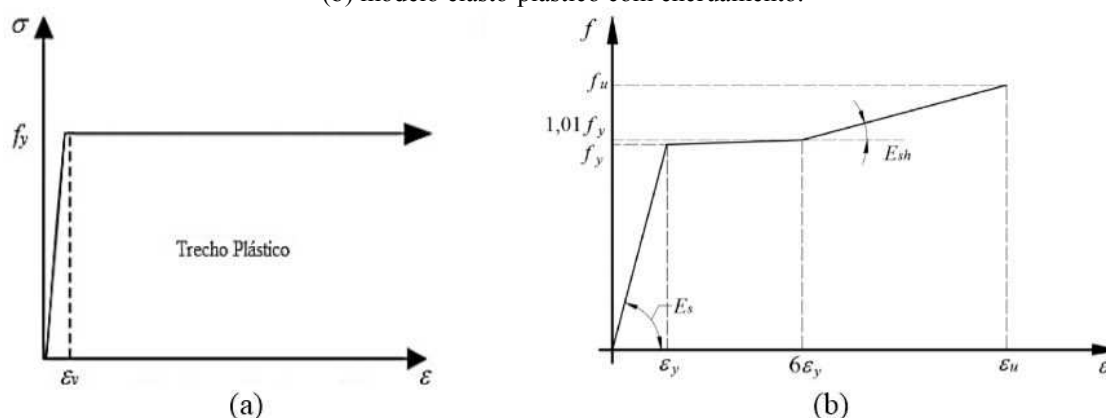
2.4.1. Comportamento elasto-plástico do aço

O aço é um material homogêneo e isotrópico que apresenta comportamento mecânico semelhante quando solicitado por esforços de tração e de compressão. O aço apresenta comportamento elástico linear até um determinado nível de tensão que caracteriza o início do escoamento, em que o material sofre deformações plásticas sob tensão constante. Após

o escoamento, o aço sofre encruamento, quando sofre um aumento de tensões e deformações até atingir a ruptura.

Dos vários modelos constitutivos que podem ser utilizados para representar o comportamento do aço, destacam-se os modelos elasto-plástico perfeito e elasto-plástico com encruamento (Figura 2.19).

Figura 2.19 - Diagramas Tensão x Deformação para o aço estrutural: (a) Modelo elasto-plástico perfeito; (b) modelo elasto-plástico com encruamento.

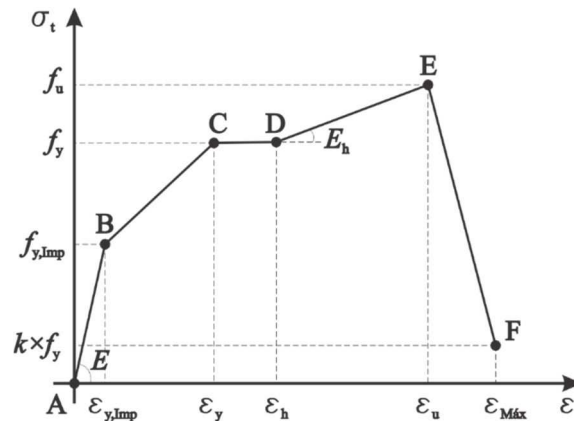


Fonte: Do autor.

Segundo Byfield, Davies e Dhanalakshmi (2005), nos modelos elasto-plásticos com encruamento, a inclinação da curva Tensão \times Deformação no trecho de encruamento pode ser determinada utilizando-se um Módulo de Encruamento (E_{sh}). Considera-se que este trecho tem início após o aço atingir a deformação ϵ_{sh} . Byfield, Davies e Dhanalakshmi (2005) recomendam os seguintes valores: $E_{sh} = 2700$ MPa e $\epsilon_{sh} = 6\epsilon_y$.

Com base nos modelos mostrados na Figura 2.19, pode-se incorporar modificações aos modelos constitutivos propostos para considerar a presença de tensões residuais no material, além de outras imperfeições e efeitos que não sejam considerados diretamente no modelo numérico. Modelos que consideram essas imperfeições foram utilizados nos trabalhos de Almeida (2012) e Dutra (2014). O modelo constitutivo mostrado na Figura 2.20 foi usado por Petruski (2016) na validação de modelos numéricos de vigas mistas com conectores do tipo Crestbond.

Figura 2.20 - Modelo constitutivo para o aço com presença de tensões residuais.

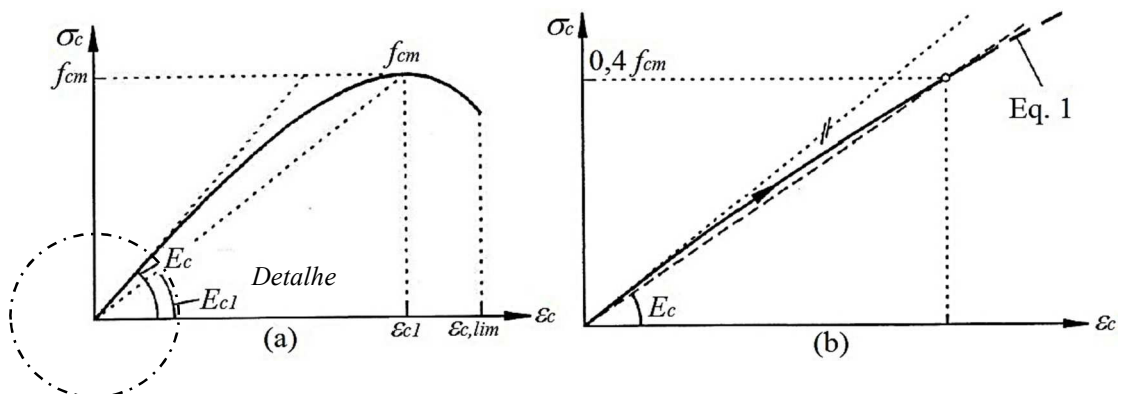


Fonte: Adaptado de Petruski (2016).

2.4.2. Comportamento do concreto submetido à compressão uniaxial

O concreto apresenta comportamento diferente quando submetido à compressão ou à tração. O *Model Code 2010* (FIB, 2011) apresenta um modelo para descrever o comportamento do concreto à compressão uniaxial. Este modelo considera que o comportamento mecânico do concreto comprimido pode ser descrito por dois trechos, sendo o primeiro elástico-linear e o segundo não-linear. O trecho elástico-linear ocorre até o concreto atingir uma tensão (σ_c) igual a 40% do valor da resistência média à compressão (f_{cm}). A partir desse ponto, o concreto passa a apresentar o comportamento não-linear definido pela Equação 1. O modelo constitutivo proposto pelo *Model Code 2010* (FIB, 2011) é mostrado na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Diagrama Tensão x Deformação para o concreto comprimido apresentado pelo *Model Code 2010*: (a) diagrama completo; (b) detalhe do trecho inicial.



Fonte: FIB (2011).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = - \left(\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right) \quad (1)$$

em que:

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1} ;$$

$$k = E_c / E_{c1} ;$$

ε_{c1} deformação correspondente a máxima tensão de compressão;

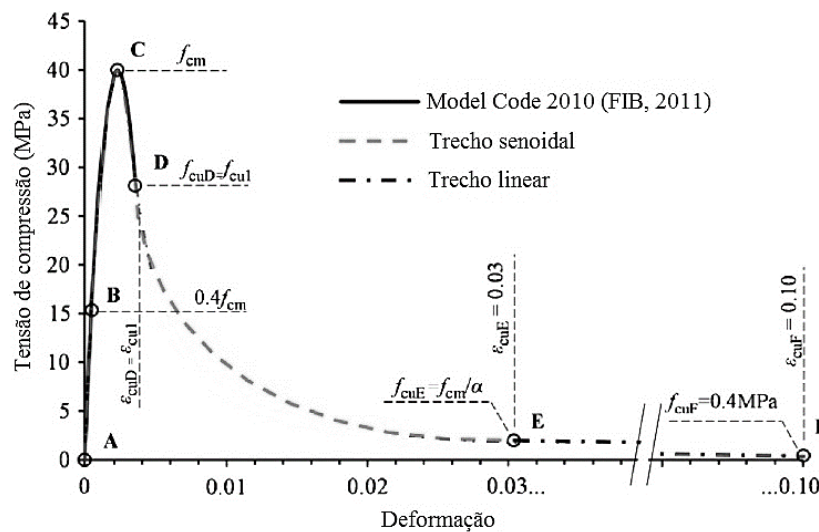
E_{c1} Módulo de Elasticidade Secante, com início na origem e fim no ponto de máxima tensão de compressão;

k número plástico.

Para mais detalhes sobre o modelo constitutivo para o concreto comprimido e sobre os parâmetros da equação proposta, consultar *Model Code 2010* (FIB, 2011).

O modelo apresentado pelo *Model Code 2010* (FIB, 2011) descreve o comportamento do concreto comprimido até a deformação limite ($\varepsilon_{c,lim}$). Além deste ponto, Pavlovic *et al.* (2013) propuseram duas equações para descrever a continuação da curva Tensão \times Deformação apresentada pelo *Model Code 2010* (FIB, 2011). Essas equações, que definem os dois trechos adicionais, são representadas pelo diagrama Tensão \times Deformação da Figura 2.22.

Figura 2.22 - Diagrama Tensão \times Deformação para o concreto comprimido proposto por Pavlovic *et al.* (2013).



Fonte: Pavlovic *et al.* (2013).

Entre os pontos D e E da Figura 2.22 tem-se um trecho senoidal definido pela Equação 2, e entre os pontos E e F um trecho linear, definido pela Equação 6.

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = f_{cm} \left[\frac{1}{\beta} - \frac{\sin\left(\mu^{\alpha_{tD}} \cdot \alpha_{tE} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\beta \cdot \sin\left(\alpha_{tE} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} + \frac{\mu}{\alpha} \right] \quad (2)$$

sendo:

$$\mu = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{cuD}}{\varepsilon_{cuE} - \varepsilon_{cuD}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{f_{cm}}{f_{c,lim}} \quad (4)$$

$$f_{cuD} = f_{c,lim} = \sigma_c(\varepsilon_{c,lim}) \quad (5)$$

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \left[\frac{f_{cuE}(\varepsilon_{cuF} - \varepsilon_c) + f_{cuF}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cuE})}{(\varepsilon_{cuF} - \varepsilon_{cuE})} \right] \quad (6)$$

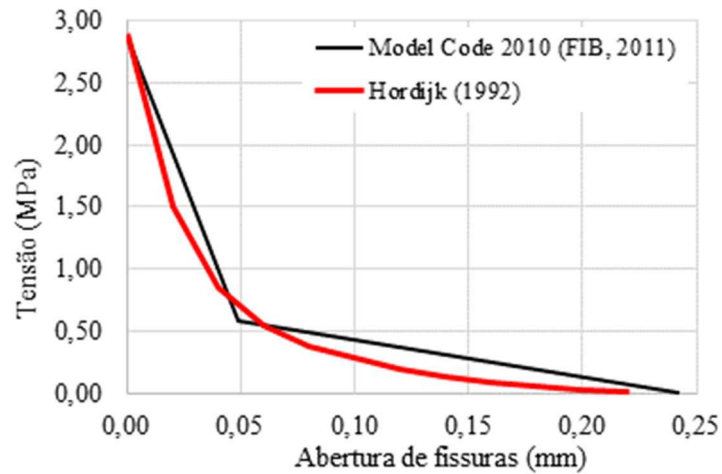
em que:

- μ coordenada relativa entre os pontos D e E;
- α fator de redução;
- α_{tD} fator para obter a tangência no ponto D;
- α_{tE} fator para obter a tangência no ponto E;
- ε_{cuE} deformação no ponto E;
- ε_{cuF} deformação no ponto F;
- f_{cuE} tensão no ponto E;
- f_{cuF} tensão no ponto F.

2.4.3. Comportamento do concreto submetido à tração uniaxial

O comportamento do concreto quando submetido à tração uniaxial pode ser representado por meio do modelo constitutivo proposto por Hordijk (1992). Segundo Mesquita (2016), o modelo Tensão \times Aberturas de Fissuras proposto pelo *Model Code* 2010 (Figura 2.23) pode gerar problemas de convergência durante a análise numérica por ser formado por dois trechos retos, que mudam bruscamente de inclinação no ponto de encontro entre eles. No modelo proposto por Hordijk (1992) a inclinação da curva é modificada gradualmente, como mostrado na Figura 2.23.

Figura 2.23 - Comparação entre o modelo proposto pelo *Model Code* 2010 e por Hordijk (1992).



Fonte: Mesquita (2016).

A curva Tensão \times Aberturas de Fissuras proposta por Hordijk (1992) pode ser descrita pela Equação 9:

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \left[1 + \left(c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \cdot \exp \left(-c_2 \cdot \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \cdot \exp(-c_2) \quad (7)$$

sendo:

$$w_c = 5,14 \frac{G_F}{f_{ctm}} \quad (8)$$

$$G_F = 73 \cdot f_{ctm}^{0,18} \quad (9)$$

em que:

w é a abertura de fissuras;

G_F é a energia de fratura;

C_1 e C_2 são constantes definidas por Hordijk (1992) ($C_1 = 3,00$ e $C_2 = 6,93$)

No modelo de Hordijk (1991) pode-se definir qual formulação usar para obter os parâmetros de entrada (f_{ct} e G_F). Neste trabalho, optou-se por usar as equações propostas pelo *Model Code* 2010 para obter estes parâmetros.

2.4.4. Dano do concreto à compressão e à tração

O modelo proposto por Pavlovic *et al.* (2013) também foi utilizado para representar o dano do concreto à compressão e à tração. Segundo o autor, considera-se que as variáveis de dano à compressão (D_c) e dano à tração (D_t) são nulas para deformações inferiores às correspondentes à fase de carregamento pré-pico. Para deformações maiores que as correspondentes às tensões máximas (pós-pico), as variáveis de dano podem ser calculadas a partir das Equações 7 e 8.

$$D_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \quad (10)$$

$$D_t = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{ctm}} \quad (11)$$

2.4.5. Interface aço-concreto

Leskelä e Hopia (2000) realizaram um amplo estudo experimental no qual se avaliou, por meio de ensaios *push-out*, quatro tipos de interfaces:

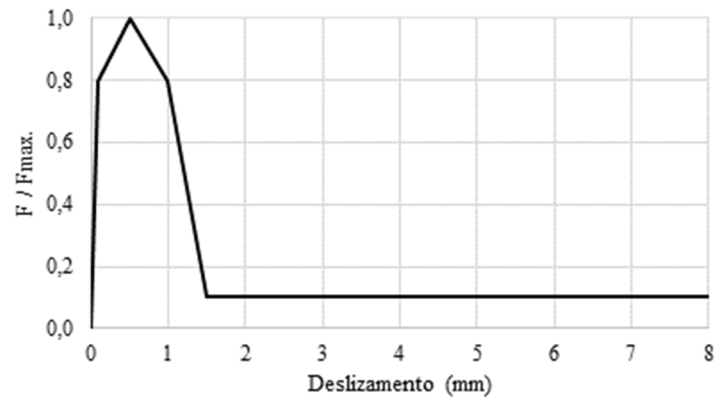
- tipo S – Alma lisa;
- tipo R – Alma com nervuras superficiais;
- tipo SR – Alma lisa e armadura passante através da alma;
- tipo RR – Alma com nervuras superficiais e armadura passante através da alma.

Segundo Paes (2003), a partir desses ensaios foi possível caracterizar o comportamento dos principais tipos de interface utilizados em vigas mistas de *slim floor*. Com os resultados obtidos por Leskelä e Hopia (2000), Paes (2003) desenvolveu modelos de elementos finitos para simular o comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* estudadas por Lawson, Mullett e Rackham (1997) e Leskelä e Hopia (2000). Nestes estudos, o comportamento mecânico da interface aço-concreto foi simulado utilizando-se um elemento de mola espacial ao qual atribuiu-se uma curva Força × Deslizamento para representar o comportamento da interface aço-concreto.

Para validar os modelos de elementos finitos, Paes (2003) propôs curvas Força × Deslizamento para interfaces tipo S, R, SR e RR. Na Figura 2.24, mostra-se o diagrama Força × Deslizamento para a interface do tipo S que foi adotado no presente

trabalho para representação da aderência nas interfaces entre aço e concreto nos modelos numéricos desenvolvidos.

Figura 2.24 - Diagrama Força \times Deslizamento proposto por Paes (2003) para a interface do tipo S.



Fonte: Do autor.

Capítulo 3

Modelos numéricos

3.1. Considerações preliminares

Neste capítulo apresentam-se os modelos numéricos de elementos finitos desenvolvidos para simular o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas na alma. Para efeito de validação, foram desenvolvidos modelos numéricos para simular o comportamento dos modelos experimentais ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009) e Chen, Limazie e Tan (2015). Esses modelos foram elaborados com a metodologia desenvolvida inicialmente por Paes (2003) e aperfeiçoada por Mesquita (2016).

Os modelos numéricos foram desenvolvidos no programa computacional Abaqus, um programa de análise estrutural capaz de realizar análises estáticas e dinâmicas pelo método dos elementos finitos. O Abaqus possui um pré e pós-processador gráfico que permite agilizar as operações de modelagem e visualização de resultados.

Nos itens a seguir são apresentadas as características geométricas e mecânicas dos materiais de dois conjuntos de modelos experimentais tomados como referência para efeitos de validação dos modelos numéricos. São apresentadas também as características geométricas dos modelos de elementos finitos desenvolvidos e a estratégia para representação do comportamento da interface aço-concreto nesses modelos. Além disso,

apresenta-se a malha de elementos finitos, os tipos de elementos usados e as condições de contorno adotadas. Por fim, apresenta-se uma avaliação crítica da simulação de cada modelo de viga de *slim floor*.

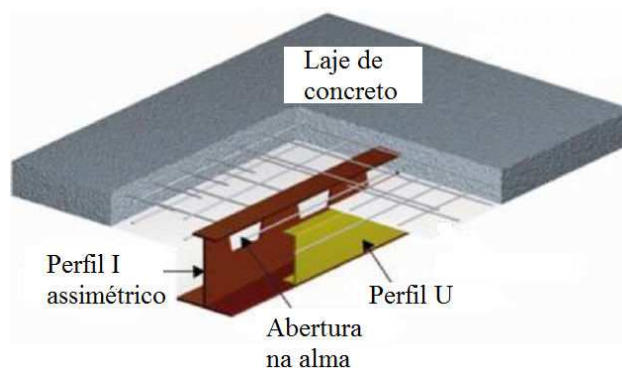
3.2. Descrição dos modelos de referência

Para fins de validação dos modelos numéricos no presente trabalho, foram selecionados dois conjuntos de modelos experimentais de vigas de *slim floor* com grandes aberturas na alma, cujos resultados experimentais estão disponíveis na literatura. Um do sistema *I-TECH*, composto por vigas de aço tipo *D-Beam* com aberturas trapezoidais na alma e outro do sistema SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), composto por vigas de aço com aberturas circulares na alma.

3.2.1. Modelos de referência ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009)

O primeiro conjunto de modelos, relacionado ao sistema *I-TECH* (inovador, técnico, econômico e convenientemente híbrido), está em desenvolvimento na Coreia do Sul desde 2002. Esse sistema é composto por vigas de aço tipo *D-Beam*, produzidas a partir de um perfil monossimétrico, e uma laje mista, fabricada com forma de aço incorporada e concreto moldado no local (JU, CHUN e KIM 2009). O perfil é fabricado a partir da metade de um perfil laminado, cortado no formato trapezoidal (castelado), seguindo o padrão de corte Litzka, soldado a uma chapa de aço (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Esquema do sistema *I-TECH*.

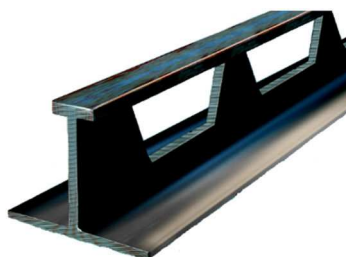


Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Segundo Ju, Chun e Kim (2009), o comportamento misto entre aço e concreto é ativado pela aderência entre esses dois materiais, pelas aberturas na alma preenchidas com

concreto e por uma barra de aço passante em cada abertura. As vigas tipo *D-Beam* também são produzidas nos Estados Unidos pela empresa *Girder-Slab Technologies* (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Viga tipo *D-Beam* produzida pela *Girder-Slab Technologies* nos Estados Unidos.



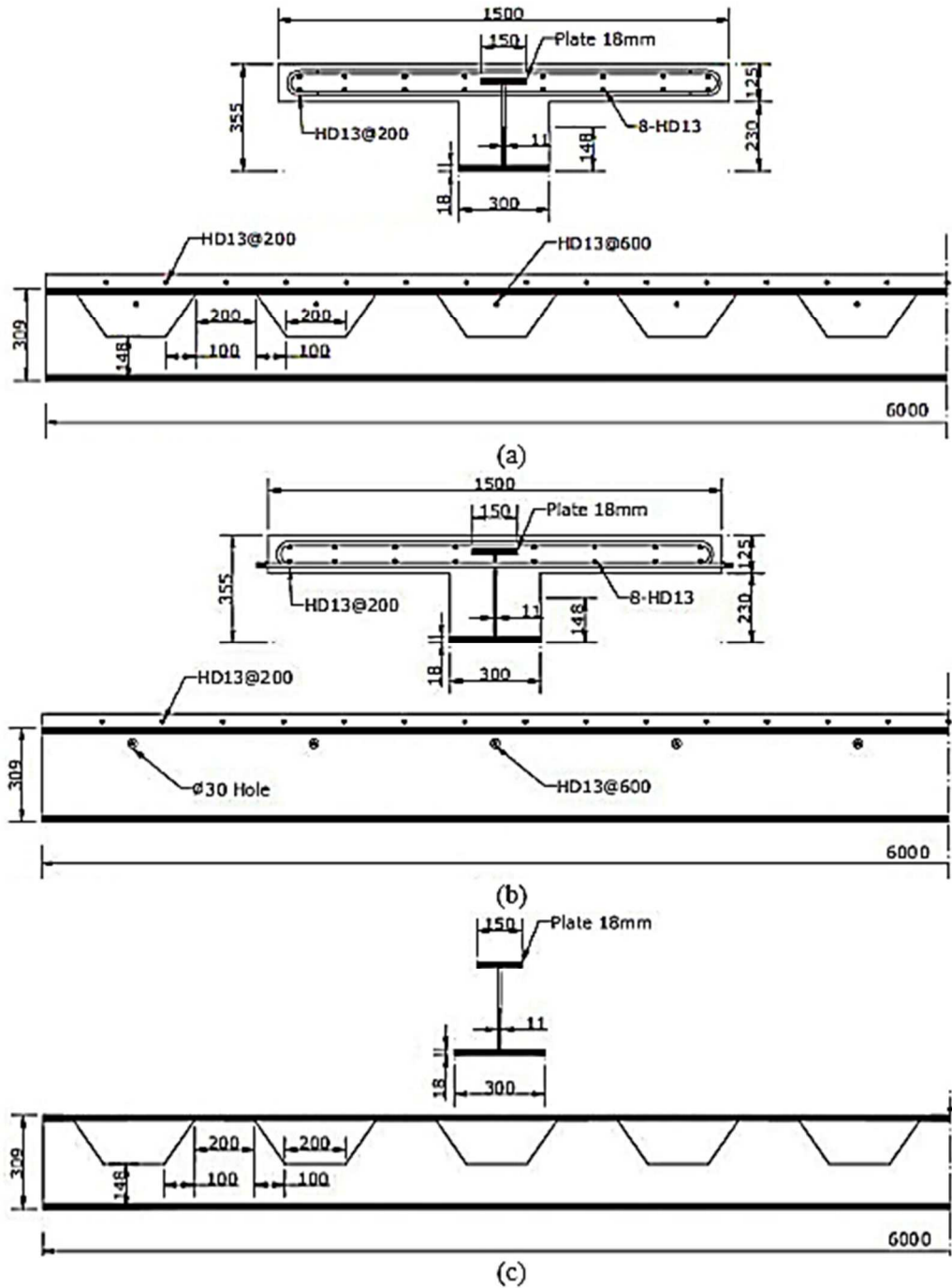
Fonte: Girder-Slab Technologies (2015).

3.2.1.1. Geometria das vigas ensaiadas por Ju, Chun e Kim (2009)

Os modelos experimentais de viga ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009) possuíam comprimento de 6,0 m e foram designados como três vigas diferentes: o sistema proposto ou B-C1P15 (Figura 3.3a), a viga mista de *slim floor* ou B-Slim (Figura 3.3b), e a viga de aço isolada B-C0P15 (Figura 3.3c). Para obter uma região sujeita à flexão pura nos ensaios das vigas com 5,0 m de vão livre, foram usados dois pontos de aplicação de carga com distância de 1,20 m entre si (Figura 3.4). Barras HD13 (13 mm de diâmetro e $f_y = 392$ MPa) foram usadas como armadura na laje. Para compor a viga tipo *D-Beam* utilizou-se um tê cortado a partir de um perfil H-488 × 300 × 11 × 18 (SS400 e $f_y = 235$ MPa) e uma placa de aço para a mesa superior (SS400 e espessura = 18 mm).

Barras transversais com as mesmas características das armaduras da laje foram inseridas através das aberturas na alma do modelo B-C1P15 e através da abertura circular de 30 mm de diâmetro para o modelo B-Slim. Apesar das barras de armadura transversais não contribuírem com o momento fletor resistente dos elementos, elas foram usadas de acordo com a BS 5950: Parte 3, Sec. 5.6.4 (ECCS 1995; BSI 1990) para melhorar a integridade dos elementos e a resistência ao cisalhamento longitudinal (JU, CHUN e KIM, 2009).

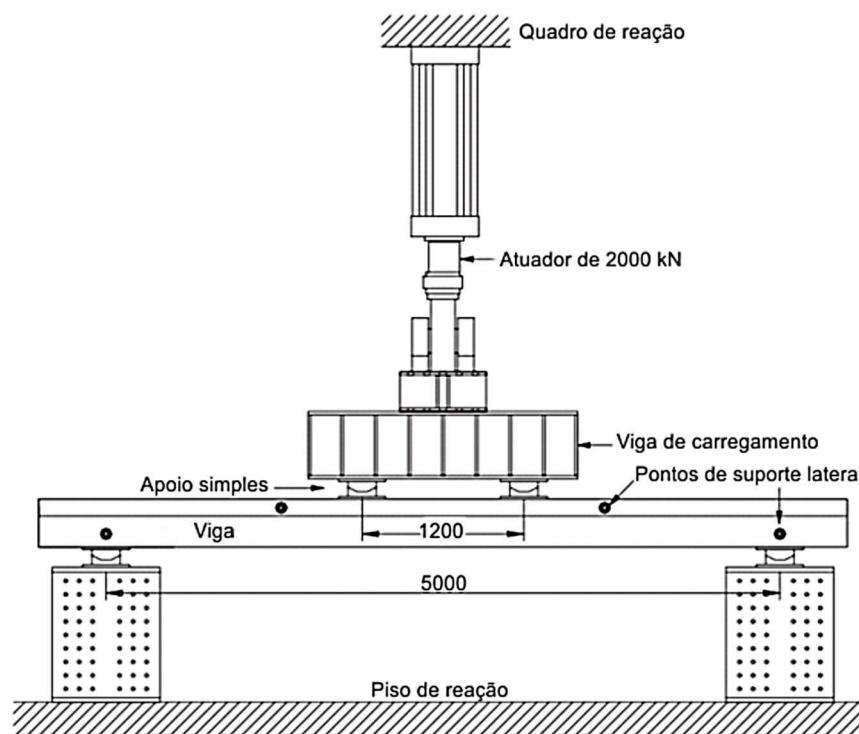
Figura 3.3 - Características geométricas dos modelos ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009):
 (a) B-C1P15; (b) B-Slim; (c) B-C0P15.



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Para evitar a flambagem lateral com torção dos modelos, foram instalados suportes laterais nos pontos de apoio e em dois pontos distantes a 1,20 m do centro do vão. A carga foi aplicada por meio de um atuador com capacidade de 2000 kN, com auxílio de outros elementos que permitiram a distribuição da carga no sentido transversal do modelo (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Configuração do ensaio realizado de Ju, Chun e Kim (2009).



Fonte: Adaptado de Ju, Chun e Kim (2009).

3.2.1.2. Propriedades dos materiais

A resistência à compressão dos cilindros de concreto aos 28 e aos 77 dias foram 28,1 e 30,1 MPa, respectivamente. Na Tabela 3.1 são mostradas as propriedades dos aços das vigas e das armaduras.

Tabela 3.1 - Propriedades dos aços ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009)

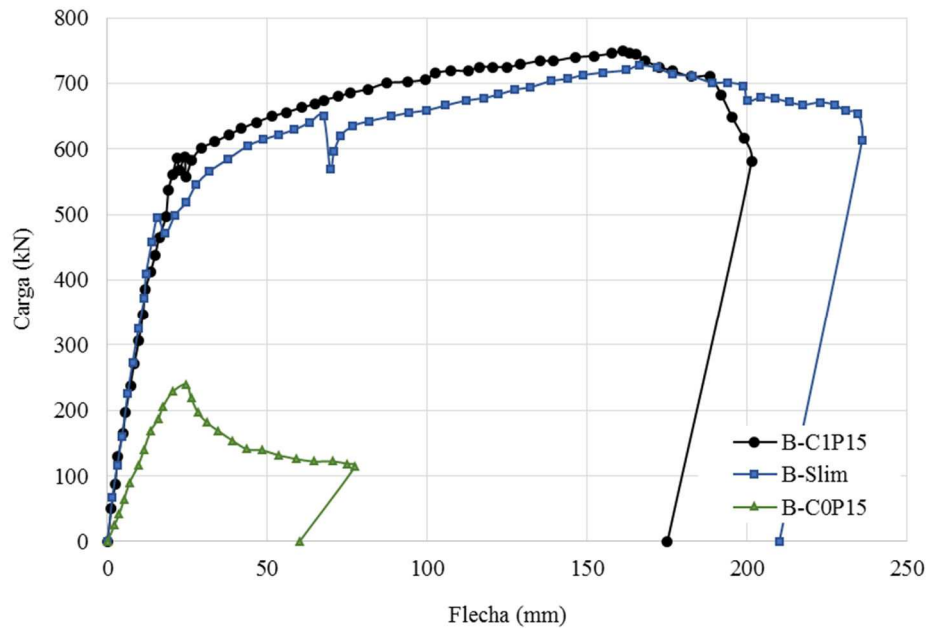
Itens	Resistência ao escoamento f_y (MPa)	Resistência última f_u (MPa)	Módulo de elasticidade E_s (MPa)
Perfil T estrutural (SS400, $f_y = 235$ MPa)	281	417	$1,99 \times 10^5$
Chapa de aço (espessura: 18 mm) (SS400, $f_y = 235$ MPa)	250	410	$2,00 \times 10^5$
Armadura HD13 (SD40, $f_y = 392$ MPa)	398	597	$1,55 \times 10^5$

Fonte: Adaptado de Ju, Chun e Kim (2009).

3.2.1.3. Resultados obtidos por Ju, Chun e Kim (2009)

A partir dos ensaios de flexão, foi obtido o diagrama Carga × Flecha apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Resultados dos modelos B-C1P15, B-Slim e B-C0P15.



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Com base nos resultados obtidos por Ju, Chun e Kim (2009) foi constatado que a viga mista de *slim floor* proposta (modelo B-C1P15) apresentou bom comportamento misto. O modo de colapso observado neste modelo experimental foi o esmagamento do concreto na zona de compressão e não foram observadas falhas locais ou dos meios de conexão da viga mista de *slim floor*. O comportamento misto observado indica que o sistema desenvolveu ductilidade, resistência e interação entre os elementos sem causar problemas em situação de serviço (JU, CHUN e KIM, 2009). No ensaio de flexão simples, os modelos com armadura passante suportaram carregamento três vezes maior que o modelo da viga de aço isolada (B-C0P15), onde foi observado o modo de colapso devido à flambagem da mesa superior do perfil de aço.

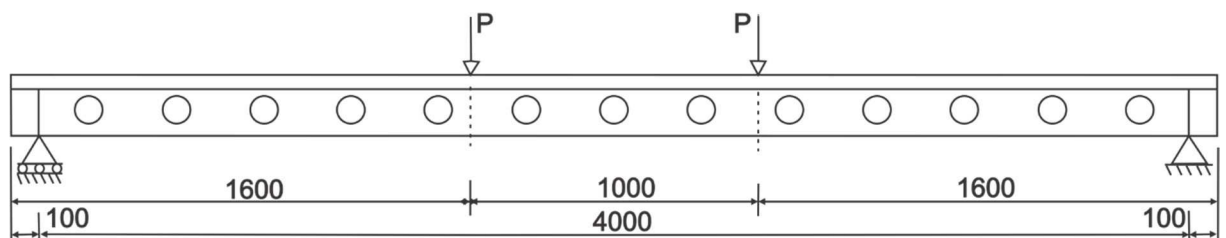
3.2.2. Modelos de referência ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015)

3.2.2.1. Geometria das vigas ensaiadas por Chen, Limazie e Tan (2015)

Os modelos de referência ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015) consistem de quatro vigas mistas tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), planejadas para ensaios de flexão. Três variáveis principais foram consideradas: formato da seção transversal, abertura na alma do perfil de aço e altura do cobrimento de concreto acima da viga de aço. Os modelos foram designados como SCSFB 1, SCSFB 2, SCSFB 3 e SCSFB 4.

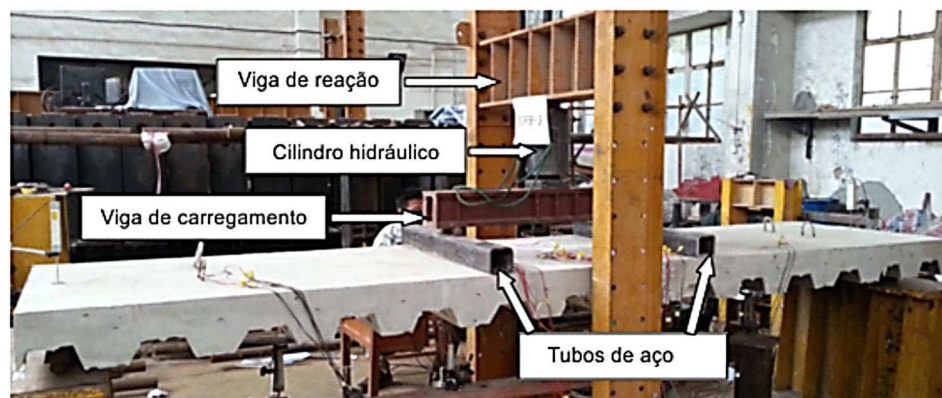
Para realização dos ensaios de flexão, os modelos foram biapoiados com 4,0 m de vão livre e dois pontos de aplicação de carga sobre a face superior da viga (Figura 3.6). Os ensaios foram realizados com controle de carregamento, com aplicação de incrementos de carga por meio de um atuador hidráulico de 600 kN, posicionado entre a viga de reação e a viga de carregamento. Dois tubos de aço foram posicionados na direção transversal do modelo, abaixo da viga de carregamento, de maneira a uniformizar a carga ao longo da largura da laje (Figura 3.7).

Figura 3.6 – Esquema geral dos ensaios de flexão de Chen, Limazie e Tan (2015).



Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

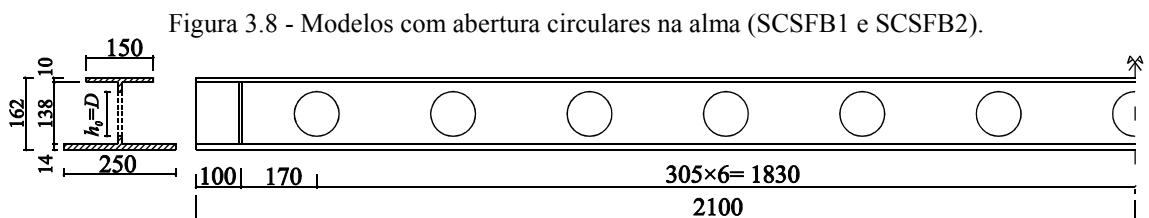
Figura 3.7 - Aspecto geral do ensaio de flexão em modelos tipo SCSFB



Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

Os modelos experimentais ensaiados foram caracterizados de acordo com suas semelhanças geométricas:

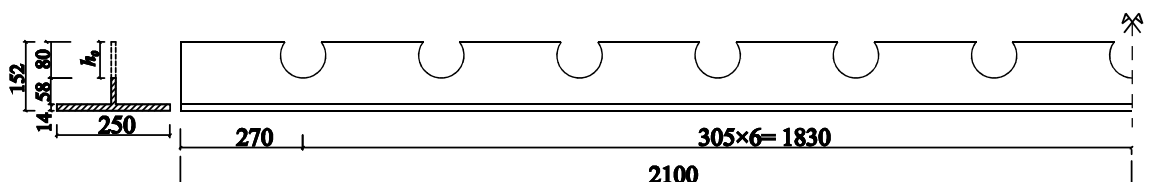
- SCSFB 1 e SCSFB 2:
 - viga de aço com seção transversal monossimétrica e alma com 10 mm de espessura (Figura 3.8);
 - laje mista com forma de aço incorporada com 75 mm de altura e 1,5 mm de espessura;
 - aberturas circulares de 100 mm de diâmetro, espaçadas de 305 mm a partir do centro da viga (13 aberturas);
 - duas placas de aço como enrijecedores, soldados na viga na região dos apoios, posicionados a 100 mm das extremidades da viga, com 8 mm de espessura.



Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

- SCSFB 3 e SCSFB 4 (Figura 3.9):
 - viga de aço com seção transversal T invertida e alma com 10 mm de espessura (Figura 3.9);
 - laje mista com forma de aço incorporada com 75 mm de altura e 1,5 mm de espessura;
 - aberturas semicirculares com diâmetro de 100 mm, espaçadas de 305 mm partindo do centro (13 aberturas).

Figura 3.9 - Modelos com aberturas semicirculares na alma (SCSFB3 e SCSFB4).

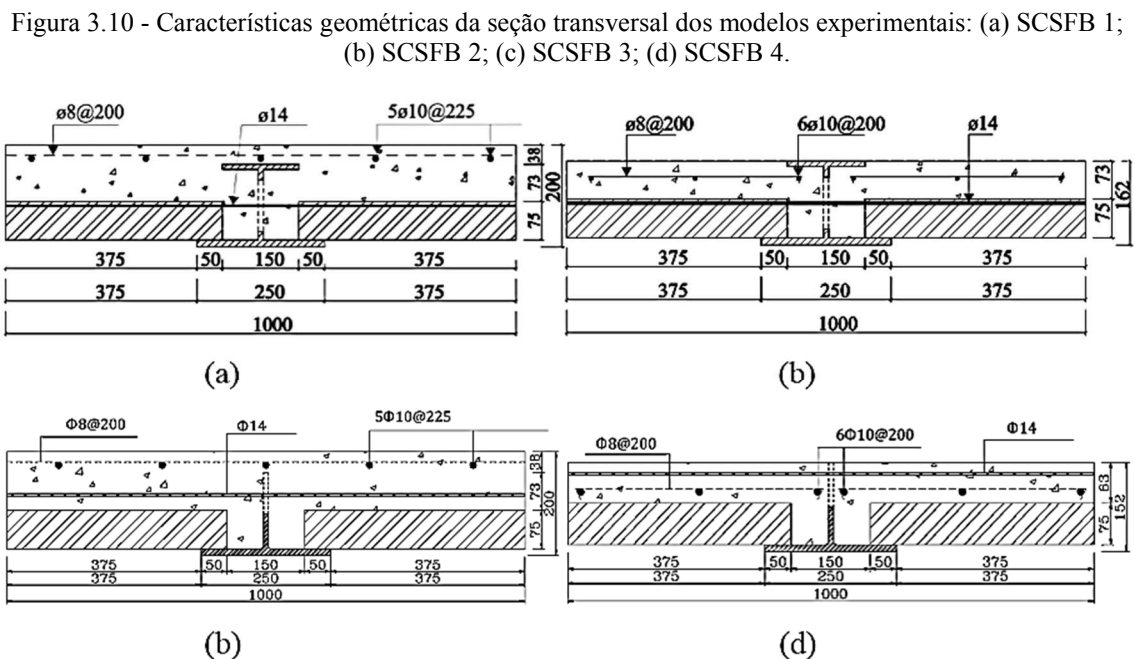


Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

Além das características de cada viga descritas anteriormente, também deve-se destacar:

- os modelos SCSFB2 e SCSFB 4 não possuem capa de concreto acima da face superior da viga de aço;
- os modelos SCSFB 1 e SCSFB 3 possuem uma capa de concreto com 38 mm de espessura acima da face superior da viga de aço;
- a laje mista possui 1000 mm de largura;
- através de cada abertura na alma foi posicionada uma barra de aço para reforçar o concreto e formar um mecanismo de conexão ao cisalhamento.

As características geométricas dos modelos experimentais de Chen, Limazie e Tan (2015) são apresentadas na Figura 3.10, na qual se destaca também a posição das barras passantes pelas aberturas na alma do perfil de aço.



Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

Para os modelos com capa de concreto acima da mesa superior da viga de aço (SCSFB 1 e 3), foram dispostas 5 barras longitudinais de $\text{Ø}10$ mm e barras transversais de $\text{Ø}8$ mm, colocadas a 20 mm da face superior da laje de concreto. Para os modelos SCSFB 2 e 4, as armaduras foram colocadas a 30 mm do topo da laje de concreto e compostas por 6 barras longitudinais de $\text{Ø}10$ mm e barras transversais de $\text{Ø}8$ mm a cada 20 cm.

3.2.2.2. *Propriedades dos materiais ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015)*

Com amostras de concreto do mesmo lote usado nas vigas fez-se a cura sob as mesmas condições. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características mecânicas dos aços das vigas e das armaduras e na Tabela 3.3 as características mecânicas dos concretos utilizados nos modelos.

Tabela 3.2 - Características mecânicas dos aços das vigas e das armaduras utilizadas nos modelos experimentais.

Elemento	Módulo de elasticidade E (MPa)	Resistência ao escoamento, f_y (MPa)	Resistência última, f_u (MPa)
Mesa superior	$1,88 \times 10^5$	462,9	558,7
Mesa inferior	$1,85 \times 10^5$	410,5	553,9
Alma	$1,88 \times 10^5$	462,9	558,7
Ø14	$2,1 \times 10^5$	548,3	586,7
Ø10	$2,1 \times 10^5$	415,0	588,3
Ø8	$2,1 \times 10^5$	428,3	551,7

Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

Tabela 3.3 - Características mecânicas dos concretos utilizados nos modelos experimentais.

Modelo	Módulo de elasticidade E_c (MPa)	Resistência à compressão f_{cu} (MPa)	Resistência à tração f_{ct} (MPa)
SCSFB 1	$3,2 \times 10^4$	29,04	2,8
SCSFB 2	$3,2 \times 10^4$	28,19	2,8
SCSFB 3	$3,2 \times 10^4$	28,48	2,8
SCSFB 4	$3,2 \times 10^4$	31,38	3,0

Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

3.2.2.3. *Resultados obtidos por Chen, Limazie e Tan (2015)*

- Capacidade máxima e deslocamento

Todos os modelos de viga ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015) apresentaram comportamento elástico no início do carregamento, seguido de escoamento, até alcançar o colapso. As cargas medidas no início do escoamento e no momento do colapso das vigas são apresentadas na Tabela 3.4.

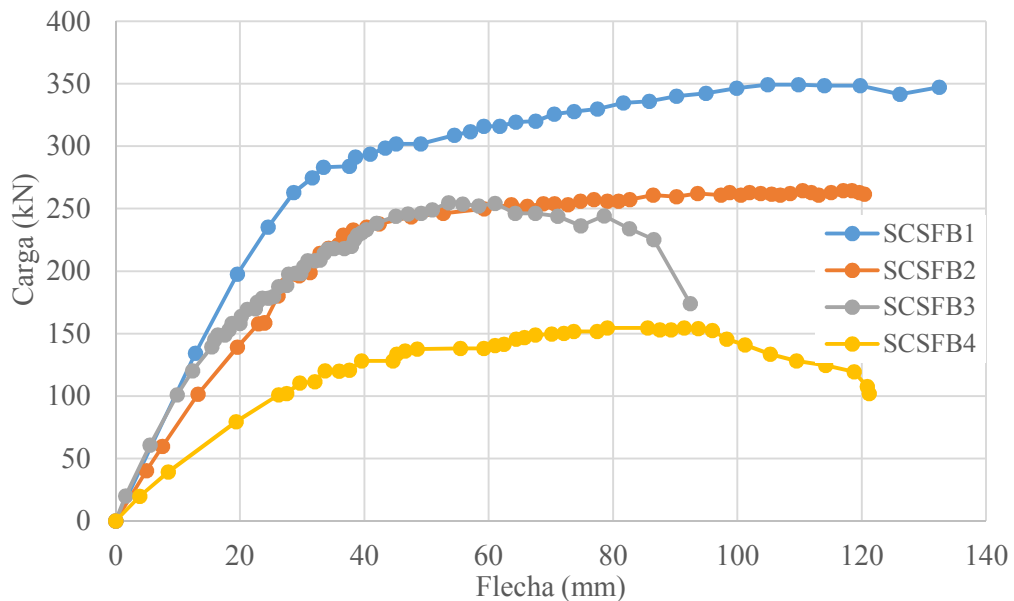
Tabela 3.4 - Cargas medidas no momento do escoamento e do colapso dos modelos de vigas mistas de *slim floor* ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015).

Amostras	Carga de Escoamento (kN)	Carga de colapso (kN)
SCSFB 1	250	349,0
SCSFB 2	190	264,7
SCSFB 3	160	255,1
SCSFB 4	110	154,4

Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

Os resultados dos ensaios de flexão dos modelos experimentais de Chen, Limazie e Tan (2015) são mostrados no diagrama Carga × Flecha apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Diagrama Carga × Flecha para os modelos de viga mista de *slim floor* ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015).



Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

Com base no Diagrama Carga × Flecha apresentado na Figura 3.11, pode-se observar que os quatro modelos experimentais tipo SCSFB apresentaram um comportamento bastante dúctil. De acordo com Chen, Limazie e Tan (2015), os modelos de viga apresentaram um comportamento elástico linear além do valor limite de flecha no centro do vão para a combinação de serviço, tomado como $v\tilde{a}o/360$ (11 mm). No entanto, se for admitido um carregamento de serviço correspondente a aproximadamente $0,5 P_u$, a flecha no centro do vão superaria a flecha limite.

Os modelos experimentais SCSFB 1 e SCSFB 2 apresentaram colapso por esmagamento do concreto na zona comprimida, causado pelo momento fletor. O modelo experimental SCSFB 1 possui uma capa de concreto armado com 38 mm de espessura sobre a mesa superior do perfil de aço, ao passo que o modelo SCSFB 2 não possui capa de concreto e as barras da armadura são posicionadas a 30 mm da superfície (Figura 3.10-a e b). A presença da capa de concreto e da armadura longitudinal causam a elevação da linha neutra no modelo experimental SCSFB 1 em relação à linha neutra no modelo SCSFB 2, resultando em um aumento do momento fletor resistente.

Os modelos experimentais SCSFB 3 e SCSFB 4, que não possuem mesa superior, apresentaram colapso por falha da conexão de cisalhamento, esmagamento do concreto pela alma do perfil de aço devido ao deslizamento entre aço e concreto e descolamento do concreto situado acima das aberturas. O modelo experimental SCSFB 3 possui uma capa de concreto armado com 38 mm de espessura sobre a alma do perfil t \bar{e} . Esta diferença causa a elevação da linha neutra no modelo experimental SCSFB 3 em relação ao modelo SCSFB 4, resultando em um momento fletor resistente maior. Os grandes deslizamentos relativos entre aço e concreto, acompanhados de falhas dos mecanismos de cisalhamento observados no modelo experimental SCSFB 3, evidenciaram o colapso por falha da conexão e a queda da capacidade resistente observada no diagrama Carga \times Flecha (Figura 3.11).

No diagrama Carga \times Flecha (Figura 3.11) pode-se observar uma semelhança entre a carga última dos modelos experimentais SCSFB 2 (264,7 kN) e SCSFB 3 (255,1 kN). O perfil de aço do modelo experimental SCSFB 2 possui mesa superior e enrijecedores soldados na região dos apoios e não possui capa de concreto, ao passo que o modelo SCSFB 3 possui capa de concreto de 38 mm de espessura e não possui mesa superior no perfil de aço e enrijecedores nos apoios. Esta proximidade entre os valores de carga última ocorre devido à posição semelhante da linha neutra apresentada pelos dois modelos experimentais. A ausência da mesa superior no perfil de aço e dos enrijecedores nos apoios no modelo SCSFB 3 levaram a grandes deslizamentos entre aço e concreto e à falha do meio de conexão pelo descolamento do concreto, o que explica a queda de sua capacidade resistente.

3.3. Definição da geometria do modelo de elementos finitos

Para definir a geometria dos modelos numéricos para os modelos de referência selecionados para este trabalho foi usada a metodologia desenvolvida inicialmente por Paes (2003) e aperfeiçoada por Mesquita (2016). Para o sistema *I-TECH* com vigas de aço tipo *D-Beam* com aberturas trapezoidais na alma e para as vigas mistas tipo *SCSFB* com aberturas circulares, o modelo geométrico abrange a representação do perfil de aço, da laje mista e das barras de armadura inseridas no concreto.

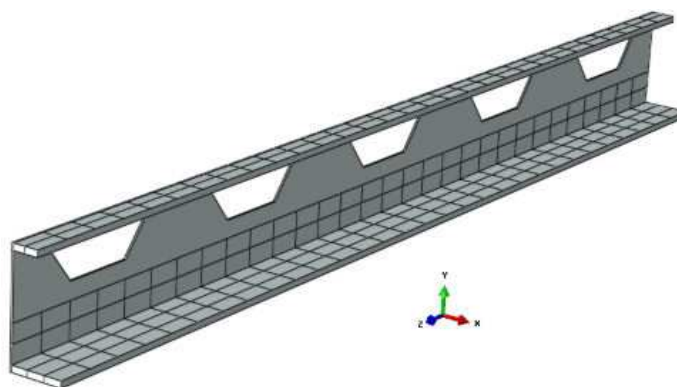
Na criação destes modelos, observou-se que, em todos os modelos de referência as vigas mistas de *slim floor* possuem simetria geométrica, bem como das condições de carregamento, em relação a dois planos. Em função disto, decidiu-se modelar somente a quarta parte de cada uma das vigas mistas de *slim floor* de referência, para reduzir o custo computacional e o tempo de análise.

A seguir apresentam-se detalhes sobre os modelos geométricos para as vigas mistas de *slim floor* dos sistema *I-TECH*, ensaiadas por Ju, Chun e Kim (2009), e do tipo *SCSFB*, ensaiadas por Chen, Limazie e Tan (2015).

3.3.1. Viga mista do sistema *I-TECH* – com aberturas trapezoidais

Para representar as vigas de aço do tipo *D-Beam* que compõem o sistema *I-TECH*, utilizou-se um modelo geométrico composto por chapas que representam o perfil de aço com aberturas trapezoidais na alma (Figura 3.12).

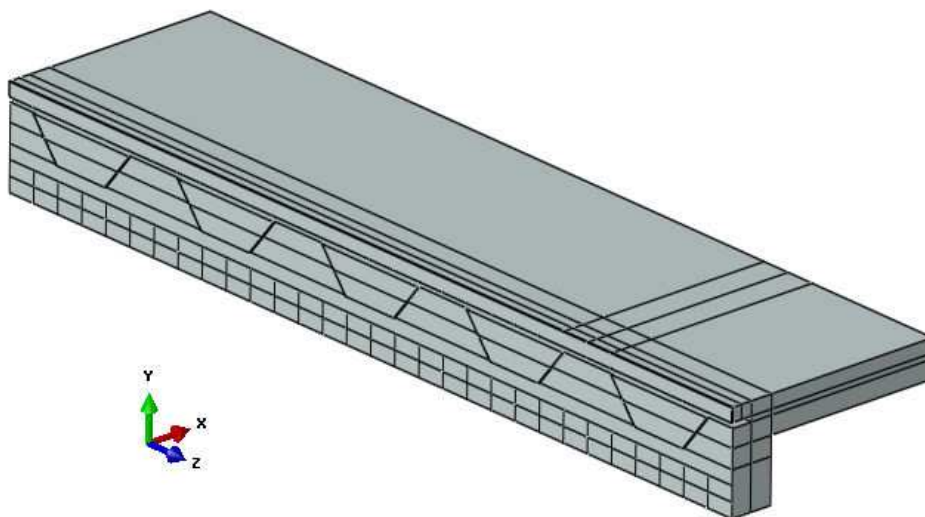
Figura 3.12 - Modelo geométrico de uma viga tipo *D-Beam*, utilizada no sistema *I-TECH*.



Fonte: Do autor.

Para representar a laje mista no modelo geométrico, considerou-se uma laje maciça subtraída do espaço ocupado pela viga de aço (Figura 3.13). As nervuras da laje mista, situadas na parte inferior, foram desprezadas.

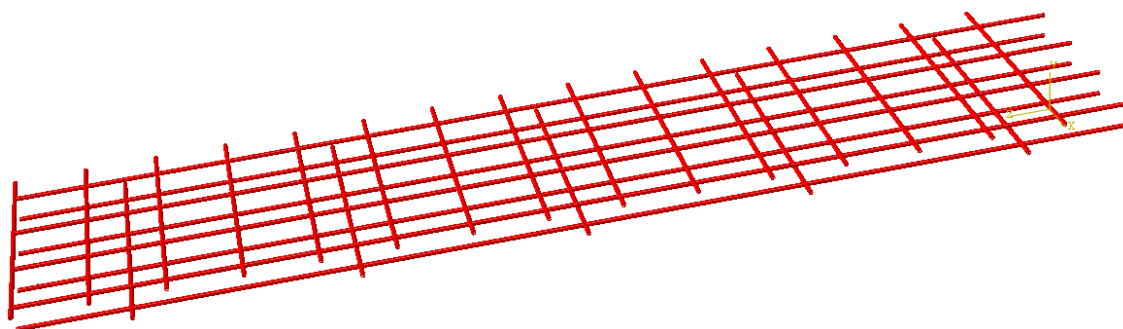
Figura 3.13 - Modelo geométrico da laje mista utilizada no sistema *I-TECH*.



Fonte: Do autor.

Para representar a armadura da laje foram utilizados elementos lineares em duas direções, formando uma malha semelhante à armadura dos modelos usadas pelos autores (Figura 3.14).

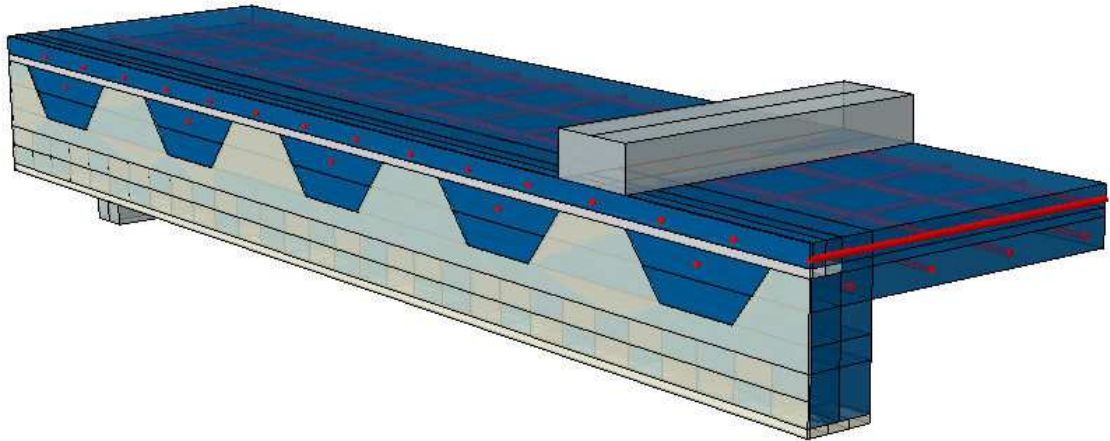
Figura 3.14 - Modelo geométrico da armadura da laje para o modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

No modelo geométrico foram representados também os elementos para distribuição da carga no sentido transversal do modelo, que consistem de uma chapa com seção transversal de 20 x 50 mm e comprimento igual à largura da laje. Após a criação das partes individuais, o modelo geométrico foi montado (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Aspecto geral do modelo geométrico para as vigas mistas do sistema *I-TECH*.

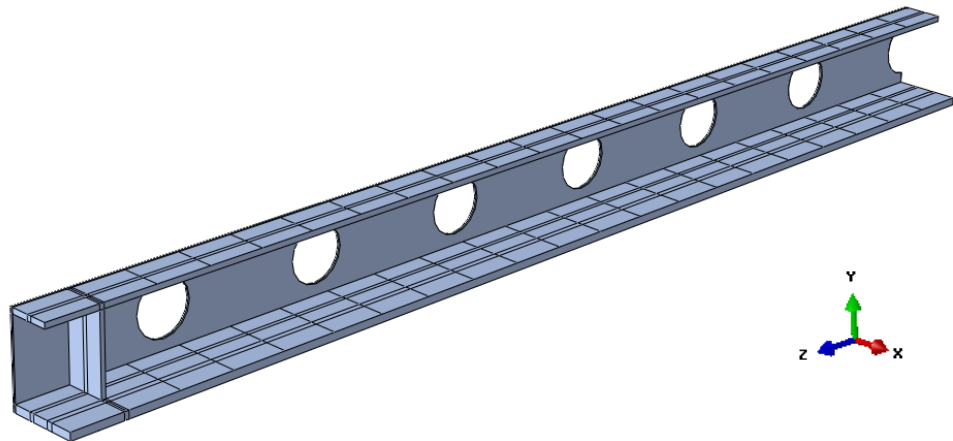


Fonte: Do autor.

3.3.2. Viga mista tipo SCSFB – com aberturas circulares

Para representar a viga de aço com seção transversal assimétrica com aberturas circulares na alma, que compõem as vigas mistas tipo SCSFB, utilizou-se um modelo geométrico composto por chapas que representam o perfil de aço com aberturas circulares na alma (Figura 3.16).

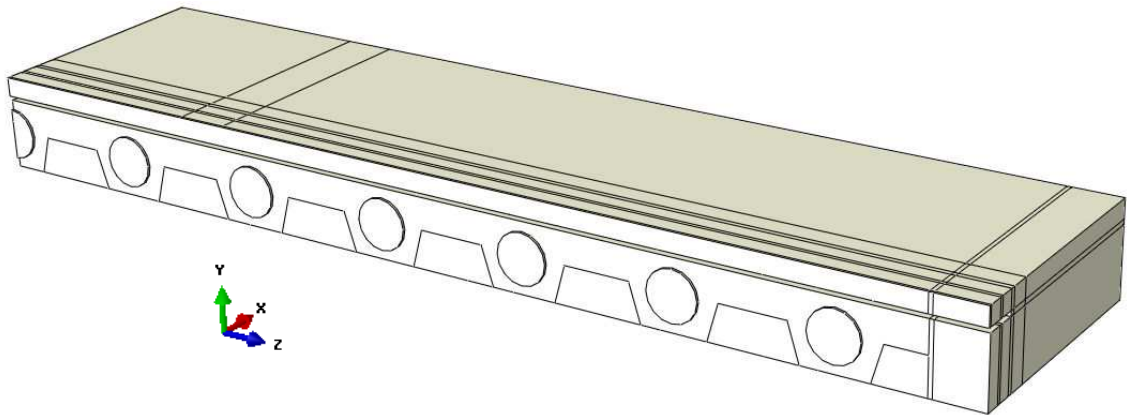
Figura 3.16 - Modelo geométrico de uma viga de aço com seção transversal assimétrica, com aberturas circulares na alma, que compõe o sistema SCSFB.



Fonte: Do autor.

Para representar a laje mista no modelo geométrico, considerou-se uma laje maciça subtraída do espaço ocupado pela viga de aço (Figura 3.17).

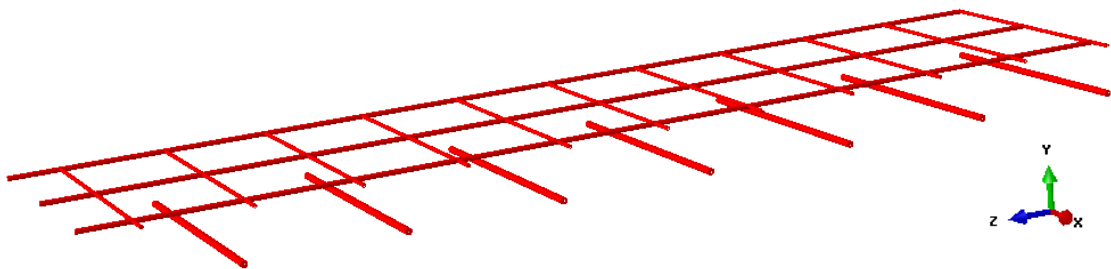
Figura 3.17 - Modelo geométrico de uma da laje de concreto usada no sistema SCSFB.



Fonte: Do autor.

Para a armadura da laje foram considerados elementos lineares em duas direções, formando uma malha de barras de aço, como as que estão presentes nos modelos ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015) (Figura 3.18).

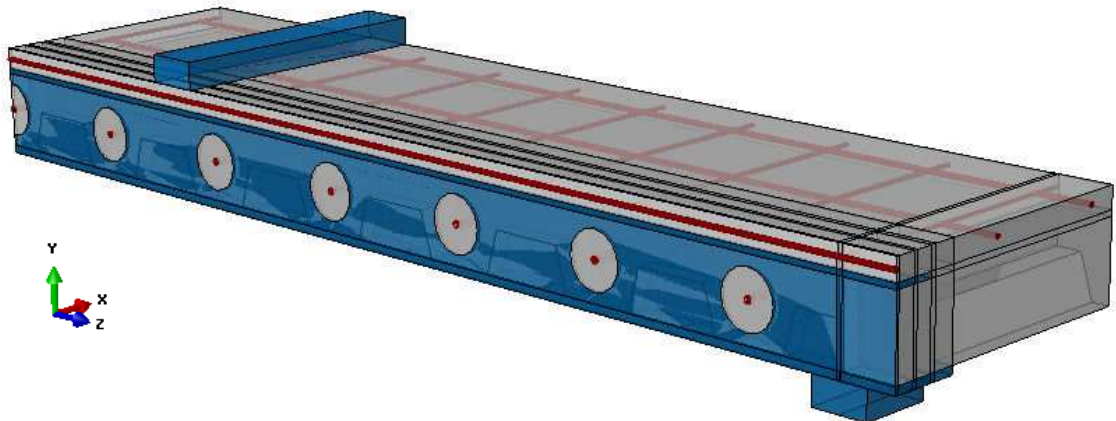
Figura 3.18 - Modelo geométrico da armadura da laje para o modelo SCSFB.



Fonte: Do autor.

No modelo numérico também foram considerados os elementos para distribuição da carga no sentido transversal da viga, que consistem de uma chapa com seção de 20 x 50 mm e comprimento igual à largura da laje. Após criar as partes individuais, o modelo geométrico foi montado (Figura 3.19).

Figura 3.19 - Aspecto geral do modelo geométrico para as vigas mistas tipo SCSFB.



Fonte: Do autor.

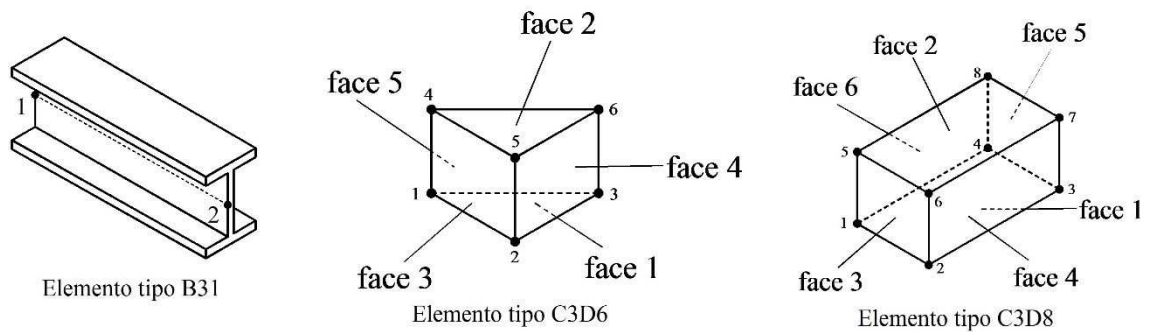
3.4. Malha de elementos finitos

Nos itens a seguir, são definidos os tipos de elementos utilizados nos modelos numéricos, as partições e o tamanho da malha de elementos finitos utilizada.

3.4.1. Tipos de elementos utilizados

Nos modelos numéricos de elementos finitos criados neste trabalho foram utilizados três tipos de elementos: elementos de viga do tipo B31 e elementos sólidos do tipo C3D6 e do tipo C3D8. Esses elementos foram usados de acordo com a geometria de cada uma das partes do modelo numérico, para conferir uma melhor conformidade para a análise. Os três tipos de elementos usados encontram-se disponíveis na biblioteca do Abaqus e são mostrados na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Tipos de elementos finitos utilizados nos modelos.

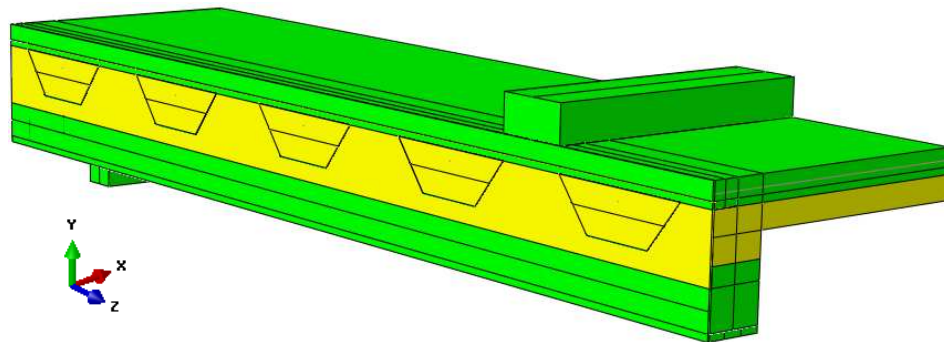


Fonte: SIMULIA (2012).

Os elementos tipo viga, B31, com dois nós, seis graus de liberdade por nó e formulação linear, foram usados nas barras de aço das armaduras e nas barras passantes pelas aberturas na alma. O uso de elementos sólidos aumentaria a complexidade da malha devido à necessidade de compatibilidade entre a malha da armadura e a do concreto em seu entorno, requerendo o uso de elementos relativamente pequenos para uma boa representação. Como este refinamento excessivo da malha de elementos finitos nesta região resultaria em um modelo muito grande, optou-se por representar as barras de aço por meio de elementos lineares.

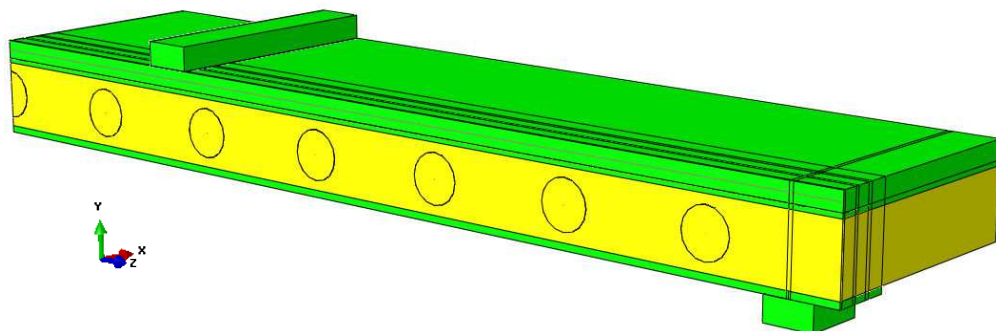
Já os elementos sólidos do tipo C3D6 (*wedge*), que consistem de um prisma de base triangular, seis nós e três graus de liberdade por nó, foram usados na região das aberturas na alma do perfil de aço e na parte central da laje de concreto. Para as vigas mistas do sistema *I-TECH*, esses elementos foram usados somente na região central da laje (região amarela da Figura 3.21). Para as vigas mistas tipo SCSFB, os elementos C3D6 foram usados na laje de concreto e na região central da viga de aço onde se encontram as aberturas, mostradas em amarelo na Figura 3.22.

Figura 3.21 - Identificação das regiões para os tipos de elementos finitos usados no sistema *I-TECH*.



Fonte: Do autor.

Figura 3.22 - Identificação das regiões para os tipos de elements finitos usados viga mista tipo SCSFB.



Fonte: Do autor.

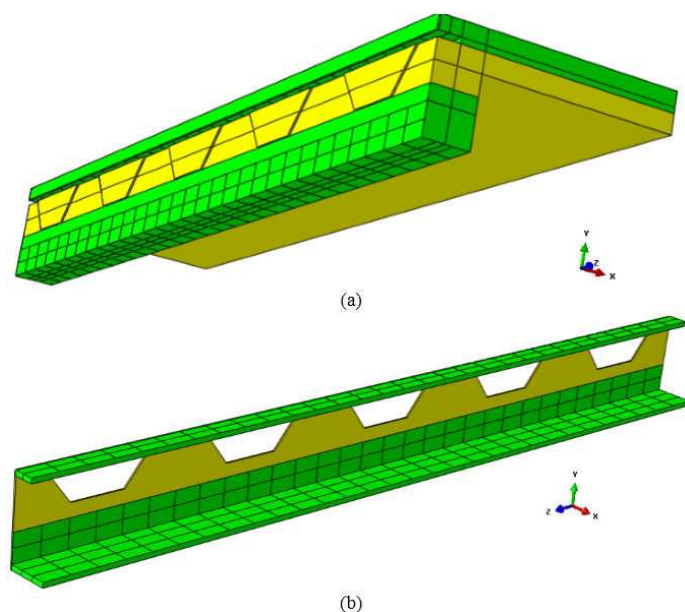
Por fim, os elementos tipo sólido hexaédrico C3D8, com oito nós e três graus de liberdade por nó, foram usados no restante das regiões com formas regulares presentes no perfil e na laje, representadas na cor verde nas Figuras 3.21 e 3.22. Esse tipo de elemento finito também foi usado para discretizar as barras de distribuição da carga no sentido transversal dos modelos e nos apoios.

3.4.2. Partições do modelo e geração da malha

Um aspecto importante em um modelo numérico de elementos finitos são as partições definidas ao longo do modelo geométrico e as técnicas de geração de malha aplicadas a este modelo. O programa computacional Abaqus gera a malha de elementos finitos automaticamente, de acordo com as partições presentes no modelo e os parâmetros de geração de malha fornecidos.

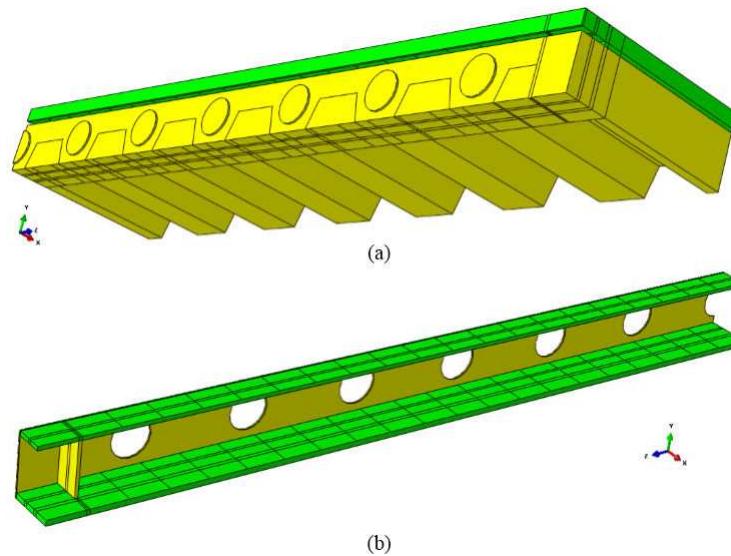
Nos dois tipos de vigas de *slim floor* analisados foram feitas diversas partições de acordo com as regiões do modelo para se obter uma malha com a menor quantidade possível de elementos distorcidos. Além desta função, as partições também servem para determinar a localização dos elementos de conexão (elementos de mola) usados para representar a interação entre interfaces de aço e concreto. Nas Figuras 3.23 e 3.24 são mostradas as partições utilizadas nos dois tipos de vigas mistas de *slim floor* considerados.

Figura 3.23 - Partições definidas nos modelos de viga mista do sistema *I-TECH*: (a) partições na laje de concreto; (b) partições na viga de aço.



Fonte: Do autor.

Figura 3.24 - Partições definidas para os modelos de viga mista tipo SCSFB: (a) partições na laje de concreto; (b) partições na viga de aço.

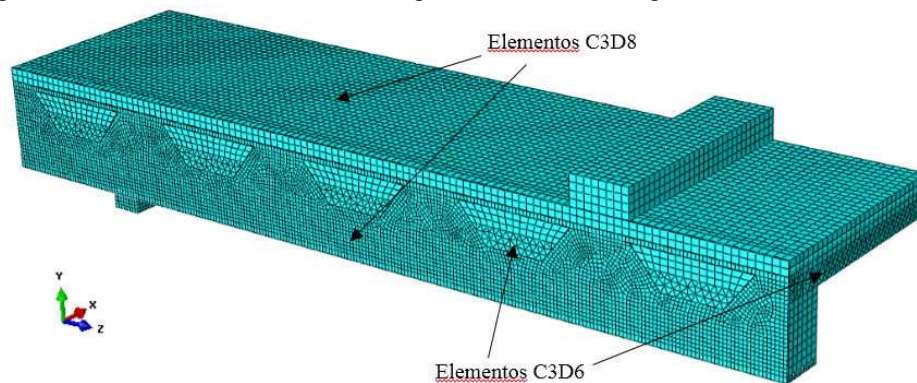


Fonte: Do autor.

Outro fator que influencia na geração da malha do modelo numérico é o tipo de metodologia para criação dos elementos definidos para a análise do modelo. Deste modo, nas regiões das aberturas dos dois modelos de *slim floor* considerados, representadas na cor amarela nas Figuras 3.23 e 3.24, onde não há formas regulares e ortogonais, optou-se por uma geração de malha por varredura. Nas demais regiões, usou-se a opção de geração de malha estruturada, representada na cor verde (Figuras 3.23 e 3.24).

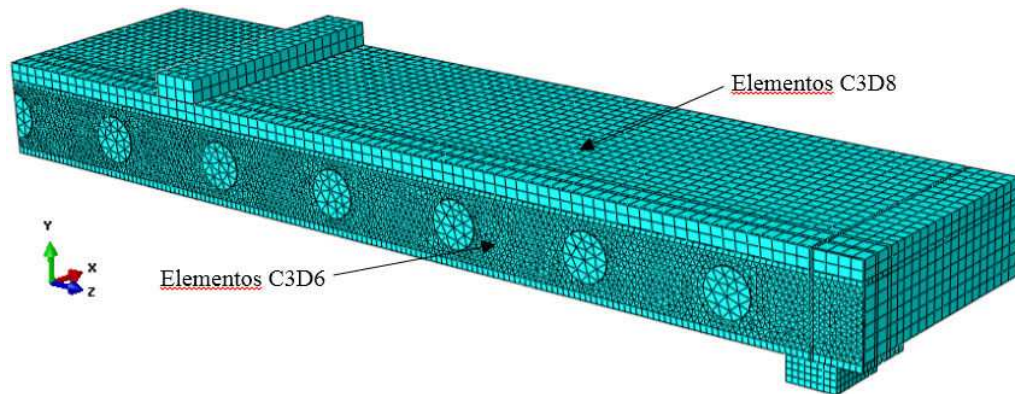
Nas Figuras 3.25 e 3.26 apresenta-se o aspecto final da malha de elementos finitos para os modelos de viga mista do sistema *I-TECH* e do tipo SCSFB, com indicação dos tipos de elementos utilizados em cada parte do modelo.

Figura 3.25 - Malha de elementos finitos para os modelos de viga mista do sistema *I-TECH*.



Fonte: Do autor.

Figura 3.26 - Malha de elementos finitos para os modelos de viga mista tipo SCSFB.



Fonte: Do autor.

3.4.3. Estudo de refinamento de malha

Na simulação numérica pelo método dos elementos finitos, um dos fatores que influencia a qualidade dos resultados é o nível de refinamento da malha de elementos finitos no modelo. Quanto maior o nível do refinamento da malha, a compatibilização entre os elementos tende a melhorar, bem como a convergência dos resultados. Com isso, à medida que o refinamento aumenta, trabalhando-se com elementos com dimensões cada vez menores, obtém-se resultados com valores convergentes. A partir de um determinado tamanho dos elementos, o efeito na melhoria dos resultados torna-se insignificante e o custo computacional e tempo de análise aumentam consideravelmente.

Após a realização de estudos para avaliar o nível adequado de refinamento da malha de elementos finitos usados para os dois tipos de vigas mistas de *slim floor* considerados, optou-se pelo uso de elementos finitos com dimensão máxima de 12,5 mm para a viga de aço e para placa de base do sistema *I-TECH*, e 25 mm para essas regiões das vigas mistas tipo SCSFB. Para as regiões da laje de concreto e para os elementos para distribuição da carga foram usados elementos com dimensão máxima de 25 mm.

3.5. Características dos materiais

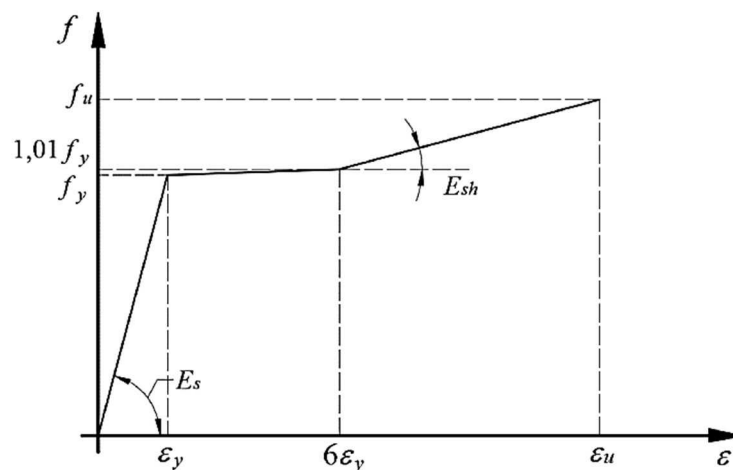
Nos itens a seguir são apresentados os modelos constitutivos adotados para representar o comportamento do aço e do concreto observados nos ensaios realizados por Ju, Chun e Kim (2009) e por Chen, Limazie e Tan (2015), para os dois tipos de *slim floor* analisados neste trabalho.

3.5.1. Modelo Constitutivo para o aço do perfil

Para representar o comportamento dos aços presentes nos elementos que compõem os modelos numéricos, são necessários alguns dados para realizar a análise elástica e plástica do material. Este dados são o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a relação tensão \times deformação do regime plástico do material. O módulo de elasticidade foi obtido experimentalmente e fornecido por Ju, Chun e Kim (2009) e Chen, Limazie e Tan (2015), e o coeficiente de Poisson usado foi 0,3. Já as relações tensão \times deformação foram obtidas a partir de estudos de validação com o uso de modelos constitutivos difundidos no meio técnico.

O modelo constitutivo usado para representar o comportamento do aço do perfil das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH* foi o modelo apresentado por Byfield, Davies e Dhanalakshmi (2005). Neste modelo, apresentado na Figura 3.27, considera-se que o encruamento do aço ocorre segundo um módulo de encruamento (E_{sh}). Os autores sugerem a adoção do valor do módulo de encruamento como sendo 2700 N/mm², na ausência de resultados experimentais. Através da representação do encruamento do aço, o modelo numérico consegue representar melhor os fenômenos que ocorrem nas vigas mistas de *slim floor* próximo à situação de colapso (MESQUITA, 2016).

Figura 3.27 - Relação tensão \times deformação para o aço tracionado e comprimido.



Fonte: Do autor.

Para evitar divergências na análise dos modelos numéricos, optou-se por adotar uma inclinação mínima no patamar de escoamento.

Para os modelos numéricos das vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares na alma, do tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), foram usados os modelos constitutivos para o aço com imperfeições. Esses modelos consideram o efeito de tensões térmicas residuais e de outras imperfeições não consideradas diretamente no modelo numérico. Partindo-se dos estudos apresentados por Almeida (2012), Dutra (2014) e Petruski (2016), foram testados diferentes modelos para o aço do perfil da viga mista. As propriedades do aço com imperfeições são apresentadas na Tabela 3.5, de acordo com o modelo constitutivo mostrado na Figura 2.20.

Tabela 3.5 - Propriedades do aço com imperfeições.

Propriedades do aço com imperfeições	
k	0,10
E_h	2700 MPa
$f_{y,Imp}$	$0,75 \times f_y$
ε_y	$7 \times \varepsilon_{y,Imp}$
ε_h	$10 \times f_y / E$
$\varepsilon_{Máx}$	$200 \times f_y / E$

Fonte: Do autor.

Para os modelos SCSFB 1 e SCSFB 2, também foram feitas simulações numéricas desconsiderando os efeitos das tensões residuais, através do modelo proposto por Byfield, Davies e Dhanalakshmi (2005). Por meio da comparação com os resultados, notou-se melhor compatibilidade com o modelo constitutivo que considera as tensões residuais. Assim, este modelo foi adotado para as vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB.

Por fim, para a placa de carregamento e placa de base foram adotados modelos constitutivos que representassem somente o comportamento elástico do aço.

3.5.2. Modelo constitutivo para o concreto

Sabe-se que o concreto é um material frágil que possui comportamentos distintos quando submetido a solicitações de tração e de compressão. Desse modo, é ideal usar um recurso que consiga representar as propriedades do concreto para as diferentes respostas a cada tipo de solicitação. Neste trabalho, foi o usado o modelo CDP (*Concrete Damage Plasticity* – ou modelo de plasticidade com consideração do dano para o concreto) para simular o comportamento do concreto numericamente. Este modelo é capaz de descrever o comportamento de materiais frágeis e está disponível na biblioteca do Abaqus.

Para utilização do CDP, são necessários os seguintes dados de entrada para definir o modelo: parâmetros elásticos do concreto; parâmetros de plasticidade do CDP; relação tensão×deformação para o concreto comprimido uniaxialmente; relação tensão × abertura de fissuras para o concreto tracionado uniaxialmente; e as variáveis de dano para o concreto comprimido e tracionado. Mesquita (2016) e Petruski (2016) apresentam informações detalhadas a respeito do modelo de plasticidade com dano (CDP) disponível no programa Abaqus.

3.5.2.1. Parâmetros elásticos do concreto

Os parâmetros elásticos do concreto são o Módulo de Elasticidade (E_c) e o coeficiente de Poisson (ν). Para o coeficiente de Poisson adotou-se o valor usual de $\nu = 0,2$. Para o Módulo de Elasticidade, foram adotados os valores experimentais obtidos por Ju, Chun e Kim (2009) e Chen, Limazie e Tan (2015) para cada tipo de *slim floor* estudado, mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Valores dos módulos de elasticidade do concreto para os modelos criados.

<i>I-TECH</i>	SCSFB
C1P15 - $E_c = 29994$ MPa	SCSFB 1 - $E_c = 32000$ MPa
B-Slim - $E_c = 29994$ MPa	SCSFB 2 - $E_c = 32000$ MPa
C0P15 - $E_c = ---$	SCSFB 3 - $E_c = 32000$ MPa
	SCSFB 4 - $E_c = 34000$ MPa

Fonte: Do autor.

3.5.2.2. Parâmetros de plasticidade do CDP

Os parâmetros de plasticidade que devem ser inseridos para definir o CDP são: o ângulo de dilatação (ψ), a excentricidade (ϵ), a relação entre a resistência à compressão no estado biaxial e a resistência à compressão uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}), o fator de forma (K) e o parâmetro de viscosidade (μ). O ângulo de dilatação (ψ) está relacionado à variação de volume do concreto quando submetido a elevados estados de tensões inelásticos (LUBLINER, 1989). Segundo Pavlovic *et al.* (2013) é recomendado um ângulo de dilatação entre os valores 36° e 38° para problemas de análise estática do concreto.

A excentricidade (ϵ) está relacionada com a velocidade que a função do potencial plástico se aproxima de uma assíntota (MALM, 2006). Na maioria dos casos, observa-se a utilização do valor recomendado pelo no manual do Abaqus que é 0,1 ou menor. Para a

relação entre as resistências à compressão biaxial e uniaxial o Abaqus adota que a resistência à compressão biaxial do concreto é obtida considerando a relação σ_{b0}/σ_{c0} é 1,16, que é o valor obtido nos ensaios realizados por Kupfer (1969) *apud* Chen (2007).

O fator de forma (K) é utilizado pelo CDP para definir o formato da superfície de falha do concreto. De acordo com o manual do Abaqus, o valor de K deve estar contido no seguinte intervalo $0,5 \leq K \leq 1,0$, sendo que o valor padrão é 0,667. Por fim, o parâmetro de viscosidade (μ) é usado para se fazer uma regularização visco-plástica e conseguir uma melhora na taxa de convergência dos modelos de elementos finitos sem que ocorra alterações nos resultados obtidos (SIMULIA, 2012).

Na Tabela 3.7 tem-se os valores dos parâmetros plásticos usados na definição do CDP (*Concrete Damaged Plasticity*) para as vigas mistas de *slim floor* desenvolvidas neste trabalho.

Tabela 3.7 - Parâmetros plásticos do CDP para os modelos de vigas mistas do sistema *I-TECH*.

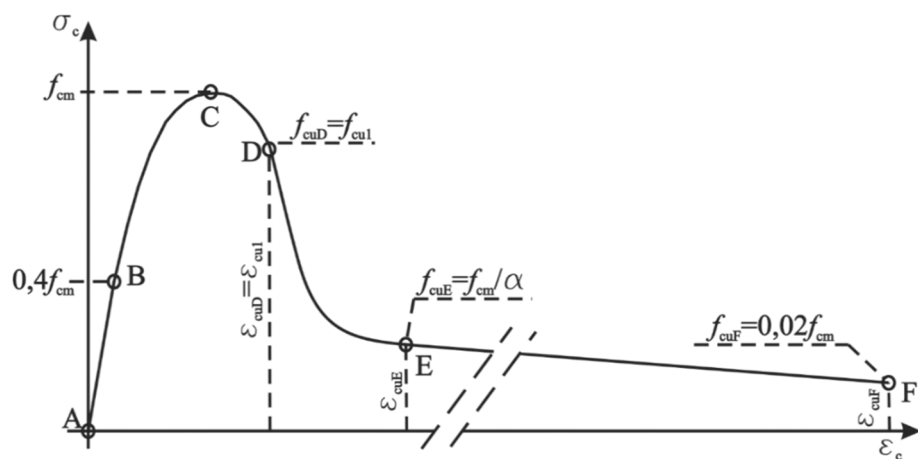
ψ	ϵ	σ_{b0}/σ_{c0}	K	μ
38°	0,1	1,16	0,667	5×10^{-5}

Fonte: Do autor.

3.5.2.3. Comportamento do concreto sob compressão uniaxial

O comportamento do concreto quando submetido à compressão uniaxial foi representado pelo modelo apresentado por Pavlovic *et al.* (2013) (Figura 3.28).

Figura 3.28 - Representação da curva Tensão (σ_c) x Deformação (ϵ_c) para o concreto sob compressão uniaxial.



Fonte: Do autor.

O modelo constitutivo usado para representar o comportamento mecânico do concreto submetido à compressão uniaxial é formado por cinco trechos distintos. Os três primeiros trechos foram definidos a partir das prescrições apresentadas pelo Model Code 2010 (FIB, 2011, Item 2.8.2.1), o Trecho D-E foi definido utilizando a equação apresentada por Pavlovic *et al.* (2013), calibrando-se os fatores α_{tD} e α_{tE} , e o último trecho (Trecho E-F) foi definido com a calibração do parâmetro α , da deformação ε_{cuE} e da resistência residual $f_{cuF} = 0,02f_{cm}$.

A curva Tensão (σ_c) x Deformação (ε_c) é informada ao CDP somente com seu trecho inelástico. A deformação inelástica ($\varepsilon_{c,in}$) é obtida subtraindo a parcela de deformação elástica ($\varepsilon_{c,el}$) da deformação total (ε_c), que é calculada a partir da relação entre σ_c e E_c . Considerou-se que o concreto se comporta em regime elástico até $0,4f_{cm}$ (40% de f_{cm}).

Nas Tabelas 3.8 e 3.9 tem-se os parâmetros para determinação do modelo constitutivo proposto por Pavlovic *et al.* (2013) usados em cada um dos modelos numéricos analisados.

Tabela 3.8 - Parâmetros do comportamento do concreto sob compressão para as vigas mistas do sistema *I-TECH*.

<i>I-TECH</i>	f_{cm} (MPa)	ε_{cuE} (‰)	α	α_{tD}	α_{tE}	ε_{cuF} (‰)
C1P15	28,1	40	20	0,5	0,7	60
B-Slim	28,1	40	20	0,5	0,7	60
C0P15	-	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor.

Tabela 3.9 - Parâmetros do comportamento do concreto sob compressão para as vigas mistas tipo SCSFB.

SCSFB	f_{cm} (MPa)	ε_{cuE} (‰)	α	α_{tD}	α_{tE}	ε_{cuF} (‰)
SCSFB1	29,04	30	20	0,5	0,7	60
SCSFB2	28,19	30	20	0,5	0,7	60
SCSFB3	28,48	30	20	0,5	0,7	60
SCSFB4	31,38	30	20	0,5	0,7	60

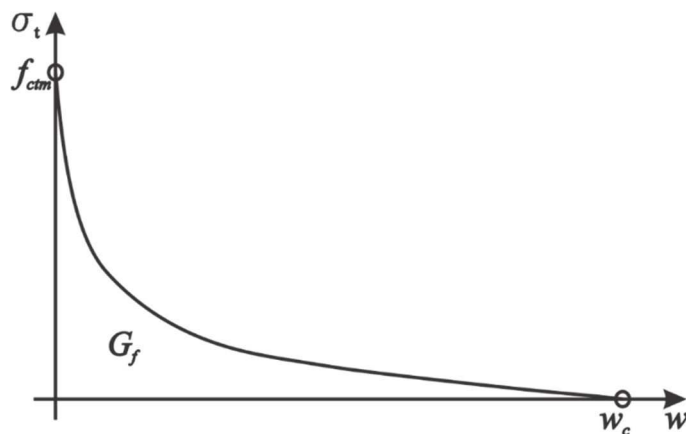
Fonte: Do autor.

3.5.2.4. Comportamento do concreto sob tração uniaxial

O comportamento do concreto submetido à tração uniaxial foi representado utilizando a relação Tensão x Abertura de fissuras com o modelo constitutivo proposto por Hordijk (1992). Esta relação apresenta um bom desempenho ao descrever o comportamento do concreto fissurado, segundo Petruski (2016).

Na fase pré-pico da tração uniaxial, antes de atingir a resistência média à tração (f_{ctm}) o concreto apresenta comportamento elástico-linear, definido pela tensão f_{ctm} e pelo módulo de elasticidade E_c . Após a fissuração do concreto, considera-se que esse material possui o comportamento não-linear descrito pela relação proposta por Hordijk (1992), como mostrado na Figura 3.29.

Figura 3.29 - Relação Tensão (σ) x Aberturas de fissuras (w) para concreto sob tração uniaxial.



Fonte: Do autor.

Para se definir a função proposta por Hordijk (1991) são necessárias a resistência média à tração (f_{ctm}) e a energia de fratura do concreto (G_F). Estes valores foram calculados utilizando-se as definições do Model Code 2010.

Nas Tabelas 3.10 e 3.11, tem-se os parâmetros para determinação do modelo constitutivo proposto por Hordijk usados nos modelos numéricos analisados.

Tabela 3.10 - Parâmetros do comportamento do concreto sob tração para as vigas mistas do sistema *I-TECH*.

<i>I-TECH</i>	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (MPa)	G_F (N/mm)
C1P15	28,1	2,22	29994	0,133
B-Slim	28,1	2,22	29994	0,133
C0P15	-	-	-	-

Fonte: Do autor.

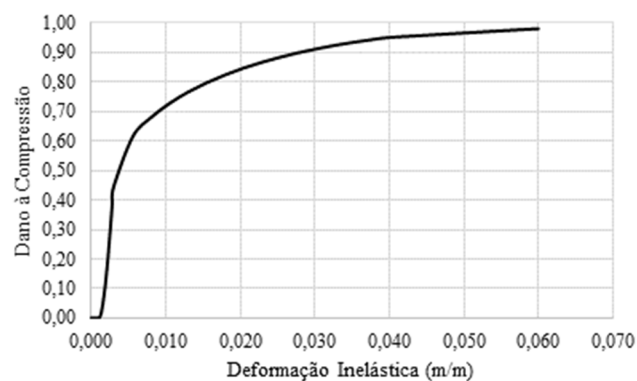
Tabela 3.11 - Parâmetros do comportamento do concreto sob tração para as vigas mistas tipo SCSFB.

<i>SCSFB</i>	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E (MPa)	G_F (N/mm)
SCSFB 1	29,04	2,8	32000	1,34
SCSFB 2	28,19	2,8	32000	1,33
SCSFB 3	28,28	2,8	32000	1,33
SCSFB 4	31,38	3,0	34000	1,36

Fonte: Do autor.

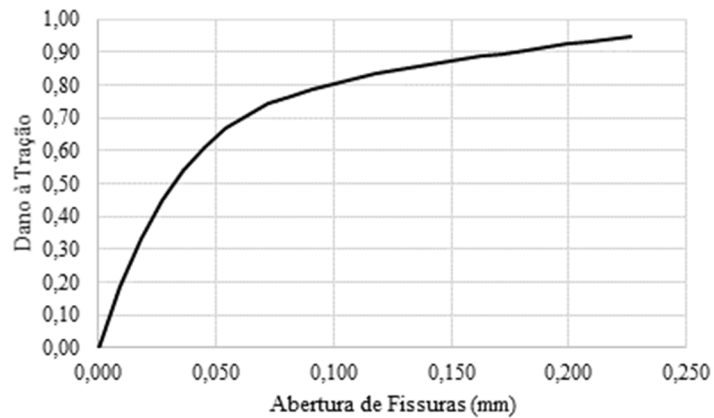
3.5.3. Variáveis de dano para o concreto comprimido e tracionado

Para descrever a evolução do dano no concreto quando submetido a solicitações de compressão e de tração, foram usadas as equações propostas por Pavlovic *et al.* (2013), apresentadas no Item 2.4.2. Assim, tem-se os diagramas de Dano à compressão uniaxial (D_c) × Deformação (ϵ_c) e de Dano à tração uniaxial (D_t) × Abertura de fissuras (w) exibidos nas Figuras 3.30 e 3.31.

Figura 3.30 - Diagrama Dano à compressão uniaxial (D_c) x Deformação (ϵ_c).

Fonte: Do autor.

Figura 3.31 - Diagrama Dano à tração uniaxial (D_t) x Abertura de fissuras (w).



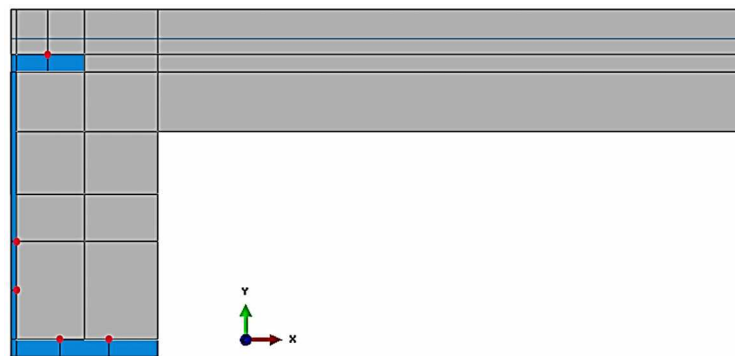
Fonte: Do autor.

3.6.Aderência na interface aço × concreto

Sabe-se que pela interação entre os materiais na interface aço-concreto ocorre a transferência de esforços longitudinais. Esta interação acontece por meios de conexão, como a aderência, que promovem a transferência do fluxo de cisalhamento.

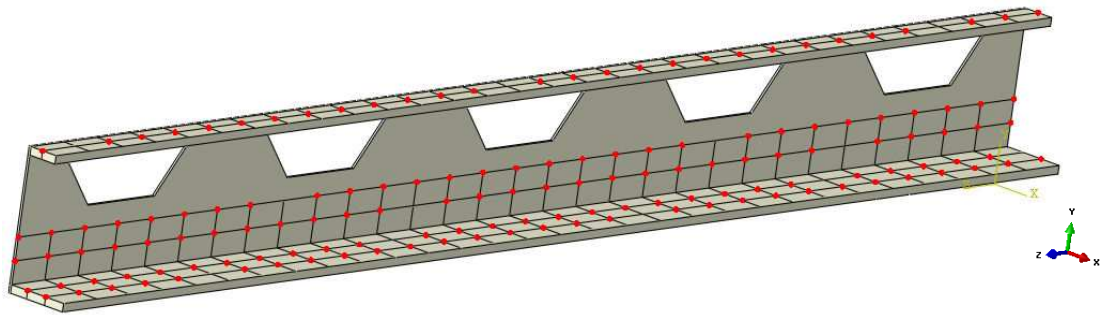
Para representar a aderência numericamente nos modelos de *slim floor* criados, foram usados elementos de conexão do tipo CONN3D2 entre nós pré-definidos no perfil de aço e na laje de concreto. A posição destes elementos na seção transversal das vigas foi determinada com referência dos modelos numéricos analisados por Paes (2003) e Mesquita (2016), e definidas por meio de partições criadas nos modelos numéricos. A seguir, tem-se a distribuição dos elementos para os modelos de viga mista do sistema *I-TECH*, na seção transversal (Figura 3.32) e ao longo da viga de aço (Figura 3.33).

Figura 3.32 - Distribuição dos elementos de conexão na seção transversal do modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

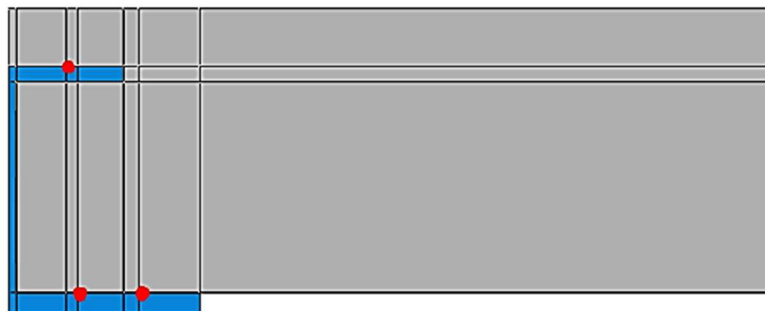
Figura 3.33 - Posição dos elementos de conexão na viga de aço do modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

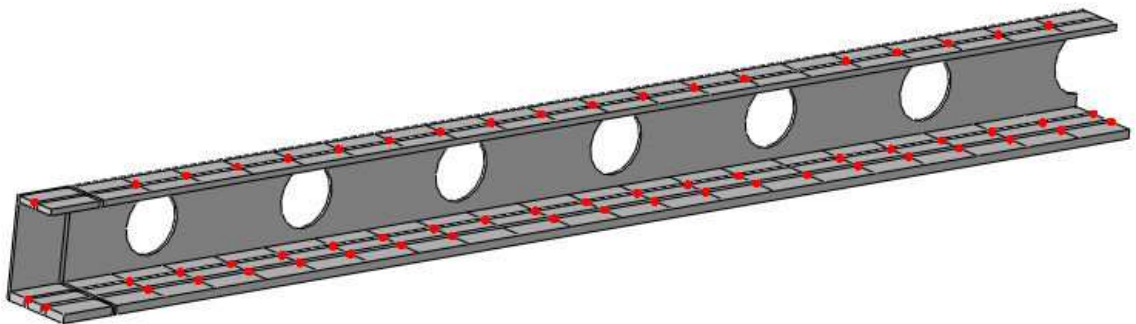
Para os modelos numéricos das vigas mistas tipo SCSFB (*Shallow Composite Shallow Floor Beam*) optou-se por usar elementos de conexão para simular a aderência somente ao longo das mesas superior e inferior. Devido às grandes aberturas presentes no centro da alma do perfil, a presença dos elementos de conexão nesta região se mostrou irrelevante. A posição deste elementos ao longo da seção transversal e do comprimento da viga mista é mostrada nas Figuras 3.34 e 3.35.

Figura 3.34 - Distribuição dos elementos de conexão na seção transversal do modelo SCSFB1.



Fonte: Do autor.

Figura 3.35 - Posição dos elementos de conexão na viga de aço do modelo SCSFB1.

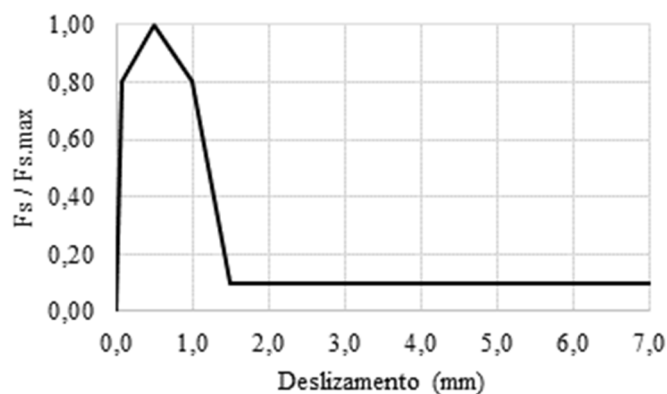


Fonte: Do autor.

Os elementos de conexão (CONN3D2) possuem duas componentes básicas, uma de translação e outra de rotação entre os nós conectados. O movimento translacional foi definido pela opção *Slide-Plane*, que permite a translação ao longo dos eixos locais U2 (y) e U3 (z) e restringe o movimento ao longo do eixo local U1 (x), ortogonal à face.

O comportamento mecânico da conexão por aderência foi representado com auxílio da curva Força × Deslizamento proposta por Paes (2003) para interfaces do tipo S (alma lisa), apresentada na Figura 3.36. A força máxima de aderência ($F_{\text{máx}}$) foi obtida a partir do produto da tensão máxima de aderência pela área de influência de cada elemento de conexão, que depende do espaçamento entre os elementos.

Figura 3.36 - Diagrama força x deslizamento proposto por Paes (2003) para a interface do tipo S.



Fonte: Do autor.

Nesse trabalho adotou-se para a tensão máxima de aderência (τ_s) o valor de 0,46 MPa para as vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, e o valor de 0,40 MPa para as vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB. Para os modelos de viga mista do sistema *I-TECH*, os elementos encontram-se espaçados horizontalmente de 50 mm na mesa inferior, verticalmente espaçados de 40 mm na alma, e longitudinalmente espaçados de 100 mm. Já para os modelos de viga mista tipo SCSFB, os elementos estão espaçados horizontalmente de 40 mm na mesa inferior e longitudinalmente espaçados de 100 mm.

3.7. Condições de contorno e carregamento

Neste item, são apresentadas as interações entre as partes dos modelos numéricos, as especificações de apoio e de simetria usadas e a forma de aplicação do carregamento aos modelos criados. Destaca-se que as interações adotadas foram as mesmas para todos os modelos numéricos de viga mista analisados, os do sistema *I-TECH* com abertura

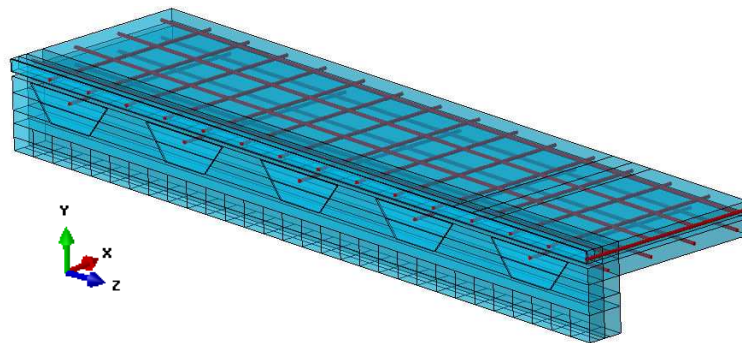
trapezoidal e os SCSFB com abertura circular. Assim, neste item serão ilustradas somente as condições de contorno e carregamento do modelo de viga mista do sistema *I-TECH*.

3.7.1. Interações presentes nos modelos numéricos

As interações entre as partes dos modelos numéricos determinam a maneira como essas diferentes partes se comportam mutuamente. Nos modelos desenvolvidos, tem-se três relações de interação entre partes diferentes: a interação entre a armadura e o concreto; as interações entre as faces da viga metálica e as faces da laje; e a interação entre a chapa de carregamento e a laje.

Primeiramente, para a interação entre a armadura e o concreto, utilizou-se a interação do tipo *embedded constrain*, que consiste na restrição de um elemento em relação àquele que ele se encontra embutido. Para isso, determinou-se que toda a armadura corresponderia à parte embutida, e toda a região de concreto seria a hospedeira (Figura 3.37). Assim, com esta interação estabelecida, compatibilizam-se as translações nodais dos elementos imersos com as translações dos elementos da região hospedeira.

Figura 3.37 - Interação do tipo *embedded* entre a armadura e a laje para o modelo C1P15.

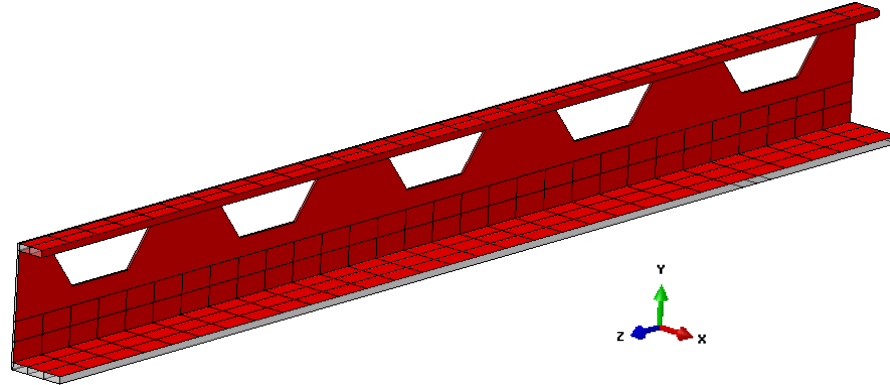


Fonte: Do autor.

Para a consideração da interação da viga de aço com o concreto deve-se entender que esta deve representar as condições de contato existentes entre o perfil de aço e a laje de concreto. Assim, além da condição de aderência imposta pelos elementos de conexão já mencionados, também deve-se representar o contato entre as faces destas duas partes. Para isso, usou-se uma interação de contato entre superfícies (*surface-to-surface contact*) do tipo *hard contact* (contato rígido), que permite o contato entre dois corpos, impede que um penetre no outro, desconsidera o atrito entre eles e permite sua separação após o

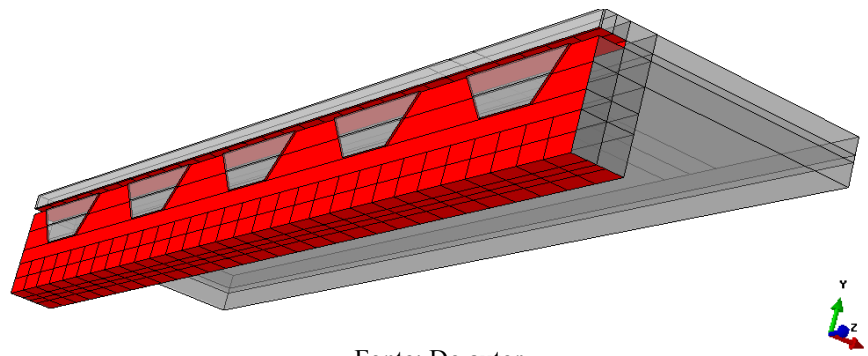
contato. As superfícies onde foram aplicadas essa propriedade de interação entre as faces são destacadas nas Figuras 3.38 e 3.39.

Figura 3.38 - Regiões com interação tipo *Hard Contact* no perfil de aço do modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

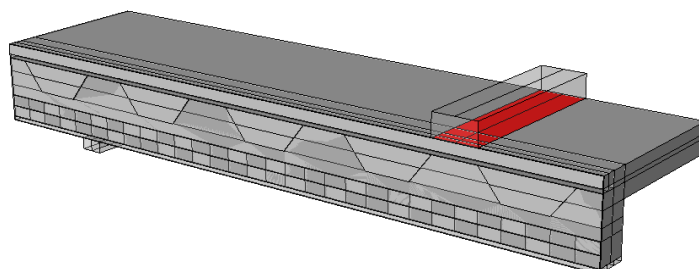
Figura 3.39 - Regiões correspondentes da interação tipo *Hard Contact* na laje do modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

Por fim, a interação entre a chapa de carregamento e a laje foi feita para possibilitar a transmissão dos esforços, da chapa para a laje. Para isto, adotou-se uma interação do tipo *tie constraint* (restrição dos nós). As regiões do modelo onde foram aplicadas a interação do tipo *tie* são apresentadas na Figura 3.40. Essas regiões consistem na região de apoio entre a placa e a laje.

Figura 3.40 - Região com interação tipo *tie* entre a chapa de carregamento e a laje de concreto.



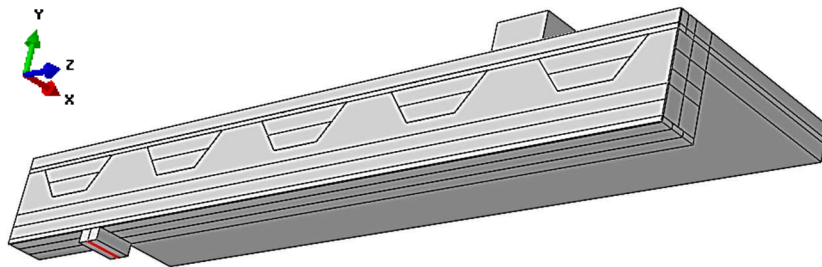
Fonte: Do autor.

3.7.2. Condições de apoio e de simetria

Além de estabelecer as interações presentes entre as partes dos modelos numéricos, também é necessário determinar as condições de apoio, que representam os apoios usados nos ensaios em laboratório, e as condições de simetria, para garantir o equilíbrio na análise da viga mista de *slim floor*.

Para a condição de apoio, foi imposta a limitação dos deslocamentos verticais. Para isso, determinou-se que todos os deslocamentos verticais em uma linha situada na face inferior da placa de base fossem nulos (Figura 3.41).

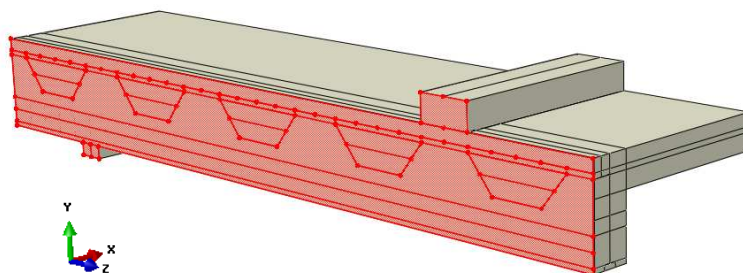
Figura 3.41 - Condição de apoio impedindo deslocamentos verticais, ao longo do eixo y.



Fonte: Do autor.

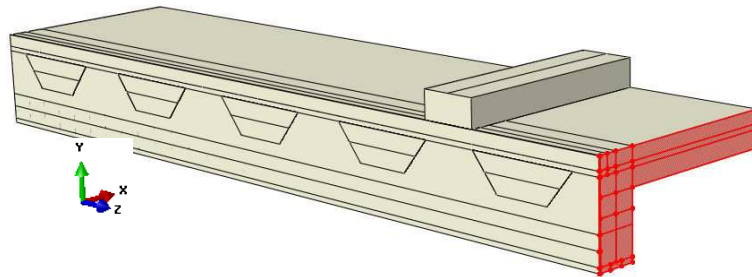
Já em relação às condições de simetria, como os modelos possuem dois planos de simetria, foi possível modelar apenas um quarto do modelo completo para as análises. Para isso, definiram-se condições de simetria que determinam que os deslocamentos na direção normal ao plano definido e as rotações em relação aos eixos contidos nesse plano sejam nulos. Assim, as regiões dos modelos onde são aplicadas as condições de simetria em relação ao plano y-z e em relação ao plano x-y são as ilustradas nas Figuras 3.42 e 3.43, respectivamente.

Figura 3.42 - Condição de simetria em relação ao plano y-z.



Fonte: Do autor.

Figura 3.43 - Condição de simetria em relação ao plano x-y.

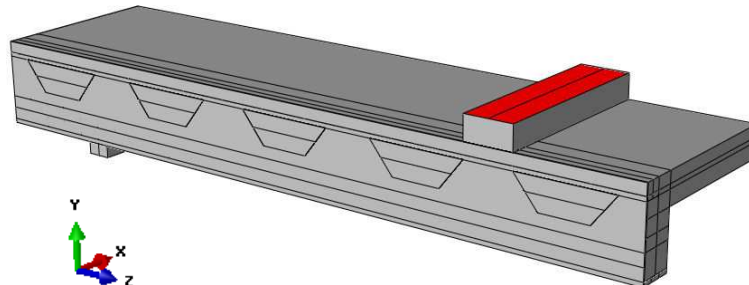


Fonte: Do autor.

3.8. Carregamento

O carregamento nos modelos numéricos foi feito com aplicação de carga sobre a região da placa de carregamento, de forma a simular os ensaios realizados em laboratório (Figura 3.44). Para isso, foi usada a opção *Pressure Total Force*, aplicando a carga sobre a chapa, evitando gerar regiões com grandes concentrações de tensões, o que poderia dificultar a convergência da análise. Utilizou-se o algoritmo de análise do tipo *static general*, em que o incremento máximo de carregamento permitido foi de 2% do carregamento total.

Figura 3.44 - Região de aplicação do carregamento determinado.



Fonte: Do autor.

3.9. Estudos de validação

Neste item apresentam-se as análises de validação dos modelos numéricos desenvolvidos com base nos experimentos de Ju, Chun e Kim (2009) e Chen, Limazie e Tan (2015). Primeiramente, tem-se os modelos de viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH* ensaiados por Ju, Chun e Kim (2009), que possuem abertura trapezoidal com barra passante como estratégia de ativação do comportamento misto do sistema. Depois, são apresentados os modelos de viga mista de *slim floor* tipo SCSFB (*shallow composite slim floor beam*), ensaiados por Chen, Limazie e Tan (2015), com vigas de aço com grandes aberturas circulares na alma e barras passantes para proporcionar o comportamento misto

do sistema. O modelo C1P15 estudado por Ju, Chun e Kim (2009) e o modelo SCSFB 1 estudado por Chen, Limazie e Tan (2015) são os modelos base dos estudos de variação de parâmetros.

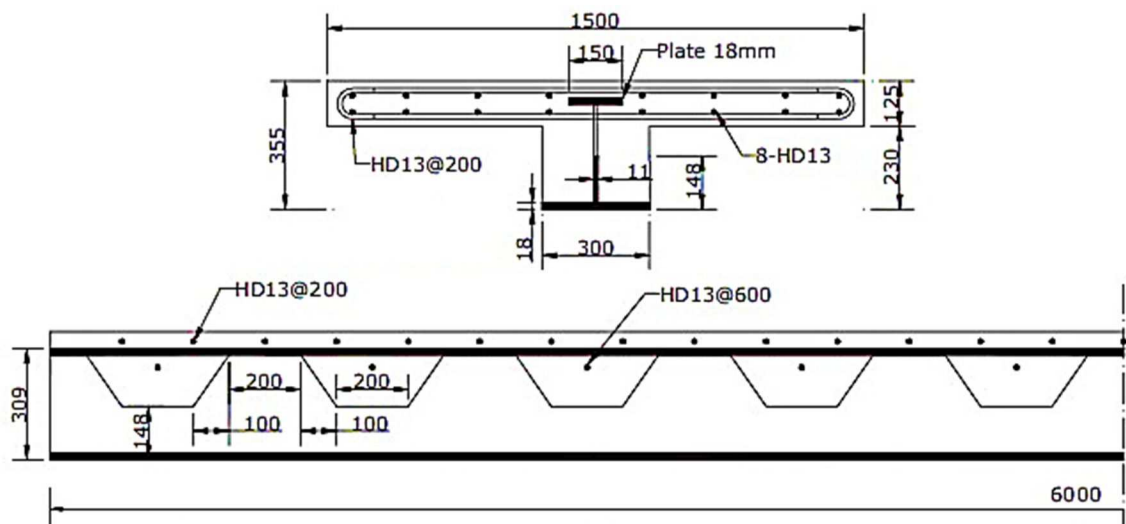
3.9.1. Estudo 1 – Modelo C1P15

3.9.1.1. Modelo experimental

O modelo experimental C1P15 corresponde a uma viga mista de *slim floor*, com comprimento de 6,0 m, composta por um perfil T fabricado a partir de um perfil laminado H-488×300×11×18 (SS400, $f_y = 235$ MPa), cortado no formato hexagonal (castelado), soldado a uma chapa de aço (espessura = 18 mm, SS400), que forma a mesa superior (Figura 3.45).

Esse perfil está integrado a uma laje mista concretada no local, formada por chapa de aço dobrada apoiada sobre perfis U não estruturais fixados na mesa inferior da viga de aço. Barras HD13 (13mm de diâmetro, $f_y = 392$ MPa) foram usadas como armadura na laje e barras transversais, com as mesmas propriedades das armaduras, foram usadas nas aberturas.

Figura 3.45 - Propriedades geométricas do modelo experimental B-C1P15.

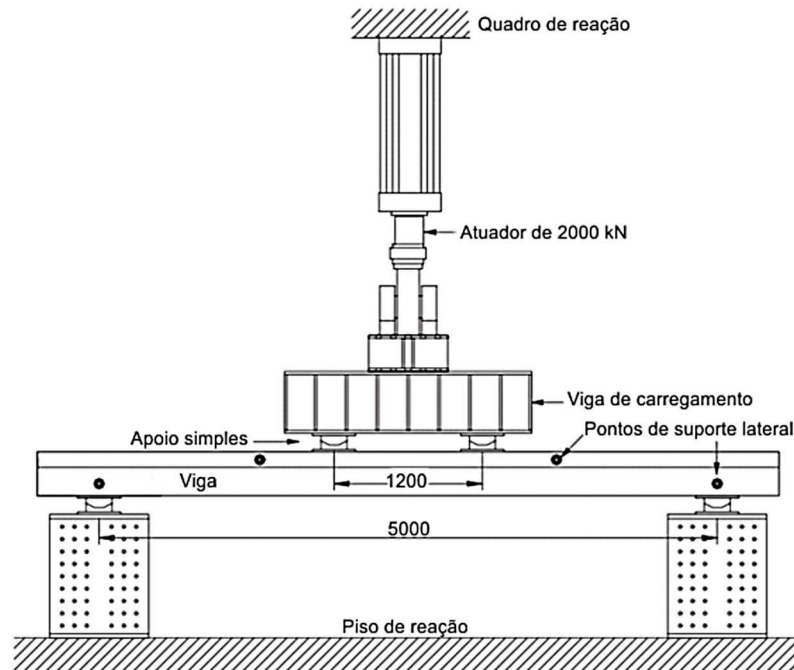


Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

Na Figura 3.46, é ilustrada a configuração do ensaio. A viga mista possui um vão livre de 5,0 m e, para evitar a flambagem lateral com torção, foram instalados suportes laterais nos pontos de apoio e em dois pontos distantes 1200 mm do centro do vão. A carga foi

aplicada usando um atuador hidráulico com capacidade de 1960 kN, com vigas de carregamento para distribuição da carga pela largura da peça.

Figura 3.46 - Configuração do ensaio.

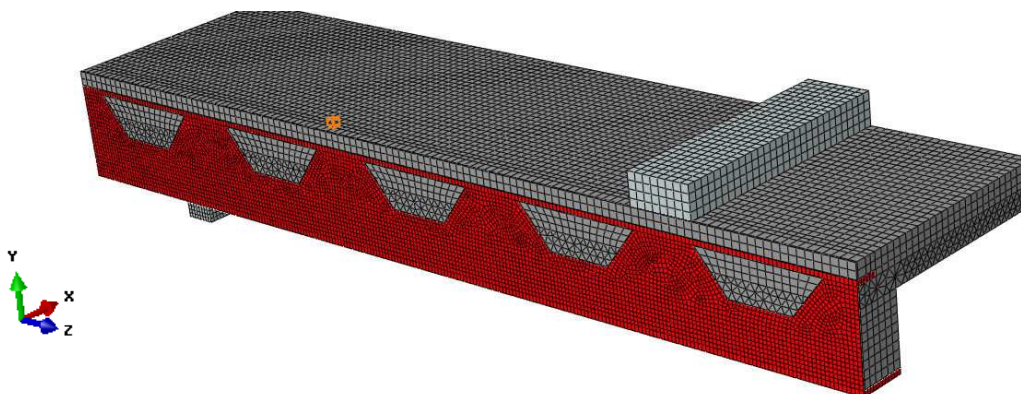


Fonte: Adaptado de Ju, Chun e Kim (2009).

3.9.1.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental C1P15 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos seguindo a metodologia apresentada neste Capítulo. Este modelo foi desenvolvido dentro do próprio programa computacional Abaqus e é composto por elementos dos tipos C3D8, C3D6 e B31 (Figura 3.47).

Figura 3.47 - Malha de elementos finitos do modelo numérico B-C1P15.



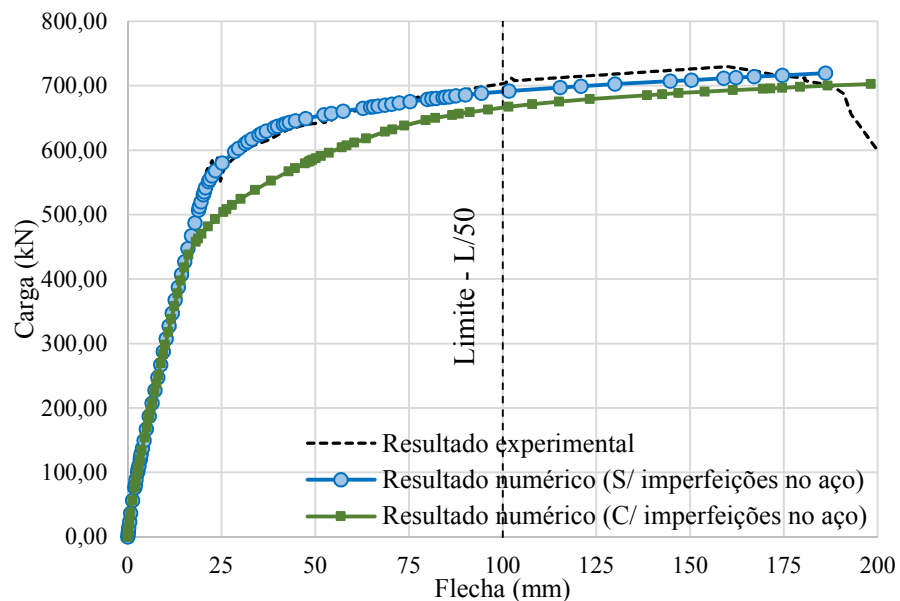
Fonte: Do autor.

Na Figura 3.47, é exibida a malha de elementos finitos utilizada para discretizar esse modelo. Esta malha possui 56523 nós, com 25532 elementos do tipo C3D8, 24718 elementos do tipo C3D6 e 1560 elementos do tipo B31, totalizando 51810 elementos finitos.

3.9.1.3. Resultados

Na Figura 3.48 são apresentados o resultado experimental obtido por Ju, Chun e Kim (2009) para o modelo C1P15 e o resultado obtido com o modelo numérico de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, que foi utilizado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas. Foi realizada uma análise considerando os efeitos das imperfeições do aço para efeito de comparação com o modelo numérico adotado.

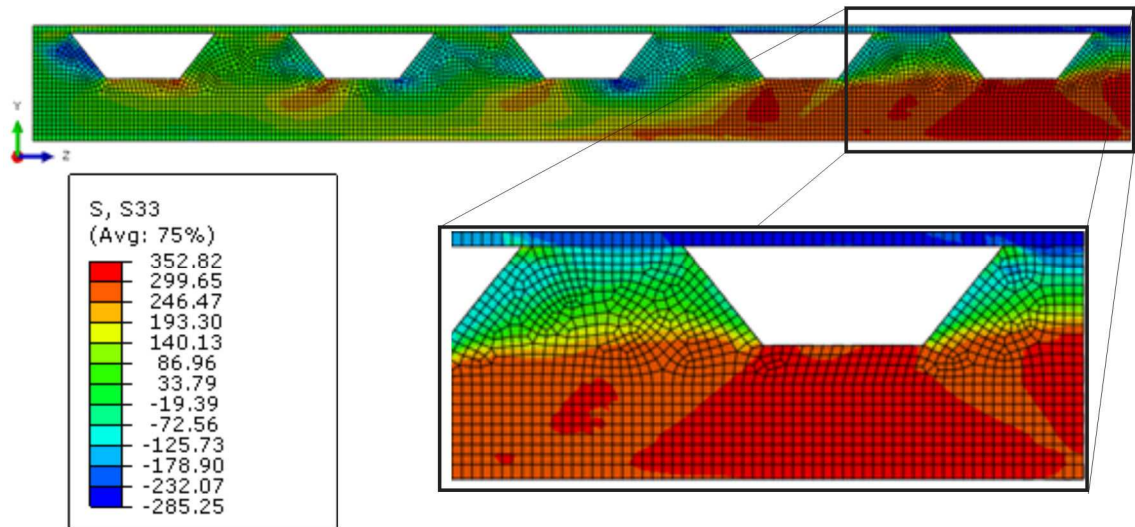
Figura 3.48 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre do modelo C1P15.



Fonte: Do autor.

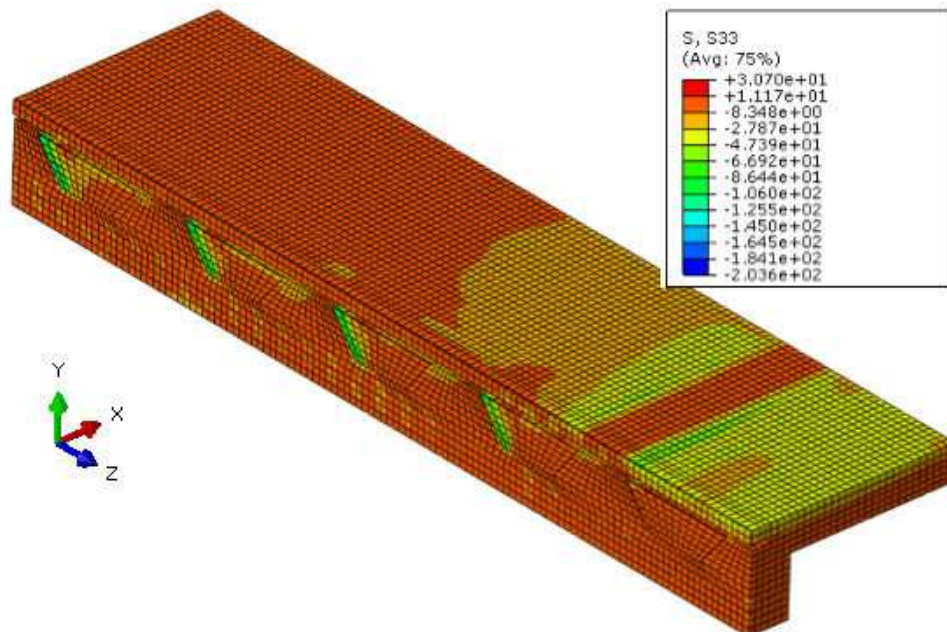
Nas Figuras 3.49 e 3.50 são apresentadas as distribuições de tensões normais na direção longitudinal do modelo numérico, para o aço e o concreto, respectivamente. Nas duas figuras observa-se a seção central do modelo de elementos finitos, onde ocorrem as maiores tensões normais na direção longitudinal.

Figura 3.49 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.



Fonte: Do autor.

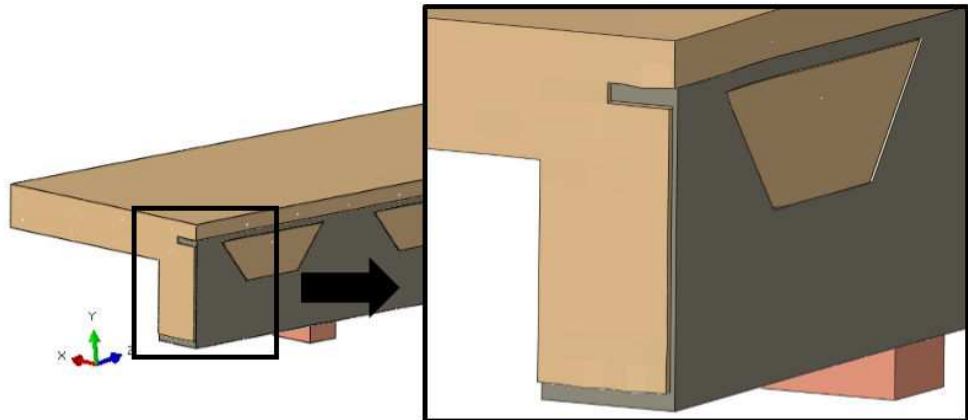
Figura 3.50 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.51, tem-se o detalhe da extremidade do modelo C1P15 para um nível de carga próximo da carga máxima, onde observa-se o deslizamento relativo ao longo de toda interface aço-concreto. No modelo experimental C1P15 o deslizamento foi de 9 mm e no modelo de elementos finitos 6,2 mm.

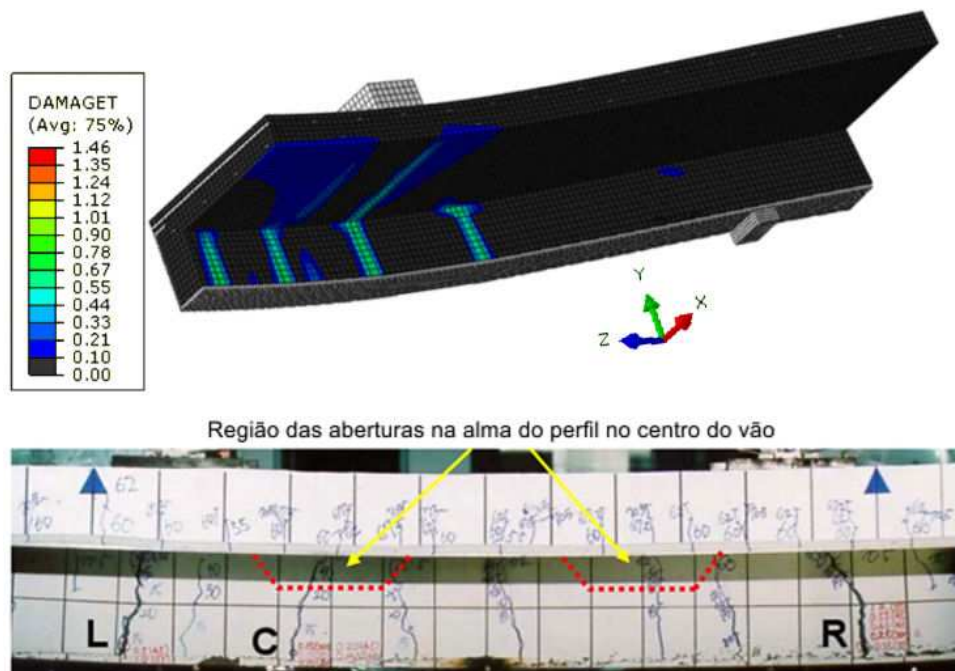
Figura 3.51 - Detalhe do deslizamento relativo entre o aço e o concreto.



Fonte: Do autor.

No modelo numérico observou-se a ocorrência das primeiras fissuras na região tracionada do concreto de forma semelhante ao que ocorreu no modelo experimental. No modelo numérico o início da fissuração é observado antes do início das não linearidades, como ocorre para o mesmo nível de carga dos ensaios experimentais, cerca de 60% da carga máxima. Na Figura 3.52 comparam-se os aspectos da fissuração entre o modelo numérico e o modelo experimental no mesmo ponto. No modelo numérico, a fissuração é representada pela variável de dano à tração, ou seja, onde este valor difere de zero as tensões de tração no concreto superaram o limite de resistência e a fissura ocorre.

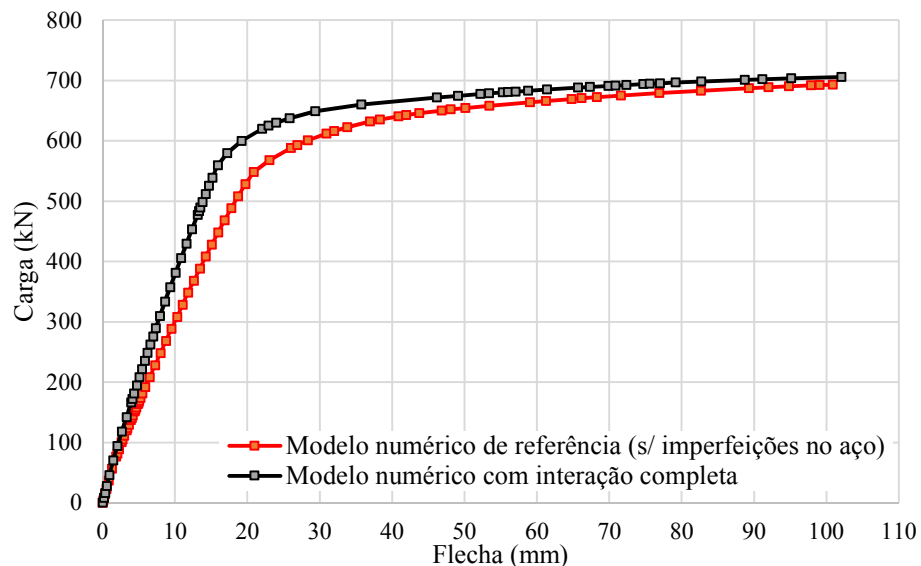
Figura 3.52 - Observação da fissuração no modelo experimental (JU, CHUN e KIM, 2009) e no numérico.



Fonte: Do autor e adaptado de Ju, Chun e Kim (2009).

Com o intuito de avaliar o nível de interação entre os meios de conexão utilizados para ativar o comportamento misto entre o aço e o concreto, foi feita uma simulação que considera que os elementos do modelo numérico possuem interação completa. Esta interação foi obtida utilizando interações do tipo *Tie* entre os elementos do modelo numérico. Os resultados obtidos desta simulação foram comparados com os resultados obtidos da análise do modelo numérico de referência calibrado, como mostrado na Figura 3.53. Para comparação entre os modelos numéricos, foi usado o valor de flecha limite de $L/50$, recomendado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas.

Figura 3.53- Comparação entre o modelo numérico com interação completa e o de referência da viga mista do sistema *I-TECH*.



Fonte: Do autor.

3.9.1.4. Discussão dos resultados

De acordo com os resultados apresentados pode-se avaliar se o modelo numérico é capaz de representar o comportamento estrutural do modelo experimental C1P15 estudado por Ju, Chun e Kim (2009).

Na Figura 3.48, onde apresenta-se o diagrama Carga \times Flecha, observa-se uma boa concordância entre o resultado numérico e o resultado experimental obtido por Ju, Chun e Kim (2009). Verifica-se que a carga máxima resistida pelo modelo experimental C1P15 foi de 730 kN, enquanto no modelo numérico sem imperfeições no aço foi de 711 kN, o que corresponde a 97,4% da carga última do modelo experimental.

Nesse diagrama observa-se também uma diferença de rigidez entre os resultados acima de 680 kN que ocorre após o limite de deslocamento de $L/50$ adotado como critério de parada para ensaios de flexão em vigas por Leskelä e Hopia (2000). Pode-se associar esta diferença à complexidade de se representar numericamente o comportamento do concreto, especialmente tratando-se da sua fissuração, bem como a limitações do *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) em caracterizar o comportamento do concreto. Além disso, a perda da aderência pelos elementos de conexão adotados, mesmo que sua influência tenha sido pequena, pode ter contribuído para essa diferença de rigidez.

Com base nos resultados do diagrama Carga \times Flecha, nota-se que o modelo numérico que considera as imperfeições iniciais do aço apresenta uma divergência dos resultados a partir de uma carga correspondente a cerca de 62% da carga última. Apesar disto, pode-se observar que a carga última obtida por meio do modelo numérico com imperfeições no aço (702,95 kN), corresponde a aproximadamente 96,3% da carga última obtida no modelo experimental. A divergência observada evidencia que o nível de imperfeições iniciais consideradas no modelo constitutivo do aço é mais alto do que o material apresenta. Mesmo as imperfeições não influenciando no valor da carga última, optou-se por adotar o modelo numérico que não considera as imperfeições no aço como modelo de referência para os estudos de variação de parâmetros em vigas mistas com aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço apresentados no Capítulo 4, pois ele apresenta um resultado mais fiel ao comportamento observado no ensaio experimental.

Através da Figura 3.49, observa-se que para um nível de carga próximo ao colapso, a região central da viga de aço encontra-se plastificada, com tensões normais acima da resistência ao escoamento do aço, que é 281 MPa para o perfil T e 250 MPa para a mesa superior. Assim como no modelo experimental, no modelo numérico também não foram observados indícios de flambagem da mesa superior, já que ela se encontrava confinada pelo concreto.

De acordo com a Figura 3.50, para uma carga próxima ao colapso, observa-se tensões normais no concreto inferiores à resistência média de compressão do concreto de 28,1 MPa. Já na região central da viga mista e nas regiões de aberturas tem-se valores de tensões superiores à resistência média à compressão do concreto. Nessas regiões tem-se um estado multiaxial de tensões, provocando um certo nível de confinamento ao concreto, fazendo com que ele atinja tensões superiores à sua resistência uniaxial a compressão.

Quanto à representação da fissuração do concreto, como mostrado na Figura 3.52, nota-se uma semelhança no comportamento entre os modelos. Grandes fissuras se desenvolveram no sistema proposto, principalmente por não haver armaduras na região inferior e a tensão de tração ser resistida somente pelo perfil T de aço (JU, CHUN e KIM, 2009). Tal comportamento é observado no modelo numérico, onde a fissuração é representada pela variável de dano à tração. Nos pontos onde este valor é diferente de zero, as tensões de tração no concreto superaram o limite de resistência.

Em relação ao comportamento na interface aço-concreto, o deslizamento entre aço e concreto no momento de aplicação da carga máxima no modelo experimental foi de 9,0 mm e no modelo de elementos finitos de 6,3 mm (Figura 3.51). Esse deslizamento relativo ocorreu com maior intensidade no modelo experimental e está associado aos meios de conexão que atuam no comportamento misto da viga mista de *slim floor*. Neste caso, a representação numérica do concreto na região da abertura trapezoidal pode estar relacionada a esta diferença entre os deslizamentos.

Além do comportamento na interface aço-concreto, foi observado que a viga mista de *slim floor* apresentou um nível de comportamento misto entre os materiais que pode ser considerado como interação completa. Como observado na Figura 3.53, para a flecha limite $L/50$ recomendada por Leskelä e Hopia (2000), o modelo numérico adotado apresentou um valor de 693,09 kN, que representa 98,19% do valor apresentado pelo modelo com interação completa (705,84 kN). A pouca diferença observada permite concluir que o alto nível de interação apresentado pelo modelo C1P15 o leva a atingir o nível de interação completa, e realça a eficiência da viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH*.

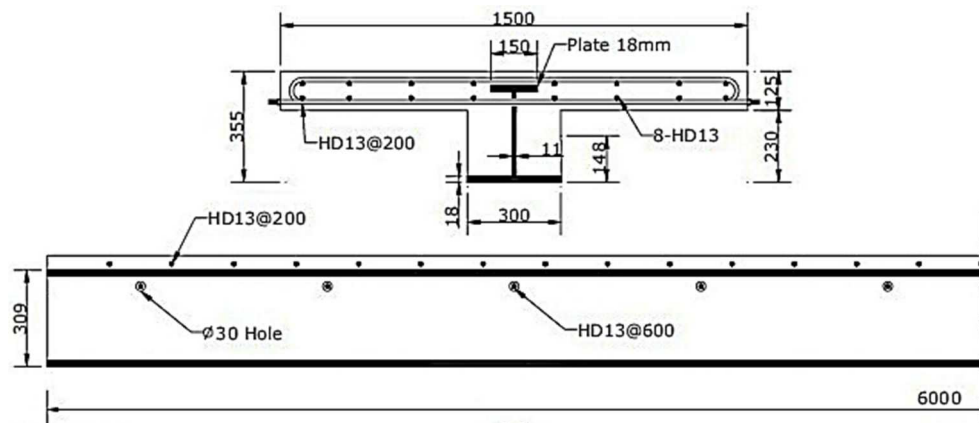
Com esta avaliação, tem-se que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor*. A similaridade entre os resultados experimentais e os resultados numéricos possibilita concluir que as estratégias de simulação numérica usadas são válidas para representar o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais na alma, semelhantes ao modelo experimental C1P15 analisado por Ju, Chun e Kim (2009).

3.9.2. Estudo 2 – Modelo B-Slim

3.9.2.1. Modelo experimental

O modelo experimental *B-Slim* corresponde a uma viga mista de *slim floor*, com comprimento de 6,0 m, composta por um perfil T fabricado a partir de um perfil laminado H-488×300×11×18 (SS400, $f_y = 235$ MPa), com furos circulares de 30 mm de diâmetro na alma, soldado a uma chapa de aço (espessura = 18 mm, SS400), que forma a mesa superior. Este modelo, reexibido na Figura 3.54, encontra-se melhor detalhado no Item 3.2.1.2.

Figura 3.54 - Características do modelo experimental B-Slim analisado por Ju, Chun e Kim (2009).



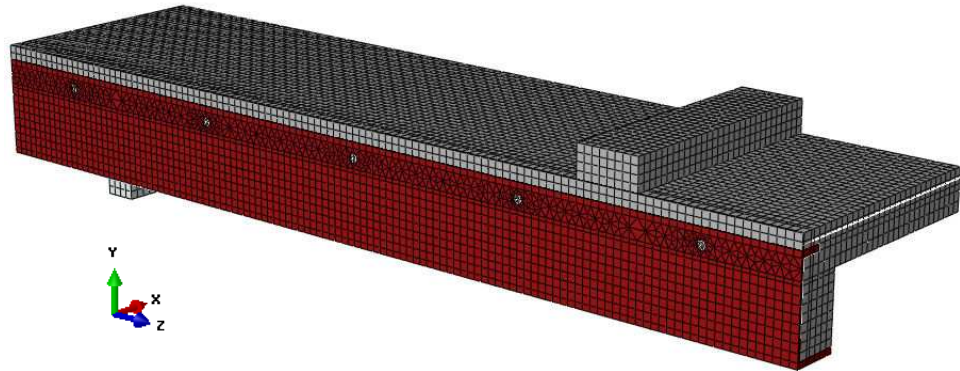
Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

A configuração do ensaio para o modelo experimental *B-Slim* foi a mesma usada para o modelo C1P15, já apresentado.

3.9.2.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental C1P15 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos composto por elementos dos tipos C3D8, C3D6 e B31 (Figura 3.55).

Figura 3.55 - Modelo numérico B-Slim.

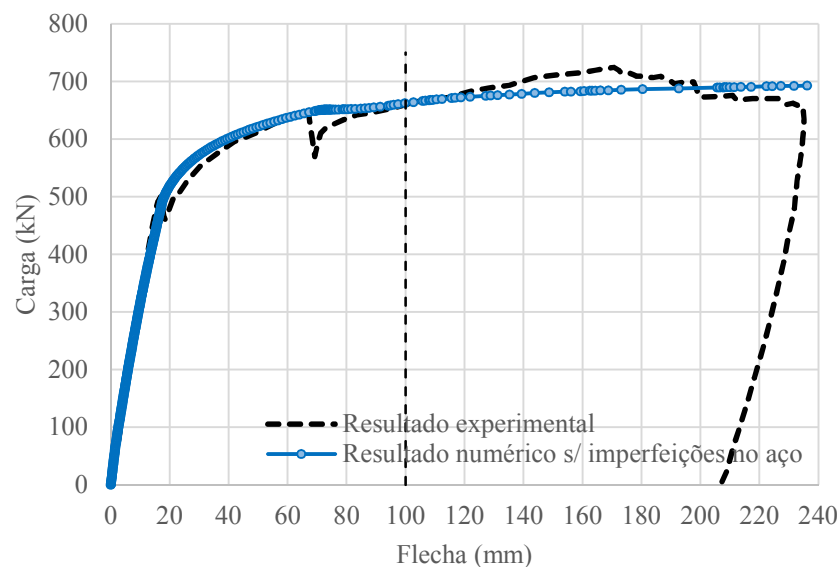


Fonte: Do autor.

A malha de elementos finitos deste modelo possui 43956 nós, com 20568 elementos do tipo C3D8, 23870 elementos do tipo C3D6 e 1560 elementos do tipo B31, totalizando 45998 elementos finitos.

3.9.2.3. Resultados

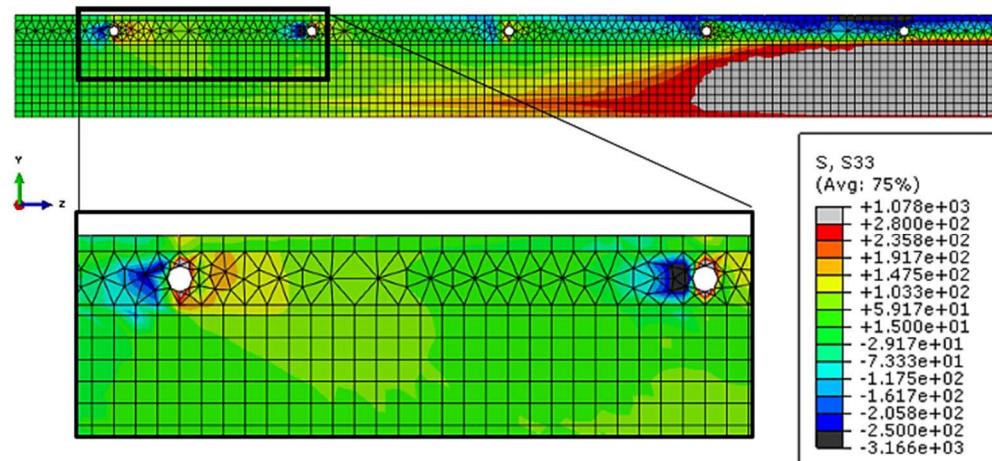
Na Figura 3.56, apresenta-se o resultado experimental obtido por Ju, Chun e Kim (2009) para o modelo B-Slim e o resultado obtido com o modelo numérico de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, usado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas. Para este modelo considerou-se somente o modelo constitutivo do aço sem imperfeições iniciais devido aos bons resultados obtidos na simulação numérica do modelo C1P15.

Figura 3.56 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo B-Slim.

Fonte: Do autor.

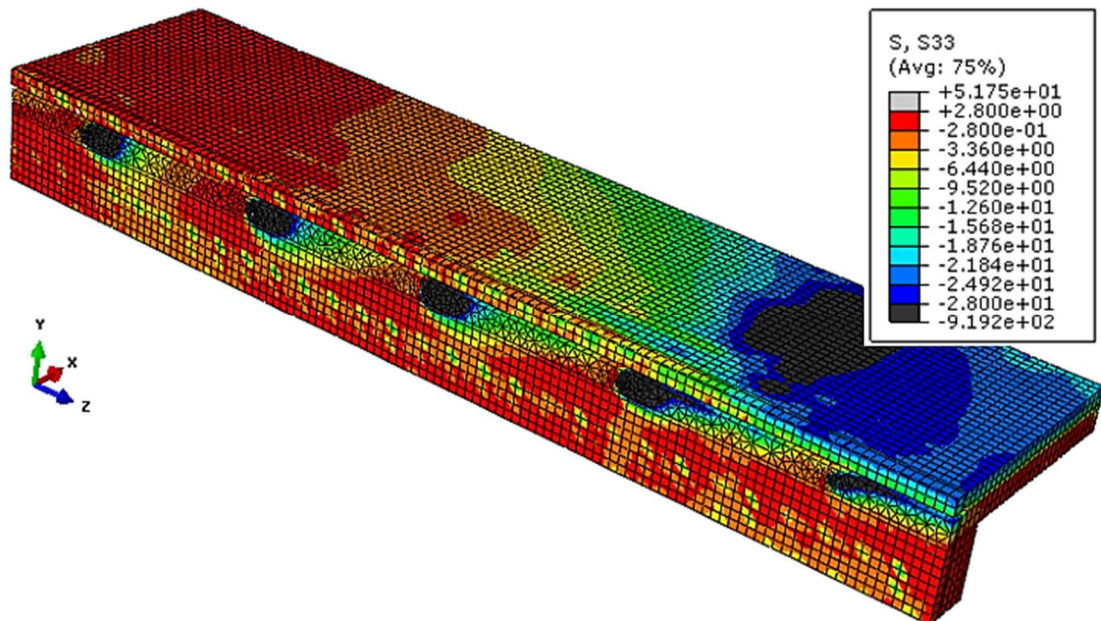
Nas Figuras 3.57 e 3.58 são apresentadas as distribuições de tensões normais na direção longitudinal ao modelo obtidas no aço e no concreto, respectivamente. Nas duas figuras são representadas a seção central do modelo de elementos finitos, na qual são observadas as maiores tensões normais na direção longitudinal.

Figura 3.57 - Distribuições de tensões normais no aço para modelo B-Slim, em MPa.



Fonte: Do autor.

Figura 3.58 - Distribuição de tensões normais no concreto para modelo B-Slim, em MPa.

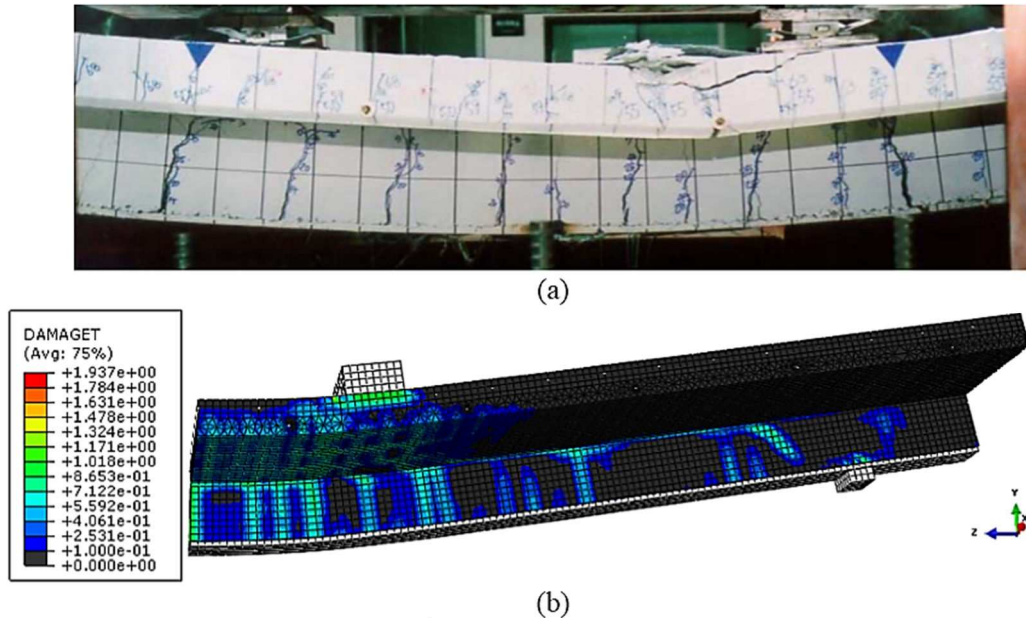


Fonte: Do autor.

Quanto ao comportamento geral da viga, observado na Figura 3.59, tem-se duas ilustrações, a primeira demonstrando a fissuração do concreto ao término do ensaio experimental. Na segunda imagem, tem-se o dano à tração sofrido pelo concreto no

modelo numérico da viga mista de *slim floor* B-Slim criado, ilustrando a semelhança entre os fenômenos.

Figura 3.59 - Padrão de fissuração: (a) modelo experimental; (b) modelo numérico.



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009) e do autor.

3.9.2.4. Discussão dos resultados

Analisando os resultados, observa-se uma boa concordância entre os obtidos com o modelo de elementos finitos e os resultados experimentais obtidos por Ju, Chun e Kim (2009), o que demonstra que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor* até esta atingir o colapso.

Por meio do diagrama Carga \times Flecha apresentado na Figura 3.56, nota-se que o deslizamento de B-Slim se desenvolveu descontinuamente em duas vezes durante o ensaio. Esta descontinuidade também aconteceu, de forma sutil, na análise numérica para uma carga atuante de 650 kN. Além disso, tem-se que a carga última obtida no ensaio experimental foi de 725 kN, e no ensaio numérico foi de 686 kN, correspondendo a 94,6% do valor experimental. A partir deste valor, os resultados numéricos começavam a divergir e, assim, decidiu-se encerrar a análise.

Ao término da análise numérica, nota-se que a viga de aço encontra-se plastificada por toda a alma e mesa inferior da região central do vão (Figura 3.57). Além disso, é possível

notar as regiões das aberturas também plastificadas, resultado de grande concentração de tensões causada pelos elementos de conexão.

De acordo com Ju, Chun e Kim (2009), no ensaio experimental, B-Slim se comportou como um elemento misto com interação completa até ocorrer o deslizamento e atingir o ponto de falha por esmagamento do concreto sob compressão. Esse esmagamento também pode ser observado na análise numérica, dadas as tensões desenvolvidas na laje de concreto (Figura 3.58).

No modelo B-Slim ensaiado por Ju, Chun e Kim (2009), as fissuras ocorreram como mostrado na Figura 3.59a, com largura menor e mais distribuídas que as apresentadas pelo modelo B-C1P15. Nota-se, na Figura 3.59b, um comportamento semelhante ao ocorrido no modelo numérico, com presença de fissuras verticais na região de momento puro, e fissuras diagonais próximas à região do apoio.

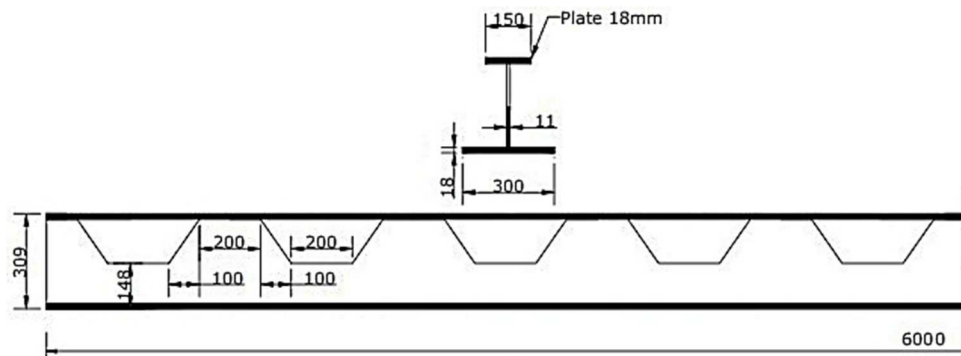
De modo geral, a boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos permite concluir que as estratégias de simulação numérica utilizadas são válidas para a representação do comportamento estrutural da viga mista de *slim floor* B-Slim, com pequenas aberturas circulares na alma, analisada por Ju, Chun e Kim (2009).

3.9.3. Estudo 3 – Modelo C0P15

3.9.3.1. Modelo experimental

O modelo experimental C0P15 corresponde a uma viga de aço isolada, com 6,0 m de comprimento e vão livre de 5,0 m, composta por um perfil T fabricado a partir de um perfil laminado H-488×300×11×18 (SS400, $f_y = 235$ MPa), cortado no formato trapezoidal (castelado) na região da alma, e soldado a uma chapa de aço (espessura = 18 mm, SS400), que forma a mesa superior (Figura 3.60).

Figura 3.60 - Características do modelo experimental C0P15 analisado por Ju, Chun e Kim (2009).

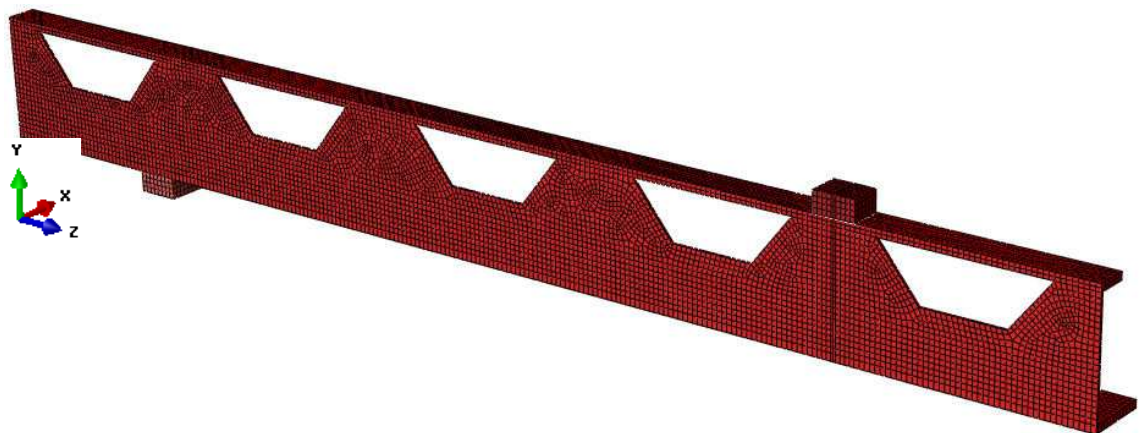


Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

3.9.3.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental C0P15 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos com o programa computacional Abaqus, composto por 11866 elementos do tipo C3D8 (Figura 3.61) e 22790 nós.

Figura 3.61 - Modelo numérico em elementos finitos da viga C0P15.

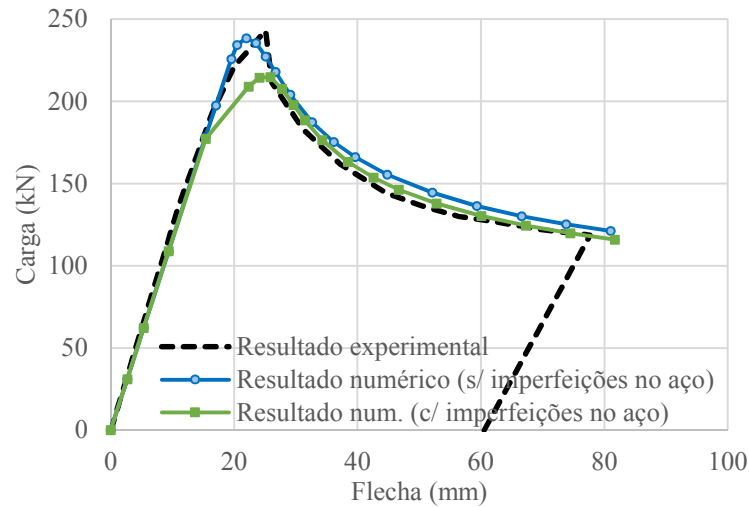


Fonte: Do autor.

3.9.3.3. Resultados

Na Figura 3.62 são apresentados o resultado experimental obtido por Ju, Chun e Kim (2009) para o modelo C0P15 e os resultados obtidos com o modelo numérico de elementos finitos. Foi realizada uma análise considerando os efeitos das imperfeições do aço para efeito de comparação com o modelo numérico adotado.

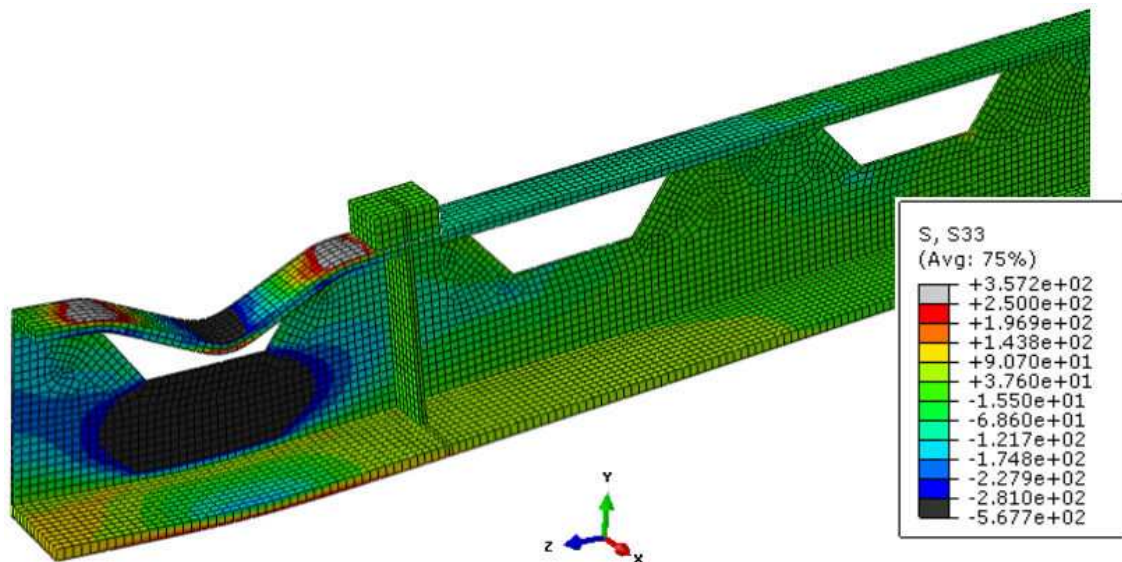
Figura 3.62 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo C0P15.



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.63 tem-se a distribuição de tensões normais na direção longitudinal ao modelo obtidas no aço. Observam-se maiores tensões normais na direção longitudinal na região entre os pontos de aplicação das cargas, ocorrendo, inclusive, a flambagem da mesa superior.

Figura 3.63 - Distribuições de tensões normais no aço no modelo C0P15, em MPa.



Fonte: Do autor.

Do resultado experimental obtido por Ju, Chun e Kim (2009), tem-se a flambagem da mesa superior exibida na Figura 3.64. Através desta figura e da distribuição de tensões

no perfil de aço obtida com a análise do modelo numérico em elementos finitos, é possível analisar a semelhança entre os ensaios.

Figura 3.64 - Análise experimental do modelo C0P15.



Fonte: Ju, Chun e Kim (2009).

3.9.3.4. Discussão dos resultados

Por meio do diagrama Carga \times Flecha apresentado na Figura 3.62 observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos no modelo de elementos finitos com os resultados experimentais obtidos por Ju, Chun e Kim (2009), o que sugere que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor* até o colapso. Com base nos resultados do diagrama Carga \times Flecha (Figura 3.62), pode-se observar que os resultados numéricos obtidos com a consideração de um modelo constitutivo para o aço sem levar em conta as imperfeições iniciais são mais próximos dos resultados experimentais.

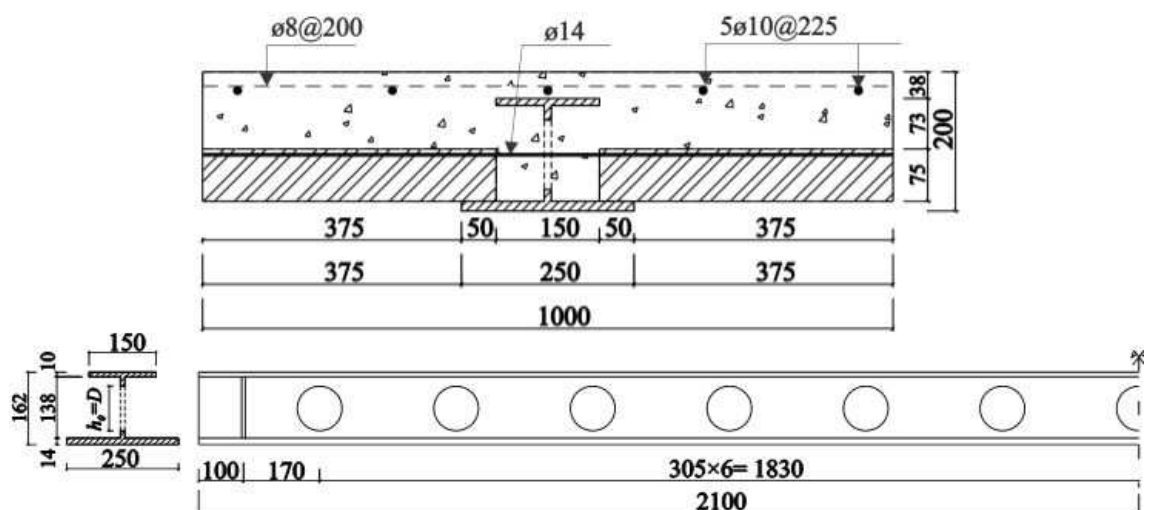
O modo de colapso apresentado pelos modelos experimental e numérico ocorreu da mesma forma. O fenômeno de flambagem local da mesa superior do perfil de aço foi bem caracterizado na simulação numérica e reflete com fidelidade o comportamento observado no modelo experimental. Assim, a boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos permite concluir que o modelo numérico criado representa bem o comportamento estrutural da viga mista de *slim floor* C0P15.

3.9.4. Estudo 4 – Modelo SCSFB 1

3.9.4.1. Modelo experimental

O modelo experimental SCSFB 1 (*Shallow Composite Slim floor Beam*), ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015), corresponde a uma viga mista de *slim floor* com comprimento de 4,2 m, composta por um perfil de aço com seção transversal assimétrica e com aberturas circulares de 100 mm de diâmetro na alma, espaçadas de 305 mm a partir do centro da viga (13 aberturas). Esse perfil está integrado a uma laje mista de concreto armado concretada no local, com forma de aço de 75 mm de altura e 1,5 mm de espessura. Duas placas de aço de enrijecedores foram soldadas na viga na região dos apoios, posicionadas a 100 mm das extremidades da viga (Figura 3.65).

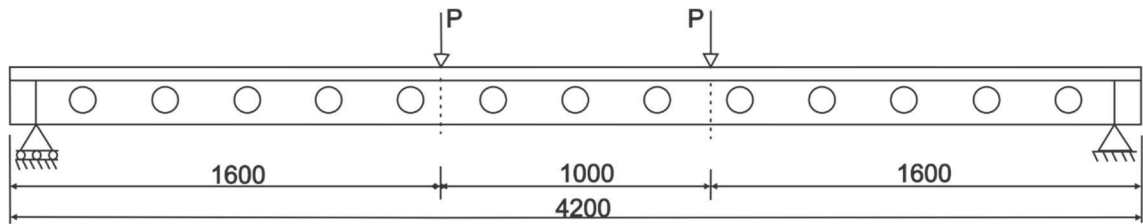
Figura 3.65 - Propriedades geométricas do modelo experimental SCSFB 1.



Fonte: Do autor.

Na Figura 3.66, é ilustrada a configuração do ensaio. A viga mista possui um vão livre de 4,0 m e o ensaio de flexão foi realizado com quatro condições de contorno, consistindo em dois pontos de apoio e dois pontos de carregamento. Os ensaios foram feitos com controle de carregamento, com aplicações incrementais. Usou-se um atuador hidráulico de 600 kN situado entre a viga de reação e a viga de carregamento.

Figura 3.66 - Configuração do ensaio das vigas ensaiadas por Chen, Limazie e Tan (2015).

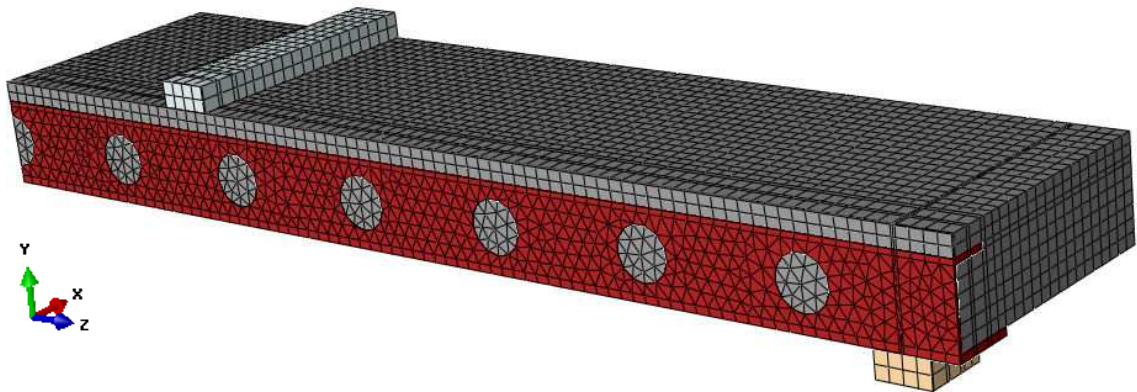


Fonte: Adaptado de Chen, Limazie e Tan (2015).

3.9.4.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental SCSFB 1 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos dentro no Abaqus, composto por elementos dos tipos C3D8, C3D6 e B31 (Figura 3.67).

Figura 3.67 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 1.



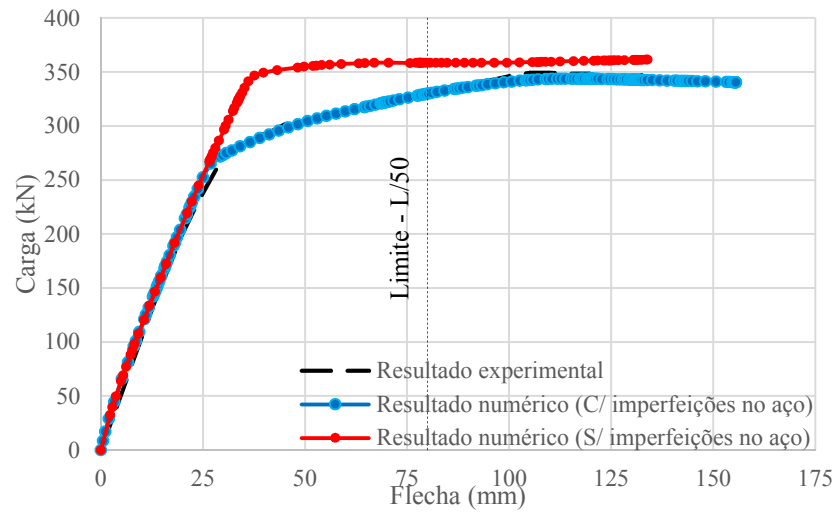
Fonte: Do autor.

A malha de elementos finitos usada neste modelo possui 23206 nós, com 6854 elementos do tipo C3D8, 20069 elementos do tipo C3D6 e 612 elementos do tipo B31, totalizando 27535 elementos finitos.

3.9.4.3. Resultados

Na Figura 3.68 são apresentados o resultado experimental obtido por Chen, Limazie e Tan (2015) para o modelo SCSFB 1 e o resultado obtido com o modelo numérico de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, que foi utilizado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas. Foi realizada uma análise desconsiderando os efeitos das imperfeições no aço para efeito de comparação com o modelo numérico adotado.

Figura 3.68 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre do modelo SCSFB 1.



Na Figura 3.69 é apresentada a distribuições de tensões normais no perfil de aço na direção longitudinal. Na Figura 3.70, tem-se o perfil de deformações ao longo da altura da seção transversal do perfil de aço, na região de aplicação do carregamento. Nota-se que a seção transversal não permanece plana, havendo um deslizamento relativo entre os banzos superior e inferior da viga. Chen, Limazie e Tan (2015) relatam que foram observadas grandes deformações da mesa inferior no ensaio experimental.

Figura 3.69 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.

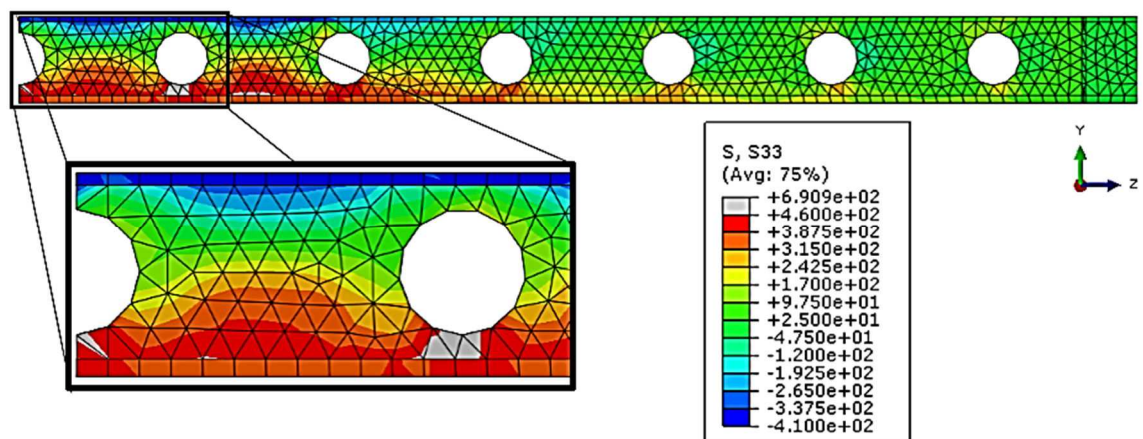
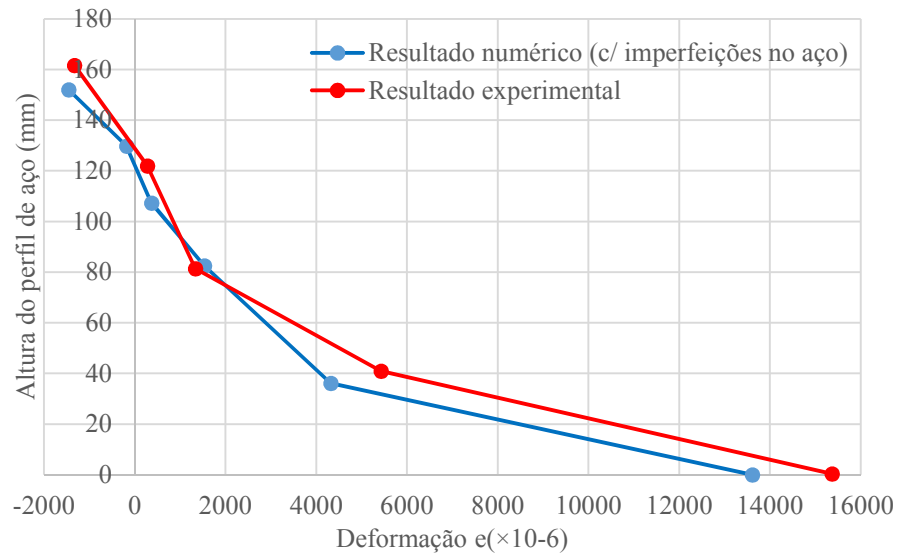


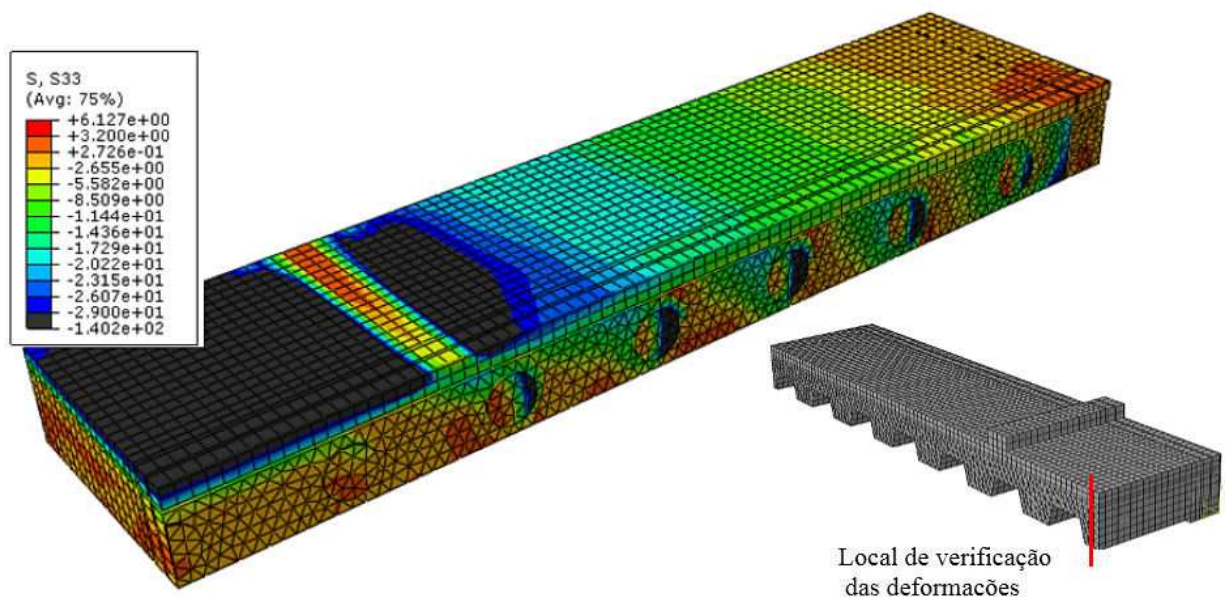
Figura 3.70 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.



Fonte: Do autor.

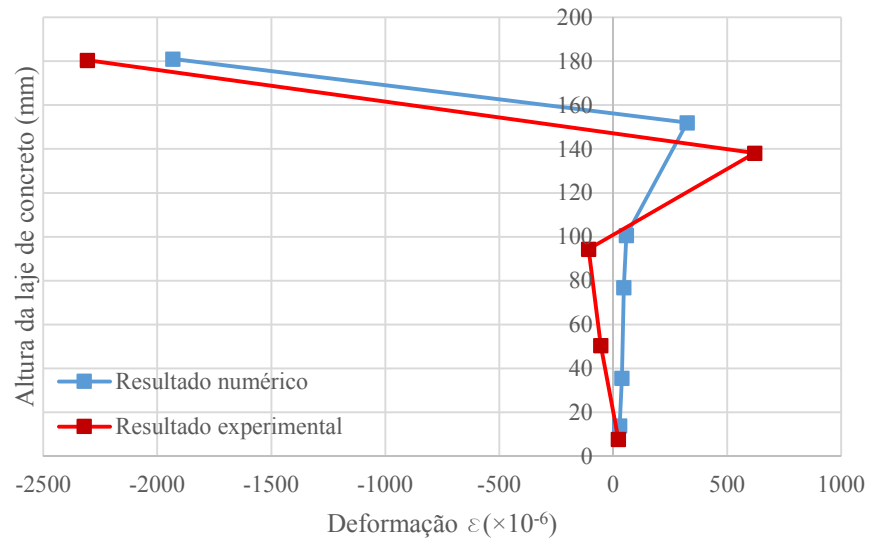
Na Figura 3.71 apresenta-se a distribuição de tensões normais na laje de concreto na direção longitudinal. As regiões representadas na cor preta, nas aberturas e no vão central, indicam os locais onde o concreto apresentou tensões acima da resistência à compressão, evidenciando o esmagamento do concreto no centro do vão, e o estado multiaxial de tensões nas aberturas. Na Figura 3.72 é mostrado o perfil de deformações ao longo da seção transversal da laje, para uma região situada no centro do vão e na extremidade da laje.

Figura 3.71 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.



Fonte: Do autor.

Figura 3.72 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.

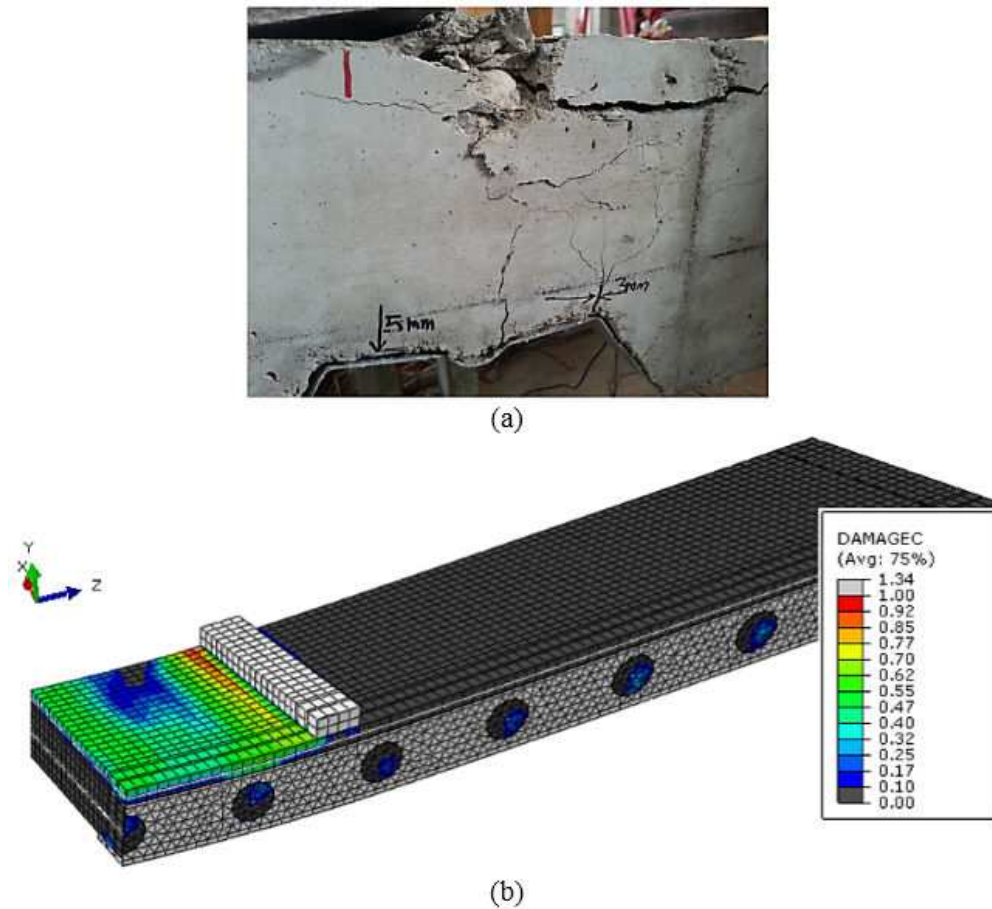


Fonte: Do autor.

Com relação ao deslizamento relativo ao longo da interface aço-concreto, no modelo experimental SCSFB 1 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) houve um deslizamento máximo de 0,13 mm, enquanto no modelo numérico de elementos finitos o deslizamento relativo entre as superfícies do perfil de aço e da laje de concreto teve um valor máximo de 0,32 mm.

Quanto ao comportamento geral da viga observado, tem-se na Figura 3.73 duas ilustrações, a primeira demonstrando o esmagamento do concreto ao término do ensaio experimental. Na segunda imagem, tem-se o dano à compressão sofrido pelo concreto no modelo numérico SCSFB 1, ilustrando a semelhança entre os fenômenos.

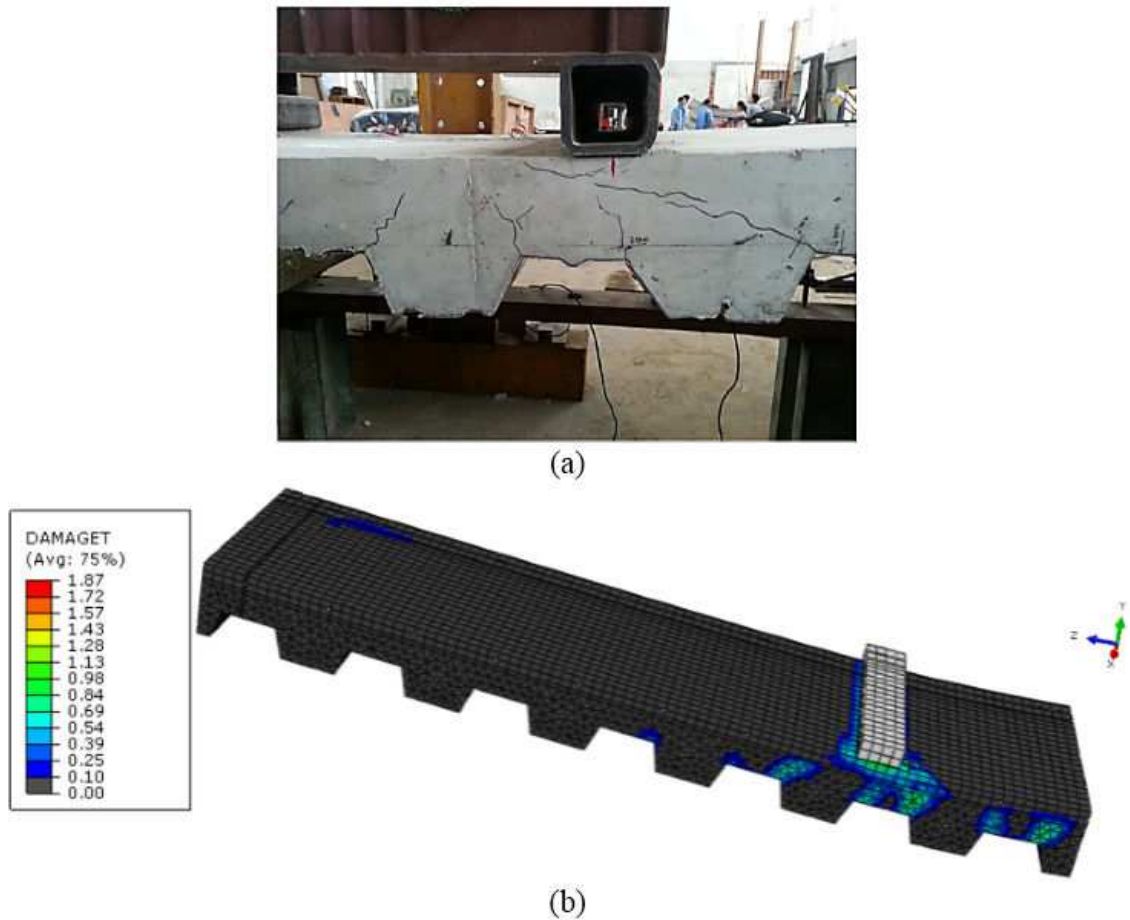
Figura 3.73 - Esmagamento do concreto observado no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b).



Fonte: (a) Chen, Limazie e Tan (2015); (b) do autor.

Outro comportamento observado relaciona-se à fissuração do concreto. Na Figura 3.74 comparam-se os aspectos da fissuração entre o modelo numérico e o modelo experimental. No modelo numérico, a fissuração é representada pela variável de dano à tração e onde este valor difere de zero, as tensões de tração no concreto superaram o limite de resistência e a fissura ocorre.

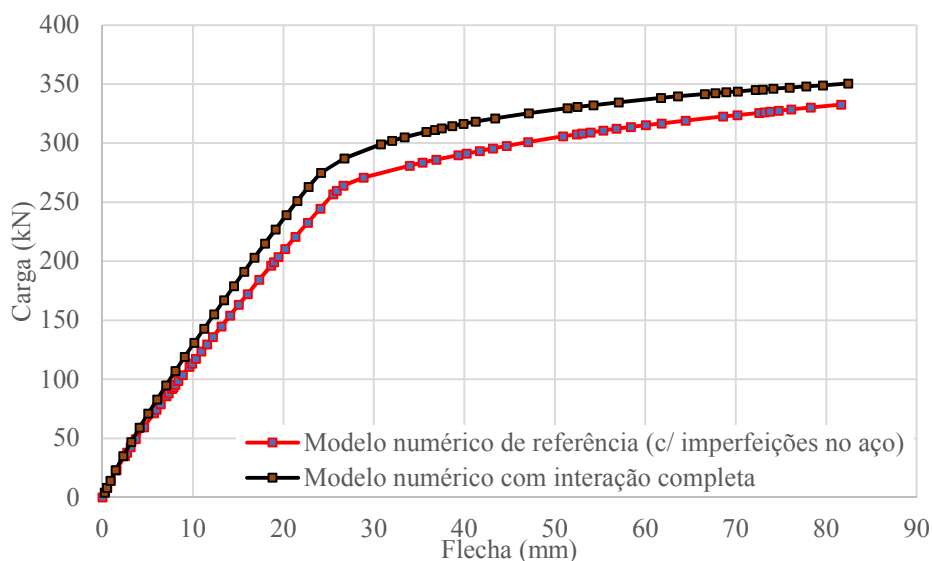
Figura 3.74 - Fissuração do concreto observado no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b).



Fonte: (a) Chen, Limazie e Tan (2015); (b) do autor.

Com o intuito de avaliar o nível de interação proporcionado pelos meios de conexão utilizados para ativar o comportamento misto entre o aço e o concreto, foi feita uma simulação que considera que os elementos do modelo numérico possuem interação completa. Esta interação foi obtida utilizando interações do tipo *Tie* entre os elementos do modelo numérico. Os resultados obtidos desta simulação foram comparados com os resultados obtidos da análise do modelo numérico de referência calibrado, como mostrado na Figura 3.75. Para comparação entre os modelos numéricos, foi usado o valor de flecha limite de $L/50$, recomendado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas.

Figura 3.75 - Comparação entre o modelo de viga mista numérico com interação completa e o de referência tipo SCSFB.



Fonte: Do autor.

3.9.4.4. Discussão dos resultados

De acordo com os resultados apresentados pode-se avaliar se o modelo numérico é capaz de representar o comportamento estrutural do modelo experimental SCSFB 1 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015). Na Figura 3.68, onde apresenta-se o diagrama Carga \times Flecha, observa-se uma boa concordância entre o resultado numérico e o resultado experimental. Verifica-se que a carga máxima resistida pelo modelo experimental C1P15 foi de 349 kN, enquanto no modelo numérico com imperfeições no aço foi de 344 kN (98,6% do valor experimental). Nota-se que o modelo numérico que desconsidera as imperfeições iniciais do aço apresenta uma divergência dos resultados a partir de uma carga correspondente a cerca de 79% da carga última. Apesar disto, pode-se observar que a carga última obtida por meio do modelo numérico (361 kN), corresponde a aproximadamente 103,4% da carga última obtida no modelo experimental. Como o modelo numérico que considera as imperfeições no aço apresentou um comportamento mais semelhante ao observado no ensaio experimental, optou-se por utilizá-lo como modelo de referência para os estudos de variação de parâmetro em vigas mistas com aberturas circulares na alma do perfil de aço apresentados no Capítulo 4.

Ainda em relação ao comportamento da viga apresentado no diagrama Carga \times Flecha, pode-se observar um comportamento plástico e dúctil. As vigas mistas de *slim floor* se comportaram elasticamente no início da análise, no entanto, no resultado experimental e

no numérico a flecha no centro do vão foi de 16 mm ($L/250$). Este valor (considerando uma solicitação de serviço como 50% da carga última) supera a condição limite de serviço imposta por diversas normas, como ABNT NBR 8800:2008 que indica um limite de $L/350$ por exemplo.

Através da Figura 3.69, observa-se que para um nível de carga próximo ao colapso, regiões da mesa inferior da viga de aço nos pontos de aplicação de carga encontram-se plastificadas, com tensões normais acima da resistência ao escoamento do aço, 410 MPa. O início do escoamento também foi observado na parte inferior da alma do perfil, onde a resistência é 460 MPa. De acordo com o diagrama Altura do perfil \times Deformação, apresentado na Figura 3.70, nota-se um comportamento semelhante pelo perfil de deformações apresentado pelo modelo numérico para a carga última atuante. Da mesma forma como no ensaio experimental, na análise numérica também foram observadas grandes deformações da mesa inferior do perfil de aço.

Analisando a laje de concreto, de acordo com a Figura 3.71, onde são mostradas as tensões presentes na laje para uma carga próxima à carga de colapso, observam-se tensões normais no concreto superiores à resistência média de compressão do concreto de 29,04 MPa, confirmando o esmagamento do concreto observado nos ensaios experimentais. Já na região das aberturas, ocorre um estado multiaxial de tensões, apresentando valores de tensões superiores à resistência média de compressão. Além disso, analisando a Figura 3.72, nota-se que o perfil de deformações apresentado pelos modelos numérico e experimental apresentam comportamento semelhante, com o eixo neutro situando-se acima da forma de aço da laje de concreto.

Quanto à representação do padrão de fissuração e falha do modelo de viga mista SCSFB 1, na Figura 3.73, tem-se uma indicação da falha por plastificação na flexão da viga mista através do esmagamento do concreto no topo da laje na região de momento constante. Já na Figura 3.74, observaram-se fissuras verticais de tração no vão central (região de momento constante e perto dos pontos de carregamento). Notou-se que a fissuração no concreto também se iniciou nas proximidades da região do apoio no modelo numérico, fato mencionado pelos autores no ensaio experimental. Como no modelo numérico a fissuração é representada pela variável de dano à tração, nos pontos onde este valor é diferente de zero, as tensões de tração no concreto superam o limite de resistência.

Em relação ao comportamento na interface aço-concreto, o deslizamento entre aço e concreto no momento de aplicação da carga máxima no modelo experimental foi de 0,13 mm e no modelo de elementos finitos de 0,32 mm. Esse deslizamento, relativamente pequeno, se deve à presença de um enrijecedor de aço soldado na região dos pontos de apoio, causando o confinamento dos deslizamentos nas extremidades da viga. A diferença entre o modelo numérico e experimental pode ser justificada pela magnitude dos valores dos deslizamentos, sendo necessário uma malha mais refinada para representar tal comportamento.

Foi observado que a viga mista de *slim floor* apresentou um nível de comportamento misto entre os materiais próximo à interação completa. Como pode ser observado na Figura 3.75, para a flecha limite $L/50$ recomendado por Leskelä e Hopia (2000), o modelo numérico adotado apresentou um valor de 332,50 kN, que representa 94,89% do valor apresentado pelo modelo com interação completa (350,41 kN). A diferença observada permite concluir que o nível de interação apresentado pelo modelo SCSFB 1 fornece certa eficiência à viga mista de *slim floor* tipo SCSFB, porém não atinge o nível de interação completa.

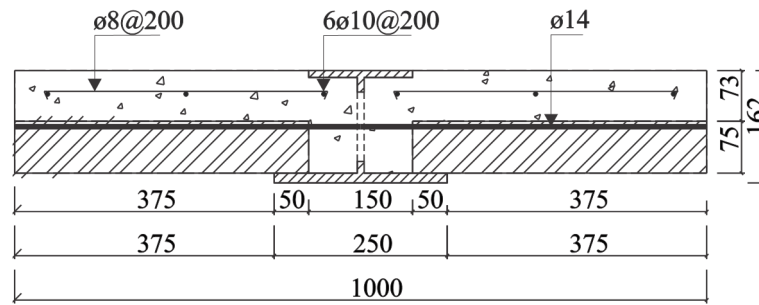
Com esta avaliação, o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor*. A similaridade entre os resultados experimentais e os resultados numéricos possibilita concluir que as estratégias de simulação numérica usadas são válidas para a representar o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas circulares na alma, semelhantes ao modelo experimental SCSFB 1 analisado por Chen, Limazie e Tan (2015).

3.9.5. Estudo 5 – Modelo SCSFB 2

3.9.5.1. Modelo experimental

O modelo experimental SCSFB 2 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) corresponde a uma viga mista de *slim floor*, com comprimento de 4,2 m e vão livre de 4,0 m. Sua única diferença com relação ao modelo anterior é a ausência da capa de concreto acima da viga de aço, e assim, as armaduras são colocadas a 30 mm do topo da laje de concreto (Figura 3.76).

Figura 3.76 - Características do modelo experimental SCSFB 2 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015).



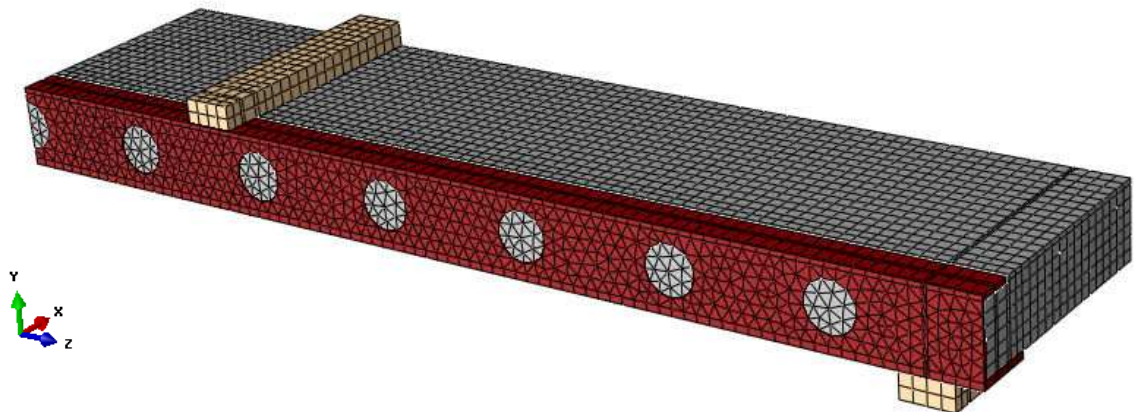
Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

A configuração do ensaio para o modelo experimental SCSFB 2 foi a mesma usada para o modelo SCSFB 1.

3.9.5.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental SCSFB 1 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos no Abaqus. Ele é composto por 2726 elementos C3D8, 19005 elementos C3D6 e 548 elementos B31, totalizando 22279 elementos finitos e 17651 nós (Figura 3.77).

Figura 3.77 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 2.



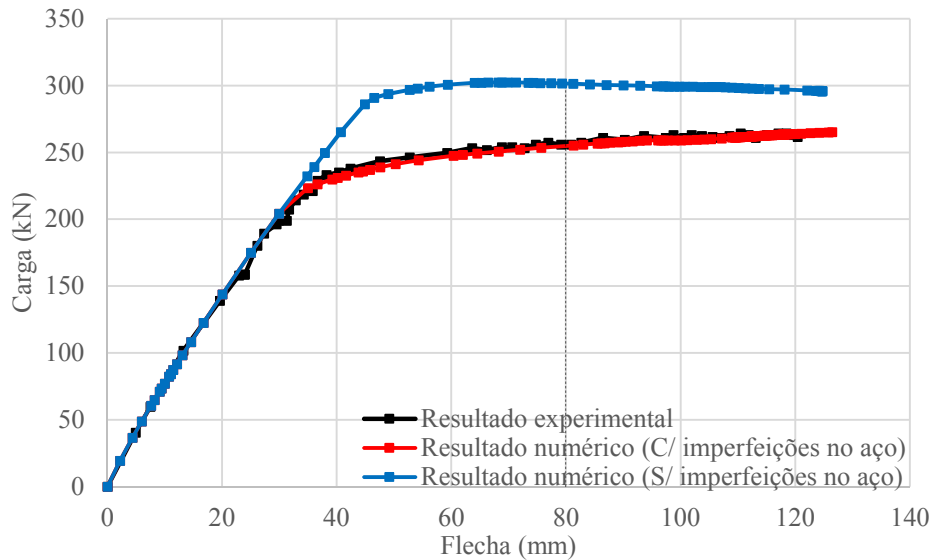
Fonte: Do autor.

3.9.5.3. Resultados

Na Figura 3.78, apresenta-se o resultado experimental obtido por Chen, Limazie e Tan (2015) para o modelo SCSFB 2 e os resultados obtidos com os modelos numéricos de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, usado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão

em vigas. Foi realizada uma análise desconsiderando os efeitos das imperfeições no aço para efeito de comparação.

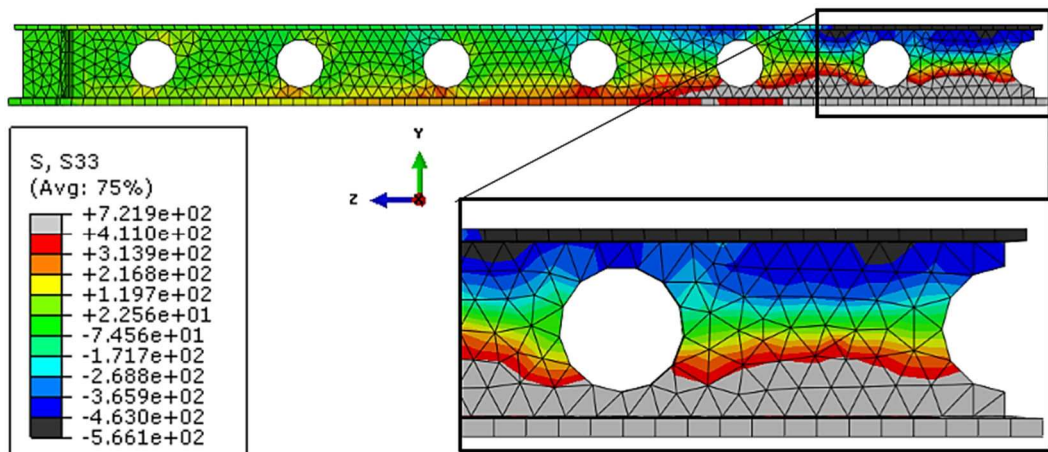
Figura 3.78 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB2.



Fonte: Do autor.

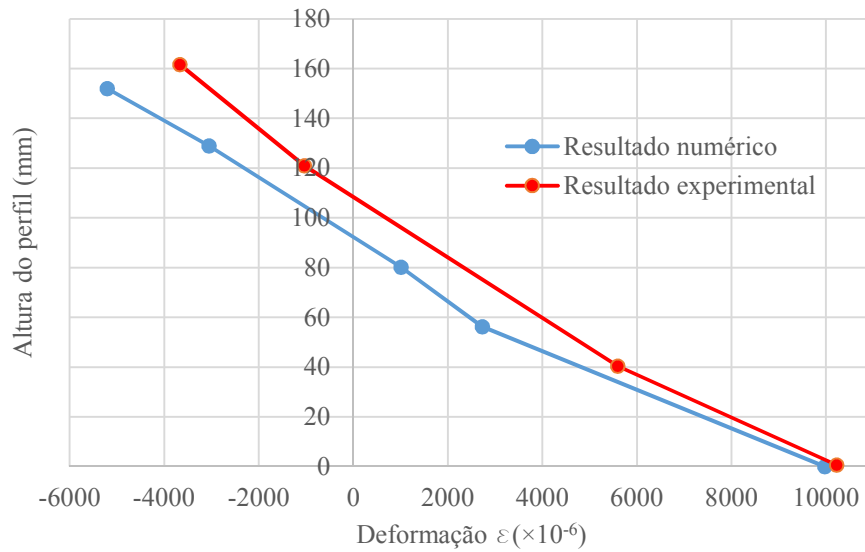
Na Figura 3.79 é apresentada a distribuição de tensões normais na direção longitudinal ao do perfil de aço. Na Figura 3.80, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal do perfil de aço, na região de aplicação do carregamento.

Figura 3.79 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.



Fonte: Do autor.

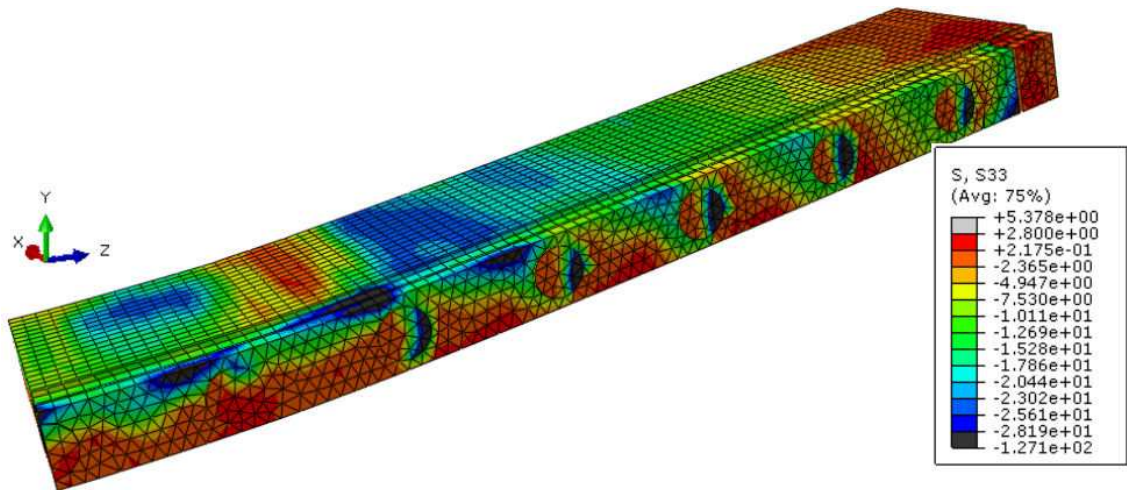
Figura 3.80 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.



Fonte: Do autor.

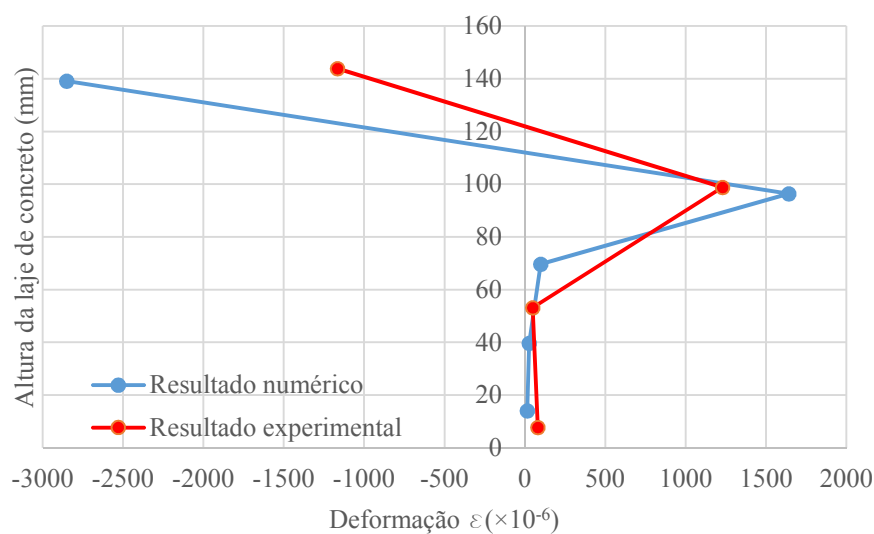
Na Figura 3.81 é apresentada a distribuição de tensões normais na direção longitudinal ao modelo obtidas na laje de concreto. Em sequência, na Figura 3.82, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal da laje, para uma região situada no centro do vão e na extremidade da laje.

Figura 3.81 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.



Fonte: Do autor.

Figura 3.82 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.



Fonte: Do autor.

Com relação ao deslizamento relativo ao longo da interface aço-concreto, no modelo experimental SCSFB 2 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) obteve-se um deslizamento máximo de 0,3 mm, enquanto no modelo numérico em elementos finitos criado o deslizamento relativo entre as superfícies do perfil de aço e da laje de concreto teve um valor máximo de 0,21 mm.

Por fim, da mesma forma como ocorrido no modelo SCSFB 1, o modo de falha da viga mista de *slim floor* SCSFB 2 ocorreu com a viga atingindo sua plastificação. Uma indicação da falha por escoamento dos materiais na flexão das vigas mistas foi o esmagamento do concreto no topo da laje na região de momento constante, além de apresentar o mesmo padrão de fissuração ocorrido no viga SCSFB 1.

3.9.5.4. Discussão dos resultados

Observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos por meio do modelo de elementos finitos e os resultados experimentais obtidos por Chen, Limazie e Tan (2015), indicando que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar com boa precisão os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor* até o colapso.

Com base nos diagramas Carga x Flecha verifica-se que a carga máxima resistida pelo modelo experimental SCSFB1 foi 264,7 kN, e no modelo numérico foi 265,15 kN (100,2% do valor experimental). Nota-se que o modelo numérico que considera as imperfeições iniciais do aço apresenta uma divergência dos resultados a partir de uma

carga correspondente a cerca de 77% da carga última. Pode-se observar que a carga última obtida por meio deste modelo numérico (296 kN) corresponde a aproximadamente 111,8% da carga última obtida no modelo experimental, evidenciando a influência da consideração das imperfeições iniciais no modelo constitutivo do aço.

Por meio da Figura 3.79 observa-se que para um nível de carga próximo ao colapso, tanto a mesa superior quanto a mesa inferior e parte da alma do perfil de aço (seção central) encontram-se plastificadas, com tensões normais da ordem de grandeza da resistência ao escoamento do aço, que é de 462,9 MPa. De acordo com a Figura 3.81, em partes da laje de concreto nota-se tensões normais superiores à resistência média a compressão. Essas regiões correspondem às aberturas, onde o concreto encontra-se confinado, e na região próxima ao ponto de aplicação de carga. Além das tensões, nota-se um padrão semelhante desenvolvido pelas deformações ao longo da seção transversal da viga mista, para a viga de aço e para a laje de concreto.

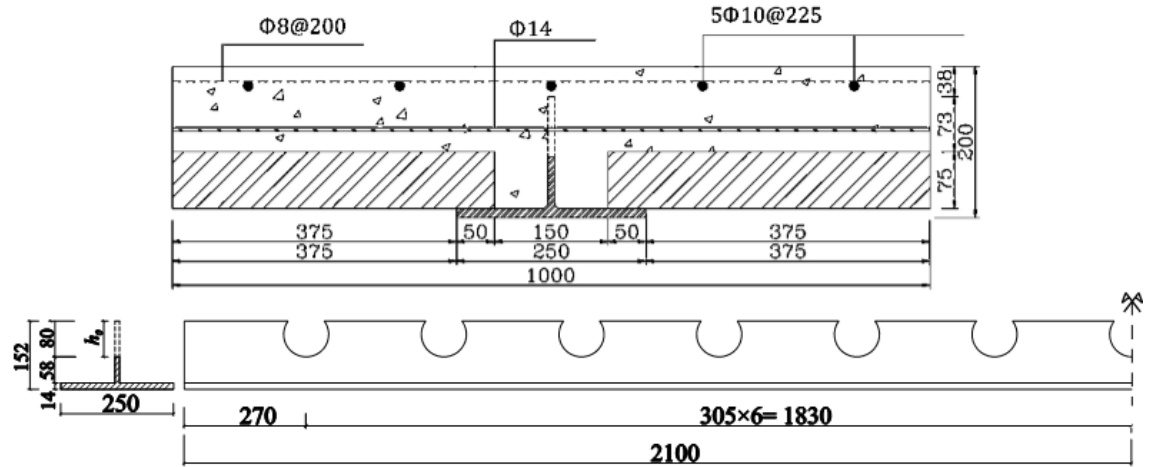
De modo geral, a boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos a partir do modelo de elementos finitos permite concluir que as estratégias de simulação numérica utilizadas são válidas para a representação do comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas circulares na alma, que se assemelham ao modelo experimental SCSFB 2 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015).

3.9.6. Estudo 6 – Modelo SCSFB 3

3.9.6.1. Modelo experimental

O modelo experimental SCSFB 3 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) é uma viga mista de *slim floor*, com comprimento de 4,2 m, composta por um perfil de aço com seção transversal T invertido. A viga possui aberturas na alma semicirculares de 100 mm de diâmetro, espaçadas 305 mm a partir do centro da viga (13 aberturas), com uma laje de concreto, como mostrado na Figura 3.83.

Figura 3.83 - Características do modelo experimental SCSFB 3 analisado por Chen, Limazie e Tan (2015).



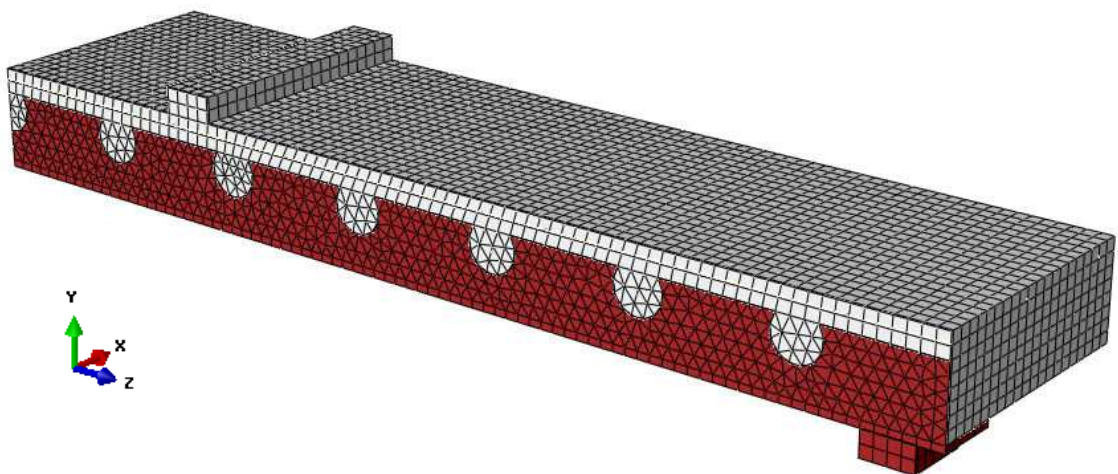
Fonte: Chen, Limazie e Tan (2015).

A configuração do ensaio para o modelo experimental SCSFB 3 foi a mesma usada no modelo SCSFB 1.

3.9.6.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental SCSFB 3 desenvolveu-se um modelo de elemento finitos com o programa computacional Abaqus. Ele é composto por 4332 elementos C3D8, 17055 elementos C3D6 e 612 elementos B31, totalizando 21999 elementos e 17865 nós (Figura 3.84).

Figura 3.84 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 3.

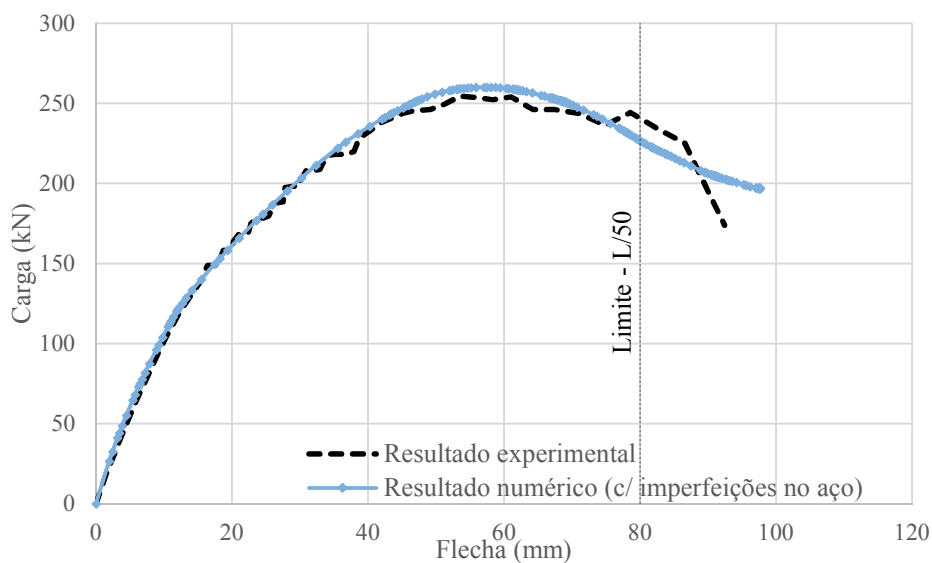


Fonte: Do autor.

3.9.6.3. Resultados

Na Figura 3.85 são apresentados o resultado experimental obtido por Chen, Limazie e Tan (2015) para o modelo SCSFB 3 e os resultados obtidos com o modelo numérico de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, que foi utilizado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas.

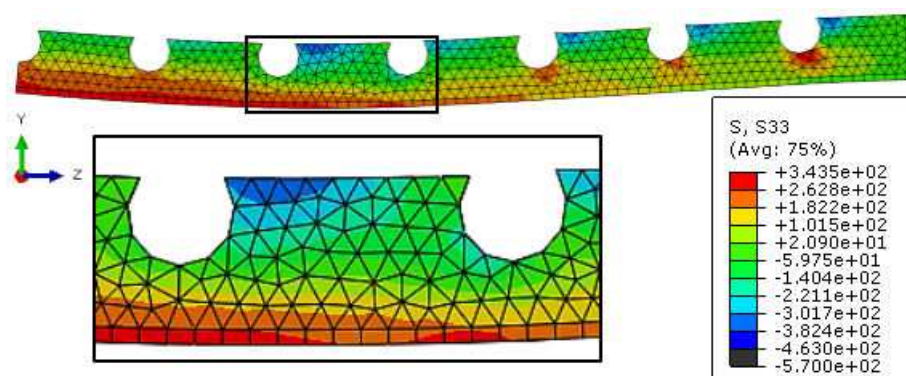
Figura 3.85 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB3.



Fonte: Do autor.

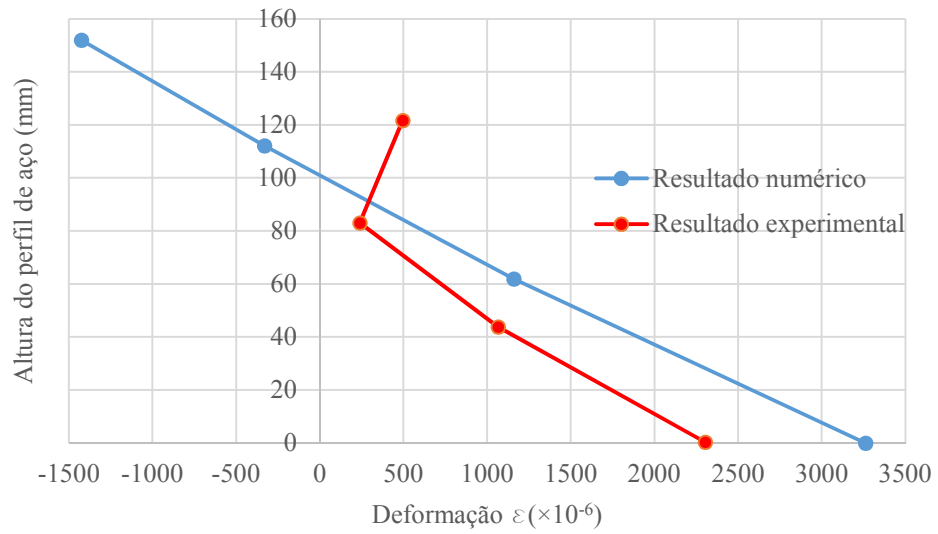
Na Figura 3.86 é apresentada a distribuição de tensões normais na direção longitudinal do perfil aço. Na Figura 3.87, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal do perfil de aço, na região de aplicação do carregamento.

Figura 3.86 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.



Fonte: Do autor.

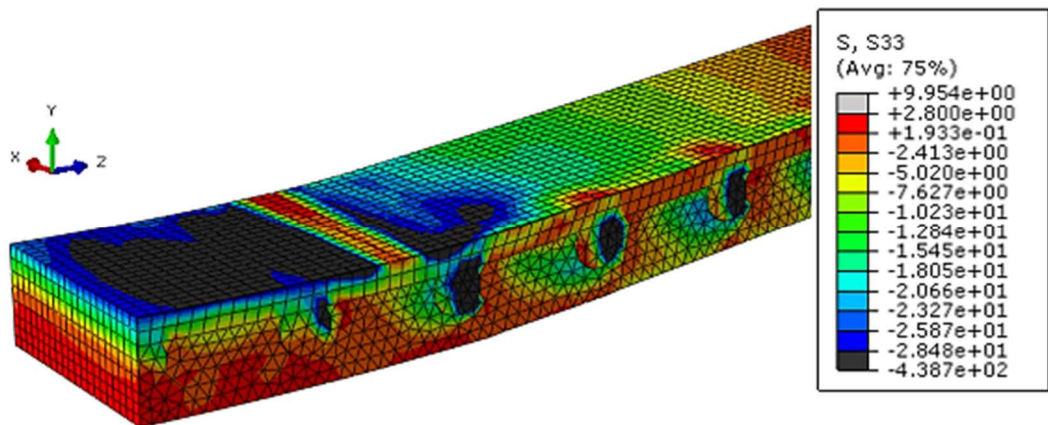
Figura 3.87 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.



Fonte: Do autor.

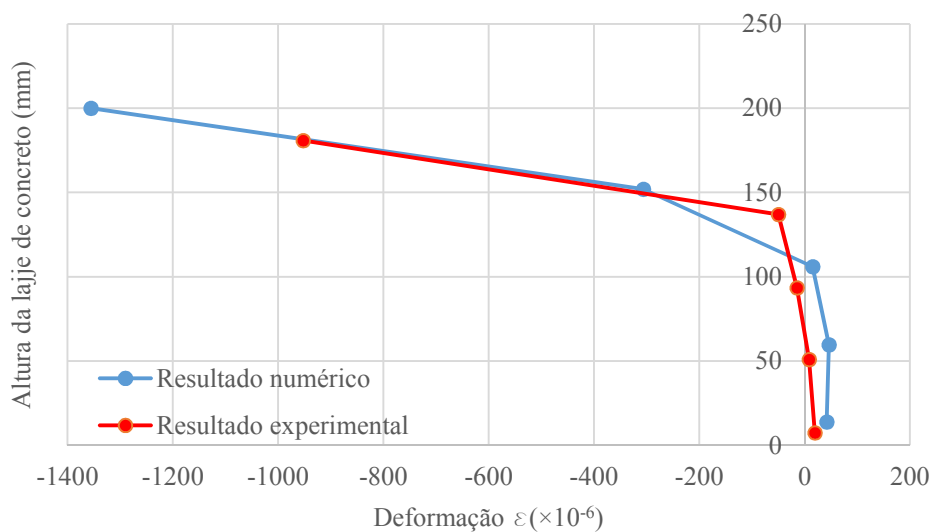
Na Figura 3.88 é apresentada a distribuição de tensões normais na laje de concreto na direção longitudinal. Em sequência, na Figura 3.89, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal da laje, para uma região situada no centro do vão e na extremidade da laje.

Figura 3.88 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.



Fonte: Do autor.

Figura 3.89 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.

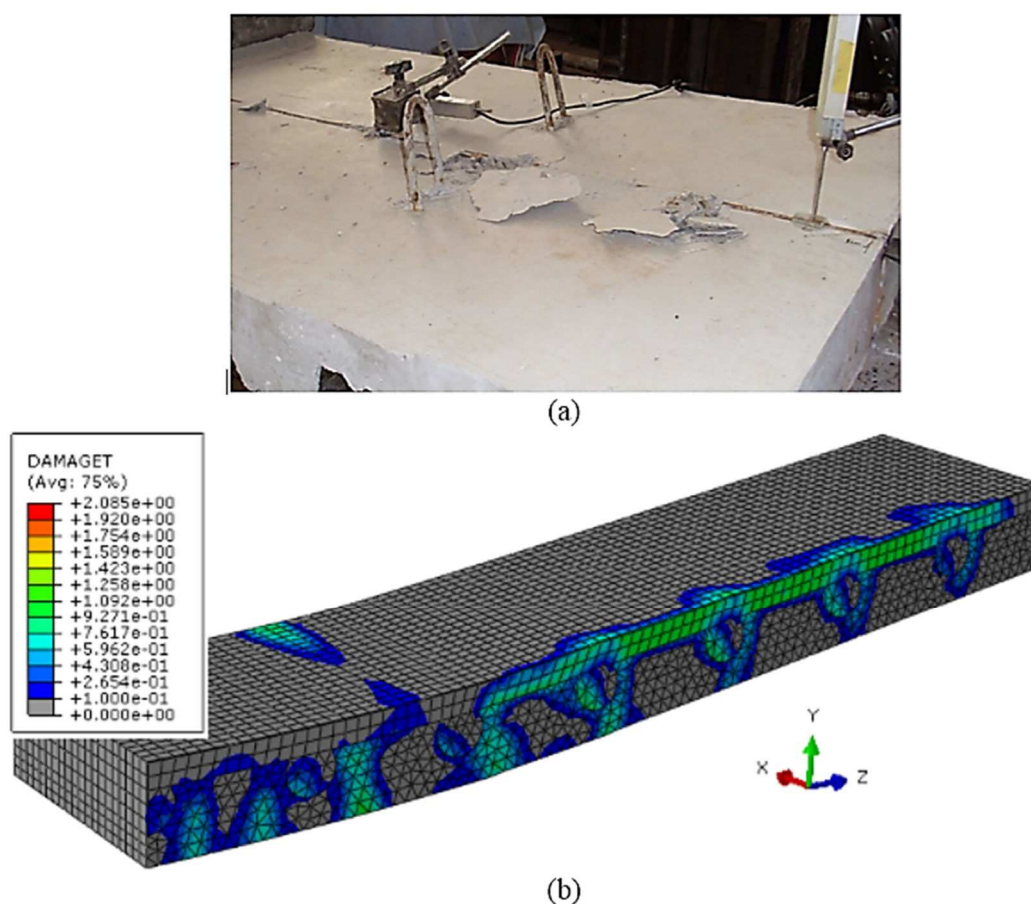


Fonte: Do autor.

Com relação ao deslizamento relativo ao longo da interface aço-concreto, o modelo experimental SCSFB 3 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) apresentou um deslizamento máximo de 9,3 mm. Já no modelo numérico de elementos finitos, o deslizamento relativo máximo entre as superfícies do perfil de aço e da laje de concreto foi 7,0 mm.

Quanto ao comportamento geral da viga observado, tem-se na Figura 3.90a, a ruptura do concreto na região acima das aberturas ao término do ensaio experimental. Na Figura 3.90b, tem-se o dano à tração sofrido pelo concreto no modelo numérico da viga mista de *slim floor* SCSFB 3 criado, ilustrando a semelhança entre os fenômenos.

Figura 3.90 - Fissuração do concreto observado no modelo experimental (a), e no modelo numérico (b).



Fonte: (a) Chen, Limazie e Tan (2015); (b) Do autor.

3.9.6.4. Discussão dos resultados

Analisando os resultados apresentados, observa-se uma boa concordância entre aqueles obtidos do modelo de elementos finitos e os experimentais obtidos por Chen, Limazie e Tan (2015), o que indica que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor* até o colapso.

Com base nos diagramas Carga x Flecha verifica-se que a carga máxima resistida pelo modelo experimental SCSFB1 foi 255,1 kN, enquanto no modelo numérico foi de 260,12 kN (102% do valor experimental).

Analisando as tensões desenvolvidas na viga de aço, nota-se que para o nível de carga máxima suportada pelo elemento, o escoamento do aço do perfil é inexistente, ao passo que, de acordo com as tensões desenvolvidas no concreto, observa-se regiões onde este se encontra com tensões acima do limite de resistência uniaxial à compressão. Essa

concentração de tensões demonstra ineficácia na ativação do comportamento misto pelos meios de conexão adotados.

No ensaio experimental e na análise numérica foi observado o modo de falha por cisalhamento caracterizado pela falha das conexões por cisalhamento planejadas. O perfil de aço não apresentava regiões plastificadas mesmo quando deslizamentos significativos, imediata queda da capacidade resistente e descolamento do concreto nas aberturas foram observados.

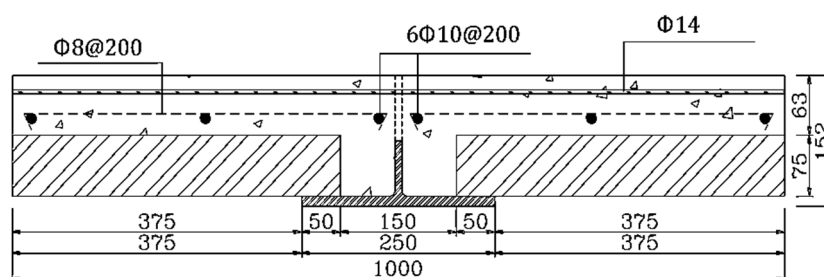
De modo geral, a boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos a partir do modelo de elementos finitos permite concluir que as estratégias de simulação numérica utilizadas são válidas para a representação do comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas semicirculares na alma, que se assemelham ao modelo experimental SCSFB 3 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015).

3.9.7. Estudo 7 – Modelo SCSFB 4

3.9.7.1. Modelo experimental

O modelo experimental SCSFB 4 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) consiste de uma viga mista de *slim floor*, com comprimento de 4,2 m, composta por um perfil de aço com seção transversal T invertido e aberturas na alma semicirculares de 100 mm de diâmetro, espaçadas de 305 mm a partir do centro da viga (13 aberturas), com uma laje de concreto como mostrado na Figura 3.91. Sua única diferença com relação ao modelo SCSFB 3 é a ausência da capa de concreto acima da viga de aço, e assim, as armaduras são colocadas a 30 mm do topo da laje de concreto.

Figura 3.91 - Características do modelo experimental SCSFB 4 analisado por Chen, Limazie e Tan (2015).



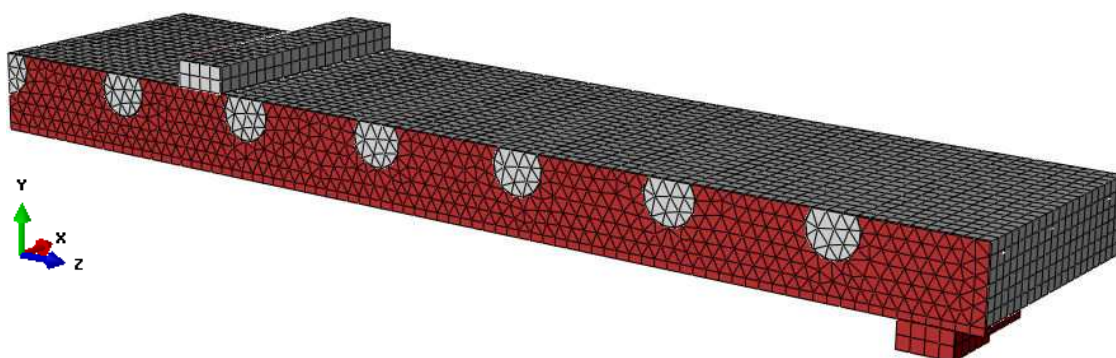
Fonte: Do autor.

A configuração do ensaio para o modelo experimental SCSFB 4 foi a mesma apresentada para o modelo SCSFB 1.

3.9.7.2. Modelo numérico

Para simular o comportamento estrutural à flexão do modelo experimental SCSFB 1 desenvolveu-se um modelo de elementos finitos no Abaqus, composto por 804 elementos C3D8, 16930 elementos C3D6 e 568 elementos B31, totalizando 18302 elementos e 13959 nós (Figura 3.92).

Figura 3.92 - Malha de elementos finitos do modelo numérico SCSFB 4.

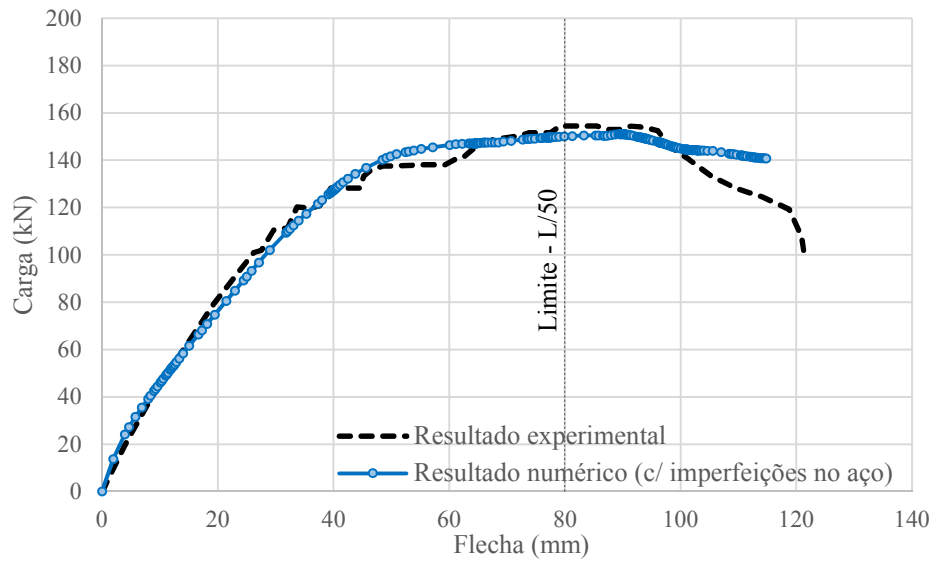


Fonte: Do autor.

3.9.7.3. Resultados

Na Figura 3.93 são apresentados o resultado experimental obtido por Chen, Limazie e Tan (2015) para o modelo SCSFB 4 e o resultado obtido com o modelo numérico de elementos finitos. No diagrama Carga \times Flecha indica-se um valor de flecha limite de $L/50$, que foi utilizado por Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas.

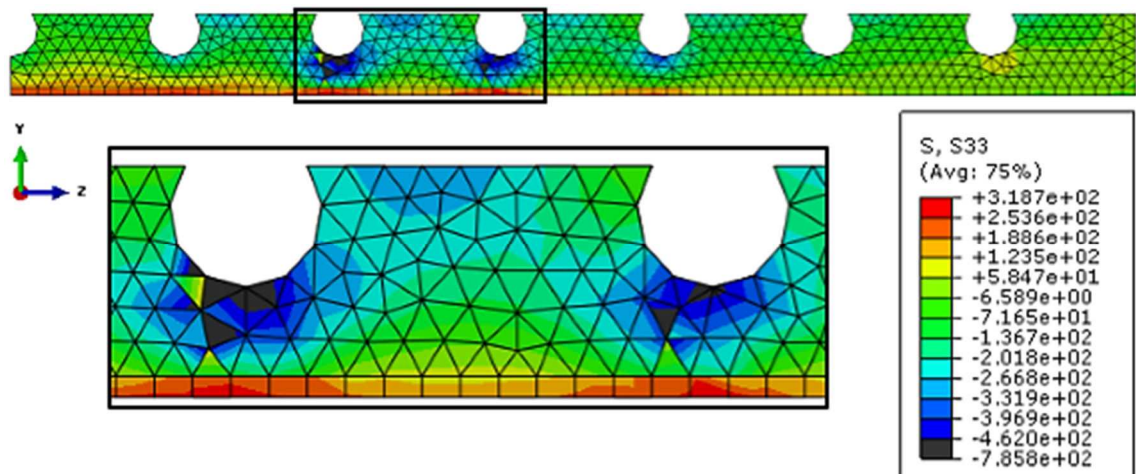
Figura 3.93 - Diagrama Carga \times Flecha no centro do vão livre para o modelo SCSFB 4.



Fonte: Do autor.

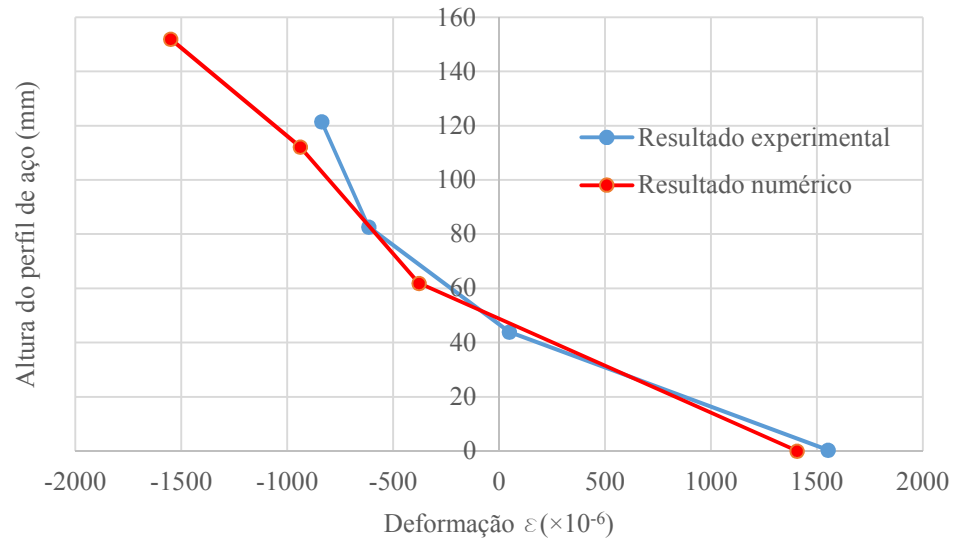
Na Figura 3.94 é apresentada a distribuição de tensões normais no perfil de aço na direção longitudinal. Já na Figura 3.95, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal do perfil de aço, na região de aplicação do carregamento.

Figura 3.94 - Distribuições de tensões normais no aço, em MPa.



Fonte: Do autor.

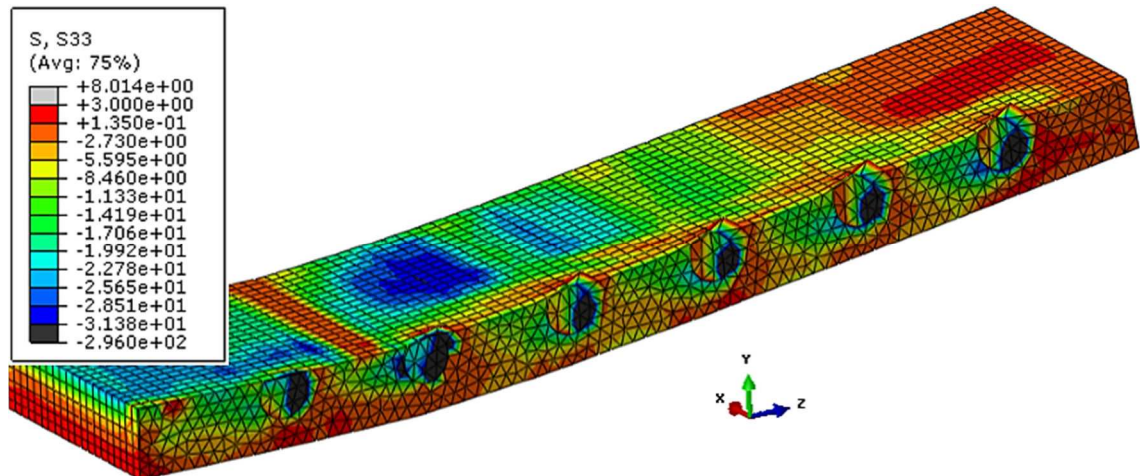
Figura 3.95 - Perfil de deformações ao longo da altura do perfil de aço.



Fonte: Do autor.

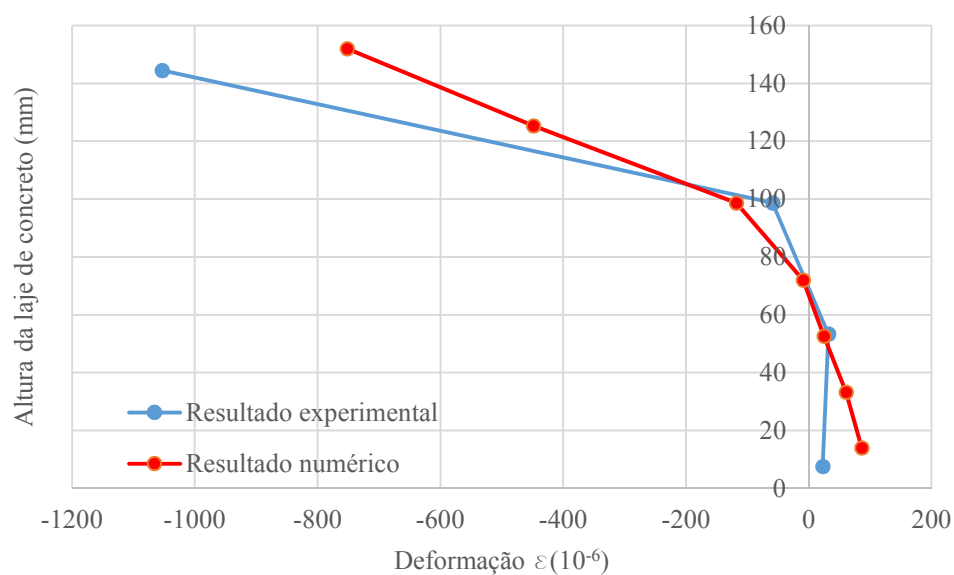
Na Figura 3.96 é apresentada a distribuição de tensões normais na laje de concreto na direção longitudinal. Em sequência, na Figura 3.97, tem-se o perfil de deformações ao longo da seção transversal da laje, para uma região situada no centro do vão e na extremidade da laje.

Figura 3.96 - Distribuição de tensões normais no concreto, em MPa.



Fonte: Do autor.

Figura 3.97 - Perfil de deformações ao longo da altura da laje de concreto.

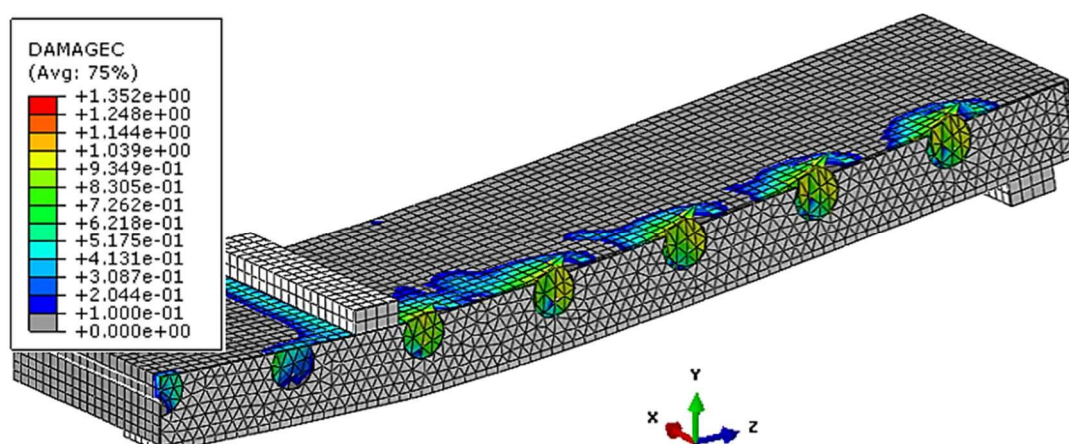


Fonte: Do autor.

Com relação ao deslizamento relativo ao longo da interface aço-concreto, o modelo experimental SCSFB 4 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015) apresentou um deslizamento máximo de 16,1 mm, enquanto no modelo numérico de elementos finitos o deslizamento relativo máximo foi 13,7 mm.

Quanto ao comportamento geral da viga observado tem-se, na Figura 3.98, a falha do concreto na região acima das aberturas ao término da análise numérica. Nesta imagem, é possível notar a tendência do concreto em se deslocar para fora das aberturas, o que causou significativas distorções nos elementos da malha da laje de concreto.

Figura 3.98 - Dano à compressão sofrido pelo concreto no modelo SCSFB 4.



Fonte: Do autor.

3.9.7.4. Discussão dos resultados

Por meio dos resultados apresentados, observa-se uma boa concordância entre os resultados obtidos por meio do modelo de elementos finitos desenvolvido nesse trabalho com os resultados experimentais obtidos por Chen, Limazie e Tan (2015), o que sugere que o modelo de elementos finitos criado é capaz de representar os fenômenos que ocorrem na viga mista de *slim floor* até o colapso.

Com base nos diagramas Carga \times Flecha, verifica-se que a carga máxima resistida pelo modelo experimental SCSFB 4 foi 154,4 kN, enquanto no modelo numérico a carga máxima foi 151,03 kN (97,8% do valor experimental).

Analisando as tensões desenvolvidas no modelo, nota-se que, para a quase totalidade do modelo, as tensões desenvolvidas não ultrapassaram os limites de escoamento dos materiais. Como na viga mista SCSFB 3, nesta análise também ocorreu falha por cisalhamento na região das conexões, com o concreto se separando da viga de aço devido à ausência da mesa superior e a não ativação do comportamento misto por meio dos elementos de conexões propostos para este sistema.

Assim, a boa concordância entre os resultados experimentais e os resultados obtidos a partir do modelo de elementos finitos permite concluir que as estratégias de simulação numérica utilizadas são válidas para a representação do comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas semicirculares na alma, que se assemelham ao modelo experimental SCSFB 4 ensaiado por Chen, Limazie e Tan (2015).

Estudos de variação de parâmetros

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados estudos de variação de parâmetros realizados utilizando-se os modelos numéricos de elementos finitos de vigas mistas desenvolvidos e apresentados no Capítulo 3. Os estudos de variação de parâmetros aqui apresentados têm por objetivo avaliar a influência que algumas características físicas exercem sobre o comportamento estrutural dos dois tipos de vigas mistas de *slim floor* adotadas neste estudo, quando submetidas a solicitações de flexão. Os estudos foram divididos em dois grupos:

- estudos de variação de parâmetros em vigas mistas com aberturas trapezoidais;
- estudos de variação de parâmetros em vigas mistas com aberturas circulares;

Dentre os modelos apresentados, para as vigas mistas com aberturas trapezoidais, tomou-se como referência o modelo numérico C1P15. Este modelo foi adotado pelo fato de ser o único apresentado por Ju, Chun e Kim (2009) do ensaio experimental que consiste em uma viga mista com aberturas trapezoidais na alma, pois os outros consistem em uma viga isolada e uma viga mista com pequenas aberturas circulares.

Para o outro estudo de variação de parâmetros com a viga mista com grandes aberturas circulares na alma, tomou-se como referência o modelo SCSFB 1. Este modelo foi adotado para os estudos de variação de parâmetros por apresentar um melhor comportamento estrutural em relação aos demais modelos de *slim floor* com aberturas circulares na alma analisados.

Isto posto, ressalta-se que em todos os modelos de elementos finitos desenvolvidos neste Capítulo são utilizadas as estratégias de simulação numérica descritas no Capítulo 3 para representar o comportamento mecânico da aderência, as condições de simetria da análise numérica, as condições de aplicação de carga, as interações entre as partes do modelo numérico e a definição da malha de elementos finitos.

4.2. Variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais

Os estudos de variação de parâmetros relativos aos meios de conexão das vigas mistas com aberturas trapezoidais são divididos em: diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas; nível de interação dos meios de conexão; espaçamento entre as aberturas e variação da área da abertura.

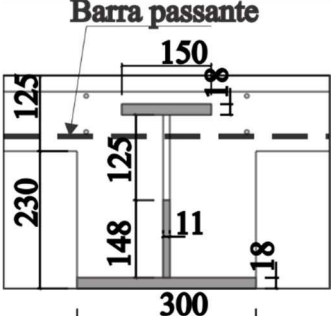
4.2.1. Diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas

Sabe-se que um parâmetro que pode influenciar o comportamento estrutural de vigas mistas de *slim floor* é o diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas presentes nas vigas mistas de aço. Dentre os meios de conexão usados nas vigas mistas de aço e concreto, as barras de aço que passam nas aberturas dos elementos de conexão tem a função de aumentar a eficiência na ativação do comportamento misto entre os dois materiais. Segundo Veríssimo (2007), na literatura encontram-se vários autores que observaram uma influência positiva ao se utilizar barras passantes em conjunto com o conector tipo *Perfobond*, usado em vigas mistas convencionais. Assim, este estudo visa avaliar a influência do diâmetro das barras passantes em vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais na alma.

4.2.1.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência do diâmetro das barras de aço passantes através das aberturas localizadas na alma do perfil de aço no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas do sistema *I-TECH*, com vigas de aço do tipo *D-Beam*, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Modelos considerados no estudo de variação dos diâmetros das barras de aço.

Esquema	Modelo	Diâmetro das barras (d)
	ØBP -M1-SI	Sem interação
	ØBP -M2-SB	Sem barras passantes
	ØBP -M3-8.0	$d = 8,0$ mm
	ØBP -M4-13.0-RF	$d = 13,0$ mm
	ØBP -M5-18.0	$d = 18,0$ mm
	ØBP -M6-22.0	$d = 22,0$ mm
	ØBP -M7-32.0	$d = 32,0$ mm
	ØBP -M8-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#- XX-RF

AA - Identificação do estudo - ØBP: Diâmetro das barras passantes

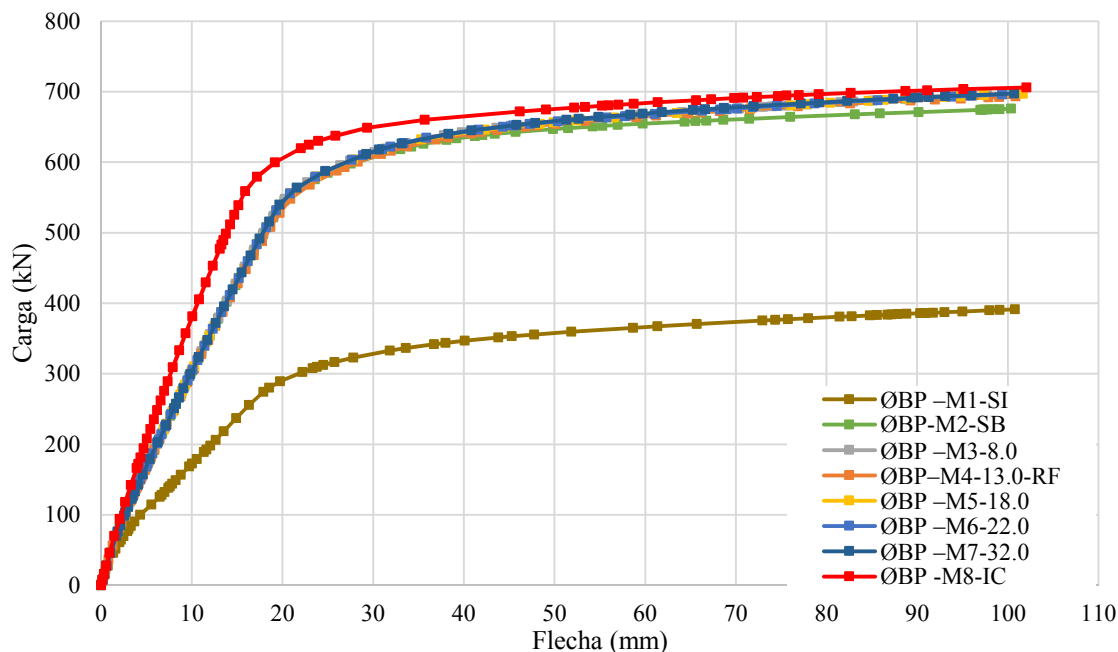
XX - Característica do modelo - IC: Interação completa; SI: Sem interação (sem abertura e sem aderência); SB: Sem barras passantes; #.#: diâmetro da barra passante; RF - Modelo de referência

Fonte: Do autor.

4.2.1.2. Resultados

Na Figura 4.1 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha obtidos a partir das análises numéricas dos modelos de viga mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma, e 5000 mm de vão livre.

Figura 4.1 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do diâmetro da barra passante nas aberturas.



Fonte: Do autor.

4.2.1.3. Discussão dos resultados

A partir dos diagramas Carga × Flecha para o estudo da influência do diâmetro das barras passantes nas aberturas, pode-se verificar que o comportamento estrutural apresentado pelas vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais na alma, que compõem o sistema *I-TECH*, é relativamente pouco influenciado pelo diâmetro das barras passantes através das aberturas.

De acordo com os resultados, observa-se que com a variação do diâmetro das barras o ganho de resistência é pouco significativo, ao passo que se nota uma sutil diferença no comportamento das vigas mistas analisadas com o modelo ØBP-M2-SB (sem barras passantes). Isso indica que a presença da barra de aço passante exerce uma influência positiva no comportamento da viga mista, atuando para uma maior eficiência na ativação do comportamento misto e na resistência do concreto presente na região das aberturas. Além disso, pode-se observar que o uso da barra passante contribui para o sistema se aproximar do caso ideal para o comportamento de uma viga mista, com a interação completa entre os elementos.

Comparando os resultados entre os modelos, o único que se afasta dos demais é o modelo relativo à viga mista sem interação (\emptyset BP –M1-SI), ou seja, sem a presença das aberturas e da aderência entre aço e concreto. Observando o comportamento deste modelo em relação aos demais, é possível notar a importância dos meios de conexão entre a viga de aço e a laje de concreto. Assim, ressalta-se que a presença da abertura na alma da viga acompanhada de uma barra de aço passante tem significativa participação na ativação do comportamento misto do sistema.

A pouca significância da variação do diâmetro das barras de aço nos resultados é influenciada pelo fato das vigas possuírem grandes aberturas, resultando em uma taxa de armadura relativamente pequena para o volume de concreto que a envolve. Em vigas mistas de *slim floor* com aberturas na alma menores que as apresentadas neste modelo de estudo, o diâmetro das barras passantes pelas aberturas na alma exerce uma influência mais expressiva, como pode ser visto no estudo apresentado por Mesquita (2016).

De maneira geral, o diâmetro da barra de aço passante pelas aberturas é um parâmetro de projeto que influencia de forma positiva, ainda que com pouca expressividade, a capacidade resistente das vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas trapezoidais na alma.

4.2.2. Formas de ativação do comportamento misto

Os meios de conexão em uma viga mista de aço e concreto são as formas que o sistema construtivo possui para ativar o comportamento misto entre os elementos dos dois materiais. O comportamento misto pode ser proporcionado através de conectores mecânicos, como pinos com cabeça, usados nas vigas mistas tradicionais, e aberturas nas almas dos perfis metálicos com barras passantes por elas. Além dos conectores mecânicos, o comportamento misto entre os elementos da viga mista também pode ser obtido por meio da aderência na interface entre os elementos de aço e concreto.

Considerando, especificamente, as vigas mistas de *slim floor*, o uso dos pinos com cabeça sobre a mesa superior do perfil de aço não é usual, pois a capa de concreto sobre o perfil não possui espessura suficiente para alojar os conectores. Ademais, caso se adotasse uma capa de concreto que atendesse ao uso dos pinos com cabeça, a viga mista de *slim floor* perderia o aspecto positivo de diminuir a altura total da edificação em relação às construções mistas convencionais. Logo, nas vigas mistas de *slim floor* analisadas neste

trabalho os meios de conexão utilizados são as aberturas com barras de aço passantes e a aderência na interface entre as superfícies.

Os meios de conexão presentes entre os elementos das vigas mistas de *slim floor* podem ser classificados como frágeis ou dúcteis (PAES, 2003). Os meios classificados como frágeis são aqueles que usam a aderência para ativação do comportamento misto, capazes de transmitir esforços longitudinais até um determinado limite, após o qual ocorre o deslizamento entre o aço e o concreto. Já um meio de conexão dúctil, proporcionado, neste caso, por aberturas no perfil com barras de aço passantes, transmite esforços longitudinais até o colapso da viga. Para melhor compreensão sobre interfaces frágeis e dúcteis, recomenda-se consultar Paes (2003).

Isto posto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência dos meios de conexão utilizados em vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas trapezoidais na alma da viga de aço, que compõem no sistema *I-TECH*, quando submetidas à flexão.

4.2.2.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência do meios de conexão no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Modelos considerados no estudo de variação dos meios de conexão da viga mista de *slim floor*.

Esquema	Modelo	Meios de conexão
	MC-M1-SI	Sem meios de conexão
	MC-M2-SAb	Sem aberturas
	MC-M3-SB	Sem barras passantes
	MC-M4-SAd	Sem aderência
	MC-M5-RF	Presença de abertura, barras passantes e aderência
	MC-M6-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#- XX

AA - Identificação do estudo - MC: Meios de conexão

M# - Modelo #

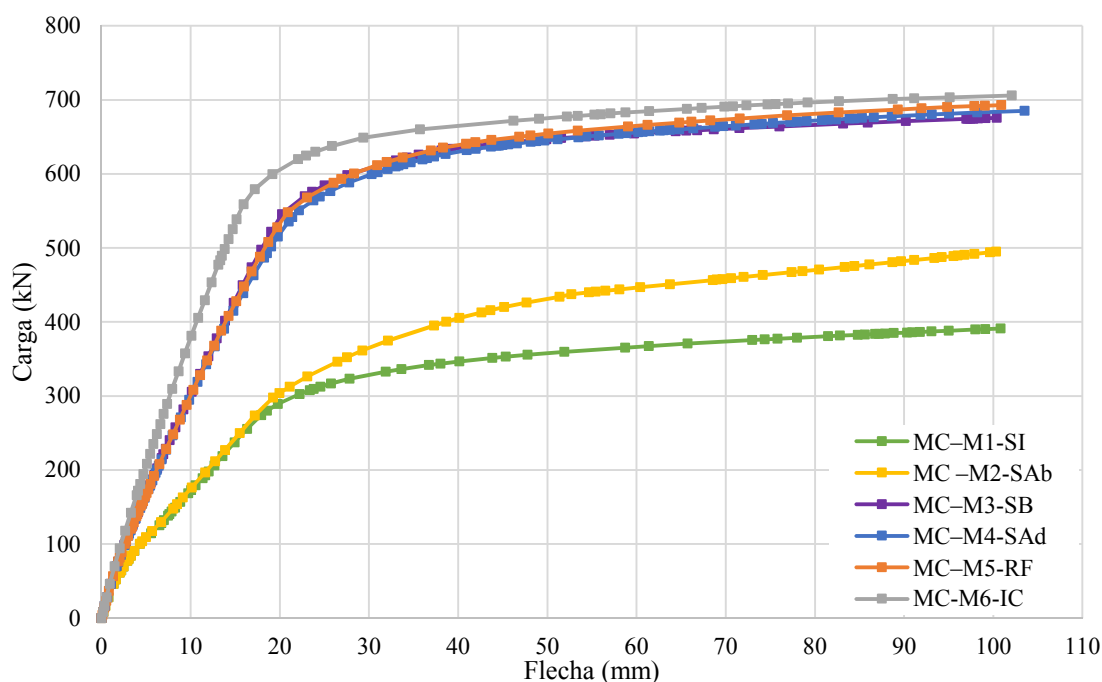
XX - Característica do modelo – IC: Interação completa; SI: Sem interação (sem abertura e sem aderência); SB: Sem barras passantes; RF - Modelo de referência

Fonte: Do autor.

4.2.2.2. Resultados

Na Figura 4.2 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação dos meios de conexão obtidos a partir das análises numéricas dos modelos de viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma e 5000 mm de vão livre.

Figura 4.2 - Diagramas Carga \times Flecha para o estudo de variação dos meios de conexão.



Fonte: Do autor.

4.2.2.3. Discussão dos resultados

Com os resultados na Figura 4.2, pode-se avaliar a influência dos meios de conexão sobre o comportamento à flexão em vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com grandes aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço.

A partir dos diagramas Carga \times Flecha obtidos para o estudo de variação dos meios de conexão, verifica-se que o modelo de elementos finitos MC-M5-RF (modelo de referência) se aproximou mais do resultado do modelo MC-M6-IC (interação completa), que representa a condição na qual o sistema apresenta maior rigidez e maior capacidade resistente. O modelo de referência, por sua vez, apresenta como meios de conexão a abertura na alma do perfil de aço, a barra de aço passante por esta abertura e a aderência nas interfaces de contato entre o perfil de aço e a laje de concreto. Esse resultado

demonstra a capacidade dos meios de conexão de transferir os esforços longitudinais que surgem quando o sistema é solicitado.

Por meio dos diagramas Carga \times Flecha, verifica-se que a diferença entre os comportamentos dos modelos numéricos MC–M5-RF para os modelo MC–M4-SAd e MC–M3-SB foi sutil. Na Tabela 4.3, são apresentados os valores de carga máxima apresentados pelos modelos numéricos, o valor da carga máxima do modelo de referência e a diferença entre elas. Os valores indicados referem-se ao ponto de deslocamento $L/50$, indicado Leskelä e Hopia (2000) como critério de parada para ensaios de flexão em vigas.

Tabela 4.3 - Carga Máxima obtida na avaliação das formas de ativação do comportamento misto.

Modelo	Meio de conexão	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
MC–M1-SI	Sem meios de conexão	391,24	693,09	56,5%
MC –M2-SAb	Sem aberturas	494,69	693,09	71,4%
MC–M3-SB	Sem barras passantes	675,71	693,09	97,5%
MC–M4-SAd	Sem aderência	685,35	693,09	98,9%
MC–M5-RF	Presença de abertura, barras passantes e aderência	693,09	693,09	100,0%
MC-M6-IC	Interação completa	705,84	693,09	101,8%

Fonte: Do autor.

Com os resultados obtidos para os valores das cargas máximas apresentadas pelos modelos numéricos, pode-se avaliar o desempenho dos meios de conexão quando comparados com o resultado apresentado pelo modelo de referência. Desses resultados, verifica-se que a ausência da aderência entre as interfaces aço-concreto representou uma diferença de 1,1% nos resultados. A pouca expressividade desta diferença indica que a aderência presente nas interfaces entre a viga de aço e a laje de concreto tem pouca participação no comportamento misto do sistema.

Em relação ao modelo numérico MC–M3-SB, que possui como meios de conexão a aderência e a abertura trapezoidal sem barras passantes, verifica-se que ele apresentou um comportamento estrutural semelhante ao modelo de referência, com uma diferença entre os valores de carga máxima de 2,5%. Isso indica que, para este modelo de viga mista de *slim floor* com grandes aberturas trapezoidais, as barras passantes possuem pequena influência no comportamento estrutural da viga mista, ainda que maior do que a influência relativa à consideração da aderência. Ressalta-se que, mesmo com pouca

representatividade na resistência da viga mista, seu uso é recomendado por adicionar ductilidade ao sistema.

A baixa influência apresentada pela consideração da aderência ou das barras passantes pelas aberturas pode ser relacionada com o fato de este ser um sistema viga mista de *slim floor* com grandes aberturas na alma, conseqüentemente com um volume maior de concreto mobilizado nesta região em comparação com os sistema com aberturas menores. Esta consideração fica evidenciada quando se analisa o modelo numérico MC–M2-SAb, sem a presença das aberturas e barras passantes. A diferença entre a carga máxima apresentada por este modelo e a apresentada pelo modelo de referência é da ordem de 28,6%, realçando a magnitude da influência que a abertura trapezoidal possui na ativação do comportamento misto do sistema.

Ao se comparar o modelo numérico MC–M2-SAb, com somente a aderência como meio de conexão, com o modelo MC–M1-SI, sem qualquer meio de conexão entre os elementos, nota-se que na ausência da abertura trapezoidal a aderência possui uma influência positiva significativa no comportamento estrutural da viga. Esta constatação evidencia a importância da consideração deste meio de conexão entre os elementos, mesmo com sua sutil influência na presença de outros meios de conexões.

Por fim, com os resultados obtidos na análise da influência dos meios de conexão atribuídos aos modelos numérico foi possível avaliar a representatividade de cada meio de conexão usado nas vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com grandes aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço. Dentre os meios de conexão avaliados, a influência das grandes aberturas na alma do perfil de aço prevaleceu sobre as barras passantes e a aderência.

4.2.3. Espaçamento entre as aberturas

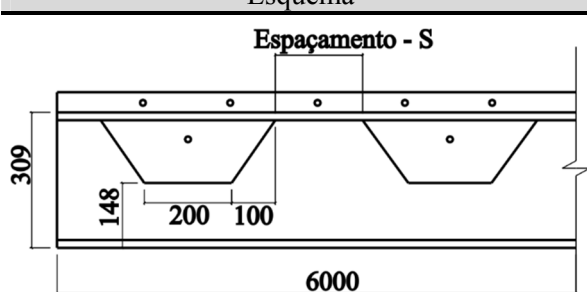
No âmbito do estudo de variação de parâmetros proposto para as vigas mistas de *slim floor*, um parâmetro que pode influenciar o comportamento estrutural à flexão é o espaçamento entre as aberturas ao longo do perfil de aço. Este parâmetro está relacionado ao número de aberturas de forma proporcionalmente inversa, ou seja, ao aumentar o espaçamento entre as aberturas, a quantidade das aberturas presentes ao longo da viga mista diminui. Sabendo que as aberturas no perfil constituem um meio de conexão da viga mista e atuam proporcionando um comportamento misto entre os elementos de aço

e concreto, tem-se interesse em analisar a influência do espaçamento entre elas. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar esta influência sobre o comportamento à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com grandes aberturas trapezoidais na alma.

4.2.3.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência do espaçamento entre as aberturas no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Modelos considerados no estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.

Esquema	Modelo	Espaçamento (S)
	EspAb-M1-SI	Sem interação
	EspAb-M2-100	S = 100 mm
	EspAb-M3-200-RF	S = 200 mm
	EspAb-M4-350	S = 350 mm
	EspAb-M5-450	S = 450 mm
	EspAb-M6-600	S = 600 mm
	EspAb-M7-800	S = 800 mm
	EspAb-M8-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#-XX

AA - Identificação do estudo - EspAb: Espaçamento entre as aberturas

M# - Modelo #

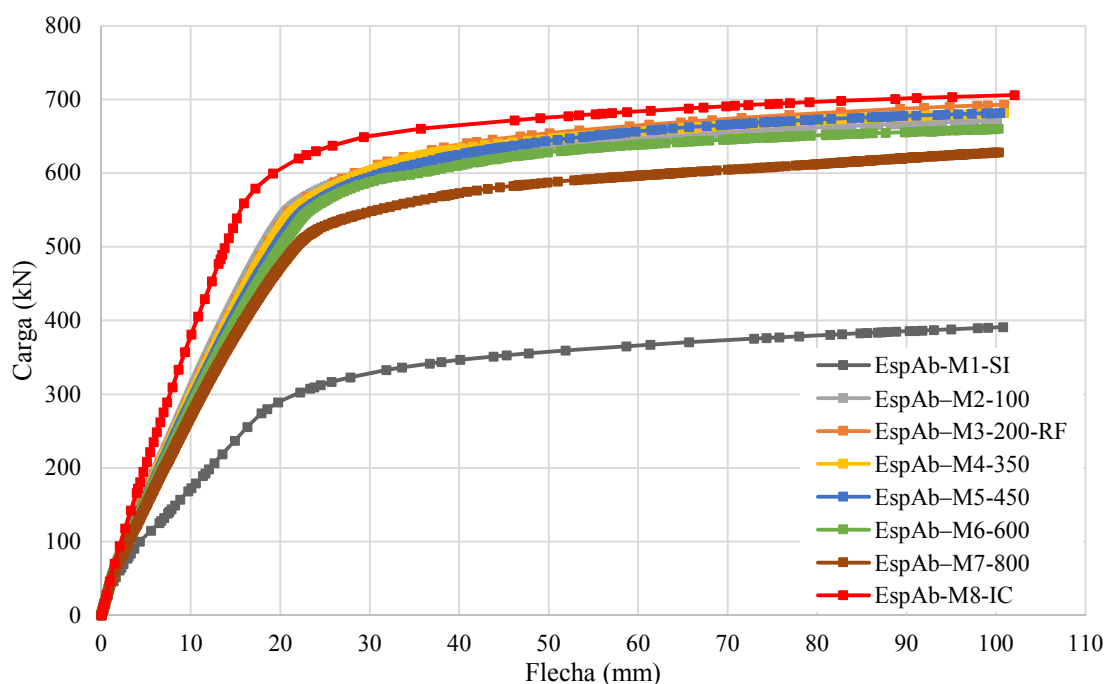
XX - Característica do modelo – IC: Interação completa, SI: Sem interação e ##: espaçamento entre aberturas em milímetros; RF- Modelo de referência

Fonte: Do autor.

4.2.3.2. Resultados

Na Figura 4.3, são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas, obtidos a partir das análises numéricas dos modelos de viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço e 5000 mm de vão livre.

Figura 4.3 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.



Fonte: Do autor.

4.2.3.3. Discussão dos resultados

De acordo com os resultados obtidos dos modelos numéricos de vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH* exibidos na Figura 4.3, é possível avaliar a influência do espaçamento entre as aberturas no comportamento estrutural da viga mista. Pode-se observar que o espaçamento entre as aberturas trapezoidais na alma do perfil de aço tem influência sobre o sistema proposto, pois o comportamento e a capacidade resistente da viga são afetados com a variação deste parâmetro.

Por meio dos diagramas Carga × Flecha obtidos com os resultados, o modelo numérico que apresentou maior eficiência foi o modelo EspAb-M3-200-RF, com espaçamento de 200 mm entre as extremidades das aberturas. Este modelo apresentou diferença de 1,8% para o valor da carga máxima apresentado pelo modelo EspAb-M8-IC, que representa uma condição ideal de interação completa e deslizamento relativo nulo entre aço e concreto. Os valores de carga máxima obtidos nas análises e a diferença em relação ao modelo de referência são exibidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Carga Máxima obtida na avaliação do espaçamento entre as aberturas.

Modelo	Espaçamento	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
EspAb-M1-SI	Sem interação	391,24	693,09	56,4%
EspAb-M2-100	$S = 100$ mm	671,38	693,09	96,9%
EspAb-M3-200-RF	$S = 200$ mm	693,09	693,09	100,0%
EspAb-M4-350	$S = 350$ mm	681,57	693,09	98,3%
EspAb-M5-450	$S = 450$ mm	681,58	693,09	98,3%
EspAb-M6-600	$S = 600$ mm	660,22	693,09	95,3%
EspAb-M7-800	$S = 800$ mm	628,34	693,09	90,7%
EspAb-M8-IC	Interação completa	705,84	693,09	101,8%

Fonte: Do autor.

Observando os diagramas Carga \times Flecha, em complemento com os valores de carga máxima obtidos pelos modelos numéricos, verifica-se que os comportamentos mais eficientes se deram para os modelos com espaçamentos de 450, 350 e 200 mm. Já para o modelo com espaçamento menor que esses valores, como o modelo EspAb-M2-100, nota-se que ele apresenta uma resistência menor em relação aos outros citados, diferindo em 3,1% do valor de referência. Isto se deve ao pouco espaçamento presente entre as aberturas, que ocasiona o escoamento da alma do perfil de aço na região entre as aberturas.

Perdas na eficiência da capacidade estrutural da viga mista também são observadas para os modelos EspAb-M6-600 e EspAb-M7-800, com 600 e 800 mm de espaçamento, respectivamente. O modelo com 600 mm de espaçamento apresentou uma diferença de 4,7% do modelo de referência e o modelo com 800 mm de espaçamento diferiu em 9,3%. A queda no valor da capacidade resistente ao aumentar o valor do espaçamento entre as aberturas indica que além de certo valor, o espaçamento influencia negativamente o comportamento da viga mista de *slim floor*.

A análise dos resultados apresentados neste estudo da variação do espaçamento entre as aberturas presentes nas vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com grandes aberturas trapezoidais, permite concluir que, como o espaçamento está diretamente relacionado ao número de aberturas presentes na viga, ele possui influência significativa no comportamento estrutural. Quanto maior o valor do espaçamento, menor o número de aberturas na viga de aço, dificultando a ativação do comportamento misto entre os elementos do sistema. Por outro lado, quanto menor o valor do espaçamento, maior o

número de aberturas na alma do perfil, até o ponto em que a região entre as aberturas se torna relativamente reduzida e sofre escoamento sob as tensões atuantes.

4.2.4. Variação da área da abertura

A área da abertura trapezoidal presente da viga de aço, que compõe a viga mista de *slim floor* adotada neste estudo, atua na forma como o sistema se comporta quando submetido à solicitação de flexão. Por consistir em um meio de conexão participante no comportamento misto que o sistema apresenta, a variação da área da abertura trapezoidal influencia na ativação deste comportamento misto realizado pelos diversos meios de conexão presentes na viga mista.

Um dos fatores afetados pela variação da área da abertura, é o volume de concreto confinado na região de cada uma das aberturas. Este volume de concreto, juntamente com a barra de aço passante, é mobilizado quando o sistema é submetido a uma solicitação de flexão, agindo na ativação do comportamento misto entre a viga de aço e a laje de concreto. Logo, ao se diminuir ou aumentar a área da abertura trapezoidal, interfere-se diretamente neste meio de conexão.

Neste estudo optou-se por variar a área das aberturas trapezoidais de forma que as medidas geométricas do trapézio fossem condizentes com a criação do modelo numérico, por isso optou-se por modelos com área equivalentes a 6,25%, 25% e 150% da área da abertura do modelo de referência. O objetivo foi avaliar a influência da variação da área das aberturas trapezoidais presentes na viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH*.

4.2.4.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência da área das aberturas na alma do perfil de aço e, conseqüentemente, a área preenchida por concreto no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Modelos considerados no estudo de variação da área das aberturas.

Esquema	Modelo	Area (mm ²)	
	AA-M1-SI	Sem interação	
	AA-M2-0,0625A	2343,75 mm ²	
	AA-M3-0,25A	9375 mm ²	
	AA-M4-A-RF	37500 mm ²	
	AA-M5-1,5A	56250 mm ²	
	AA-M6-IC	Interação completa	

Nomenclatura: AA-M#-XX

AA - Identificação do estudo - AA: Área das aberturas

M# - Modelo #

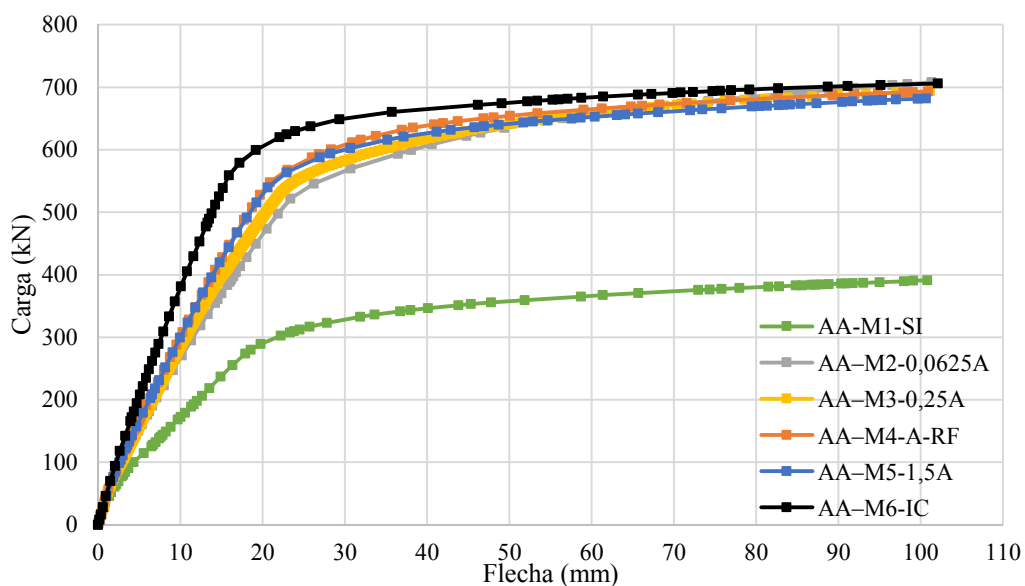
XX - Característica do modelo - IC: Interação completa, SI: Sem interação e ##: Área da abertura; RF- Modelo de referência

Fonte: Do autor.

4.2.4.2. Resultados

Na Figura 4.4 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação da área das aberturas obtidos a partir das análises numéricas do modelo de viga mista de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma e 5000 mm de vão livre.

Figura 4.4 - Diagramas Carga \times Flecha para o estudo de variação da área das aberturas.



Fonte: Do autor.

4.2.4.3. Discussão dos resultados

De acordo com os diagramas Carga \times Flecha apresentados na Figura 4.4, onde foi adotada a flecha de $L/50$ como critério de parada, verifica-se que a variação da área da abertura possui uma influência pouco significativa nos valores das cargas máximas apresentadas pelos modelos numéricos. Na Tabela 4.7, são apresentados os valores de carga máxima dos modelos, e sua relação com o valor apresentado pelo modelo de referência.

Tabela 4.7 - Carga Máxima obtida na avaliação da variação da área das aberturas.

Modelo	Área	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
AA-M1-SI	Sem interação	391,24	693,09	56,4%
AA-M2-0,0625A	2343,75 mm ²	707,81	693,09	102,1%
AA-M3-0,25A	9375 mm ²	693,67	693,09	100,1%
AA-M4-A-RF	37500 mm ²	693,09	693,09	100,0%
AA-M5-1,5A	56250 mm ²	682,12	693,09	98,4%
AA-M6-IC	Interação completa	705,84	693,09	101,8%

Fonte: Do autor.

Analisando os valores de carga máxima obtidos das análises numéricas, nota-se uma proximidade entre os valores, exceto para o modelo AA-M1-SI desprovido de qualquer meio de conexão. Ressalta-se que o motivo do modelo AA-M2-0,0625A, que possui área de abertura relativa a 6,25% da área do modelo de referência, ter apresentado carga máxima maior que o modelo AA-M6-IC, com interação completa e deslizamento relativo nulo, se deve a este ser um modelo com interação completa baseado no modelo de referência.

Apesar de apresentar pouca influência no valor da carga máxima, a variação da área da abertura trapezoidal exerceu influência no comportamento estrutural das vigas mistas. Observando os diagramas Carga \times Flecha apresentados, nota-se que os modelos com área de abertura maior que a do modelo de referência se mostraram mais rígidos que os modelos com áreas menores na fase inicial da análise, porém com capacidade resistente menor com a continuidade do carregamento. Portanto, com o estudo verifica-se que a área da abertura trapezoidal tem influência sobre o sistema, conferindo-lhe ductilidade e capacidade resistente quando usada com um valor reduzido. Ademais, a área da abertura também pode fornecer rigidez, porém implica em decréscimo da capacidade resistente do sistema quando usada com um valor relativamente superior, como exemplificado neste estudo pelo modelo AA-M5-1,5A.

4.3. Variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares

Os estudos de variação de parâmetros relativos aos meios de conexão das vigas mistas com aberturas circulares, que compõem o sistema SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), se encontram divididos em: diâmetro das aberturas circulares na alma do perfil de aço, espaçamento entre as aberturas circulares e, por fim, a posição que as aberturas se encontram ao longo da altura do perfil de aço.

4.3.1. Diâmetro das aberturas

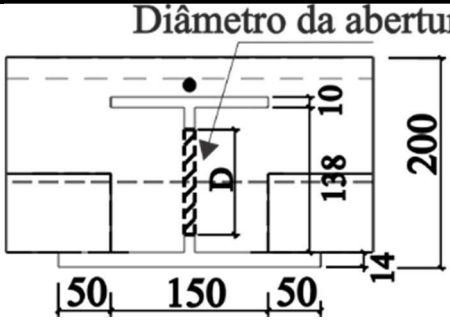
Dentro do contexto da influência que as aberturas circulares possuem no comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB, um parâmetro relevante é o diâmetro destas aberturas. O diâmetro da abertura está diretamente relacionado à área do meio de conexão, que consiste do volume de concreto confinado nesta região acompanhado da barra de aço passante por ela.

Em relação aos meios de conexões tradicionais, como conectores mecânicos por exemplo, o formato das aberturas circulares na alma tem semelhança com os conectores *Perfobond*, que são conectores mecânicos com pequenas aberturas circulares alocados na mesa superior em vigas mistas tradicionais. Essas aberturas circulares promovem o comportamento misto por meio dos pinos de concreto formados nas regiões das aberturas. O presente estudo tem o objetivo de avaliar a influência da variação do diâmetro das aberturas circulares nas vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB.

4.3.1.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência do diâmetro das aberturas no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB, com aberturas circulares na alma, foram considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Modelos considerados no estudo de variação do diâmetro das aberturas.

Esquema	Modelo	Diâmetro da abertura (mm)
	DA-M1-SB	Sem barras passantes
	DA-M2-50	$D = 50$ mm
	DA-M3-75	$D = 75$ mm
	DA-M4-100-RF	$D = 100$ mm
	DA-M5-125	$D = 125$ mm
	DA-M7-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#-XX

AA - Identificação do estudo - DA: Diâmetro da abertura

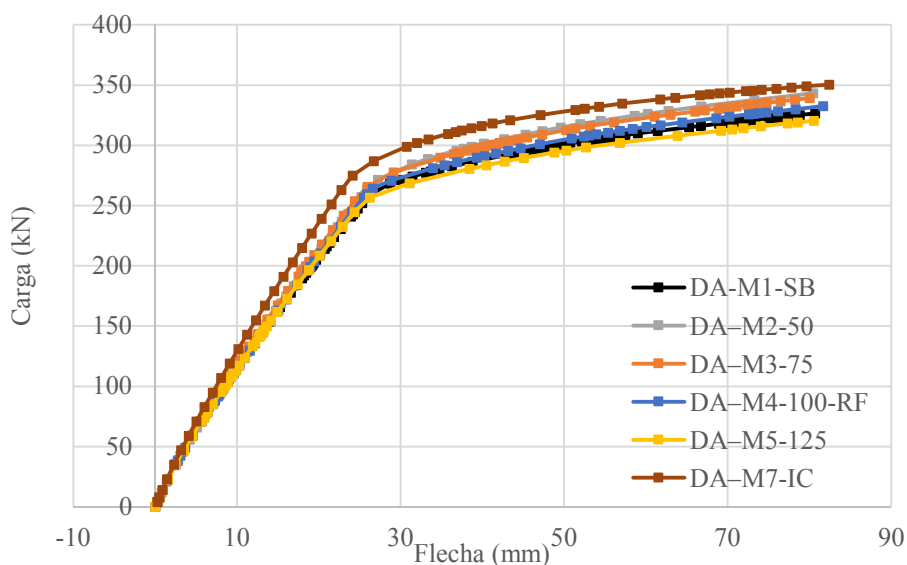
M# - Modelo #

XX - Característica do modelo – IC: Interação completa, SB: Sem barras passantes; ##: Diâmetro da abertura; RF- Modelo de referência

Fonte: Do autor.

4.3.1.2. Resultados

Na Figura 4.5 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação do diâmetro das aberturas obtidos a partir das análises numéricas dos modelos de viga mista de *slim floor* tipo SCSFB, com aberturas circulares na alma e 4000 mm de vão livre. Neste estudo foi adotado o valor de flecha de $L/50$ como critério de parada em ensaios de flexão em vigas, recomendado por Leskelä e Hopia (2000).

Figura 4.5 - Diagramas Carga \times Flecha para o estudo de variação do diâmetro das aberturas.

Fonte: Do autor.

Na Tabela 4.9, são exibidos os valores de carga máxima obtidos para os modelos numéricos e a relação entre os valores de carga máxima entre o modelo de referência e os demais modelos numéricos.

Tabela 4.9 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para estudo de variação do diâmetro.

Modelo	Diâmetro	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
DA-M1-SB	S/ barras, D=100mm	326,60	332,50	98,2%
DA-M2-50	$D = 50$ mm	343,14	332,50	103,2%
DA-M3-75	$D = 75$ mm	339,19	332,50	102,0%
DA-M4-100-RF	$D = 100$ mm	332,50	332,50	100,0%
DA-M5-125	$D = 125$ mm	320,47	332,50	96,4%
DA-M7-IC	Interação completa	350,41	332,50	105,4%

Fonte: Do autor.

4.3.1.3. Discussão dos resultados

Por meio dos diagramas Carga \times Flecha e dos resultados dos valores de carga máxima apresentados pelos modelos, verifica-se que os modelos que mais se aproximaram do comportamento apresentado pelo modelo numérico ideal, com interação completa, foram os modelos DA-M2-50 e DA-M3-75, com 50 e 75 mm de diâmetro respectivamente.

A capacidade resistente do sistema está interligada com a eficiência do comportamento misto ativado pelos elementos, que depende de como os meios de conexão atuam. Com aberturas menores, a viga mista apresentou um ganho na sua capacidade. Do contrário, com o aumento do diâmetro da abertura circular, como no modelo DA-M5-125, houve uma queda de 3,6% da capacidade resistente em relação ao modelo de referência. Ressalta-se nesta análise que, o modelo DA-M1-SB, com abertura de 100 mm e sem barras passantes, apresentou um comportamento melhor que o modelo com 125 mm de diâmetro, o que indica que a influência do diâmetro da abertura, e consequentemente da área que ela representa, é maior que a influência das barras de aço passantes. Esta influência também foi observada nos estudos de variação de parâmetros para as vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com aberturas trapezoidais na alma.

Os resultados obtidos com as análises dos modelos numéricos com diferentes valores de diâmetro para as aberturas circulares permitem notar que este é um parâmetro de significativa influência no comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB

4.3.2. Espaçamento entre as aberturas

Da mesma forma como o estudo realizado para as vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, este estudo também objetiva avaliar a influência do espaçamento entre as aberturas para as vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), com grandes aberturas circulares na alma. Como exposto, este parâmetro está relacionado ao número de aberturas presentes na alma do perfil de aço, onde ocorre o preenchimento com concreto e a passagem das barras de aço. Portanto, constituem um meio de conexão da viga mista e atuam na forma como o comportamento misto entre os elementos de aço e concreto é ativado.

4.3.2.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência do espaçamento das aberturas no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB, com grandes aberturas circulares na alma, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Modelos considerados no estudo de variação do espaçamento entre as aberturas.

Esquema	Modelo	Espaçamento (S)
	EAbC-M1-52,5	$S = 52,5 \text{ mm}$
	EAbC-M2-100	$S = 100 \text{ mm}$
	EAbC-M3-205-RF	$S = 205 \text{ mm}$
	EAbC-M4-510	$S = 510 \text{ mm}$
	EAbC-M5-815	$S = 815 \text{ mm}$
	EAbC-M6-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#-XX

AA - Identificação do estudo - EAbC: Espaçamento entre as aberturas circulares

M# - Modelo #

XX - Característica do modelo – IC: Interação completa, ##: espaçamento entre aberturas circulares em milímetros; RF- Modelo de referência.

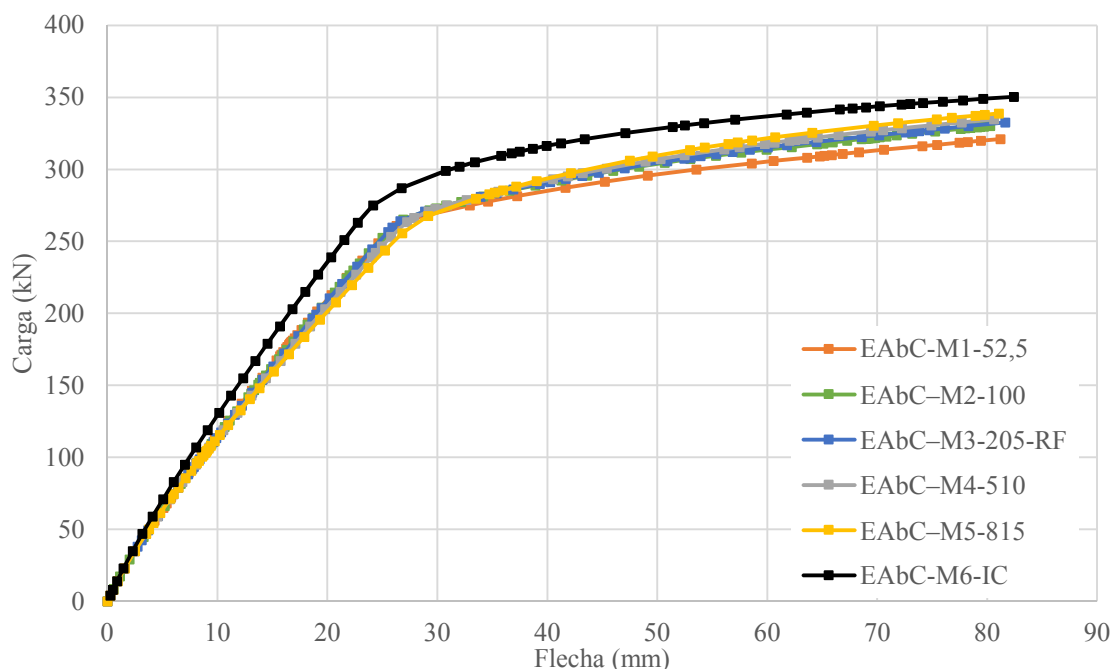
Fonte: Do autor.

4.3.2.2. Resultados

Na Figura 4.6 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas, obtidos das análises numéricas dos modelos de viga mista de *slim floor* tipo SCSFB. Neste estudo, foi adotado o valor de flecha de $L/50$ como

critério de parada em ensaios de flexão em vigas, recomendado por Leskelä e Hopia (2000).

Figura 4.6 - Diagramas Carga×Flecha para o estudo de variação do espaçamento entre as aberturas circulares.



Fonte: Do autor.

Na Tabela 4.11 são exibidos os valores de carga máxima obtidos para os modelos numéricos e a relação entre os valores de carga máxima do modelo de referência e os demais modelos numéricos.

Tabela 4.11 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para análise do espaçamento entre aberturas.

Modelo	Espaçamento	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
EAbC-M1-52,5	$S = 52,5$ mm	321,13	332,50	96,6%
EAbC-M2-100	$S = 100$ mm	330,18	332,50	99,3%
EAbC-M3-205-RF	$S = 205$ mm	332,50	332,50	100,0%
EAbC-M4-510	$S = 510$ mm	334,70	332,50	100,7%
EAbC-M5-815	$S = 815$ mm	338,78	332,50	101,9%
EAbC-M6-IC	Interação completa	350,41	332,50	105,4%

Fonte: Do autor.

4.3.2.3. Discussão dos resultados

Por meio dos diagramas Carga × Flecha apresentados, nota-se que os modelos apresentaram um comportamento relativamente semelhante, próximos ao comportamento

do modelo EAbC-M6-IC, que possui interação completa. De acordo com os valores de carga máxima obtidos das análises, o modelo que apresentou a menor capacidade resistente possui um espaçamento de 52,5 mm entre aberturas. Neste modelo, foi observado que a plastificação na região entre aberturas na alma do perfil ocorreu antecipadamente em relação aos outros modelos. Em oposição a este resultado, o modelo EAbC-M5-815, com 815 mm de espaçamento e, conseqüentemente, menor número de aberturas, apresentou a maior capacidade resistente, superior ao modelo de referência em 1,9%.

4.3.3. Posição das aberturas

O último dos estudos de variação de parâmetros definidos neste trabalho consiste na variação da posição das aberturas circulares ao longo da altura do perfil de aço nas vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*). A posição da abertura tem relação direta com o meio de conexão criado pelo concreto que preenche as aberturas na alma do perfil e a barra de aço passante por elas.

Para avaliar a influência deste parâmetro, foram definidas quatro posições para as aberturas circulares ao longo da altura da alma do perfil: a primeira delas consiste no modelo de referência calibrado no Capítulo 3; a segunda considera somente um quarto da circunferência situado na extremidade superior da alma do perfil, ainda com a presença da mesa superior; a terceira posição considera metade da abertura na extremidade superior da alma do perfil e a quarta posição da abertura considera três quartos da circunferência da abertura posicionada na extremidade inferior da alma do perfil de aço.

4.3.3.1. Descrição do estudo

Para avaliar a influência da posição das aberturas ao longo da alma do perfil de aço no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB, com aberturas circulares na alma, são considerados os modelos de elementos finitos indicados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Modelos considerados no estudo de variação da posição das aberturas.

Esquema	Modelo	Posição da abertura (mm)
	PA1-h1-D-RF	$h1 = 69 \text{ mm}$
	PA2-h2-0,25D	$h2 = 113 \text{ mm}$
	PA3-h3-0,5D	$h3 = 88 \text{ mm}$
	PA4-h4-0,75D	$h4 = 75 \text{ mm}$
	PA5-h1-D-SB	$h1 = 69 \text{ mm}$
	PA6-h1-D-IC	Interação completa

Nomenclatura: AA-M#-XX

AA - Identificação do estudo – PA#: Posição das aberturas

M# - Modelo #

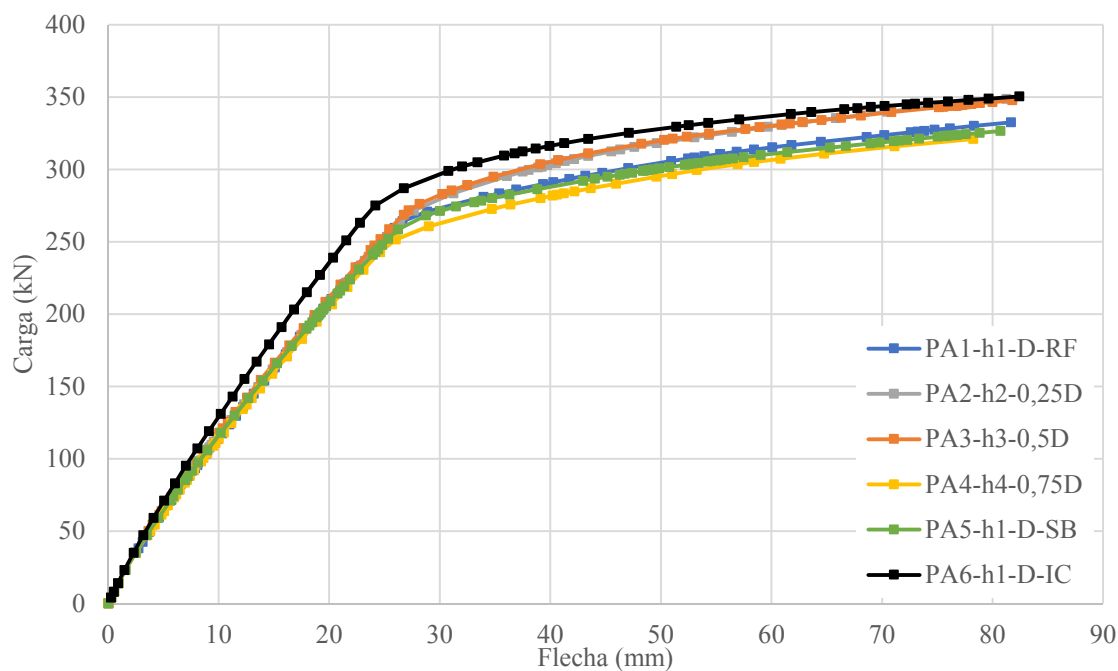
XX - Característica do modelo – IC: Interação completa; SB: Sem barras passantes; h#: Posição da abertura; ##: Dimensão da abertura em relação ao diâmetro; RF- Modelo de referência.

Fonte: Do autor.

4.3.3.2. Resultados

Na Figura 4.7 são exibidos os diagramas de Carga \times Flecha para o estudo de variação do posicionamento das aberturas, obtidos das análises numéricas dos modelos de viga mista de *slim floor* tipo SCSFB. Neste estudo foi adotado o valor de flecha de $L/50$ como critério de parada em ensaios de flexão em vigas, recomendado por Leskelä e Hopia (2000).

Figura 4.7 - Diagramas Carga \times Flecha para o estudo de variação da posição das aberturas.



Fonte: Do autor.

Na Tabela 4.13 são exibidos os valores de carga máxima obtidos e a relação entre os valores de carga máxima apresentados pelo modelo de referência e os demais modelos numéricos.

Tabela 4.13 - Relação da Carga Máxima entre os modelos para análise do posicionamento das aberturas.

Modelo	Posição	Carga Máx. [kN]	Carga Ref. [kN]	Relação
PA1-h1-D-RF	$h1 = 69$ mm	332,50	332,50	100,0%
PA2-h2-0,25D	$h2 = 113$ mm	348,79	332,50	104,9%
PA3-h3-0,5D	$h3 = 88$ mm	347,83	332,50	104,6%
PA4-h4-0,75D	$h4 = 75$ mm	321,03	332,50	96,6%
PA5-h1-D-SB	$h1 = 69$ mm	326,60	332,50	98,2%
PA6-h1-D-IC	Interação completa	350,41	332,50	105,4%

Fonte: Do autor.

4.3.3.3. Discussão dos resultados

Por meio dos resultados obtidos na análise de variação do posicionamento das aberturas circulares ao longo da altura da alma do perfil de aço, pode-se avaliar a influência que este parâmetro possui no comportamento estrutural e na capacidade resistente da viga mista de *slim floor* com aberturas circulares na alma. Ao observar o diagrama Carga \times Flecha, apresentado na Figura 4.7, verifica-se que os modelos PA2-h2-0,25D e PA3-h3-0,5D, que possuem $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da circunferência de referência na extremidade superior da alma do perfil de aço, apresentaram proximidade significativa com o modelo que considera a interação completa entre os elementos. Esta melhora do comportamento estrutural em relação ao modelo de referência indica que o uso da abertura com $\frac{1}{4}$ ou com $\frac{1}{2}$ do valor da circunferência original fornece mais eficiência ao sistema, corroborando os resultados de estudo de espaçamento, que apresentam maior área de aço na alma do perfil.

O ganho de eficiência apresentado pelos modelos com $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da circunferência na extremidade superior da alma pode ser relacionado ao fato de que o concreto nessas aberturas se encontra confinado sob tensões de compressão, estando acima da linha neutra. O oposto pode ser observado no modelo PA4-h4-0,75D, que possui $\frac{3}{4}$ da circunferência na extremidade inferior da alma do perfil, situando-se em parte, abaixo da linha neutra, onde o concreto fica exposto a tensões de tração, causando uma redução na capacidade resistente do sistema de 3,6% em relação ao modelo de referência, como mostrado na Tabela 4.13.

Em conclusão, com este estudo foi possível observar como a posição da abertura ao longo da altura do perfil de aço influencia no comportamento da viga mista de *slim floor* tipo SCSFB, com grandes aberturas circulares. O modelo de referência proposto, com a abertura circular no centro da alma do perfil, se mostrou menos eficiente que os modelos com aberturas na extremidade superior da alma do perfil de aço.

Capítulo 5

Conclusões

5.1.Considerações finais

A busca de mecanismos que atuam na melhora do comportamento misto entre os elementos presentes em sistemas de piso misto de aço e concreto estimulou o desenvolvimento de diversos meios de conexão. Nos sistemas de piso misto tipo *slim floor*, que proporcionam uma redução na altura total do piso e possuem uma pequena espessura de concreto sobre a mesa superior do perfil, os mecanismos tradicionais com os conectores mecânicos se tornaram inviáveis. Assim, para a ativação do comportamento misto deste sistema foi necessário adotar outros meios de conexão. Dentre os meios de conexão desenvolvidos, tem-se as aberturas na alma do perfil de aço preenchidas por concreto combinadas com barras de aço passantes. Exemplos de sistemas que adotam esses meios de conexão são as vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com grandes aberturas trapezoidais na alma, e as vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), com grandes aberturas circulares na alma do perfil de aço.

Neste trabalho, foram desenvolvidos sete modelos numéricos em elementos finitos de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas na alma, calibrados de acordo com ensaios experimentais realizados por outros autores. Os modelos numéricos foram desenvolvidos no programa computacional Abaqus, com base na metodologia proposta

por Paes (2003) e nos estudos de validação realizados por Mesquita (2016). Foram desenvolvidos dois tipos de viga mista de *slim floor*, de acordo com o meio de conexão proposto por cada um dos autores. Primeiramente, foram desenvolvidos três modelos numéricos de vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, compostos por vigas de aço do tipo *D-Beam*, com aberturas trapezoidais na alma, calibrados de acordo com os resultados experimentais obtidos por Ju, Chun e Kim (2009). Em sequência, foram desenvolvidos quatro modelos numéricos de vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas circulares, tipo SCSFB, validados com base nos resultados experimentais obtidos por Chen, Limazie e Tan (2015).

Os modelos numéricos desenvolvidos, usados para simular o comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH* e tipo SCSFB, foram definidos com meios de conexão que representassem o comportamento misto do sistema. Como meios de conexão foram usadas as aberturas na alma dos perfis de aço, barras de aço passantes pelas aberturas e a aderência nas interfaces aço-concreto.

Apesar dos resultados da simulação numérica terem sido mais coerentes para as vigas mistas tipo SCSFB considerando-se as tensões residuais, o mesmo não foi observado na simulação numérica de Paes (2003) e Mesquita (2016), onde essas tensões não foram consideradas. Para as vigas tipo *D-Beam*, os resultados obtidos na simulação numérica indicam que o perfil utilizado não apresenta um nível de tensões residuais tão severo como o considerado.

Com base nos resultados numéricos obtidos neste trabalho é possível concluir que para perfis com grandes aberturas trapezoidais na alma, como no caso das vigas tipo *D-Beam*, ao se realizar o corte longitudinal do perfil, as tensões residuais do perfil original se redistribuem e são aliviadas. Portanto não é adequado considerar a influência das tensões residuais no modelo numérico. Por outro lado, no caso dos perfis laminados com grandes aberturas na alma realizadas sobre o perfil original, sem um corte longitudinal no perfil, como no caso das vigas tipo SCSFB, é adequado considerar as tensões residuais no modelo numérico, já que as mesmas não são redistribuídas ou aliviadas.

Mesmo considerando-se as tensões residuais, o momento fletor último alcançado na simulação numérica para ambos sistemas avaliados se aproxima bastante do resultado experimental.

Em geral, os resultados numéricos obtidos da calibração dos modelos numéricos apresentaram uma concordância satisfatória com os resultados experimentais, para os modelos desenvolvidos para as vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH* e tipo SCSFB. Essa concordância entre resultados numéricos e experimentais indica que é possível representar os fenômenos que ocorrem nas vigas mistas de *slim floor*, quando submetidas à flexão, por meio dos modelos numéricos desenvolvidos. Fenômenos como escoamento do aço e do concreto, a ação da aderência no deslizamento relativo entre interfaces e a fissuração do concreto através do conceito de dano foram observados nos modelos numéricos, em concordância com o relatado nos ensaios experimentais.

A validação das metodologias para a simulação numérica de vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, e também do tipo SCSFB, permitiu a condução de estudos de variação de parâmetros geométricos presentes nas vigas mistas. Com esses estudos, foram avaliadas as formas que os parâmetros relativos aos meios de conexão influenciam no comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* com grandes aberturas na alma. Para isso, foi realizado um estudo de variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais na alma, e um estudo de variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares na alma.

5.2. Conclusões específicas

5.2.1. Variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas trapezoidais

Por meio dos estudos de variação dos meios de conexão nas vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, com vigas de aço do tipo *D-Beam* com aberturas trapezoidais na alma, foi possível avaliar como cada parâmetro físico, relacionado aos meios de conexão entre os elementos, influencia no comportamento estrutural da viga mista. Para avaliar esta influência, os parâmetros variados foram: o diâmetro das barras de aço passantes pelas aberturas na alma do perfil; as formas de ativação do comportamento misto entre os elementos; o espaçamento entre as aberturas; o valor da área da abertura trapezoidal e as dimensões que governam a forma das aberturas trapezoidais (altura, base superior e base inferior).

O primeiro estudo realizado foi a variação do diâmetro das barras de aço passantes pelas aberturas na alma do perfil de aço. Neste estudo, observou-se que a variação do diâmetro das barras tem influência positiva no comportamento da viga mista, ainda que pouco expressiva, atuando para uma maior eficiência na ativação do comportamento misto na região das aberturas. A pouca influência do diâmetro das barras de aço nos resultados pode ser explicada pelo fato das vigas possuírem grandes aberturas, resultando em uma taxa de armadura relativamente pequena para a grande área de concreto que a envolve. Além disso, pôde-se observar que o uso da barra passante contribui para o sistema se aproximar do caso ideal de comportamento de uma viga mista, no qual ocorre a interação completa entre os elementos.

Com o estudo relativo à variação das formas de ativação do comportamento misto foi possível avaliar a representatividade de cada meio de conexão usado nas vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*, que possuem grandes aberturas trapezoidais na alma do perfil. Dentre os meios de conexão analisados, a influência das grandes aberturas na alma do perfil de aço prevaleceu sobre as barras passantes e a aderência. Porém, também verificou-se a importância de se considerar esses meios de conexão entre os elementos para melhorar o comportamento estrutural da viga mista.

Em sequência, foi realizado o estudo para analisar a influência do espaçamento entre as aberturas na alma do perfil no comportamento estrutural à flexão das vigas mistas de *slim floor* do sistema *I-TECH*. Por esta análise, como o espaçamento está diretamente relacionado ao número de aberturas presentes na viga, verificou-se que ele possui influência significativa no comportamento estrutural. Quanto maior o valor do espaçamento, menor o número de aberturas na viga de aço, dificultando a ativação do comportamento misto entre os elementos do sistema, resultando na queda da capacidade resistente. Por outro lado, quando se reduz o valor do espaçamento, aumenta-se o número de aberturas na alma do perfil, até o ponto em que a região do perfil entre as aberturas se torna relativamente reduzida e sofre escoamento, voltando a prejudicar o comportamento estrutural do sistema.

No estudo para avaliar como a variação da área da abertura trapezoidal influencia no comportamento da viga mista de *slim floor*, verificou-se que o valor da área da abertura possui pouca influência nos valores das cargas máximas apresentados pelos modelos. Pôde-se observar que o sistema proposto obteve um ganho de ductilidade e capacidade

resistente nos modelos em que a área possuía um valor reduzido em relação ao modelos de referência. Ademais, a área da abertura forneceu rigidez, porém implicou em decréscimo da capacidade resistente do sistema quando adotado com um valor superior em relação ao modelo de referência.

5.2.2. Variação de parâmetros em vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares

Os estudos de variação dos meios de conexão nas vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB (*Shallow Composite Slim floor Beam*), com grandes aberturas circulares na alma do perfil de aço, possibilitaram avaliar como os parâmetros relacionado aos meios de conexão entre os elementos influenciam no comportamento estrutural da viga mista. Para avaliar esta influência, os parâmetros variados foram: o diâmetro das aberturas na alma do perfil; o espaçamento entre as aberturas e posição das aberturas ao longo da altura do perfil de aço.

O primeiro estudo realizado consistiu em avaliar a influência da variação do diâmetro das aberturas no comportamento estrutural das vigas mistas de *slim floor* tipo SCSFB. Neste estudo, verificou-se que os modelos que mais se aproximaram do comportamento apresentado pelo modelo numérico ideal, com interação completa, foram os modelos com menores valores de diâmetro adotados, 50 e 75 mm. Assim, com aberturas menores, foi obtido um ganho na capacidade resistente, evidenciando maior eficiência que o modelo de referência de com aberturas de 100 mm de diâmetro.

Por meio do estudo de variação do espaçamento entre as aberturas, o modelo numérico com menor espaçamento apresentou uma queda na capacidade resistente em relação aos demais, devido ao escoamento do aço na região da alma entre as aberturas. Ao aumentar o valor do espaçamento, como observado ao se adotar um espaçamento de 815 mm, com quatro aberturas ao longo da viga, houve uma melhora no comportamento estrutural da viga mista. Este resultado condiz com o comportamento ao cisalhamento de conectores *Perfobond*, que também utiliza aberturas circulares como meio de conexão, que melhora com o aumento do número de aberturas, desde que o espaçamento entre elas tenha pelo menos 2,25 vezes o diâmetro das aberturas.

Por fim, com o estudo realizado para avaliar a posição da abertura circular ao longo da altura do perfil de aço, foi possível observar como a posição da abertura influencia no

comportamento da viga mista de *slim floor* tipo SCSFB, com grandes aberturas circulares. O modelo de referência proposto, com a abertura circular no centro da alma do perfil, se mostrou menos eficiente que os modelos com aberturas na extremidade superior da alma do perfil de aço.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho permitiu observar que os estudos realizados que se relacionam com vigas mistas de *slim floor* apresentaram uma contínua evolução ao longo dos anos, se expandindo dentro dos ramos que envolvem as características principais destes sistemas. Porém, o volume de estudos realizados e a expressividade deste sistema ainda é relativamente baixa quando comparada aos sistemas tradicionais. Assim, de forma a contribuir com este tema, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- realizar um programa experimental a fim de verificar o comportamento de vigas mistas de *slim floor* com aberturas circulares com $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da circunferência na extremidade superior da alma do perfil de aço;
- realizar um estudo experimental com a finalidade de verificar e esclarecer o comportamento mecânico da aderência;
- realizar um estudo com o objetivo de verificar a necessidade da mesa superior em vigas mistas *slim floor* e o uso de enrijecedores para evitar os deslizamentos entre aço e concreto;
- desenvolver uma fôrma de aço de grande altura para ser utilizada em sistemas *slim floor* que atendas as condições do mercado brasileiro da construção mista;
- Avaliação de modelos experimentais considerando o efeito de tensões residuais;
- realizar um estudo para avaliar o comportamento estrutural dos sistemas *slim floor* quando solicitados de forma dinâmica, com o objetivo de verificar as respostas destes sistemas sob diferentes frequências de vibração.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, P. H. F. **Estudo numérico de um dispositivo de transferência de cargas em pilares mistos tubulares preenchidos com concreto**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AMADIO, C.; FRAGIACOMO, M. Effective width evaluation for steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, p.373-388, 2002. Elsevier.

ARCELORMITTAL. **Composite Slim-Floor Beam (CoSFB)**. Informativo Técnico da ArcelorMittal, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.

BAILEY, C. G. The behavior of asymmetric *slim floor* steel beams in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 50, p. 235-257, 1999.

BARROS, M. O. **Análise e dimensionamento de pavimentos mistos *Slim floor***. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil Estruturas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

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- Blackwell.

BRAUN, M.; HECHLER, O.; OBIALA, R. Untersuchungen zur Verbundwirkung von Betondübeln. **Stahlbau**, [s.l.], v. 83, n. 10, p.746-754, out. 2014. Wiley-Blackwell.

BRAUN, M.; OBIALA, R.; ODENBREIT, C. Analyses of the loadbearing behaviour of deep-embedded concrete dowels, CoSFB. **Steel Construction**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.167-173, 2015.

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

BYFIELD, M.P.; DHANALAKSHMI, M. Analysis of strain hardening in steel beams using mill tests. **Advances in Steel Structures**. p. 139-146. 2002.

BYFIELD, M. P.; DAVIES, J. M.; DHANALAKSHMI, M. Calculation of the strain hardening behavior of steel structures based on mill tests. **Journal of Construction Steel Research**, 61:133-150, 2005.

CHEN, W. **Plasticity in Reinforced Concrete**. 2. ed. J. Ross Publishing, 2007. 474 p.

CHEN, W.; HAN, D. J. **Plasticity for Structural Engineers**. New York: Springer - Verlag, 1988. 606 p.

CHEN, S.; LIMAZIE, T.; TAN, J. Flexural behavior of shallow cellular composite floor beams with innovative shear connections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 106, p. 329–346, 2015. Elsevier Ltd.

CHOI C.K.; KWAK H.G. The effect of finite element mesh size in nonlinear analysis of reinforced concrete structures. **Computer Structures** 1990;5(36):807–15.

COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN-1994-1-1: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Brussels, Belgium, 2004. 117 p.

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.

DUTRA, C. M. y. **Estudo do comportamento estrutural do conector Crestbond considerando variações geométricas e mecânicas**. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ELLOBODY, E. Nonlinear behaviour of unprotected composite slim floor steel beams exposed to different fire conditions. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 6, p. 762–771, 2011. Elsevier.

FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DO BETÃO. **Model Code 2010**: final draft. Lausanne (Suíça), 2011. 656 p.

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

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, fev. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE).

HEGGER, J.; ROGGENDORF, T.; KERKENI, N. Shear capacity of prestressed hollow core slabs in slim floor constructions. **Engineering Structures**, v. 31, n. 2, p. 551–559, 2009.

HORDIJK, D. A. Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete; experiments, modelling and analyses. **HERON**. Stevin-laboratory (Netherlands), p. 1-79. 1992.

HUO, B. Y. **Experimental and Analytical Study of the Shear Transfer in Composite Shallow Cellular Floor Beams**. 2012. 316 f. Tese (Doutorado) - School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, London, UK, 2012.

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**, 2013;88: 191–205.

HUO, B. Y, D'MELLO, C. A. Shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams, **Journal of Constructional Steel Research**. 88 (2013) 191–205.

INHA, T. New Composite Beams and Slabs in Finland. **Constructional Steel Design: World Developments**. Acapulco: Elsevier. p. 297-306. 1992.

JU, Y. K.; CHUN, S. C.; KIM, S. D. 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. H.; KIM, S. D. 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, 2005.

KUHLMANN, U. Recent Developments and Chances of Composite Structures. **International Rilem: Symposium on Connections Between Steel and Concrete**, Stuttgart, v. 2, p.995-1014, 2001.

LAWSON, R. M; OWENS, G. W; MULLETT, D. L. **Slim floor Construction in UK. Constructional Steel Design: World Developments**. Acapulco: Elsevier, p. 317-330, 1992.

LAWSON, R. M.; MULLETT, D. L.; RACKHAM, J. W. **Design of Asymmetric Slimflor Beams Using Deep Composite Decking**. SCI Publication P175. The Steel Construction Institute, 1997.

LAWSON, R.M.; BODE, H.; BREKELMANS, J.W.P.M.; WRIGHT, P.J.; MULLETT, D.L. 'Slimflor' and 'Slimdek' construction: European developments, **Journal of Structural Engineering**, 77 (8) (1999) 22–30.

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**, 62 (6) (2006) 614–629

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; PH, D.; TUTKIANTIE, F.; OULU, F. I. N. Shallow floor integrated beams and their components : comparison of behavior. **Composite Construction in Steel and Concrete**, v. IV, p. 164–177, 2000.

LIANG Q.Q.; UY B.; BRADFORD M.A.; RONAGH H.R. Strength analysis of steel–concrete composite beams in combined bending and shear. **Journal of Structural Engineering** – ASCE 2005;10(131):1593–600.

LIMAZIE, T; CHEN, S. Numerical procedure for nonlinear behavior analysis of composite slim floor beams, **Journal of Constructional Steel Research**. 106 (2015) 209–219.

LIMAZIE, T.; CHEN, S. FE modeling and numerical investigation of shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 119, p. 190–201, 2016. Elsevier Ltd.

LIMAZIE, T.; CHEN, S. Effective shear connection for shallow cellular composite floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 128, p. 772–788, 2017. Elsevier B.V.

LUBLINER, J. A plastic-damaged model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**. Great Britain, p. 299-326. 1989.

MA, Z.; MAKELAINEN, P. Behavior of Composite Slim Floor Structures in Fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 126, n. JULY, p. 830–837, 2000.

MALM, R. **Shear cracks in concrete structures subjected to in-plane stresses**. 88. ed. Estocolmo (Suécia): TRITA-BKN, 148 p., 2006.

MARAVEAS, C., SWAILES, T.; WANG, Y.C. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire, **Steel Construction**., 5(3), 191-198, 2012.

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

MULLETT, D. L. ***Slim floor Design and Construction***. The Steel Construction Institute, 1992. 172 p.

MULLETT, D. L.; LAWSON, R. M. ***Slim floor Construction Using Deep Decking***. London: The Steel Construction Institute, 1993.

NÁDASKÝ, P. Steel-concrete composite beams for slim floors - Specific design features in scope of steel frames design. ***Procedia Engineering***, v. 40, n. 0, p. 274–279, 2012.

PAES, J. L. R. ***Aportaciones al Análisis del Comportamiento Estructural de Sistemas Forjados Mixtos Tipo "Slim floor"***. 2003. 403 p. Tese (Doutorado) – Programa de Doctorat d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2003.

PAVLOVIC, M.; MARKOVIC, Z.; VELJKOVIC, M.; BUDEVAC, D.. Bolted shear connectors vs. headed stud's behaviour in push-out tests. ***Journal of Constructional Steel Research***, [s.l.], v. 88, p.134-149, 2013. Elsevier.

PETRAUSKI, M. C. ***Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores Crestbond***. 214 p. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

RAMOS, A. L. ***Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura***. 138 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SCHLEICH, J. B. *Slim floor Construction: Why In: Composite Construction – Conventional and innovative – International Conference*. Innsbruck, Austria, setembro, 1999. ***Proceedings...*** Innsbruck. p. 53-64.

SHAYANFAR M.A.; KHEYRODDIN A.; MIRZA M.S. Element size effects in nonlinear analysis of reinforced concrete members. ***Computer Structures*** 1997;2 (62):339–52.

SIMULIA. ***Abaqus theory manual***. Providence, United States, 2012, 1173 p.

TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C.; HUO, B. Y. Experimental and computational study of the vertical shear behaviour of partially encased perforated steel beams. ***Engineering Structures***, v. 56, p. 805–822, 2013.

VERÍSSIMO, G. S. ***Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento***. 2007. 316 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WANG Y; YANG, L; SHI, Y; ZHANG, R. Loading capacity of composite slim frame beams, ***Journal of Constructional Steel Research***. 65 (2009) 650–661.