

ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF DE VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO
COM LAJES ALVEOLARES

André Pinto Morais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Alexandre Landesmann
Wendell Diniz Varela

Rio de Janeiro
Outubro de 2018

ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF DE VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO COM
LAJES ALVEOLARES

André Pinto Morais

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Alexandre Landesmann, D.Sc.

Prof^ª. Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar, D.Sc.

Prof^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2018

Morais, André Pinto

Análise numérica via MEF de vigas mistas aço e concreto com lajes alveolares / André Pinto Moraes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

X, 80 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Landesmann

Wendell Diniz Varela

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 77-80.

1. Estruturas Mistadas Aço e Concreto. 2. Lajes Alveolares. 3. Análise Numérica. I. Landesmann, Alexandre *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais e aos meus irmãos

Agradecimentos

A Deus por tudo. Aos meus pais, pelo apoio incondicional. Aos meus irmãos pelo companheirismo, incentivo e amizade.

Aos meus orientadores, Prof. Alexandre Landesmann e Prof. Wendell Diniz Varela, pelo constante aprendizado.

Aos professores do PEC/COPPE/UFRJ e do IFMA por todos os ensinamentos.

A CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa durante o período de realização deste mestrado.

A COPPE, agradeço o apoio, a estrutura e os incentivos prestados.

Ao povo brasileiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE NUMÉRICA VIA MEF DE VIGAS MISTAS AÇO E CONCRETO COM LAJES ALVEOLARES

André Pinto Morais

Outubro/2018

Orientadores: Alexandre Landesmann

Wendell Diniz Varela

Programa: Engenharia Civil

Apesar de bastante difundido no país, tendo em vista suas vantagens construtivas e econômicas, o projeto e a construção de estruturas mistas de aço e concreto com emprego de perfis laminados e lajes alveolares em concreto pré-moldado não foram diretamente contemplados na revisão da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008. Neste contexto, o presente trabalho traz resultados de uma pesquisa numérica-computacional sobre o comportamento estrutural e dimensionamento desta tipologia sob flexão simples. As análises desenvolvidas foram realizadas com auxílio de programa comercial de elementos finitos, combinando diferentes elementos, a saber: (i) planos de casca para simular o perfil metálico, (ii) sólidos tridimensionais para representação da laje alveolar e (iii) elementos de barra para simular os conectores de cisalhamento e armaduras. As análises consideram a influência da não linearidade no comportamento para estimativas de resistência e colapso das vigas mistas. Os resultados obtidos são validados com resultados experimentais decorrentes de testes realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE, permitindo-se inferir sobre a adequação do modelo para aplicação a outras tipologias deste sistema construtivo. A melhora dos valores comparados deu-se pela estratégia de modelagem detalhada e individual de cada elemento de uma maneira representativa e consistente de modo a evitar instabilidades numéricas. A consideração de elementos lineares nos conectores foi fundamental para melhora dos resultados, uma vez que permitiu ao modelo a entrada na fase plástica do ensaio.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

NUMERICAL ANALYSIS BY FEM OF COMPOSITE STEEL BEAMS
USING HOLLOW CORE SLABS

André Pinto Morais

October/2018

Advisor: Alexandre Landesmann

Wendell Diniz Varela

Department: Civil Engineering

In spite of being widely diffused in the country, in view of its constructive and economic advantages, the design and construction of composite steel and concrete structures using laminated profiles and precast hollow core slabs were not directly contemplated in the revision of the Brazilian standard ABNT NBR 8800: 2008. In this context, the present work brings results of a numerical-computational research on the structural behavior of this typology under simple bending. The analyzes were performed using a commercial finite element program, combining different elements, namely: (i) shell plans to simulate the metal profile, (ii) three-dimensional solids for the representation of the hollow core slabs and (iii) bar to simulate the shear connectors and reinforcement. The analyzes consider the geometric and nonlinear behavior of the materials (physical) for estimation of strength and collapse of the composite beams. The results obtained are critically validated according to the experimental results of the tests carried out at LABEST / COPPE / UFRJ, allowing us to infer about the suitability of the model for application to other typologies of this constructive system. . The improvement of the values compared was given by the strategy of detailed and individual modeling of each elements in a representative and consistent way in order to avoid numerical instabilities. The consideration of linear elements in the connectors was fundamental to improve the results since it allowed the model to enter the plastic phase of the test.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Vigas mistas aço-concreto	5
2.2	Mecanismo de funcionamento estrutural das vigas mistas	8
2.2.1	Interação completa ou total	9
2.2.2	Interação parcial	9
2.2.3	Interação nula	10
2.3	Grau de conexão entre viga de aço e laje de concreto	10
2.3.1	Grau de conexão completa	11
2.3.2	Grau de conexão parcial	13
2.4	Conectores de cisalhamento	14
2.4.1	Mecanismo de funcionamento dos conectores de cisalhamento	16
2.5	Estado da arte	16
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	22
3.1	Fabricação dos protótipos	22
3.2	Instrumentação dos modelos	28
3.2.1	Ensaio à flexão	28
3.2.2	Ensaio de <i>push out</i>	29
3.3	Esquemas dos ensaios	31
3.3.1	Ensaio à flexão	31
3.3.2	Ensaio de <i>push out</i>	32
3.4	Resultados experimentais	33
3.4.1	Ensaio à flexão	33
3.4.2	Ensaio de <i>push out</i>	36
4	MODELAGEM NUMÉRICA	38
4.1	Viga mista V_150_19_SL	38
4.1.1	Grupos de elementos finitos	39
4.1.2	Discretização dos elementos finitos	43

4.1.3	Condições de contorno	45
4.1.4	Vinculações do modelo	47
4.1.5	Relações constituintes	48
4.2	Viga mista V_265_19_SL	50
4.3	Característica do contato entre laje e viga	51
4.4	Aspectos da análise não linear	52
5	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	54
5.1	Descrição das vigas mistas simuladas	54
5.2	Comparação de dados numéricos e experimentais	54
5.2.1	Deflexão linear vertical no meio do vão.....	55
5.2.2	Deslizamento horizontal relativo entre a laje de concreto e ao perfil de aço 59	
5.2.3	Tensões longitudinais no meio do vão	60
5.2.4	Variação das tensões nos elementos	64
5.2.5	Fissuração na laje de concreto	70
6	CONCLUSÕES.....	75
6.1	Sugestões de trabalhos futuros	76
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

SÍMBOLOS E SIGLAS

Letras romanas maiúsculas

A_c	Área da seção transversal de concreto
A_s	Área da seção transversal de aço
$C.G$	Centro de gravidade da seção transversal
D_{ult}	Deslizamento último
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_s	Módulo de elasticidade do aço
F_c	Resultante das tensões de compressão no concreto
F_s	Resultante das tensões de tração no aço
$I_x; I_y$	Momentos de inércia da seção bruta em relação aos eixos principais x e y , respectivamente
$L.N.$	Linha neutra da seção transversal
M_{nD}	Momento fletor resistente de cálculo
M_p	Momento plástico da barra
M_y	Momento de escoamento da barra
P	Pressão normal
P_{sh}	Capacidade resistente da conexão

Letras romanas minúscula

b_f	Comprimento da mesa da viga
b_w	Comprimento da alma da viga
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_s	Tensão de escoamento do aço
t	Espessura
c	Coesão

Letras gregas

δ	Deslocamento transversal máximo
ν	Coefficiente de Poisson
Φ	Ângulo de orientação para armadura no elemento <i>solid65</i>
θ	Ângulo de orientação para armadura no elemento <i>solid65</i>
σ_c	Tensão de compressão no concreto
ε	Deformação específica
τ	Tensão cisalhante equivalente
τ_{lim}	Tensão cisalhante limite
μ	Coefficiente de atrito

Siglas

MEF	Método dos Elementos Finitos
PFF	Perfil Formado a Frio
FL	Flexímetro

1 INTRODUÇÃO

Sistemas estruturais mistos aço e concreto proporcionaram uma significativa evolução na construção civil de todo mundo. Inicialmente a união do aço e concreto limitava-se a proteger o elemento metálico da corrosão e proporcionar uma maior resistência ao fogo. A associação do aço e concreto com fins estruturais permitiu um melhor aproveitamento dos componentes, através da maior aproximação das resistências de escoamento dos materiais constituintes. Desta maneira, o projetista precisa objetivar uma definição estrutural de modo a reduzir o surgimento de momentos fletores negativos (evitando a flambagem local das peças metálicas). Estruturas com pórticos contraentados constituídos por vigas biapoiadas são exemplo de diretrizes técnicas que melhoram o aproveitamento do aço e concreto.

Como aspectos construtivos/econômicos positivos cita-se o aumento da velocidade de execução da obra, redução do contingente de operários, eliminação de etapas construtivas (formas de aço incorporadas), diminuição do desperdício de material, entre outros. Estes fatores também proporcionam ao canteiro de obra um aspecto de maior organização, produtividade e segurança.

Ressalta-se que esta sofisticação inerente às estruturas mistas não traz como consequências restrições arquitetônicas, como pode ocorrer em alguns sistemas de elementos pré-fabricados. Desta maneira, os sistemas mistos acabaram por tornar-se excelente soluções estruturais.

Para que seja possível proporcionar às estruturas mistas um comportamento misto, é necessário que na região comum ao aço e ao concreto haja um componente capaz de solidarizar esforços entre os componentes. Neste contexto, instalam-se os conectores de cisalhamento como um componente metálico, objetivando o controle do deslizamento horizontal relativo entre o aço e o concreto e também se evita a separação destes componentes. O grau de conexão, grau de interação, bem como o tipo e formato dos conectores de cisalhamento e sequência dos processos construtivos afetam o comportamento do sistema estrutural.

Ensaio experimentais em estruturas mistas envolvem sempre uma grande mobilização de mão de obra e elevados custos, assim sendo, modelagens numéricas computacionais ganham grande importância neste meio. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, o tempo de processamento passou a não ser mais

um fator complicador para análises numéricas. Desta maneira, programas computacionais constituem uma sólida e confiável ferramenta (conferida por meio da comparação *numérico x experimental*) de análise, uma vez que permite ao engenheiro, por exemplo, uma variedade de testes antes de propor parâmetros normativos. A presente obra traz validações de códigos numéricos quando comparados aos resultados obtidos durante uma campanha experimental de ensaios em laboratório.

1.1 Motivação

Um dos principais fatores de sucesso para o uso de estruturas mistas é que este sistema se apresenta como uma alternativa segura e econômica, pois resulta em baixo desperdício na obra dado o nível de planejamento que é inerente a sua execução. A associação de perfis mistos laminados com placas pré-fabricadas alveolares de concreto tende a ser um ótimo avanço, pois se elimina na obra o processo construtivo da concretagem de toda a laje do pavimento e permite ainda ao projetista dimensionar a estrutura com uma significativa redução de peso próprio. Após o posicionamento das placas, é necessário apenas posicionar uma tela de aço, respeitando os transpasses recomendados pelo fabricante e concretar apenas o capeamento da laje, reduzindo assim o contingente de mão de obra e conseqüentemente os custos.

O presente trabalho busca oferecer parâmetros para que seja possível prever em norma procedimentos construtivos e de projetos, de sistemas mistos com lajes alveolares pré-fabricadas, uma vez que se realizaram análises quantitativas obtidas de ensaios experimentais em escala real e modelagem numérica computacional sofisticada, que resultou na validação dos modelos.

1.2 Objetivo

O presente trabalho possui como objetivo contribuir com o estudo do comportamento das vigas mistas de aço laminado e lajes alveolares pré-moldadas de edificações em geral, através do desenvolvimento de rotinas parametrizadas escritas na linguagem de programação *APDL (Ansys Parametric Design Language)* para o *software ANSYS*, que tenham capacidade de simular satisfatoriamente o comportamento destes componentes estruturais. Para atingir o maior grau de fidelidade ao ensaio possível,

procurou-se inserir todos os elementos constituintes dos protótipos de acordo com o projeto executivo.

Para que fosse possível resultados consistentes, procurou-se balizar as rotinas de tal forma que fosse possível atender tanto a análise global, quanto resultados nos grupos de elementos isolados, isto é, análise das tensões na seção transversal a meio vão ou no perfil metálico, laje de concreto, armadura passiva e conectores de cisalhamento.

Os modelos numéricos e experimentais foram ensaiados sob a forma de vigas biapoiadas com arranjo de carregamento capaz de proporcionar aos protótipos esforços correspondentes à flexão pura. O trabalho proporcionará ao leitor analisar a influência que a adição de cada grupo de elemento finito (*solid65*, *shell181*, *targe170*, *conta173*, *beam189* e *combin39*) trará ao modelo. Também será objeto de estudo a variação da geometria dos componentes dos protótipos ensaiados em BATISTA e LANDESMANN (2016) como altura da placa pré-fabricada da laje de concreto e disposição de armaduras passivas.

1.3 Metodologia

Adotou-se a seguinte metodologia para obtenção dos resultados: (i) escolha dos tipos de elementos finitos na biblioteca do ANSYS de maneira que fosse possível obter os resultados mais representativos possíveis na modelagem computacional; (ii) evolução da estratégia de modelagem, objetivando sofisticar aos poucos o protótipo computacional; (iii) eleição dos modelos mais representativos para análise subsequente; (iv) análise comparativa entre resultados do modelo computacional e ensaio experimental, i.e., deflexão linear no meio do vão e deslizamento relativo entre as interfaces aço e concreto. Prosseguiu-se com a análise de parâmetros obtidos no modelo computacional, tais como: tensões longitudinais na seção transversal a meio vão, tensões nos elementos isolados e grau de fissuração da laje de concreto. Desta maneira foi possível validar as simulações numéricas face à comparação com os ensaios experimentais.

1.4 Estrutura da dissertação

O trabalho inicia-se com uma revisão bibliográfica (capítulo 2) dos conceitos referentes às vigas mistas aço-concreto e também um breve histórico sobre o estudo de modelagem das vigas mistas no Brasil.

No capítulo 3 são descritas as campanhas experimentais das vigas mistas biapoiadas, realizadas por BATISTA e LANDESMANN (2016) nas dependências do Laboratório de Estruturas e Materiais do programa de Engenharia Civil da COPPE, bem como a sequência de procedimentos normativos para a confecção, instrumentação, procedimento dos ensaios e obtenção dos resultados dos experimentos.

No capítulo 4 foram apresentados aspectos referentes à simulação numérica dos protótipos ensaiados, descrição dos elementos finitos utilizados, estratégias para discretização dos componentes, acoplamentos e vinculações entre os componentes, relações constitutivas e por fim considerações sobre a aplicação das solicitações consideradas.

No capítulo 5 foram apresentados os resultados dos modelos computacionais. Comparou-se os resultados com os dados obtidos na campanha experimental. Os demais valores numéricos foram analisados segundo preceitos normativos.

No capítulo 6 foram apresentadas as conclusões finais do presente trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos principais referentes às vigas mistas, incluindo os tipos e o mecanismo de funcionamento estrutural. Desta maneira, serão abordados os conceitos de interação total/parcial/nula e graus de conexão completa/parcial entre o perfil metálico e a laje de concreto. Será abordado também o mecanismo de funcionamento dos conectores de cisalhamento (*stud bolt*).

2.1 Vigas mistas aço-concreto

Pode-se definir as vigas mistas aço-concreto como a união de dois elementos bastantes usuais nas obras, onde se busca aproveitar ao máximo as qualidades de cada material. As vigas mistas são comumente compostas por perfil metálico do tipo “I” e laje de concreto e projetadas de forma que um elemento seja solidário ao outro, tendo como objetivo maximizar a resistência aos esforços de flexão. De acordo com OEHLERS e BRADFORD (1995), ao se analisar de forma isolada cada material, sabe-se que tanto o aço quanto o concreto possuem suas próprias particularidades. Por exemplo, quando se usa perfis laminados, nota-se que geralmente seus elementos constituintes (banzos e alma) são fabricados como elementos finos de chapa, o que os tornam mais propensos a flambagem local e lateral assim como à fadiga. Portanto, constam nas normas de projeto verificações específicas para evitar falhas por instabilidade ou flambagem dos elementos metálicos. Por outro lado, elementos estruturais de concreto possuem seções transversais mais robustas que os perfis metálicos correspondentes e, por isso, são menos propensos à flambagem. Segundo os mesmos autores, separadamente aço e concreto possuem maneiras de falhar um tanto quanto distintas, contudo ao se analisar ambos os elementos no contexto das estruturas mistas, estes estão mais propensos a falharem na ligação entre o aço e o concreto. Sendo assim, para o entendimento do comportamento estrutural das vigas mistas, deve-se entender não somente o comportamento de cada material, mas também o comportamento da interação entre o aço e o concreto, especialmente na interface entre os materiais.

De acordo com PFEIL e PFEIL (2009), para melhorar a solidarização entre os materiais, pode-se usar um elemento de conexão chamado conector de cisalhamento. Este elemento é soldado no banzo superior da viga metálica e exerce a função de conectar a laje de concreto ao perfil de aço, buscando evitar: (i) o deslizamento relativo entre os dois

elementos, transmitindo os esforços longitudinais de cisalhamento entre a mesa de concreto e o perfil metálico; e (ii) a separação vertical na interface entre o aço e o concreto (processo conhecido como *uplift*). Os conectores tipo *stud bolt* ou pinos com cabeça são soldados com o auxílio de uma pistola especial controlada por temporizador através de um procedimento rápido e seguro denominado eletrofusão, o qual consiste basicamente na pressão exercida pelo conector no perfil, imediatamente após a passagem de uma corrente em uma esfera de metal, que após o disparo do gatilho entra em fusão e ao cessar essa corrente se solidifica. Após a concretagem da laje, os conectores ficam embutidos na mesma.

OEHLERS e BRADFORD (1995) citam que as seções mistas podem ser compostas por perfis laminados padronizados embutidos no concreto ou servindo de forma para o concreto. Estas seções assumem os mais variados formatos, além dos formatos mais comuns ilustrados na Figura 2.1. De acordo com CLASSEN (2018), perfis metálicos em formato de “T” invertido podem também ser empregados, devido ao fato de que numa viga mista a mesa superior do perfil metálico pouco contribui para a rigidez global do sistema. A função principal da mesa superior é facilitar a instalação dos conectores. Se o banzo superior for removido completamente, os conectores de cisalhamento deverão ser soldados na alma do perfil. Assim sendo, a seção passa a ser um perfil em forma de “T” invertido com braço de alavanca entre o eixo centroidal do perfil metálico e o eixo neutro da seção mista significativamente maior quando comparado com as vigas mistas com perfis em forma de “I” de mesma área de seção transversal (ver Figura 2.2), proporcionando então aumento significativo na resistência da viga mista à flexão.



Figura 2.1: Principais tipos de vigas mistas (fonte: EUROCÓDIGO 4, 2004).

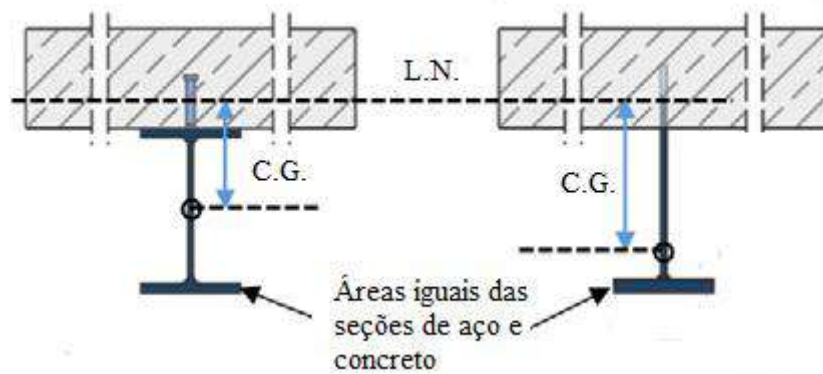


Figura 2.2: Viga mista com e sem banço superior (Fonte: CLASSEN, 2018 - Adaptado).

Outro tipo de geometria de perfil metálico que tem sido bastante utilizada é a seção caixão aberto (*open box girder*), conforme exemplo mostrado na Figura 2.3. ANDROUS *et al.* (2017) analisaram que estas seções podem ser empregadas em estruturas como pontes horizontalmente curvadas, uma vez que a aplicabilidade destas se justifica por seu aumento de rigidez longitudinal e torcional, maior resistência aos efeitos da vibração (causadas pelos carregamentos móveis e cíclicos) e, por isso, têm sido empregadas na construção de pontes e ferrovias modernas de médio e grande porte. Ainda de acordo com o mesmo autor, além das vantagens estruturais evidentes, esta geometria permite ainda a passagem das instalações no seu interior, causando um impacto estético mais agradável.

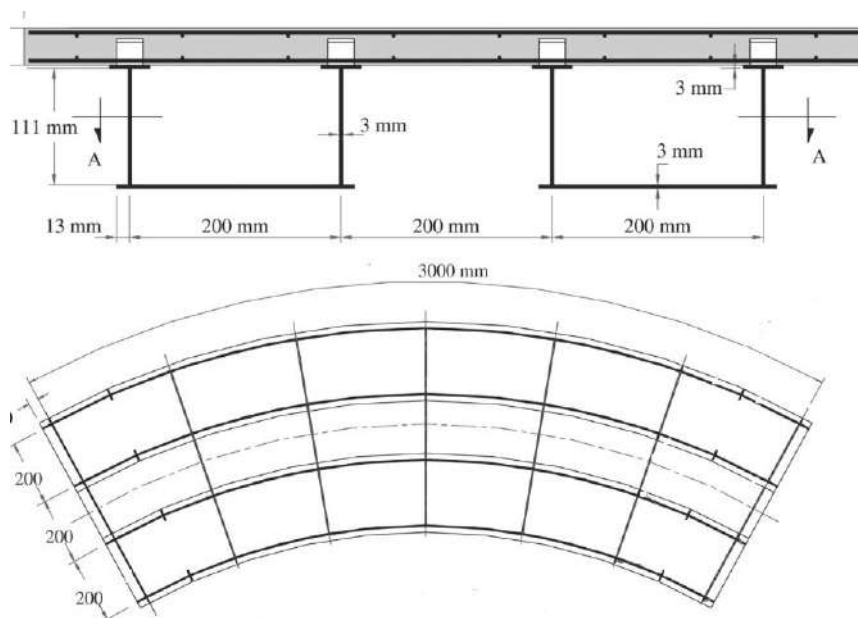


Figura 2.3: Aplicação da seção tipo caixão em pontes, seção transversal e planta (Fonte: ANDROUS *et al.*, 2017 - Adaptado).

Outra seção mista também muito utilizada em lajes, vigas e paredes são os sistemas com formas de aço incorporada, formadas por chapas dobradas de maneira a servir tanto de forma quanto de armadura passiva para o sistema estrutural (ver Figura 2.4). A geometria da forma de aço é escolhida de maneira conveniente, isto é, de modo a se conseguir uma rigidez suficiente para suportar o carregamento durante a execução do pavimento na obra, particularmente ao lançamento e cura do concreto, uma vez que somente após a sua cura é que o concreto passará a contribuir na resistência da seção mista. Segundo OEHLERS e BRADFORD (1995), o esforço cisalhante é transmitido através das reentrâncias formadas no processo de dobragem das chapas e a ligação entre o aço e o concreto é proporcionada pelas mossas localizadas nas reentrâncias, podendo-se ainda adicionar conectores de cisalhamento. As principais vantagens de se utilizar o aço como forma incorporada ao concreto são a economia com o custo da execução de estruturas de suporte provisórias (cimbramento) e o maior espaço disponível na obra ao se dispensar o uso do cimbramento. No entanto, PFEIL e PFEIL (2009) observam que podem ocorrer deslocamentos excessivos nessas estruturas durante a construção e em serviço.

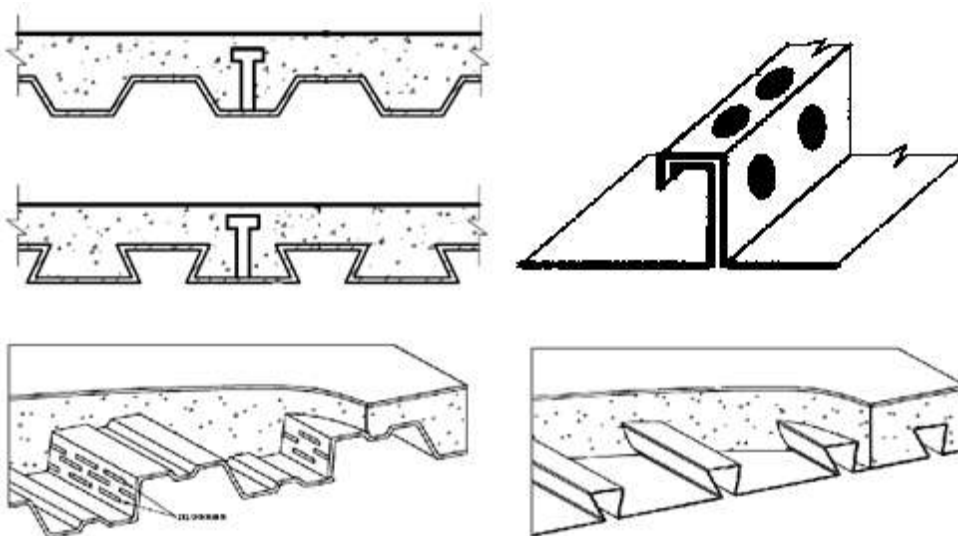


Figura 2.4: Estruturas com formas de aço incorporada, *steel deck* (Fonte: NBR 8800, 2008 - adaptado).

2.2 Mecanismo de funcionamento estrutural das vigas mistas

Para estudar o mecanismo de funcionamento estrutural das vigas mistas, especialmente o comportamento da interface comum tanto ao banzo superior do perfil I, quanto à face inferior da laje de concreto, adota-se inicialmente como exemplo uma viga

mista aço-concreto biapoiada, submetida a um carregamento uniformemente distribuído. Segundo QUEIROZ *et al.* (2001), na interface aço-concreto incide um fluxo de cisalhamento longitudinal proporcionado pela distensão das fibras do perfil metálico e, simultaneamente, pela contração das “fibras” do concreto. Este fluxo de cisalhamento possui distribuição linear, atua paralelamente a interface aço-concreto, e é diretamente proporcional ao esforço cortante na viga. Desta maneira, para vigas biapoiadas por exemplo, os conectores periféricos sempre serão mais solicitados, resultando então em maior deformação. PFEIL e PFEIL (2009) ainda salientam que as chapas de aço dos elementos metálicos podem flambar localmente em qualquer direção transversal ao plano da chapa. Contudo nas vigas mistas, as chapas de aço quanto mais próximas estiverem do concreto, menos tenderão a sofrer com flambagem.

2.2.1 Interação completa ou total

De acordo com PFEIL e PFEIL (2009), tomando-se como base a configuração deformada da viga mista para um estágio de carregamento inicial, nota-se que o deslizamento horizontal na interface entre os materiais e o afastamento vertical da laje em relação ao perfil são praticamente nulos. A viga de aço e a laje de concreto resistem aos esforços solicitantes solidariamente e a flexão do conjunto ocorre em torno do centro de gravidade da seção mista, comportamento esse que pode ser classificado como de interação completa entre os materiais. Neste estágio, o diagrama de deformações é contínuo e a seção mista possui apenas uma linha neutra.

2.2.2 Interação parcial

Ao intensificar o carregamento, aumenta-se tanto a contração das “fibras” referentes ao concreto quanto a contração das fibras referentes ao perfil metálico. Isso resulta no deslizamento entre o aço e o concreto e, conseqüentemente, uma deformação no sentido do fluxo de cisalhamento nos conectores (PFEIL e PFEIL, 2009). Prosseguindo com este aumento do carregamento, o conector flexível mais externo atinge sua resistência característica máxima, podendo ainda assim, mesmo plastificado, continuar se deformando sem romper, permitindo que os conectores vizinhos absorvam parte do fluxo de cisalhamento, proporcionando uma reação em cadeia que permite aos demais conectores também atingirem suas capacidades resistentes máximas, uniformizando assim a resistência da conexão como um todo. Pode-se concluir que ocorre

uma interação parcial entre o aço e o concreto. QUEIROZ *et al.* (2001) sinaliza que o deslizamento relativo entre os principais componentes do sistema misto acarreta numa descontinuidade no diagrama de deformações com duas linhas neutras com posições correlatas em função do grau de interação entre os componentes.

2.2.3 Interação nula

Considera-se agora uma laje apoiada sobre um perfil metálico, sem nenhum elemento que tenha a função de solidarizar ambos os elementos. Analisando o diagrama de deformações resultante, nota-se a existência de duas linhas neutras, assim como ocorre na interação parcial, mas com distâncias bem maiores que no caso descrito anteriormente. DAVID (2007) indica que neste caso os elementos trabalham de maneira independente, isto é, cada um resiste a uma parcela dos esforços de flexão, caracterizando assim a interação nula. As distribuições de deformações ao longo da seção transversal de uma viga mista sob ação de um carregamento transversal ao eixo da viga para os casos de interação nula, total e parcial entre o aço e o concreto são mostradas na Figura 2.5.

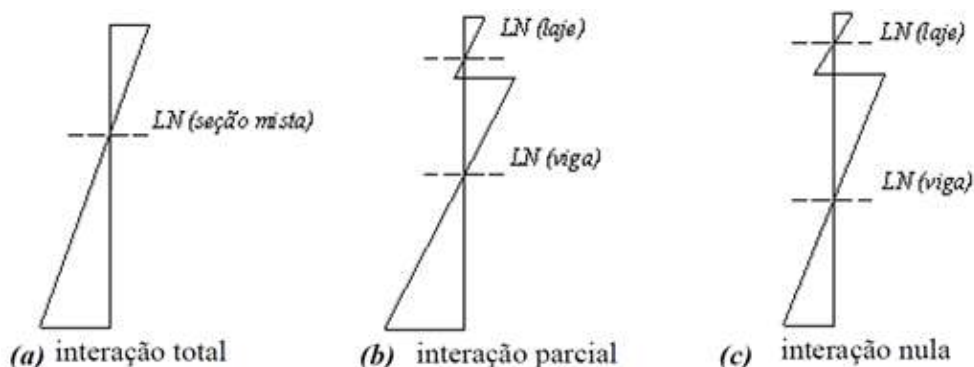


Figura 2.5: Distribuição de deformações para interações total, parcial e nula (Fonte: QUEIROZ *et al.*, 2001).

2.3 Grau de conexão entre viga de aço e laje de concreto

Para seguir com as análises da interação entre os materiais, será considerado como exemplo o caso de viga mista biapoiada sob ação de carregamento uniformemente distribuído.

De acordo com OEHLERS e BRADFORD (1995), as tensões normais que atuam na seção transversal provenientes dos esforços de flexão geralmente agem ao longo da seção transversal, equivalendo-se estaticamente a forças de tração no perfil de aço e compressão na laje de concreto. A resultante das tensões de compressão no concreto F_c é

igual a área da seção transversal da laje A_c multiplicada pela resistência característica do concreto à compressão f_{ck} , que por sua vez é adotada igual à 85% da resistência cilíndrica à compressão. Assim como a resultante das tensões de tração no aço F_s é igual a área do perfil metálico A_s multiplicado pela tensão de escoamento do aço f_s . Os esforços atuantes na laje de concreto são apresentados na Figura 2.6.

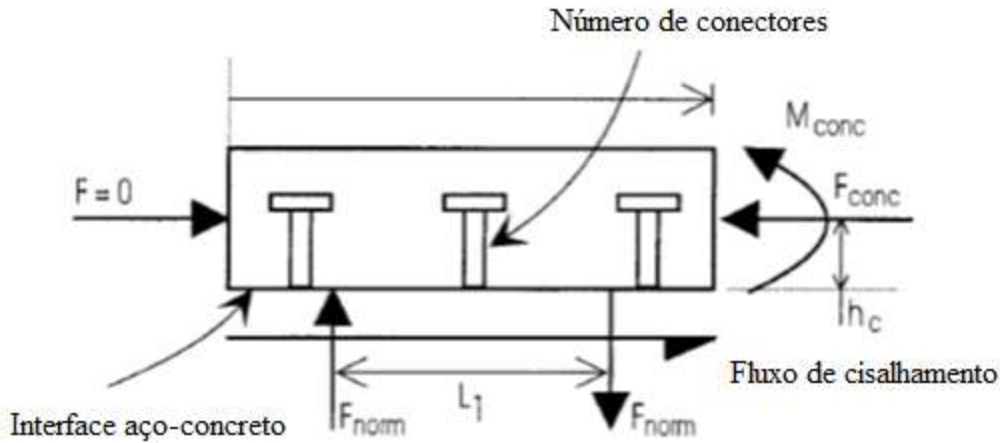


Figura 2.6: Distribuição de esforços no elemento de concreto (Fonte: OEHLERS e BRADFORD, 1995).

2.3.1 Grau de conexão completa

OEHLERS e BRADFORD (1995) mostram que a capacidade resistente da conexão (P_{sh}) é dada pelo número de conectores entre a seção de momento fletor máximo e nulo multiplicado pela resistência de cada um destes conectores. Ao se dividir P_{sh} pelo valor do comprimento entre a seção de momento máximo e nulo, tem-se o fluxo de cisalhamento longitudinal. Este valor é fundamental no dimensionamento da ligação entre o aço e o concreto. Este fluxo influencia na distribuição das tensões normais na seção transversal, uma vez que esta distribuição depende do grau de conexão da viga mista.

Existem duas possibilidades de interação total entre os materiais. No primeiro caso, mostrado na Figura 2.7, a resistência da seção do perfil metálico F_s é menor que a resistência da seção de concreto F_c . Desta maneira, quando o aço escoar totalmente, apenas uma parte do concreto estará comprimida (b), fazendo com que a resistência do concreto seja limitada pela resistência do aço e a linha neutra se encontre na seção de concreto (c). Como $F_s < F_c$, e o aço encontra-se totalmente escoado, a resistência do concreto F_c passa a ser igual a resistência do aço F_s (a) o que garante assim o equilíbrio da seção. O fato da capacidade resistente da conexão P_{sh} ser superior a resistência da

seção do perfil metálico F_s ($P_{sh} > F_s$), faz com que os conectores resistam a força no concreto, uma vez que $F_c = F_s$.

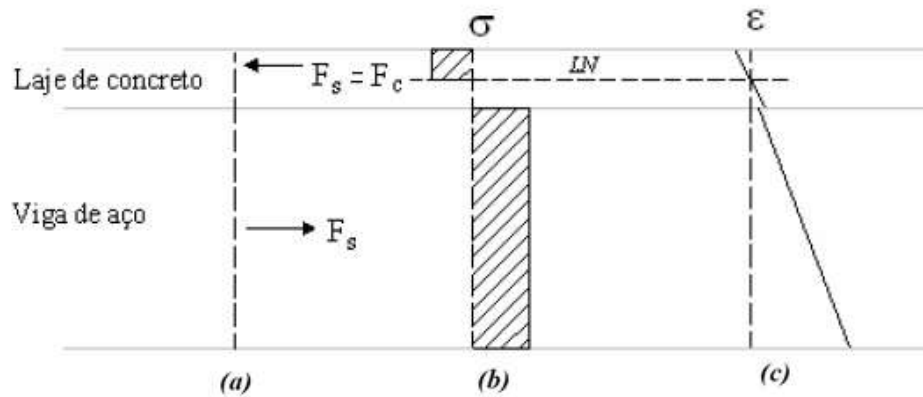


Figura 2.7: Caso 1: Exemplo de grau de conexão total (Fonte: OEHLERS e BRADFORD, 1995).

Ainda de acordo com OEHLERS e BRADFORD (1995), no segundo caso a resistência da seção de concreto F_c é inferior à resistência da seção metálica F_s . Assim sendo, quando o concreto estiver totalmente comprimido apenas parte da resistência total do aço será alcançada (ver Figura 2.8). Isto é, a resistência do concreto impede que a resistência no aço alcance patamares mais elevados e a linha neutra se localiza no perfil metálico. Para $F_c < F_s$ o equilíbrio interno da seção mista é garantido adotando-se a resistência do aço F_s igual à resistência do concreto F_c , e, como parte do aço está tanto sob tensões de tração quanto sob tensões de compressão, esta última adiciona no sistema um momento em relação ao centróide da seção de aço que não pode ser desprezado. Analogamente ao primeiro caso, a capacidade resistente da conexão P_{sh} é superior a resistência da seção de concreto F_c ($P_{sh} > F_c$) – que por sua vez limita F_s , fazendo com que os conectores de cisalhamento resistam à força no perfil metálico.

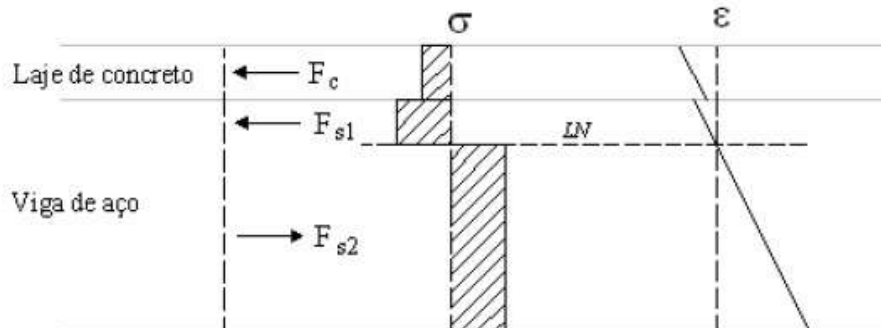


Figura 2.8: Caso 2: Exemplo de grau de conexão total (Fonte: OEHLERS e BRADFORD, 1995).

Para os dois casos, pode-se ligar a conexão completa ou ligação total a cisalhamento, ao fato da resistência dos conectores ser superior ao termo que limita a resistência do sistema, ou seja, o acréscimo de P_{sh} não afeta a distribuição das tensões na seção transversal. Sendo assim, o aumento do número de conectores não traz como consequência o aumento da resistência à flexão da viga (EUROCÓDIGO 4, 2004) e a falha do conjunto ocorre no aço ou no concreto e não pelo cisalhamento dos conectores. Quando ocorre a conexão total entre os materiais sempre resulta em apenas uma linha neutra com a ruptura da seção de aço ou de concreto.

2.3.2 Grau de conexão parcial

Segundo OEHLERS e BRADFORD (1995), a conexão parcial entre os materiais numa seção mista ocorre toda vez que a capacidade da conexão de cisalhamento P_{sh} for menor que a resistência individual do aço e do concreto, ou seja, a falha da viga mista ocorre na ligação entre os elementos. Assim sendo, a resistência do sistema fica diretamente ligada com o aumento do número de conectores. Desta maneira, como $P_{sh} < F_s$, para que ocorra o equilíbrio no elemento de concreto, a sua capacidade resistente F_c se reduz, igualando-se a P_{sh} (ver Figura 2.9), diferentemente ao que acontece no primeiro caso onde F_c é igual a resistência do aço F_s . A capacidade da conexão de cisalhamento passa a ser determinante para o limite de falha do sistema misto. Outra consequência da conexão parcial é que devido a P_{sh} ser menor que F_s , parte do aço fica tracionado e outra parte comprimido, assim como parte do concreto fica comprimido (h). Consequentemente, na interação parcial aparecem duas linhas neutras atuando na mesma seção.

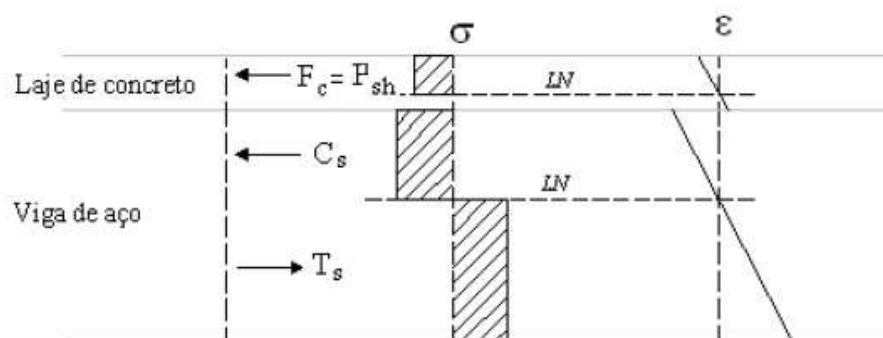


Figura 2.9: Caso 3: Exemplo de grau de conexão parcial (Fonte: OEHLERS e BRADFORD, 1995).

De acordo com QUEIROZ *et al.* (2001), aspectos práticos como o maior preço do conector instalado se comparado com o custo unitário do perfil limitam o emprego destes

conectores. Apesar de tecnicamente o aumento da quantidade de conectores melhorar a conexão de cisalhamento P_{sh} , e em última instância a resistência da viga à flexão, economicamente a estrutura fica mais cara, o que inviabiliza a utilização da ligação total a cisalhamento. O autor informa que graus de interação entre 70% a 90% são mais viáveis.

KOTINDA (2006) ressalta que quando nos referimos a grau de conexão estamos nos referindo a resistência da conexão de cisalhamento da viga mista, que se diferencia do grau de interação que por sua vez se refere ao deslizamento entre o aço e o concreto.

2.4 Conectores de cisalhamento

A ligação que deve ser alcançada entre o elemento de aço e o elemento de concreto nas vigas mistas é crucial para a ação conjunta (MALITE, 1990). Quando dois dos elementos apenas encostam numa interface, comumente a conexão é feita através de formas mecânicas de conectores de cisalhamento, como as formas mostradas na Figura 2.10. Quando um elemento está envolto por outro, como por exemplo um pilar de concreto onde um tubo metálico sirva de forma, então os dois elementos estão solidarizados pelas forças na interface induzidas pela geometria da forma (invólucro) e quaisquer forças de ligação. No caso das vigas mistas reforçadas, as chapas adicionais podem ser soldadas ou aparafusadas no banzo inferior. Em todos estes casos, a ligação deve resistir aos esforços de cisalhamento longitudinal na interface aço-concreto. Contudo, a ligação também é projetada para evitar que os dois principais componentes se separem, de maneira a garantir que a deformação em ambos os elementos seja a mesma. Em suma, a interface de ligação deve ser capaz de resistir tanto às tensões normais quanto às tensões longitudinais de cisalhamento, normais e paralelas à interface, respectivamente.

De acordo com PFEIL e PFEIL (2009), conectores de cisalhamento do tipo *stud bolt* são até hoje os mais utilizados. O corpo e o cordão de solda adjacentes ao banzo do perfil são projetados para resistir aos esforços de cisalhamento longitudinal, enquanto que a cabeça é projetada para resistir às tensões normais à interface aço-concreto. Os conectores podem ser acoplados no perfil antes ou depois do lançamento do concreto, por soldagem / aparafusamento, ou através de pinos acionados por explosivos. Em conectores do tipo “U”, o esforço longitudinal é resistido prioritariamente pela parte inferior, enquanto que a parte superior resiste às tensões perpendiculares à interface. Para conectores do tipo barras com alça, as barras soldadas resistem aos esforços normais.

Através desta breve abordagem sobre os tipos de conectores de cisalhamento, pode-se perceber a variedade existente, de diferentes formatos, tamanhos e maneiras de conectá-los aos perfis metálicos. Entretanto, os conectores de cisalhamento possuem as seguintes características em comum: são elementos de aço embutidos no concreto, possuem um componente projetado para resistir aos esforços longitudinais de cisalhamento e outro componente projetado para resistir aos esforços normais de tração e, conseqüentemente, impedir a separação dos componentes, além de transmitir elevadas cargas concentradas para o elemento de concreto (OEHLERS e BRADFORD, 1995).

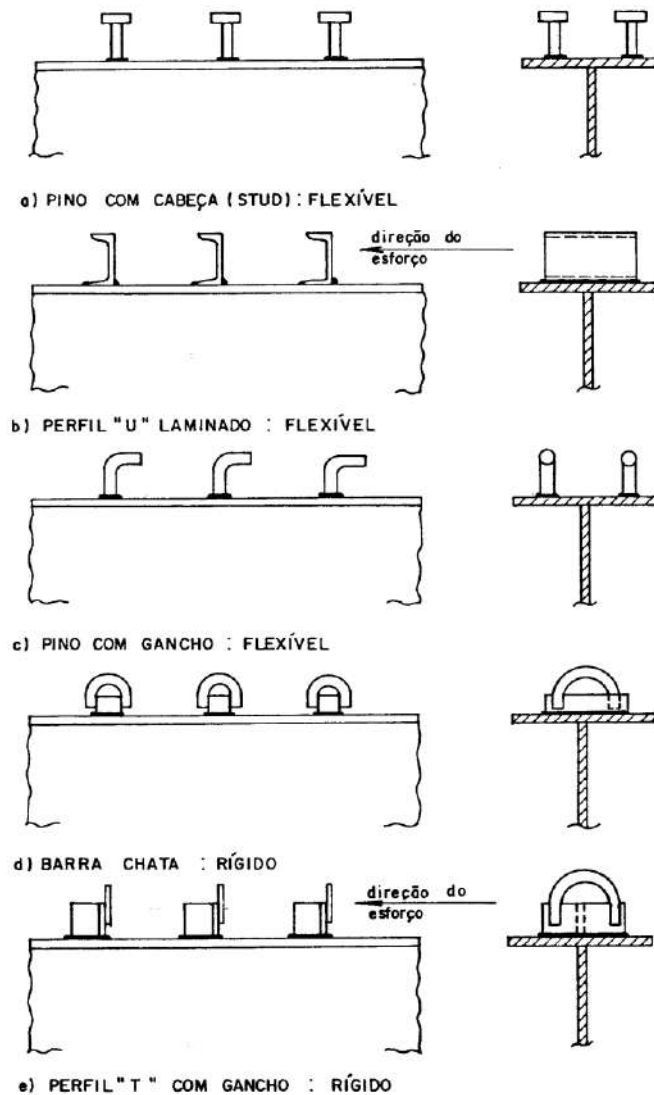


Figura 2.10: Tipos de conectores de cisalhamento (Fonte: MALITE, 1990).

2.4.1 Mecanismo de funcionamento dos conectores de cisalhamento

O comportamento dos conectores de cisalhamento é determinante nas deformações, distribuição das tensões e modos de falhas das vigas mistas. O comportamento da ligação é ilustrado através da relação entre a força de cisalhamento longitudinal e o deslizamento na interface entre o perfil metálico e o concreto. Esta ligação varia de frágil a dúctil a depender do formato de cada conector, conforme figura 2.11. Para estruturas com formas de aço incorporadas (*steel deck*), as mossas/reentrâncias fazem este papel de transferir as forças de cisalhamento longitudinais e impedir a separação do aço do concreto. A geometria dessas reentrâncias contribui mais ou menos para a ductilidade do sistema.

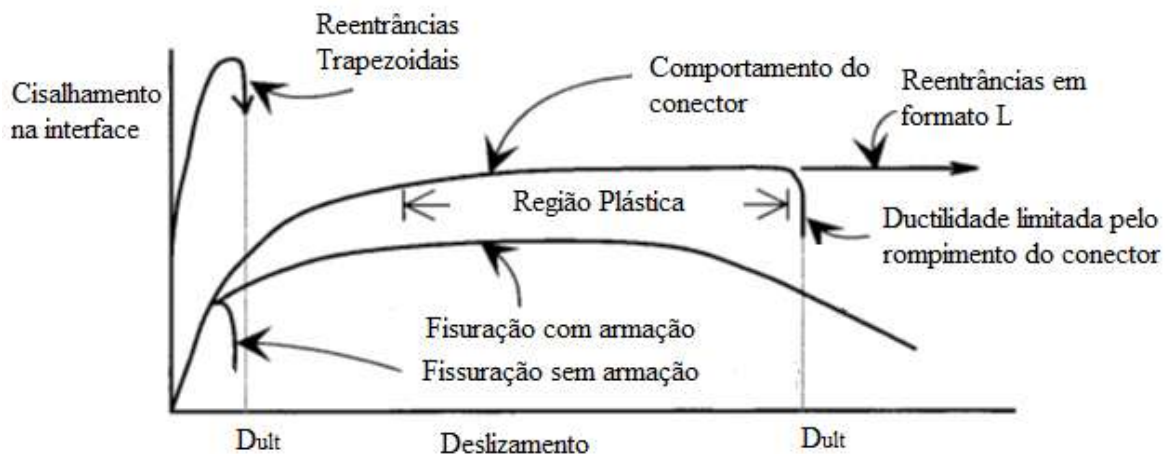


Figura 2.11: Ductilidade dos conectores (Fonte: OEHLERS e BRADFORD, 1995)

Os conectores de cisalhamento controlam o nível de deformação plástica das vigas mistas. Desta maneira se classifica em rígidos, quando possuem uma região de deformação plástica bem limitada, e flexíveis, quando proporcionam às estruturas uma maior deformação plástica (OEHLERS e BRADFORD, 1995).

2.5 Estado da arte

Como breve histórico do que se ensaiou em laboratório e foi modelado computacionalmente, cita-se a seguir os principais trabalhos desenvolvidos ultimamente no Brasil.

MALITE (1990) obteve alguns parâmetros para dimensionamento e construção de vigas mistas em aço e concreto para edifícios. A capacidade resistente dos conectores de cisalhamento, altura da laje de concreto, largura efetiva da laje e a resistência

característica do concreto foram observados como fatores que influenciaram na resistência da seção ao momento fletor. Porém, aspectos como tipo de aço do perfil e largura da mesa do perfil metálico proporcionaram maiores variações na resistência do momento fletor da seção mista. Desta maneira, o autor observou maior protagonismo no perfil de aço em comparação com o concreto em termos de influência no momento fletor para estruturas de edifícios projetadas segundo preceitos da interação parcial.

Dando continuidade à pesquisa, MALITE (1993) apresentou experimentos em vigas mistas formadas por perfis formados a frio com conectores também constituídos por perfis de chapa dobrada. O autor concluiu ser viável a utilização desse sistema sob o ponto de vista estrutural, pois as estruturas mistas com PFF não apresentaram diferenças significativas de comportamento estrutural quando comparadas com as estruturas mistas formadas com perfis laminados.

ALVA (2000) realizou uma análise estrutural e normativa das estruturas mistas aço e concreto para edifícios por meio dos principais componentes que constituem sua estrutura, vigas, lajes e pilares. Segundo o autor, a associação de perfis de aço com concreto conduz a uma solução competitiva em sistemas estruturais para edifícios e pontes. Para as lajes e vigas, a utilização de elementos mistos justifica-se pela rapidez de execução e aumento da capacidade estrutural, o que acarreta em economia de material. Os principais aspectos que contribuem na utilização de pilares mistos são o aumento de rigidez que estes proporcionam à estrutura e também a maior resistência a altas temperaturas.

TRISTÃO (2002) realizou simulações computacionais com o auxílio do método dos elementos finitos sobre ensaios de tração dos conectores em relação ao concreto (*push-outs*), com conectores de cisalhamento sendo os do tipo pino com cabeça e perfil “U” formado a frio. Para tal foram utilizados alguns dados experimentais de MALITE (1993) e outros autores. Foram apresentados como resultados os modelos numéricos juntamente com um estudo paramétrico, tendo como objetivo a análise da concentração das tensões, deformações e determinação da relação carga x deslocamento dos conectores. O autor conclui que a posição do perfil “U” para as espessuras analisadas influenciou basicamente na ductilidade do modelo, isto é, para modelos com conectores na posição I a carga última do conector se deu para deslocamentos maiores que os modelos com os conectores na posição II.

No trabalho de KIRCHHOF (2004), elaborou-se um modelo computacional tridimensional para análise de vigas mistas aço e concreto simplesmente apoiadas. Para o modelo em temperatura ambiente, estes resultados foram comparados com resultados numéricos de outros trabalhos, através das relações obtidas entre a carga aplicada e o deslocamento obtido no meio do vão. Na análise do modelo numérico submetido a altas temperaturas, analisou-se a relação entre a temperatura alcançada no banzo inferior do perfil metálico e o respectivo deslocamento também na metade do vão. Ao inserir no modelo numérico em situação de incêndio diretrizes da NBR 14323 (1999), o autor observou que aparentemente a norma brasileira apresenta valores mais conservadores que os obtidos experimentalmente.

CATAI (2005) pesquisou sobre a influência das ações que ocorrem em pontes e as principais características destas. Os tipos de conectores de cisalhamento utilizados nas ligações aço-concreto assim como efeitos retração e fluência do concreto em vigas mistas também foram objeto de estudo. Os perfis metálicos recebem os carregamentos que são aplicados antes da ligação aço-concreto. Uma vez que nas estruturas mistas o aço não sofre deformações lentas em temperatura ambiente, as tensões também não se alteram. Porém, após a solidarização com o concreto, a deformação da laje por retração e fluência ocasiona na estrutura uma redistribuição nas tensões dos elementos, i.e. aço e concreto, assim como aumenta os deslocamentos no decorrer do tempo.

KOTINDA (2006) desenvolveu uma rotina parametrizada, onde os valores numéricos resultantes foram comparados com diversos dados obtidos por meio de ensaios experimentais realizados por CHAPMAN e BALAKRISHNAN (1964) de vigas mistas biapoiadas solicitadas com carga pontual ou uniformemente distribuída. A simulação teve ênfase na interface comum à laje de concreto e o perfil metálico laminado e todos as rotinas limitaram-se a análises em temperatura ambiente. O estudo apresentou modelos numéricos com boa estratégia de definição de malha de elementos finitos, o que contribuiu para boa aproximação com os resultados experimentais. Os modelos possuíam conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça soldados no banzo superior do perfil “I” metálico laminado. A laje de concreto era maciça e armada nas duas direções.

DAVID (2007) desenvolveu um estudo numérico e experimental para análise de conectores e vigas metálicas em perfis formados a frio com seção U, juntamente com vigotas pré-moldadas embutidas na laje de concreto. Nesse trabalho, variou-se as dimensões das vigas, a espessura dos conectores e a disposição das vigotas treliçadas. Os

resultados indicaram que se deve adotar momento fletor resistente inferior ao momento de plastificação total da seção mista. A taxa de armadura transversal assim como a sua posição interferem no aspecto de fissuração da laje, mas possuem pouca influência na resistência da viga mista.

No trabalho de DE NARDIN e EL DEBS (2008) ensaiaram-se três protótipos parcialmente revestidos com e sem os *stud bolts*. Estes conectores foram soldados na alma e na mesa inferior, objetivando-se o estudo do comportamento da estrutura ao cisalhamento e a resistência ao variar suas posições. A performance dos conectores soldados na mesa inferior indicou que estes possuem maior eficiência na capacidade de resistência à flexão e diminuição do deslizamento relativo na interface aço-concreto. Os autores observam ainda que os valores da capacidade resistente à flexão obtidos na campanha experimental pouco se diferenciam.

HIGAKI (2009) objetivou analisar o comportamento das vigas mistas com laje de vigotas pré-moldadas de concreto em um pavimento tipo. Estudou-se o comportamento das vigas ao submetê-las a diferentes tipos de carregamentos bem como a propagação das fissuras na laje de concreto na região pertencente a largura efetiva sobre os perfis. Após análises comparativas numérico *versus* experimental, observou-se que as ligações se comportaram mais como apoio do que como engaste. O que foi confirmado por meio dos códigos numéricos que mais se aproximaram dos valores experimentais, onde se considerou que as vigas mistas foram modeladas como simplesmente apoiadas, o que caracterizou o comportamento semirrígido das ligações semelhantes aos de uma rótula.

No estudo de CHAVES (2009) analisou-se um sistema de vigas mistas com perfil do tipo cartola preenchido com concreto, uma vez que a ligação entre o aço e o concreto foi modelada com auxílio de conectores do tipo alça em barra chata, soldados ao perfil ou conectores do tipo alça em barra redonda soldados ao perfil. O comportamento estrutural foi analisado com o auxílio de ensaios de cisalhamento e ensaios à flexão simples em vigas biapoiadas. Concluiu-se que os conectores proporcionaram ductilidade e resistência ao sistema misto analisado. O autor ainda observa que o sistema pode ser facilmente implantado nas mais diversas obras devido à facilidade e rapidez com que os conectores podem ser soldados ao perfil “I”.

RAMOS (2010) elaborou um modelo numérico com múltiplos pisos que foi validado quando comparou estes resultados com os valores obtidos em ensaios experimentais realizados em pesquisas anteriores. Os principais parâmetros investigados

na estabilidade global da estrutura foram a resistência do concreto e a necessidade da presença de tela como armadura passiva. O autor conclui que a variação da espessura da capa de concreto foi o fator que mais interferiu no aspecto de ganho de resistência da estrutura.

CAVALCANTI (2010) analisou a contribuição da armadura para a capacidade de resistência das vigas mistas revestidas de maneira parcial. Este trabalho foi uma continuidade do estudo de DE NARDIN e EL DEBS (2008). A capacidade de resistência à flexão nos ensaios experimentais ilustrou que os conectores soldados de maneira horizontal são mais eficientes. Investigou-se também outros parâmetros como o deslizamento entre o aço e o concreto e a abertura das fissuras na laje de concreto.

ROCHA (2012) desenvolveu modelos computacionais de vigas mistas parcialmente revestidas objetivando a análise do desempenho térmico e estrutural de pisos mistos. O autor concluiu que a presença de armadura pouco interferiu no comportamento estrutural até 90 minutos de exposição ao incêndio padrão. Após este período, a estrutura mostrou um comportamento mais suave. Diferentemente do modelo sem armadura, uma vez que este mostrou uma descontinuidade em seu comportamento. No que diz respeito aos deslocamentos, o autor conclui que estes foram inferiores para os modelos que possuíam armadura na capa de concreto.

LOPES (2012) verificou a influência das ligações estruturais em elementos mistos aço-concreto sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos. Incluiu-se na investigação dos critérios de projeto, aspectos dinâmicos durante a excitação para verificação dos estados limites de serviço. Assim sendo, desenvolveu-se um modelo computacional de acordo com o nível de interação do concreto com a finalidade de produzir recomendações sobre o comportamento estrutural estático e dinâmico para edificações. O autor conclui que a consideração ou não da interação total ou parcial e da semi-rigidez das ligações estruturais não teve relevância para alterar significativamente os valores máximos dos esforços seccionais na análise estática. Observa-se também uma significativa melhora no comportamento estrutural quando o modelo possui os conectores do tipo *perfobond* tanto para interação total quanto para interação parcial, em comparação com os *stud bolts*.

DIOGENES (2013) executou ensaios estáticos e dinâmicos não destrutivos objetivando o estudo do comportamento das ligações por aderência aço-concreto, através da interface comum às lajes pré-fabricadas e os perfis de aço de seção I. Avaliou-se a

influência do estado de dano na frequência natural da viga mista após o ensaio. Também se desenvolveu a modelagem numérica para comparação com resultados dos ensaios experimentais. O autor obteve resultados satisfatórios nas simulações numéricas, principalmente no tocante a resistência ao cisalhamento das ligações. Também se ressaltou a capacidade destes modelos em estimar satisfatoriamente a capacidade resistente dos protótipos experimentais e o deslizamento na carga máxima.

SOUZA *et al.* (2017) fizeram uma análise numérica e experimental de testes *push outs* em lajes alveolares pré-fabricadas, com conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça soldados na alma do perfil I laminado, com o objetivo de obter a resistência ao cisalhamento dos conectores. Na sequência foi feita uma análise numérica dos valores experimentais que conduziram a bons resultados na análise da ação conjunta dos *stud bolts* e lajes alveolares de concreto pré-fabricadas. As análises teóricas apresentaram resistência dos conectores a favor da segurança.

No contexto apresentado, a contribuição da presente pesquisa se insere na análise detalhada do comportamento de vigas mistas constituídas por lajes alveolares, com conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça soldados no banzo dos perfis “I” laminados, em situações bastantes usuais de projeto.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados o programa experimental e os resultados do estudo desenvolvido por BATISTA e LANDESMANN (2016) no âmbito de um projeto P&D, no Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE. Os resultados obtidos a partir de dois ensaios de flexão de vigas mistas e de dois ensaios de *push out* foram adotados para aferição das condições de ligação entre o perfil de aço e as lajes pré-moldadas no modelo computacional proposto/desenvolvido. Os protótipos das vigas mistas ensaiadas foram compostos por perfis W de aço, tela soldada nervurada, armadura passiva, painéis de lajes alveolares extrusadas e conectores de cisalhamento fixados nos perfis metálicos pelo processo de eletrofusão. A seguir serão descritas as etapas da fabricação de cada protótipo, os procedimentos dos ensaios realizados e os detalhes das instrumentações dos protótipos. No fim do capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais que serão utilizados na calibração e validação do modelo proposto.

3.1 Fabricação dos protótipos

Foram confeccionados dois modelos de vigas mistas para o ensaio à flexão (V_150_19_SL e V_265_19_SL) e ambos obedecem ao esquema ilustrado na figura 3.1.

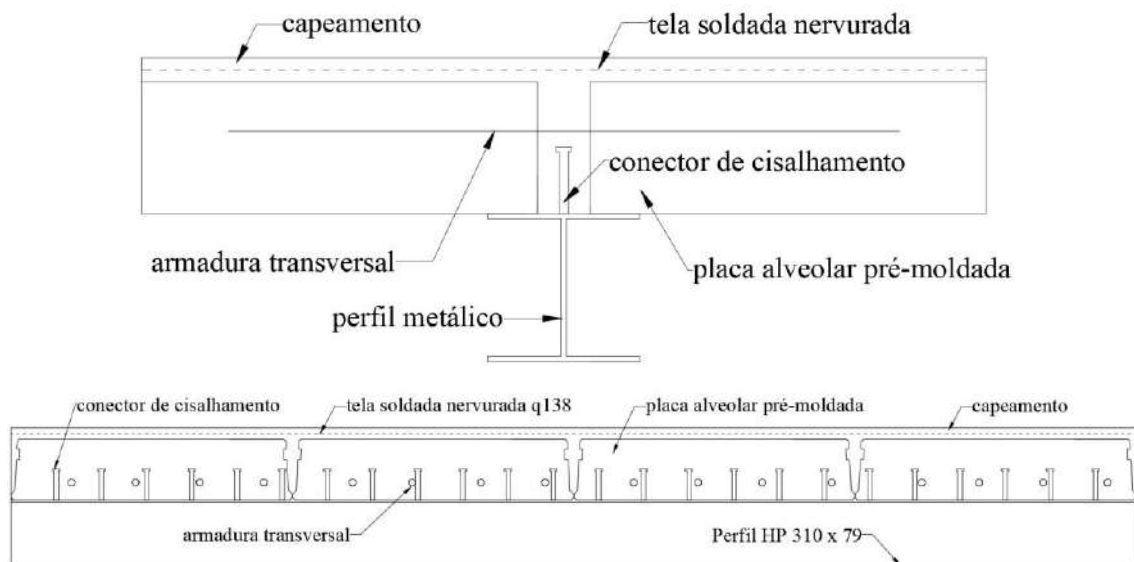


Figura 3.1: Componentes das vigas mistas (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

Na fabricação do protótipo V_150_19_SL foram utilizados os componentes estruturais descritos abaixo e ilustrados na figura 3.2, combinados de acordo com as diretrizes do projeto.

- (i) Placas alveolares de seção PS 150, com 150 milímetros de altura por 1245 milímetros de largura por 667 milímetros de comprimento;
- (ii) Conectores de cisalhamento do tipo com cabeça, com diâmetro e altura iguais a 19 e 135 milímetros respectivamente;
- (iii) Armadura passiva transversal com diâmetro igual a 12,5 milímetros posicionada no interior de cada placa alveolar para solidarização das mesmas;
- (iv) Tela soldada nervurada Q-138, posicionada no interior do capeamento com espessura de 5 centímetros, sobre os painéis pré-fabricados;

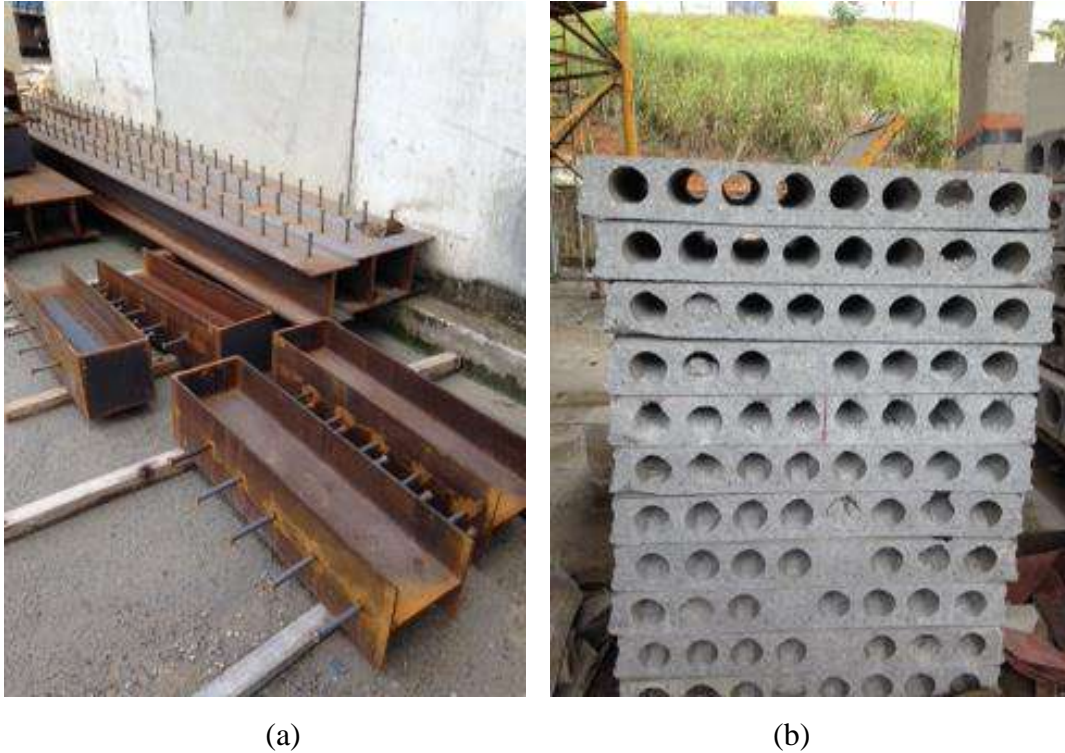


Figura 3.2: (a) Perfis metálicos e (b) placas alveolares pré-fabricadas (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

Para fabricação do segundo protótipo V_265_19_SL utilizou-se os seguintes componentes:

- (i) Placas alveolares de seção PS 26,5 com 265 milímetros de altura por 1245 milímetros de largura por 667 milímetros de comprimento;
- (ii) Conectores de cisalhamento do tipo com cabeça (*stud bolt*), com diâmetro e altura iguais a 19 e 135 milímetros respectivamente;
- (iii) Armadura passiva transversal com diâmetro igual a 16,0 milímetros posicionada no interior de cada placa alveolar para solidarização das mesmas;
- (iv) Tela soldada nervurada Q-138, posicionada no interior do capeamento com espessura de 5 centímetros, sobre os painéis pré-fabricados;

Para a fabricação do protótipo V_150_19_SL para o ensaio à flexão, primeiramente foi feita a fixação por meio da eletrofusão dos conectores de cisalhamento no banzo superior dos perfis laminados. Em seguida, as placas pré-fabricadas foram posicionadas sobre o perfil laminado (figura 3.3). Na sequência, com o auxílio de uma serra mármore, abriu-se alguns alvéolos para o posicionamento da armadura passiva transversal. Em cima das placas pré-moldadas, posicionaram-se as telas Q-138 com auxílio de espaçadores do tipo centopeia com 25 milímetros (figura 3.4), para que fosse

respeitado o cobrimento no capeamento que viria subsequentemente após a concretagem. Na placa pré-moldada e no cobrimento do protótipo, foram usados concretos usinados com resistências à compressão iguais à 45 e 30 MPa respectivamente, aos 28 dias de idade. A fabricação da viga mista V_265_19_SL ocorreu de modo semelhante, diferindo do modelo anterior na altura da placa alveolar (de 150 para 265 milímetros de altura) e diâmetro da armadura transversal (de 12,5 para 16,0 milímetros). As figuras 3.3 e 3.4 ilustram a sequência de execução dos protótipos.



(a)

(b)

Figura 3.3: Sequência executiva dos protótipos, (a) posicionamento das placas e (b) posicionamento da tela Q138. (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).



(a)



(b)

Figura 3.4: Detalhes das vigas ensaiadas à flexão, (a) posicionamento dos *stud bolts* e (b) armadura passiva (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

Dois protótipos para ensaio de *push out* (PO150.19.SL-1 e PO265.19.SL-1) foram confeccionados com o objetivo de obter dados complementares na ligação dos conectores de cisalhamento com os perfis metálicos e ambos obedecem ao esquema ilustrado na figura 3.5.

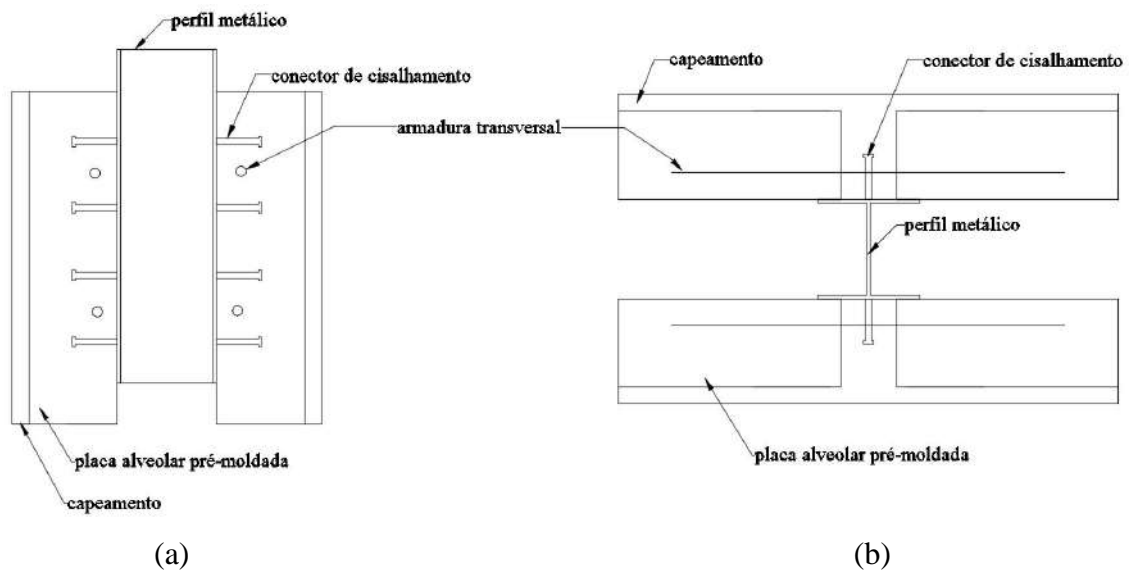


Figura 3.5: Componentes dos modelos *push out*, em (a) vista e (b) corte. (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016)

Na fabricação do modelo PO150.19.SL-1 foram utilizados os seguintes componentes estruturais, combinados de acordo com as diretrizes de cada projeto.

- (i) Placas alveolares de seção PS 15, com 150 milímetros de altura por 1245 milímetros de largura por 667 milímetros de comprimento;
- (ii) Conectores de cisalhamento do tipo com cabeça (*stud bolt*), com diâmetro e altura iguais a 19 e 135 milímetros respectivamente;
- (iii) Armadura passiva transversal com diâmetro igual a 20 milímetros posicionada no interior de cada placa alveolar para solidarização das mesmas;

Na fabricação do modelo PO150.19.SL para o ensaio de *push out* foi feita inicialmente a fixação por meio da eletrofusão dos conectores de cisalhamento no banzo superior e inferior dos perfis laminados. Em seguida, as placas pré-fabricadas foram posicionadas sobre o perfil laminado. Na sequência, abriram-se alguns alvéolos para o posicionamento da armadura transversal passiva. A montagem do modelo PO265.19.SL-1 ocorreu de maneira análoga ao protótipo anterior, a única mudança ocorreu na substituição da placa pré-moldada de 150 para 265 milímetros de altura. A figura 3.6 ilustra a sequência de execução dos protótipos.

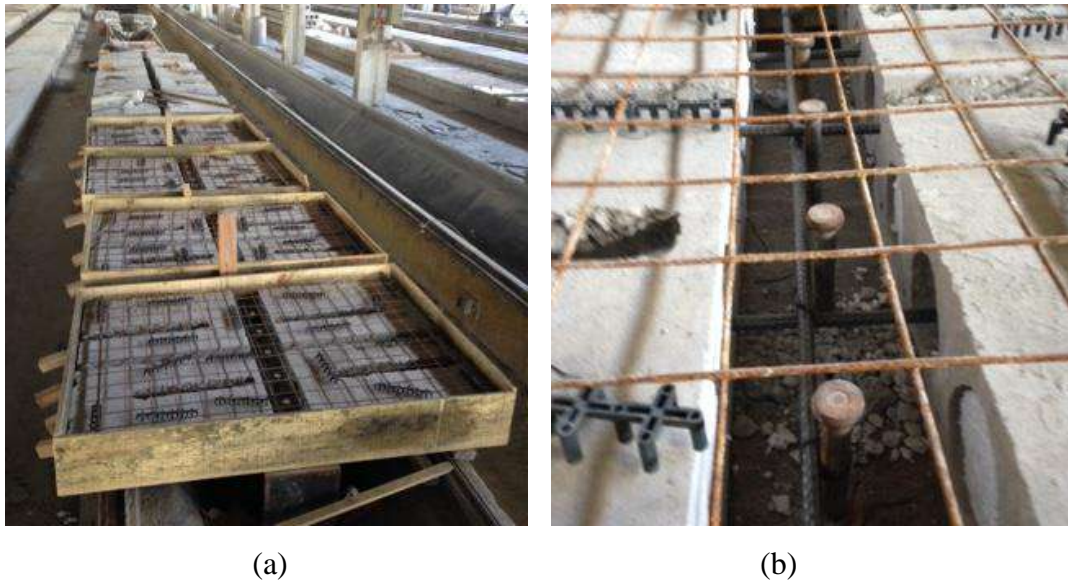


Figura 3.6: Protótipos para ensaios de *Push out* e detalhes, (a) aspecto geral e (b) ênfase nos conectores (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.2 Instrumentação dos modelos

3.2.1 Ensaio à flexão

Nas vigas ensaiadas à flexão a quatro pontos foi instalado o flexímetro FL7, com o objetivo de aferir a deflexão linear no meio do vão. Para medição do deslizamento relativo no decorrer da interface laje de concreto-perfil metálico, posicionou-se os flexímetros FL1 e FL6, um em cada extremidade. Para medições complementares referentes ao deslizamento relativo entre laje e perfil, foram inseridos quatro flexímetros entre as seções dos apoios e as seções de aplicação do carregamento, FL2, FL3, FL4 e FL5 (dois de cada lado da viga mista), conforme ilustrado na figura 3.7.

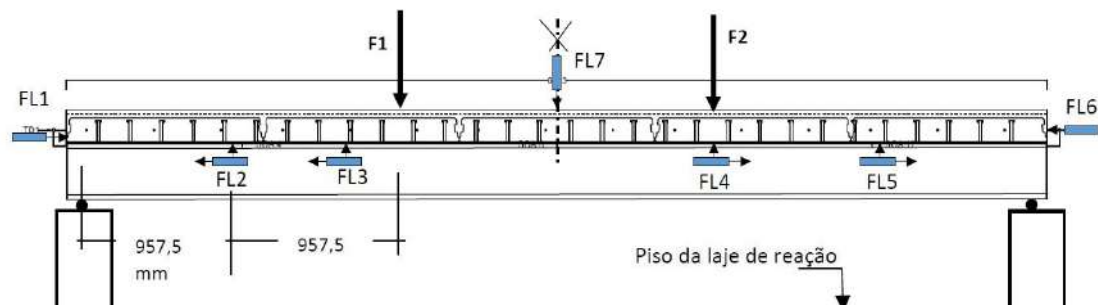


Figura 3.7: Posicionamento dos flexímetros (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

A aquisição dos dados experimentais dos ensaios foi obtida com auxílio do sistema de aquisição de sinais da *Kyowa*, com frequência de aquisição igual a 10 pontos por segundo.

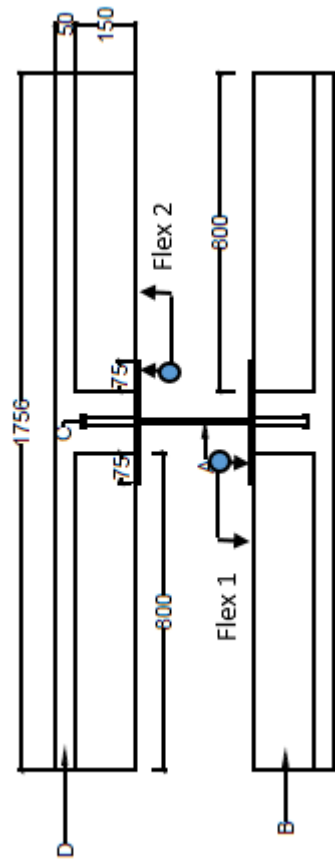
3.2.2 Ensaio de *push out*

A instrumentação aplicada nesses ensaios incluiu a medição do deslizamento relativo entre lajes e perfil de aço com auxílio de dois transdutores de deslocamento (flexímetros), posicionados em lados opostos do perfil de aço.

A força foi aplicada com auxílio de dois atuadores servo controlados MTS (assim como no ensaio à flexão), cada um com capacidade de força de compressão máxima (aproximada) de 1200 kN, e para aferir esta força, foram usadas as células de carga dos atuadores hidráulicos.

A aquisição de dados experimentais com auxílio de um sistema de aquisição de dados da *Kyowa*, acionado com frequência de aquisição de 10 pontos por segundo.

Para os ensaios de *push out* a instrumentação adotada e a montagem dos ensaios estão ilustradas e identificadas na figura 3.8.



(a)



(b)

Figura 3.8: Posicionamento dos flexímetros para medição do deslocamento relativo entre perfil de aço e laje, (a) corte e (b) vista frontal (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.3 Esquemas dos ensaios

3.3.1 Ensaio à flexão

As três vigas foram apoiadas em dois aparelhos do tipo fixo a 19,6 centímetros de cada extremidade. Foram aplicadas duas forças concentradas transversais em arranjo simétrico, por meio de dois atuadores servo controlados MTS, cada um com capacidade de força de compressão máxima aproximada de 1200 kN, conforme esquema da figura 3.9.

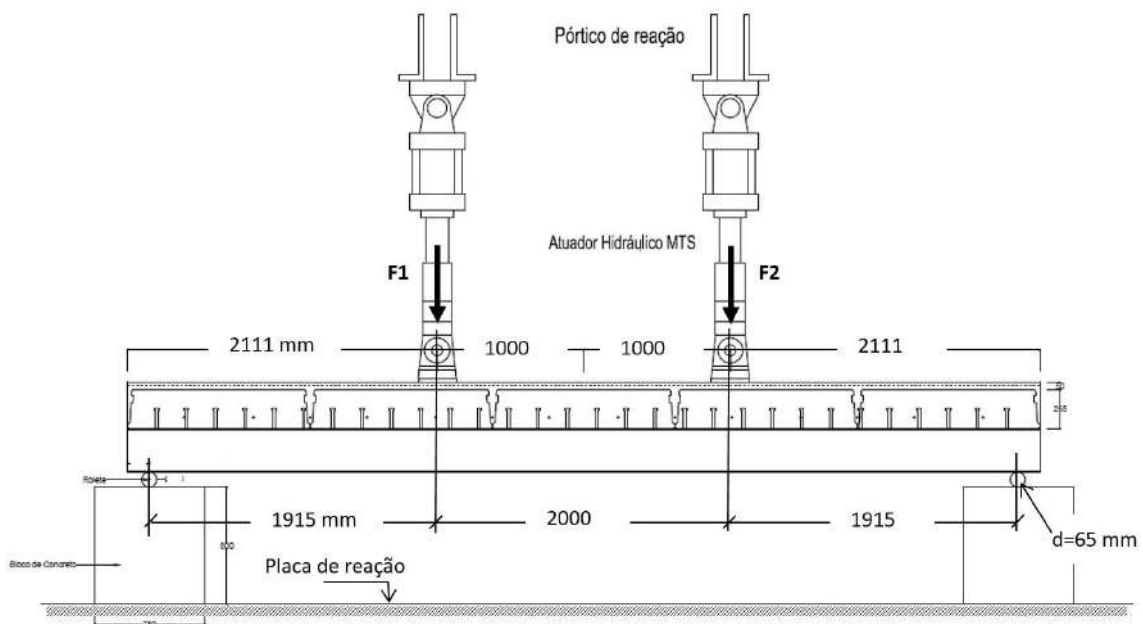


Figura 3.9: Posicionamento dos apoios e atuadores (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

Os ensaios foram realizados com controle de deslocamentos nos atuadores hidráulicos, sendo esta a maneira mais segura e confiável de realizar tais tipos de testes em estruturas. As forças transversais resultantes aplicadas nas vigas, F1 e F2, foram incrementadas lentamente, não sendo possível mantê-las com valores idênticos durante os ensaios, por conta do desequilíbrio provocado pela falta de simetria absoluta na rigidez dessas vigas mistas (comportamento natural em ensaios de vigas em laboratório). A figura 3.10 ilustra o esquema geral dos ensaios à flexão.



(a)



(b)

Figura 3.10: Esquema geral dos ensaios, (a) perspectiva e (b) vista lateral (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.3.2 Ensaios de *push out*

Foram previstos e executados dois ensaios de *push out* para aferição das condições de ligação entre perfil de aço e as lajes pré-moldadas.

Os ensaios de *push out* foram projetados com base nas prescrições do EUROCÓDIGO 4 (2004). As montagens dos ensaios seguiram o projeto executivo detalhado (BATISTA e LANDESMANN, 2016). A ilustração 3.11 ilustra a disposição em vista frontal e perspectiva dos ensaios.



(a)



(b)

Figura 3.11: Montagem dos ensaios de *push out*, (a) vista frontal e (b) perspectiva (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.4 Resultados experimentais

Apresenta-se a seguir os resultados dos ensaios experimentais de flexão e de *push out* dos modelos descritos anteriormente.

3.4.1 Ensaios à flexão

Nos dois ensaios à flexão realizados foram obtidos os valores de deflexão linear e deslizamento horizontal relativo entre o aço e o concreto, e serão detalhados a seguir.

3.4.1.1 Ensaio da viga mista V_150_19_SL

A figura 3.12 apresenta a curva carga *versus* deflexão linear no meio do vão do protótipo V_150_19_SL. De modo que se observa uma relação linear entre o carregamento aplicado e a deflexão linear no meio do vão, até a força aproximadamente igual a 170 kN. Prosseguindo-se com a análise, observa-se ainda um carregamento máximo de 430 kN com uma deflexão linear igual a 65 milímetros.

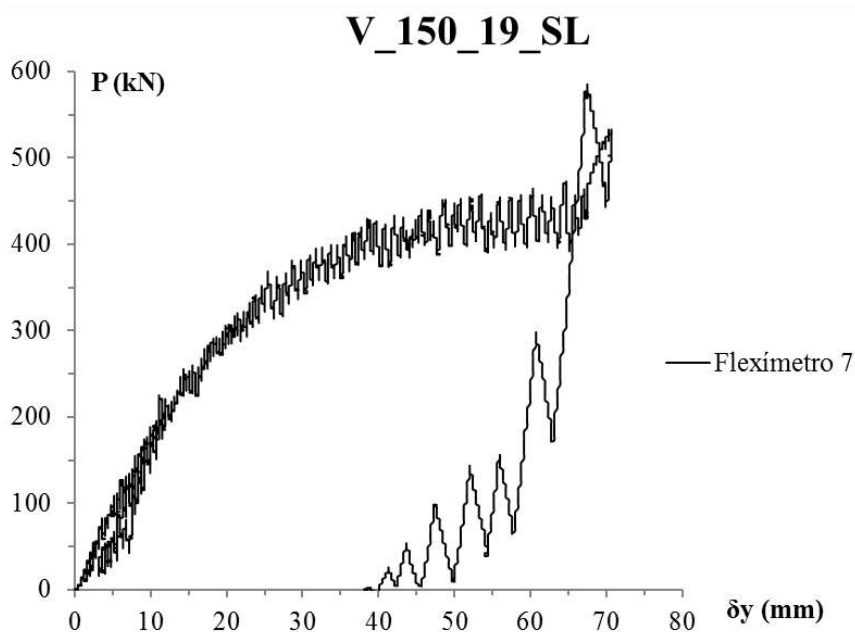


Figura 3.12: Carga aplicada x flecha no meio do vão (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

A figura 3.13 ilustra o deslizamento horizontal relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico em função do carregamento. Nota-se que de maneira geral a relação carga x deslocamento comportou-se de maneira simétrica, com deslizamentos máximos nas duas extremidades iguais a 7 milímetros para carregamento em torno de 440 kN.

Durante a fase elástica do ensaio (até o carregamento igual à 170 kN) nota-se um deslizamento relativo praticamente igual à zero. Após a entrada do ensaio na fase plástica maiores deslizamentos passam a ser observados.

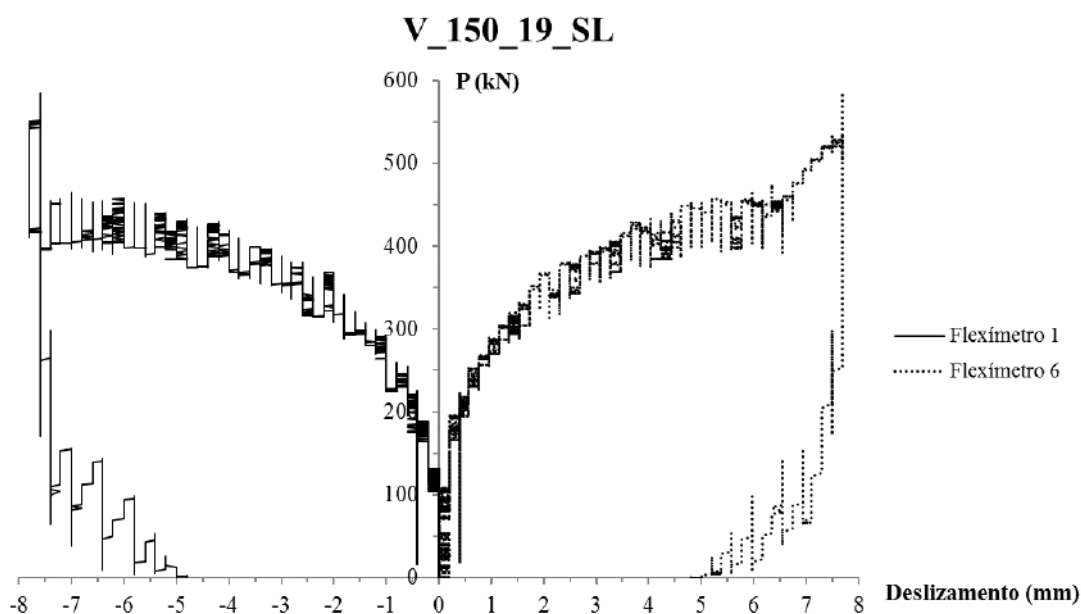


Figura 3. 13: Deslizamento relativo laje – perfil de aço: medições nas extremidades da viga mista (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.4.1.2 Ensaio da viga mista V_265_19_SL

Ao se analisar a figura 3.14 para a viga mista V_265_19_SL para o máximo carregamento suportado e seu respectivo deslocamento, nota-se um significativo aumento na capacidade resistente de carga de 430 kN para 530 kN, ou seja, um aumento de 19%. Simultaneamente ocorreu uma redução da deflexão linear se comparado com o modelo anterior, de 65 milímetros para 38 milímetros, isto é, uma perda de 42%. Ambos resultados foram de certa forma esperados uma vez que para o aumento da seção de concreto, se espera que aumente também a capacidade do sistema em resistir a esforços de compressão. Dado o arranjo do carregamento e condições de contorno do sistema, estes esforços de compressão ocorrem na laje de concreto. Aumentando-se a contribuição da seção de concreto na resistência da seção mista, aponta-se como principal ponto fraco o aumento da fragilidade da estrutura.

O gráfico nos permite observar a relação linear entre o carregamento aplicado e a deflexão linear no meio do vão, até a força igual a 200 kN aproximadamente.

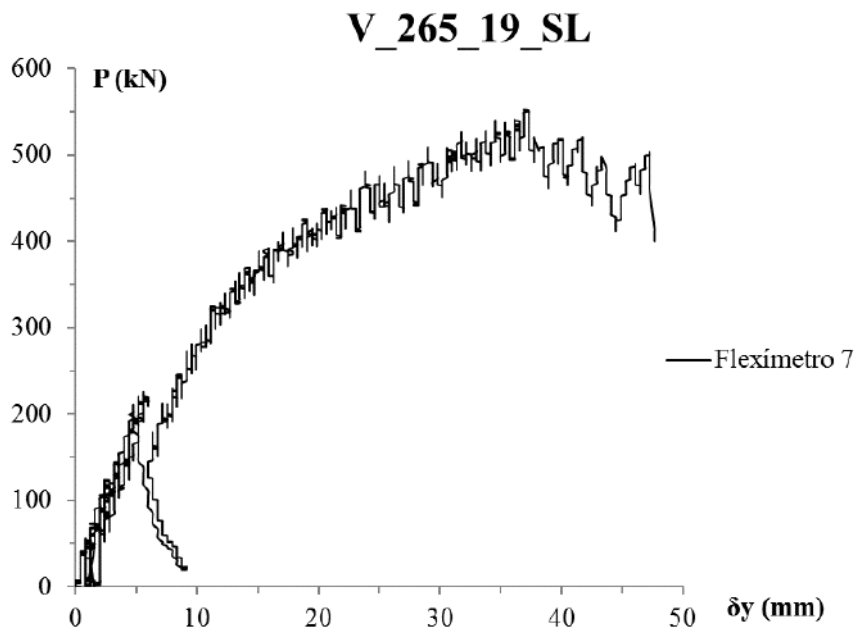


Figura 3.14: Carga aplicada x flecha no meio do vão (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

Para o deslizamento horizontal relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico, nota-se na figura 3.15 que a relação carga x deslocamento para carregamentos inferiores à 350 kN não se comportou de maneira simétrica. Neste intervalo inicial ambas extremidades obtiveram deslocamentos máximos da ordem de 1 milímetro. A partir da entrada do ensaio na fase plástica, após a carga igual à 350 kN, nota-se uma tendência de as extremidades apresentarem deslocamentos parecidos até o fim do ensaio.

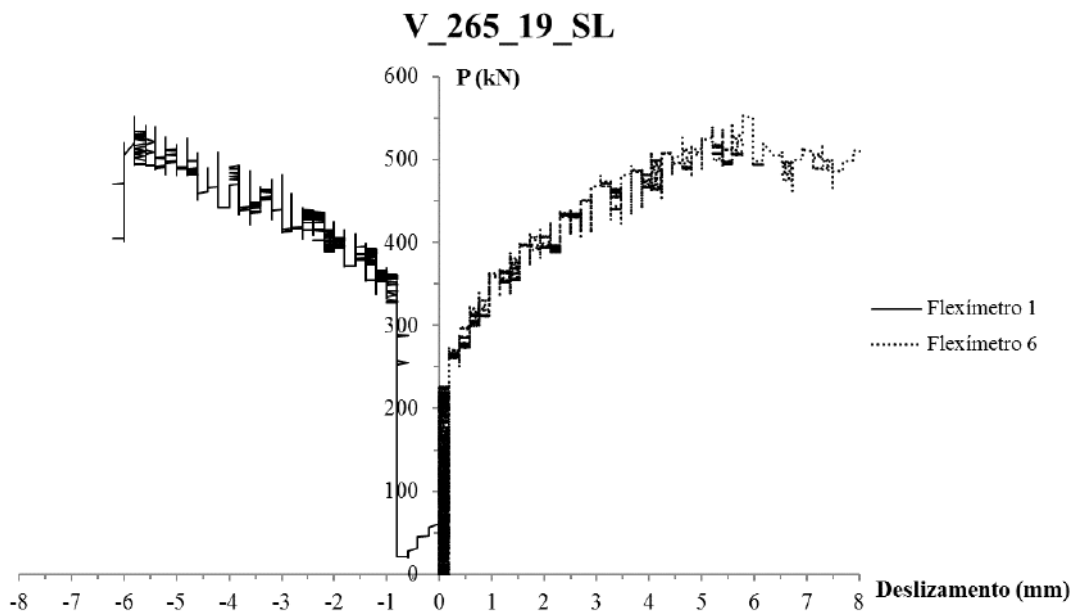


Figura 3.15: Deslizamento laje – perfil de aço: medições nas extremidades da viga mista (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016).

3.4.2 Ensaio de *push out*

A seguir são apresentados os resultados registrados durante os ensaios de *push out*, conforme identificação dos dispositivos detalhados no tópico anterior.

3.4.1.2 Ensaio do modelo PO 150_19_SL_1

Para o primeiro modelo, nota-se na figura 3.16 uma proporcionalidade entre o carregamento e as deformações até o carregamento igual a 400 kN com deslizamento inferior à 1 milímetro. Ao atingir a carga última igual à 1150 kN, o deslizamento atinge o valor de 4,6 milímetros.

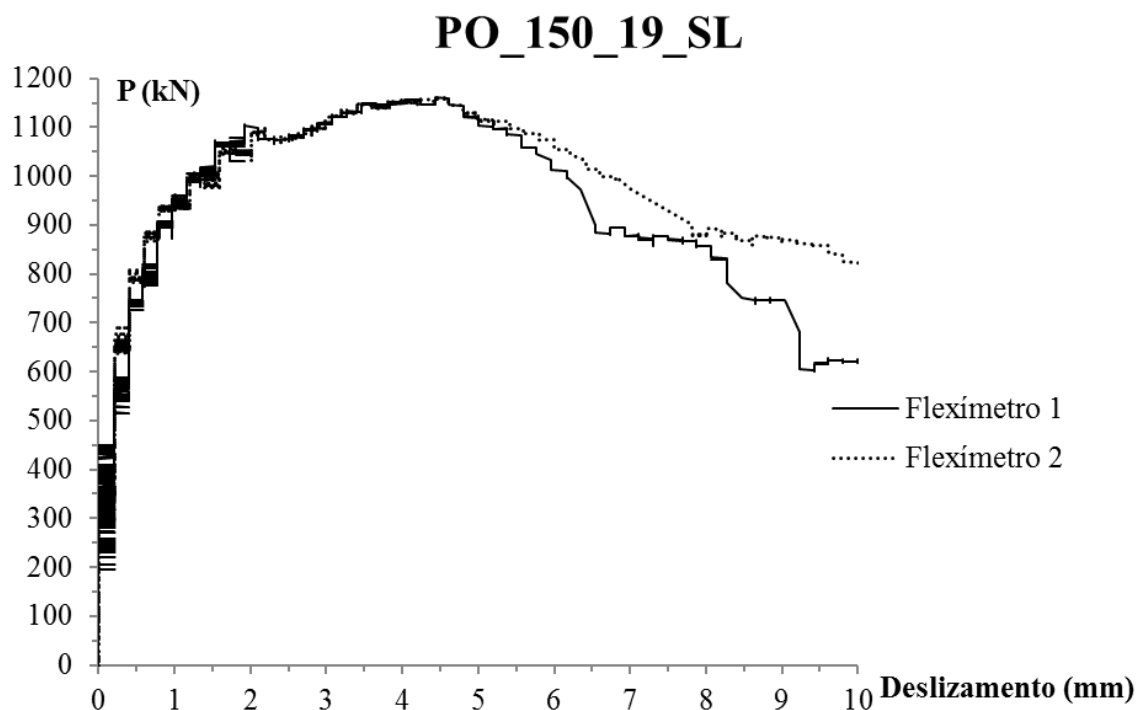


Figura 3.16: Gráfico força x deslizamento - PO 150-19-SL-1. (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016)

3.4.1.2 Ensaio do modelo PO 265_19_SL_1

Na figura 3.17 apresenta-se o resultado do segundo ensaio de *push out*, onde se nota uma relação proporcional entre a carga e o deslizamento até o carregamento de 380 kN, com respectivo deslizamento inferior a 1 milímetro. Observa-se na sequência, valores de deslizamentos também igual a 3,8 milímetros para a carga última alcançada de aproximadamente 1400 kN.

PO_265_19_SL

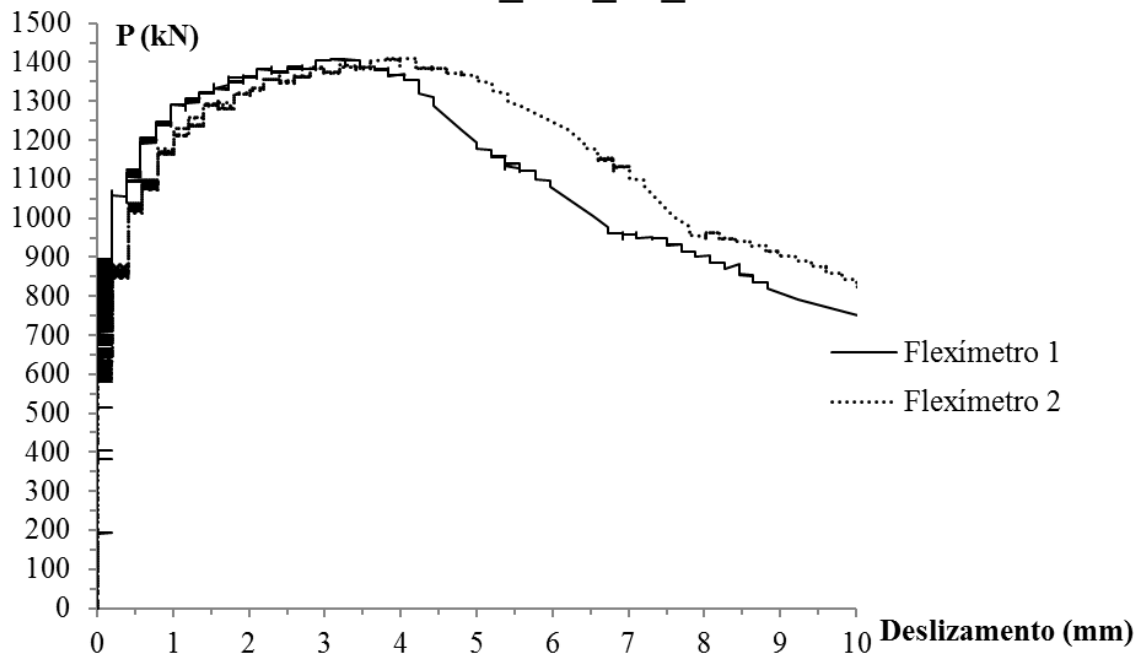


Figura 3.17: Gráfico força x deslizamento - PO 265-19-SL-1. (Fonte: BATISTA e LANDESMANN, 2016)

4 MODELAGEM NUMÉRICA

A simulação numérica tridimensional foi realizada com o auxílio do *software* comercial ANSYS que é um pacote de modelagem de elementos finitos de uso geral, capaz de resolver numericamente uma ampla variedade de problemas de engenharia (linear e não linear), envolvendo análise de tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos, eletromagnetismo, entre outros.

No presente trabalho, simulou-se o ensaio à flexão das vigas mistas V_150_19_SL e V_265_19_SL descritas no capítulo anterior. A estratégia adotada foi a evolução gradativa dos modelos, isto é, do mais simples até o mais sofisticado para que fosse possível compará-los com os ensaios, e também apreciar o significativo aumento de rigidez que cada grupo de elemento finito proporciona ao sistema.

Inicialmente foi modelada a viga mista (perfil “I” juntamente com a laje maciça de concreto), adicionando paulatinamente elementos de maneira a tornar a modelagem mais próxima possível ao modelo ensaiado em escala real e sendo possível analisar a influência da inclusão de cada elemento.

Os elementos utilizados nas modelagens foram *solid65* para simular a laje de concreto maciça ou armada. Observa-se que no presente trabalho as armaduras foram modeladas de forma difusa, incluídas sob taxas no interior do elemento conforme suas direções. O elemento *shell181* teve como objetivo simular o perfil metálico. O par de contato *target170* e *conta173* foi utilizado para simular forças de atrito existentes na interface aço-concreto. O elemento *beam189* foi utilizado para reproduzir os conectores de cisalhamento. Foi implementada um elemento semi-rígido nos conectores com o auxílio do elemento *combin39*.

A presença dos alvéolos foi inserida de maneira parametrizada, isto é, a alteração relacionada à diferença de peso existente entre as placas alveolares e maciças foi inserida sob o ajuste da densidade e não de maneira discreta.

4.1 Viga mista V_150_19_SL

Utilizamos para o desenvolvimento dos modelos tridimensionais ensaiados, rotinas programadas de acordo com a linguagem de programação do *software* ANSYS intitulada APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Tem-se a seguir a descrição do modelo desenvolvido, em função da apresentação dos elementos finitos utilizados, discretização

dos elementos, condições de contorno, vinculações, solicitações e relações constituintes dos materiais utilizados nos modelos.

4.1.1 Grupos de elementos finitos

Para representar a laje de concreto o elemento *solid65* foi escolhido. Utilizado para modelagens 3-D de sólidos em concreto, possui a capacidade de modelar armaduras de maneira difusa em cada um dos elementos (com o limite de até três especificações – a depender das orientações dos ângulos Φ e θ - para cada elemento e resistindo apenas a tração e compressão). Os valores devem ser inseridos no código em forma de taxas. Esta foi a maneira adotada neste trabalho. Também é possível representar a armadura passiva sob a forma discreta, neste caso a função estrutural deste componente de reforço é transferido para um outro elemento, a ser incluído e caracterizado a priori. Este elemento estrutural também possui como diferença em relação aos demais a capacidade de simular a propagação das fissurações (em três direções ortogonais) do concreto, tanto para tensões de tração quanto para tensões de compressão. Com o auxílio da figura 4.1, é possível notar que o elemento *solid65* possui oito nós (hexaedro), cada um com três translações nas direções nodais x, y e z.

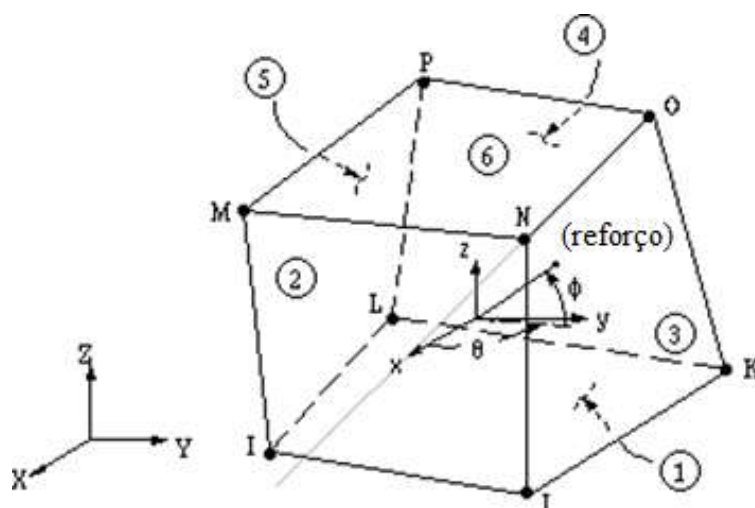


Figura 4.1: Elemento *solid65*, Fonte: Manual do ANSYS.

Para a inserção da armadura passiva (tela q138) no capeamento da laje de concreto de maneira difusa, foram fornecidas para as constantes reais as orientações dos ângulos de cada uma das três direções das armaduras. Também foi fornecida a razão de volume referente a cada elemento. A figura 4.2 ilustra estas orientações de acordo com o sistema de coordenadas do elemento *solid65* (figura 4.1).

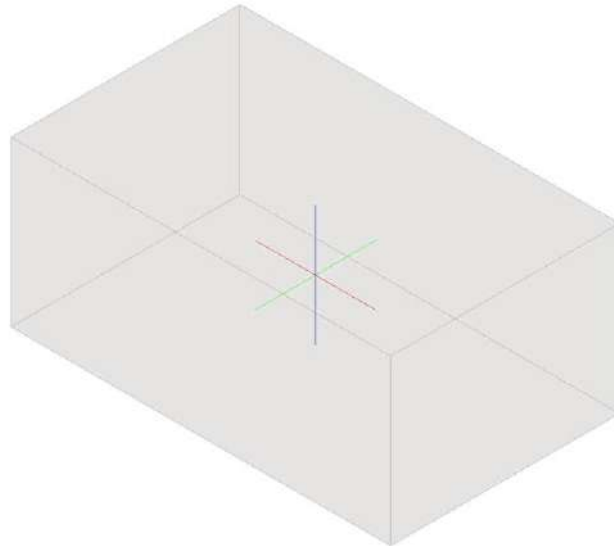


Figura 4 2: Orientações das armaduras no *solid65*.

Na representação do perfil metálico foi utilizado para análise o elemento *shell181*. Capaz de simular o comportamento de estruturas como formato de elementos de casca, ou seja, quando uma dimensão possui ordem de grandeza consideravelmente inferior que as demais. Com o auxílio da figura 4.3, constata-se que o elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó, sendo três de translação nas direções x, y e z e três rotações em torno dos eixos x, y e z.

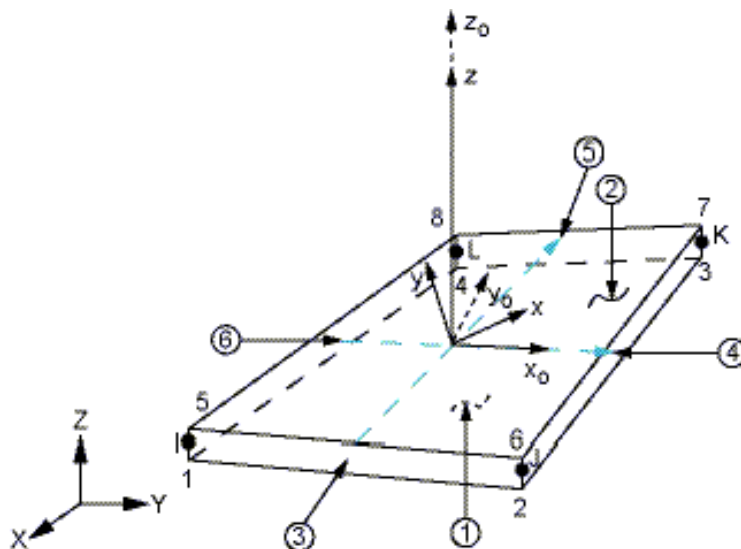


Figura 4.3: Elemento *shell181*, Fonte: Manual do ANSYS.

Para reproduzir o comportamento dos conectores de cisalhamento, utilizou-se o elemento de viga *beam189* que possui seis graus de liberdade por nó, sendo três de translação mais três de rotação segundo os eixos x, y e z (vide figura 4.4). Desta maneira,

este elemento, além de permitir esforços axiais, permite também a propagação dos esforços de flexão, a consideração da não linearidade do material constituinte e diferentes geometrias nas seções transversais.

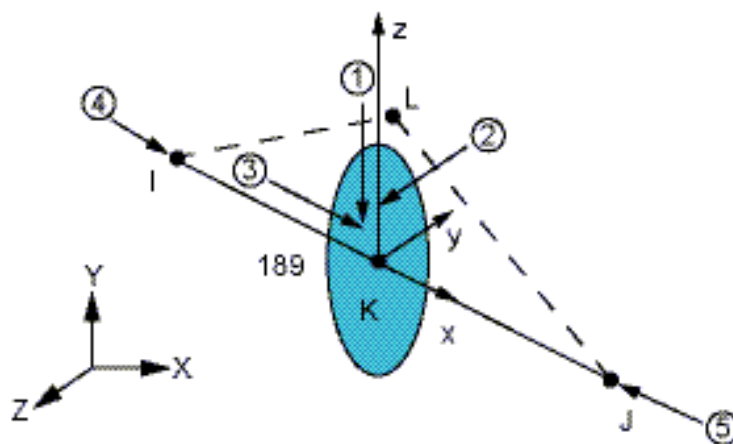


Figura 4.4: Elemento *beam189*, Fonte: Manual do ANSYS.

O par de contato foi inserido com o objetivo de simular as forças de atrito existentes na interface concreto - perfil metálico. Segundo DAVID (2007), os elementos *targe170* e *conta173* possuem capacidade de simular existência de pressão entre os elementos quando há contato, e separação destes quando não há contato.

Utilizou-se para representar as forças de atrito e coesão na interface aço-concreto, o par de contato modelado como contato do tipo superfície-superfície. No presente trabalho atribuiu-se ao concreto o elemento *targe170* (superfície alvo), isto é, dado dois elementos em contato, a superfície alvo pode ser definida como a mais rígida. Desta maneira, atribuiu-se à superfície mais deformável (banzo superior do perfil de aço) o elemento *conta173*, ficando ainda a cargo deste, representar além do contato, o deslizamento entre as superfícies 3-D. Este contato passa a ocorrer quando o elemento da superfície *conta173* penetra em um dos elementos alvo (*targe170*) na superfície alvo escolhida. As características geométricas do par de contato (vide figura 4.5) variam de acordo com o tipo de elemento sobre o qual estes serão aplicados.

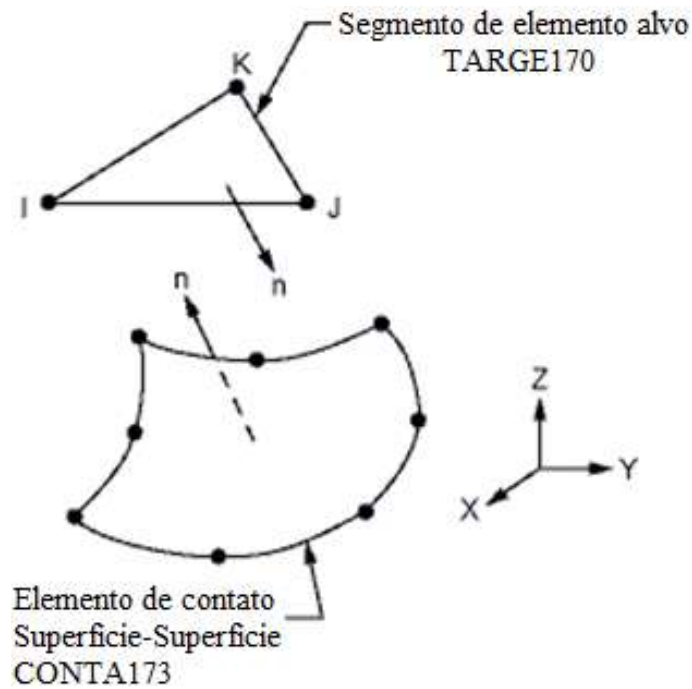


Figura 4.5: Elementos *targe170* e *conta173*, Fonte: Manual do ANSYS.

Para melhora na convergência dos valores das tensões, adicionaram-se elementos semi-rígidos aos conectores de cisalhamento, de maneira a combater as elevadas tensões identificadas nos conectores externos dos modelos preliminares.

O elemento *combin39* comporta-se como uma mola não linear unidirecional com capacidade de deflexão que pode ser utilizado em modelos tridimensionais, sob a forma de tração ou compressão com até três graus de liberdade por nó (translações nas direções nodais x, y e z), conforme figura 4.6. O elemento não permite considerar torção e possui ainda capacidade de simular grandes deslocamentos.

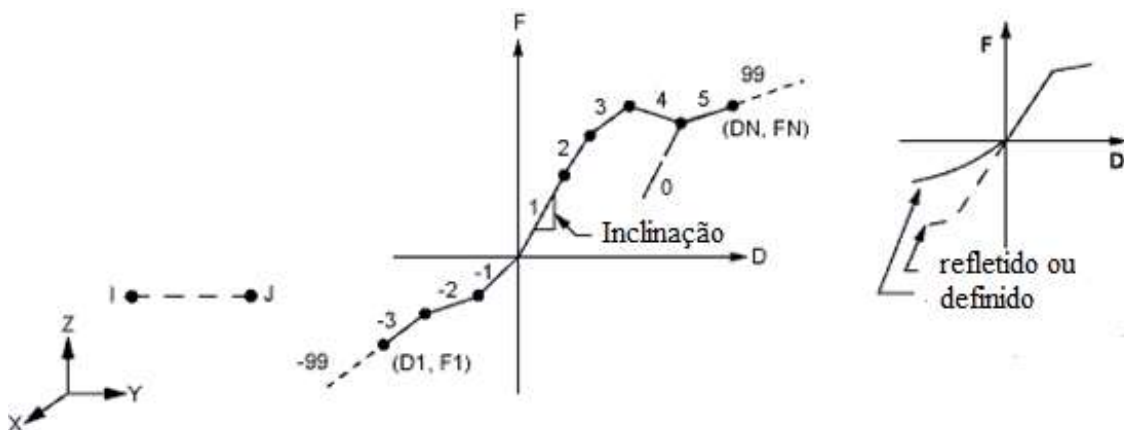


Figura 4.6: Elemento *combin39*, Fonte: Manual do ANSYS.

Baseado em LOPES (2012), substituiu-se a restrição em x dos conectores por uma mola com rigidez equivalente aos resultados obtidos nos ensaios PO_150_19_SL-1 e

PO_265_19_SL-2. Os demais graus de liberdade dos nós de cada conector (translação na direção y e z, e rotação nas três direções) permaneceram acoplados conforme ilustrado na figura 4.12.

Representou-se o comportamento da mola a partir de aproximações polinomiais de grau seis das curvas força *versus* deslocamento obtidas nos ensaios de *push out* em BATISTA e LANDESMANN (2016). A curva aproximada para o ensaio PO_150_19_SL-1 foi caracterizada pela equação $y = 0,0106x^6 - 1,0119x^5 - 3,2199x^4 - 33,478x^3 - 143,85x^2 - 318,96x + 35,75$, e para o protótipo PO_265_19_SL-2, o polinômio que representou a curva experimental foi $y = -18,884x^6 + 261,74x^5 - 1399,1x^4 + 3641,4x^3 - 4845,6x^2 - 3307,4x + 213,9$. Com o auxílio destas equações, retirou-se valores das abscissas espaçadas com intervalos iguais. Os valores das ordenadas foram obtidos através do respectivo valor da função, completando-se então os pares ordenados.

4.1.2 Discretização dos elementos finitos

No que diz respeito à discretização da laje de concreto, para a direção x (eixo longitudinal) do modelo foram estabelecidos um elemento entre cada conector de cisalhamento, acrescentando-se mais um elemento entre os apoios e a extremidade mais próxima. Tomando como referência a proposital coincidência dos elementos modelados, para o perfil metálico respeitou-se o alinhamento da malha proveniente da laje de concreto, para que fosse possível a concordância dos nós desses dois grupos. Assim sendo, manteve-se a quantidade de elementos modelados na direção longitudinal para o perfil metálico.

Na direção y (eixo vertical) a laje foi modelada com o objetivo de facilitar o acoplamento dos nós do conector com a laje. Isto é, seis elementos, quatro coincidentes com cada nó do corpo do conector, um com a cabeça do *stud bolt*, e junto ao capeamento da laje pré-moldada, empregou-se um elemento. Para o perfil metálico utilizou-se um elemento para representar a espessura dos banzos e na alma utilizou-se oito elementos.

Para a direção z foram estabelecidos uma quantidade de elementos de tal maneira que tivessem a mesma ordem de grandeza nas três dimensões de seus comprimentos. É importante ressaltar ainda que tais elementos foram arranjados de maneira simétrica em relação à alma do perfil (plano XY). O alinhamento dos elementos da laje de concreto partiu do banzo superior do perfil metálico. A figura 4.7 ilustra o explicado.

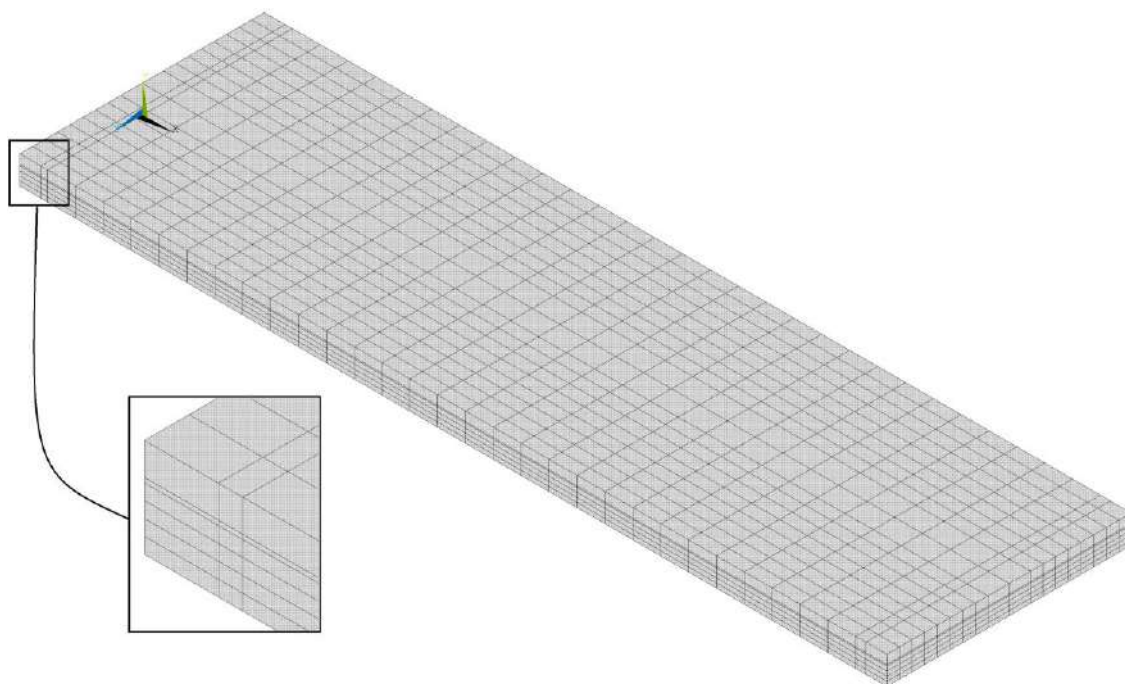


Figura 4.7: Discretização da laje de concreto.

Conforme exposto na revisão bibliográfica, a transferência de esforços cisalhantes é resistida primordialmente pela metade inferior do corpo do conector em relação à laje de concreto.

De acordo com o exposto na referência teórica do elemento *beam189*, para que este seja capaz de ilustrar tensões de tração, compressão, esforços de flexão dentre outros, é necessário que cada elemento seja inserido com três nós, sendo dois externos e um interno.

Os conectores de cisalhamento são constituídos por três elementos no total. O corpo do conector tem dois elementos, isto é, três nós extremos e dois nós intermediários e a cabeça possui um elemento com dois nós de extremidade e um nó intermediário, conforme pode-se observar na figura 4.8.

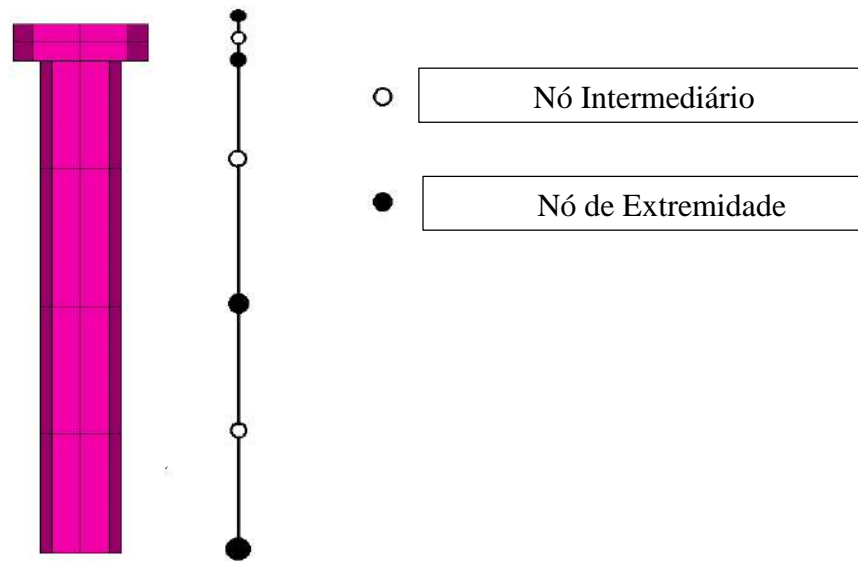


Figura 4.8: Discretização dos conectores de cisalhamento.

A discretização dos elementos de contato foi feita de modo a coincidi-la tanto com o banzo superior da viga metálica quanto da laje de concreto. A figura 4.9 ilustra o esclarecido.

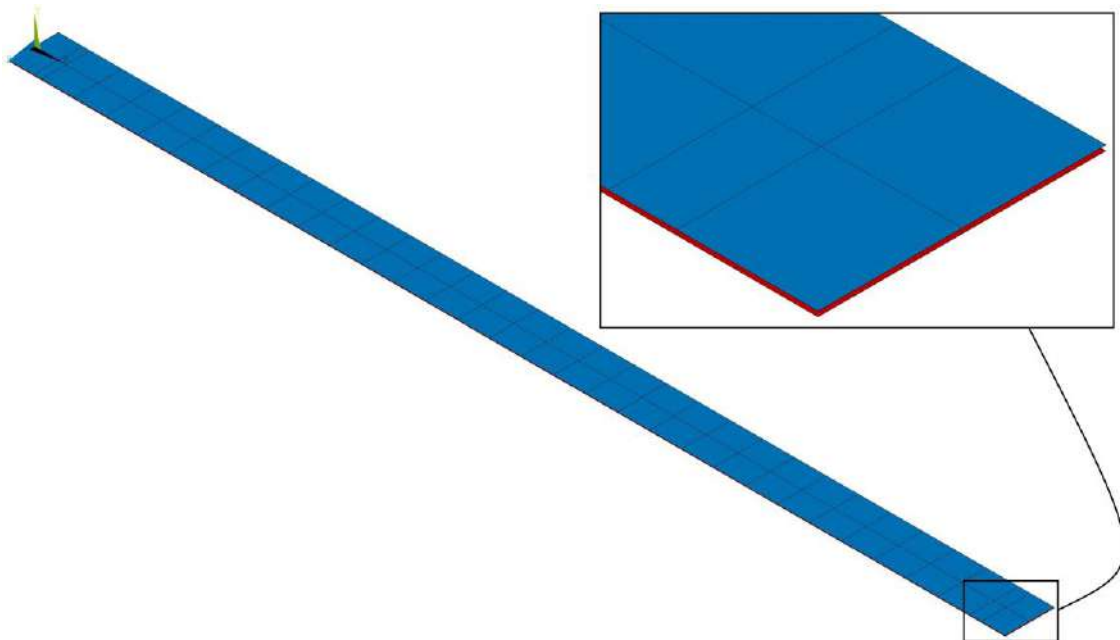


Figura 4.9: Malha de elementos finitos do par de contato.

4.1.3 Condições de contorno

No que diz respeito às restrições da viga mista, simularam-se no apoio da esquerda, restrições nas direções x e y , ou seja, um apoio do segundo gênero. Para o apoio da direita, adotou-se restrição apenas na direção y , isto é, um apoio do primeiro gênero

de acordo com a figura 4.10. Desta maneira é possível oferecer ao modelo ensaiado a condição de viga biapoiada.

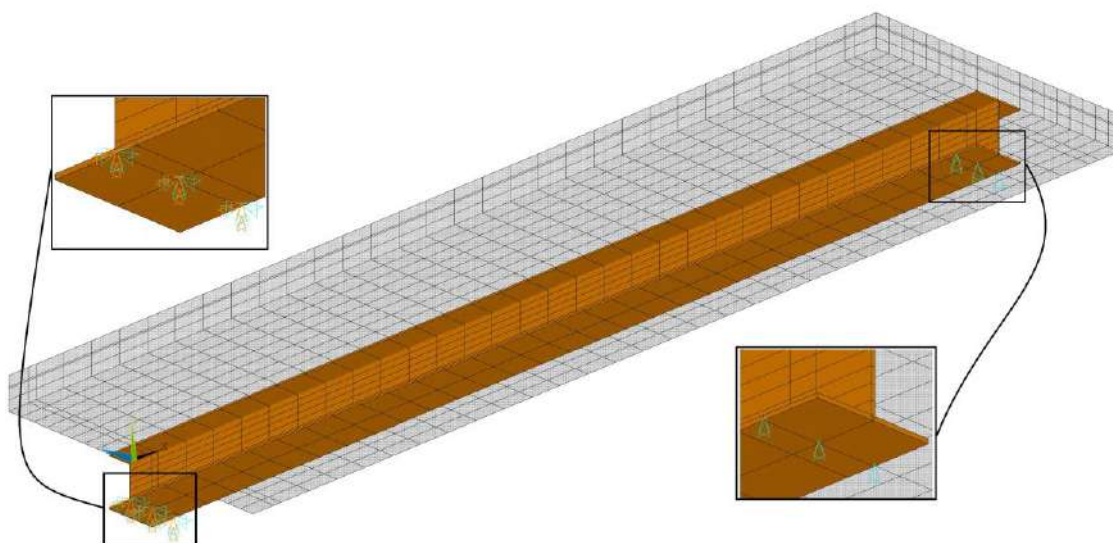


Figura 4.10: Condição de contorno da viga mista.

O carregamento foi dividido em duas etapas, criando-se então dois passos de cargas. Para o primeiro passo de carga, considerou-se o peso próprio dos componentes dos modelos e para tal, foram definidos valores para os pesos específicos de cada material (concreto e aço iguais a $2,4 \text{ E-5 kN/cm}^3$ $7,7 \text{ E-5 kN/cm}^3$ respectivamente) e impôs-se na sequência a ação gravitacional.

Para o segundo passo de carga foi simulada a atuação dos atuadores hidráulicos mecânicos nos nós superiores da laje de concreto, por meio de cargas concentradas. Atenta-se para o fato de que embora a carga na bibliografia seja sempre referida em um ponto, isto se torna inviável de ser obedecido tanto no ensaio experimental, quanto no modelo numérico. Primeiramente porque é necessário obedecer à geometria da célula de carga do atuador e em segundo lugar porque quando se aplica uma solicitação em apenas um nó da estrutura, esta consideração para modelos com um número maior de nós e elementos tende a gerar inconsistências numéricas no resultado do modelo, fazendo com que este passe a não convergir para valores de carregamentos abaixo do protótipo ensaiado. Assim sendo, a carga foi distribuída igualmente entre seis nós cujos centro de gravidade coincidissem com as coordenadas dos atuadores. A figura 4.11 ilustra o explicado. Em ambos os modelos, dadas as não linearidades adotadas nos materiais constituintes dos mesmos, as solicitações gravitacionais e mecânicas foram realizadas de maneira incremental.

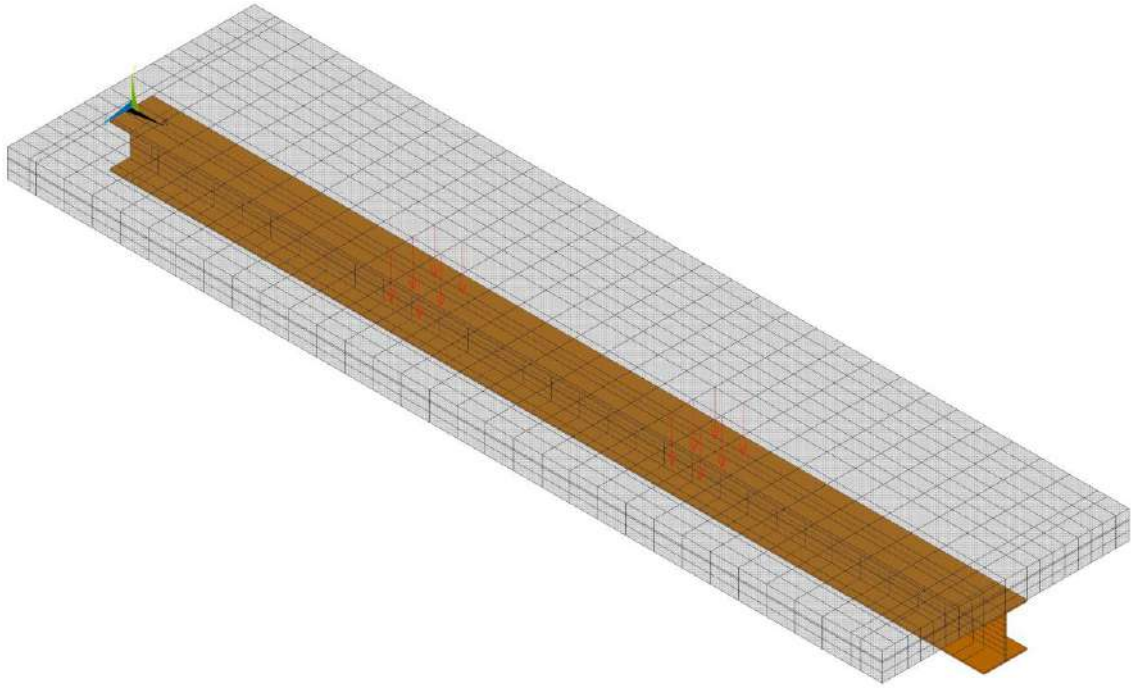


Figura 4.11: Solicitações na viga mista.

4.1.4 Vinculações do modelo

Conforme descrito anteriormente, acoplaram-se os diferentes grupos de elementos finitos do modelo através de nós coincidentes. A figura 4.12 e os comentários subsequentes têm por objetivo elucidar o que foi feito no modelo.

- Conectores - Laje de concreto: Estes elementos foram acoplados através dos nós coincidentes (exceção feita ao nó da base do conector que foi acoplado ao perfil metálico), através das translações referentes aos eixos x e z . No nó abaixo da cabeça do conector, acoplou-se adicionalmente a direção y , para que fosse possível evitar o fenômeno *uplift* (separação vertical na interface aço - concreto).
- Conectores – Perfil: O nó da base de cada conector foi acoplado ao nó correspondente ao banzo superior do perfil, compatibilizando todos os graus de liberdade, isto é, três translações e três rotações referentes aos eixos x , y e z . Desta maneira, provocou-se uma situação de engastamento perfeito do *stud bolt*.

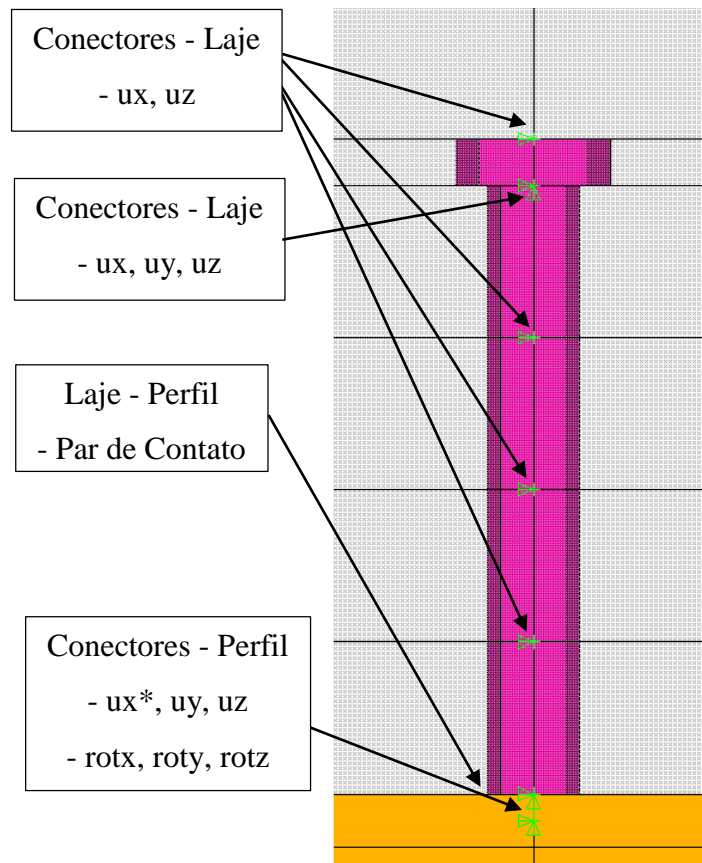


Figura 4.12: Acoplamento entre os conectores, concreto, perfil metálico e par de contato.

No que diz respeito aos acoplamentos dos nós da laje de concreto com o banzo superior do perfil metálico, estes foram simulados com auxílio do par de contatos. A ligação laje-perfil foi representada por meio do par de contato *target170* que deve estar associada ao elemento menos rígido, portanto associado à laje de concreto. Utilizou-se o elemento *conta173*, associando-o ao elemento mais flexível, neste caso o perfil de aço, conforme ilustrado na figura 4.12.

4.1.5 Relações constituintes

O *ANSYS* possibilita que se represente a não linearidade dos materiais de acordo com o critério da resistência de cada um destes.

Para tensões de tração, o modelo *concrete* (disponibilizado pela biblioteca interna do *ANSYS*) tem como base o modelo de WILLAM e WARNKE (1975) que permite a simulação da fissuração do concreto uma vez que este esteja submetido às tensões de tração. O comportamento do concreto foi representado pela relação multilinear de encruamento isotrópico usando o critério de escoamento de von Mises. A curva tensão x deformação foi montada de acordo com diretrizes descritas em GATTESCO (1999). O

comportamento do concreto foi dividido em duas partes: para a primeira parte (para valores da deformação específica ε maiores que zero e inferiores a ε_{c1}) utilizou-se a equação (1) para discriminar as tensões até a tensão máxima de compressão,:

$$\sigma_c = \frac{k \cdot \varepsilon_0 - \varepsilon_0^2}{1 + (k - 2) \cdot \varepsilon_0} \cdot f_{ck} \quad (1), \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_0 \leq \varepsilon_u$$

Onde:

$$k = E_c \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck};$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1};$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{cu} / \varepsilon_{c1}.$$

Na segunda parte do gráfico obtiveram-se tensões de compressão para deformações específicas superiores a ε_{c1} e inferiores a deformação específica última à compressão (ε_{cu}), de acordo com QUEIROZ *et al.* (2007). O valor da força de compressão (f_c) para a deformação última (ε_{cu}), deve sofrer um acréscimo total de 0,005 kN/cm², a fim de evitar problemas numéricos devido a um fluxo de escoamento sem restrições. A figura 4.13 (a) ilustra o gráfico adotado. Também de acordo com os autores supracitados, adotou-se para valores de coeficiente de cisalhamento para fissura aberta e coeficiente de cisalhamento para fissura fechada 0,2 e 0,6 respectivamente. Para a resistência uniaxial à tração, tomou-se como valor 1/10 do valor máximo de resistência à compressão obtido em ensaio. Foi desabilitado a resposta do modelo *concrete* à compressão, disponibilizada pelo ANSYS, adotando-se então f_c igual a -1. Para o concreto sob compressão, foi adotado o critério de plastificação de von Mises, com o objetivo de evitar instabilidades numéricas.

Para o perfil de aço e para os conectores de cisalhamento adotou-se o modelo bilinear com encruamento isotrópico baseado no critério de von Mises. No perfil laminado, os *stud bolts* e a tela q138 foram utilizadas as tensões de escoamento iguais à 34,5 kN/cm², 41,5 kN/cm² e 60 kN/cm² respectivamente. Os três materiais possuem módulo de elasticidade igual à 20500 kN/cm². Os gráficos tensão x deformação ilustrados nas figuras 4.13 (b), 4.13 (c) e 4.13 (d) possuem um comportamento elastoplástico perfeito.

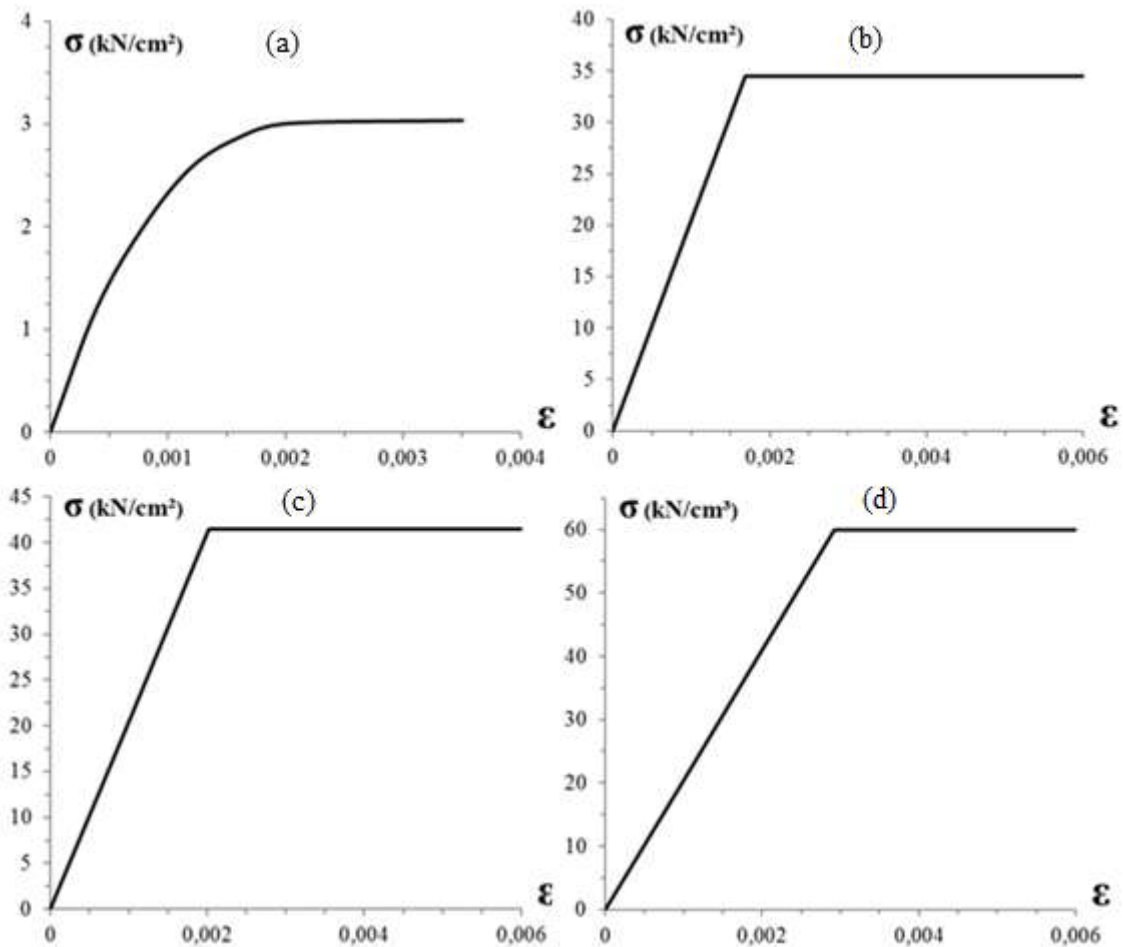


Figura 4.13: Diagrama tensão x deformação para: (a) concreto, (b) perfil metálico, (c) *stud bolt* e (d) tela q138.

4.2 Viga mista V_265_19_SL

Para validar o segundo código utilizaram-se resultados do ensaio da viga mista VM_265_19_SL para a comparação *numérico x experimental*, e implementaram-se as modificações necessárias na rotina como altura da laje de concreto e diâmetro dos alvéolos.

Os elementos finitos usados foram os mesmos do primeiro código, ou seja, *solid65*, *shell181*, *beam189*, *targe170*, *conta173* e *combin39*.

Para a discretização do modelo na direção *y* a laje de concreto foi modelada com sete elementos, quatro coincidentes com cada nó do corpo do conector, um coincidente com a cabeça do *stud bolt* e quanto ao capeamento da laje pré-moldada, empregou-se dois elementos. Ainda para o concreto nenhuma alteração na quantidade de elementos no sentido longitudinal (eixo *x*) e transversal (eixo *z*) foi necessária. A figura 4.14 ilustra a

disposição dos elementos na laje de concreto. Manteve-se a estratégia da malha do perfil metálico e dos conectores de cisalhamento.

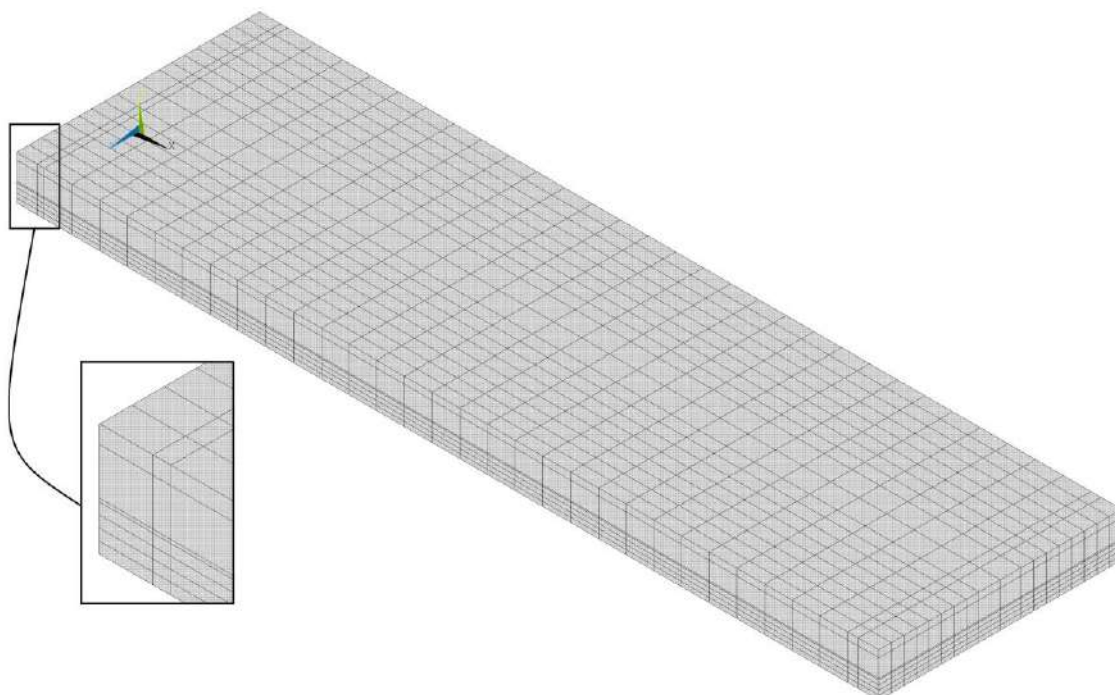


Figura 4.14: Grupos de elementos finitos – *solid65*.

A estratégia de acoplamento dos elementos seguiu a mesma lógica da figura 4.12, apenas com a mudança do gráfico força x deslocamento uma vez que este foi retirado do experimento PO_265_19_SL-1.

As condições de contorno, solicitações e relações constitutivas dos materiais, seguiram as mesmas diretrizes do modelo V_150_19_SL.

4.3 Característica do contato entre laje e viga

Conforme a evolução dos códigos, notou-se que este mecanismo ofereceu um significativo aumento de rigidez ao sistema. A modelagem do par de contato *conta173* e *targe170*, proporcionou o surgimento de tensões normais de compressão na interface comum à laje de concreto e a viga metálica e também permitiu a separação dos elementos. De acordo com o ANSYS, o deslizamento que passou a ocorrer entre o banzo superior e a laje de concreto é governado pela Lei de Coulomb, que por sua vez é representada através das equações (2) e (3):

$$\tau_{lim} = \mu P + c \quad (2)$$

$$|\tau| \leq \tau_{lim} \quad (3)$$

Onde:

τ_{lim} é a tensão cisalhante limite;

τ é a tensão cisalhante equivalente;

μ é o coeficiente de atrito;

P é a pressão normal;

c é a coesão.

Quando a tensão cisalhante limite foi excedida, passou a haver deslizamento na interface. Entende-se por coesão a resistência ao deslizamento exercida, independentemente de haver ou não pressão normal à superfície.

Segundo recomendações de BALTAY e GJELSVIK (1990) para o coeficiente de atrito entre o aço e o concreto adotou-se o valor 0,4 e para a coesão, utilizou-se 0,18 kN/cm². Valores estes que já foram adotados pelos trabalhos antecessores a este, tais como KOTINDA (2006) e DAVID (2007).

Dentre os diversos métodos de solução para o contato colocados à disposição pelo ANSYS, o escolhido para o presente trabalho foi o “*Pure Lagrange Multiplier*”. Este método é capaz de representar a penetração nula quando o contato está *fechado*, ainda que exista contato entre as partes, e também deslizamento nulo enquanto a tensão cisalhante limite não for alcançada.

Ainda segundo KOTINDA (2006) e DAVID (2007), para a representação do que seria um contato *fechado* ou *aberto*, o método possui dois parâmetros controladores: FTOLN (que seria um valor mínimo de penetração para que o contato ainda seja considerado como fechado, adotou-se -0,01 como valor) e TNOP (referente a um valor mínimo de tração, perpendicular à superfície de contato para o qual modifica o status para *aberto*).

4.4 Aspectos da análise não linear

O carregamento foi aplicado de forma incremental devido a consideração da não linearidade física dos materiais que constituíram os modelos. O incremento de carga foi controlado através do comando conhecido como “*Automatic Load Stepping*”, que permite ao ANSYS determinar os tamanhos apropriados para interromper os passos do carregamento (*load step*). Diminuir o tamanho da etapa do carregamento, geralmente resulta em melhor acurácia dos resultados. Como aspecto negativo, pode-se mencionar um provável aumento de tempo computacional. Os passos do carregamento subsequentes

são determinados com base na resposta do material devido ao incremento de carga anterior. Uma vez que esta opção fora ativada, cabe então ao usuário fornecer o primeiro passo de carga a ser adotado pelo ANSYS, e na sequência o máximo número de subpassos do carregamento (*maximum number of substeps*). Este valor para o programa caso a solução não convirja. A documentação do ANSYS esclarece que o “*Automatic Load Stepping*” reduz o tamanho do incremento caso a previsão do número de iterações ultrapasse o limite fornecido, deslocamentos excessivos ou incrementos de deformações plásticas superiores a 15%. Se a análise convergir na primeira iteração o valor do incremento poderá ser elevado.

Testaram-se para os modelos os cinco métodos (*automatic* – opção padrão na qual o programa escolhe a melhor opção, *full* – Newton Raphson pleno, *modified* – Newton Raphson modificado, *initial* – a matriz de rigidez anteriormente calculada é utilizada e *unsymmetric* – Newton Raphson pleno é utilizado com a matriz assimétrica de elementos onde a opção assimétrica é possível) para resolução da análise não linear disponibilizados pelo *software*, com maior destaque para o *Newton Raphson Full* (pleno), que se caracteriza pela atualização da matriz de rigidez tangente à cada iteração.

Para o critério de convergência, estabeleceu-se com base no vetor de resíduo de forças e momentos $\{R\}$, condição esta a ser satisfeita quando a norma deste vetor, $\|\{R\}\|$, atingir valores inferiores ou iguais à tolerância estabelecida, que no presente trabalho fora um por cento da norma do vetor de forças e momentos aplicados ($0,001 \cdot \|\{F^a\}\|$) e a norma utilizada fora a quadrática $\|\{R\}\|_2 = (\sum R_j^2)^{1/2}$.

Para resolução das equações de sistemas lineares utilizou-se o método “*Direct Sparse*”, recomendado para simulações que possuem vários tipos de elementos. Este método consiste em eliminações diretas, que decompõem a matriz de rigidez em matrizes triangulares, superior e inferior ($K = LU$). Como a matriz de rigidez é do tipo esparsa (comumente empregada no método dos elementos finitos), realiza-se uma reordenação das linhas da matriz K antes da sua decomposição em LU , tendo como objetivo minimizar o número de operações, isto é, otimizando o processo.

5 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Tendo como objetivo validar os modelos computacionais descritos no capítulo 4, os resultados numéricos foram comparados com os ensaios experimentais descritos no capítulo 3. O código de programação caminhou no sentido de evoluir a modelagem, de tal maneira que fosse possível aproximar as diferenças de resultados que as análises de cunho comparativo *numérico x experimental* trazem.

5.1 Descrição das vigas mistas simuladas

No presente trabalho validaram-se os códigos numéricos para as vigas mistas V_150_19_SL e V_265_19_SL. Para ambos modelos das vigas citadas optou-se como estratégia de modelagem a evolução sucessiva da análise, a fim de que seja possível analisar particularmente a inserção de cada elemento e conseqüentemente o grau de aproximação que este possa vir a ter com os resultados experimentais. De tal forma que todos os modelos possuem as mesmas dimensões, propriedades físicas, mecânicas, solicitações externas, condições de contorno e propriedades da análise não linear. O que os diferencia, portanto, é a disposição dos elementos.

5.2 Comparação de dados numéricos e experimentais

Adotou-se como primeiro parâmetro utilizado para validação dos modelos numéricos, a deflexão linear vertical no meio do vão em função da aplicação da solicitação (item 5.2.1). Na seqüência, analisou-se o deslizamento relativo entre a laje de concreto e o perfil metálico, nas extremidades das vigas mistas (item 5.2.2).

A elaboração de modelos numéricos mais sofisticados nos proporcionou ir além da comparação *numérico x experimental*, uma vez que se tornou razoável elucidar uma gama de resultados não coletados durante o ensaio. No presente trabalho tornou-se possível observar a distribuição das tensões longitudinais na seção a meio vão (item 5.2.3), e também a variação das tensões em cada elemento, i.e., na laje de concreto, perfil metálico e conectores de cisalhamento (item 5.2.4). No item 5.2.5 tem-se uma análise a respeito dos indicativos de propagação da fissuração na laje de concreto, fornecido com o auxílio do elemento *solid65* do ANSYS.

5.2.1 Deflexão linear vertical no meio do vão

5.2.1.1 Viga Mista V_150_19_SL

De acordo com os valores obtidos por meio dos ensaios experimentais, a força máxima resistida pelo protótipo V_150_19_SL obteve uma média de 430 kN, com seu respectivo deslocamento vertical igual à aproximadamente 65 milímetros. A figura 5.1 ilustra o comportamento das curvas numérica e experimental ao longo da fase elástica e plástica da viga mista ensaiada, assim como comparação com o momento fletor resistente segundo a NBR 8800 (2008). Observa-se claramente conforme o avanço do ensaio, que as curvas possuem ótima aproximação durante todo o comportamento elástico e início da fase plástica. A partir do carregamento igual à aproximadamente 350 kN a distância entre as curvas se acentua, chegando a diferença vertical máxima em torno de 20 kN ou 6%. Assim sendo, ambas as curvas mantêm bom nível de aproximação, mas com distâncias entre estas superiores às fases anteriores. A configuração deformada do modelo V_150_19_SL pode ser apreciada na figura 5.2. Para a verificação do momento resistente não foram adotados coeficientes de segurança.

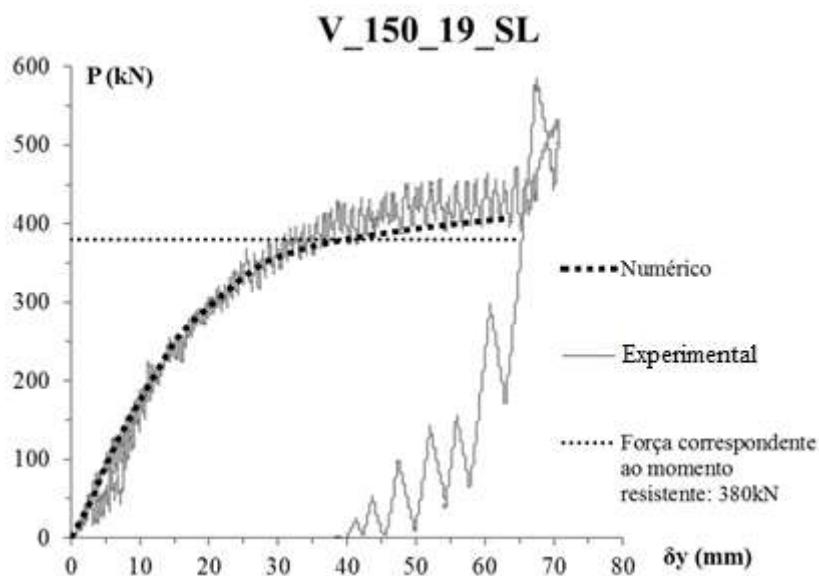


Figura 5.1: Gráfico força x deslocamento comparativo entre o protótipo experimental e o modelo numérico.

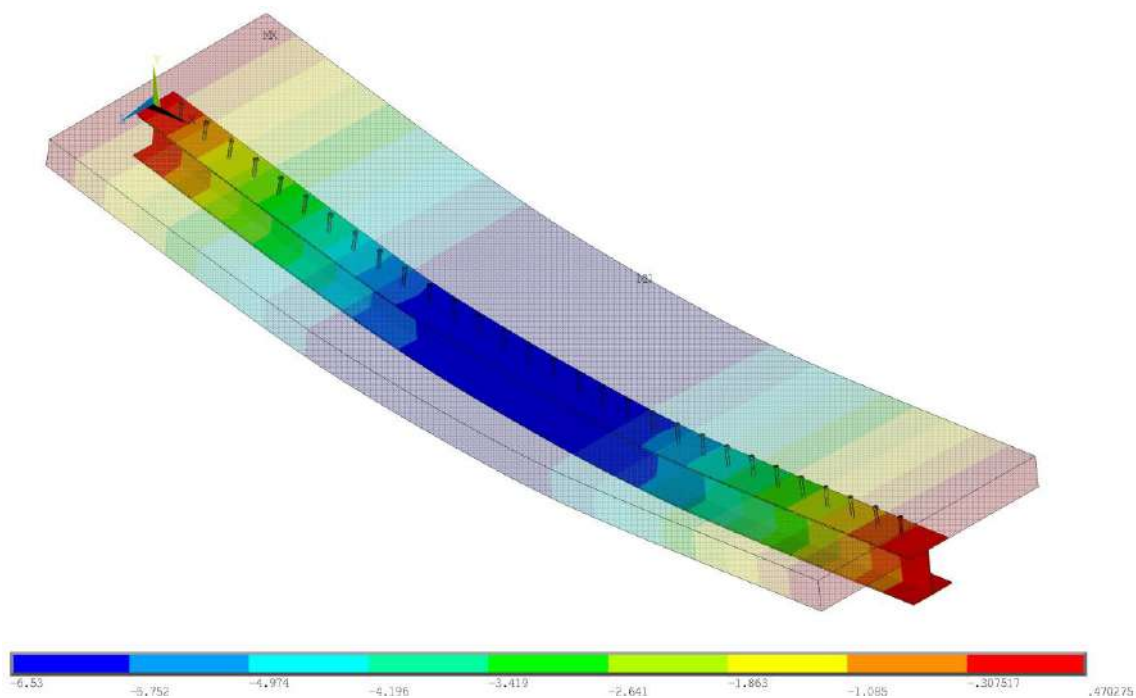


Figura 5.2: Configuração deformada do modelo V_150_19_SL.

Na tabela 5.1 encontra-se um resumo comparativo das cargas e deslocamentos máximos apresentados na campanha experimental e modelagem numérica.

Tabela 5.1: Comparativo *numérico x experimental* para o protótipo V_150_19_SL.

Carga máxima-P(kN)		Diferença(%)	Deslocamento máximo- δ (mm)		Diferença(%)
Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
430	407	5,3	65	64	1,5

5.2.1.2 Viga mista V_265_19_SL

Para o modelo V_265_19_SL constituída pela laje de concreto armado, conectores de cisalhamento, armadura passiva no capeamento da laje, molas nos conectores de cisalhamento e par de contato na interface aço-concreto para a viga mista, também se obtiveram boas aproximações dos resultados experimentais ao longo de toda trajetória do ensaio, conforme ilustrado na figura 5.3. O carregamento máximo do protótipo V_265_19_SL atingiu o valor aproximado de 530 kN, com respectivo deslocamento igual à 38 milímetros.

A figura 5.3, através do comparativo entre os ensaios numérico e experimental, ilustra o comportamento ao longo da fase elástica e plástica da viga mista ensaiada, assim como comparação com o momento fletor resistente segundo a NBR 8800 (2008). Observa-se claramente conforme o avanço do ensaio, que as curvas possuem ótimas aproximações durante boa parte do comportamento elástico e início da fase plástica, isto

é, até o carregamento igual à aproximadamente 330 kN e deslocamento igual a 13 milímetros. Após este valor ambas as curvas mantêm bom nível de proximidade, mas com distâncias entre estas superiores aos estágios anteriores. A partir do carregamento igual à aproximadamente 360 kN a distância entre as curvas se acentua, chegando à diferença vertical máxima em torno de 50 kN ou 10%. Assim sendo ambas as curvas ainda mantêm bom nível de aproximação, mas com distâncias entre estas superiores às fases anteriores. A figura 5.4 ilustra a configuração deformada para o modelo da miga mista V_265_19_SL.

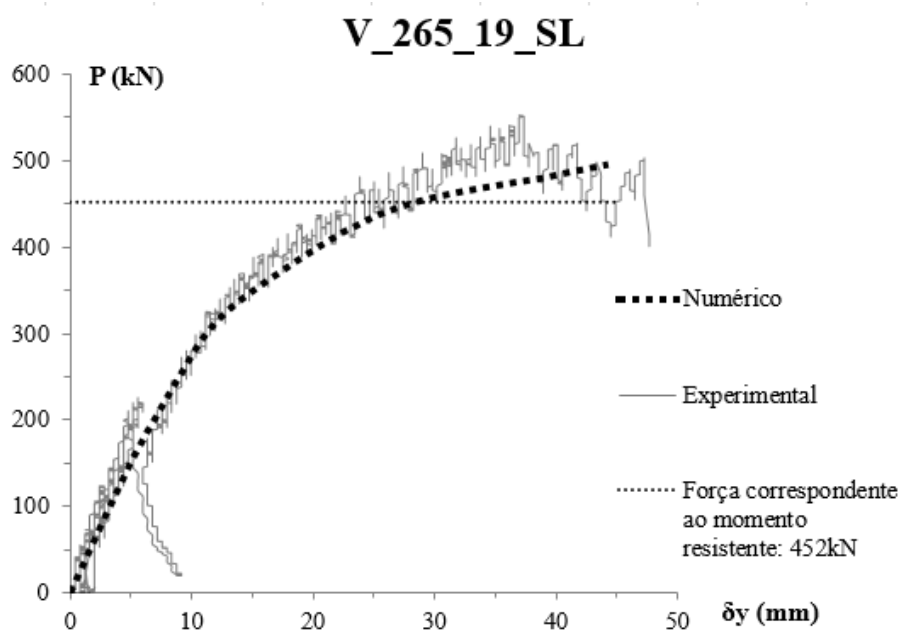


Figura 5.3: Gráfico força x deslocamento comparativo V_265_19_SL.

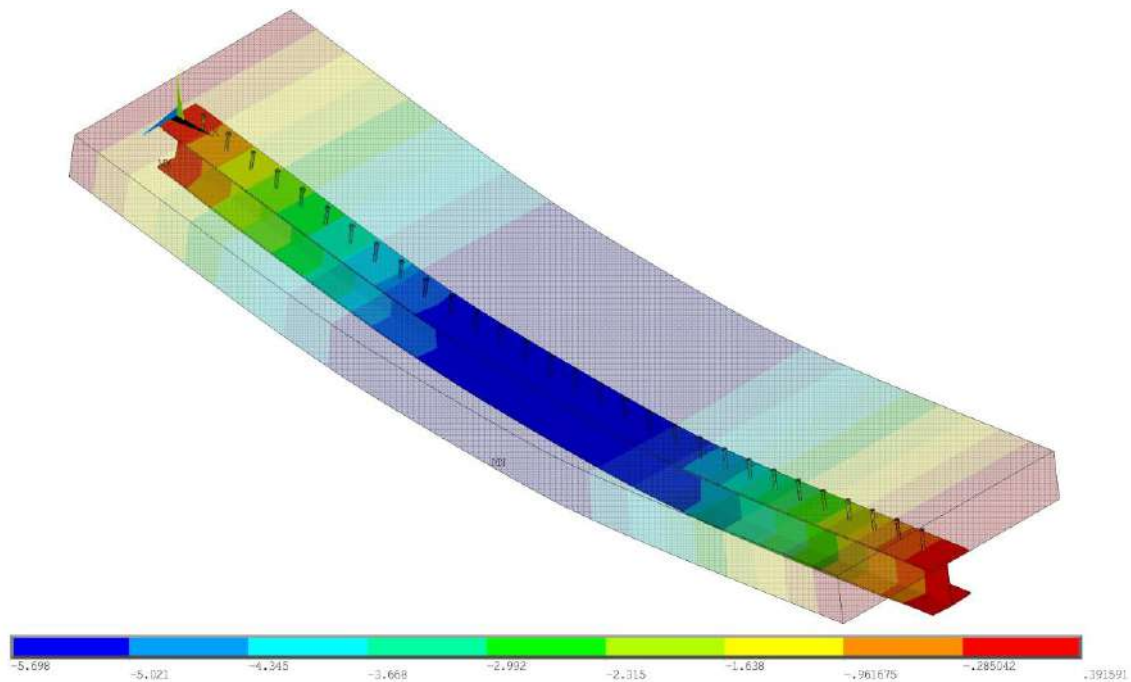


Figura 5.4: Configuração deformada do modelo V_265_19_SL.

Na tabela 5.2 inseriu-se um resumo dos valores das curvas *numérico* x *experimental* para fins comparativos de carregamentos últimos e flechas máximas.

Tabela 5.2: Comparativo *numérico* x *experimental* para o protótipo V_265_19_SL.

Carga máxima-P(kN)		Diferença(%)	Deslocamento máximo-(mm)		Diferença(%)
Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
530	478	9,8	38	37	2,6

Ressalta-se que para o segundo ensaio os resultados numéricos obtidos por meio da simulação computacional apresentaram diferenças inferiores à 10%, quando comparados com os resultados experimentais, o que no presente trabalho foi dado como suficiente para validação do modelo numérico.

Para a modelagem computacional das duas vigas mistas nota-se uma satisfatória aproximação durante toda a extensão das curvas experimental e numérica. Em ambos modelos se verifica uma tendência dos modelos em resistirem às solicitações de maneira solidária.

5.2.2 Deslizamento horizontal relativo entre a laje de concreto e ao perfil de aço

Apresentou-se em BATISTA e LANDESMANN (2016) curvas que se referem ao escorregamento relativo (na extremidade esquerda e direita dos protótipos) que ocorre entre a laje e o perfil metálico. A seguir compararam-se os resultados de acordo com a evolução dos modelos numéricos.

5.2.2.1 Viga mista V_150_19_SL

A figura 5.5 apresenta uma simetria nos deslizamentos dos dois lados, tanto nos valores numéricos quanto nos valores experimentais. Até o carregamento igual à 200 kN isto é, durante a fase elástica, as curvas *numérico x experimental* apresentaram boas aproximações. Para carregamentos superiores aos 200 kN o distanciamento entre as curvas tende a aumentar. Até o carregamento igual à 150 kN nota-se que o deslizamento relativo é igual a zero, evidenciando que a partir deste momento a aderência entre o aço e o concreto na interface para de funcionar.

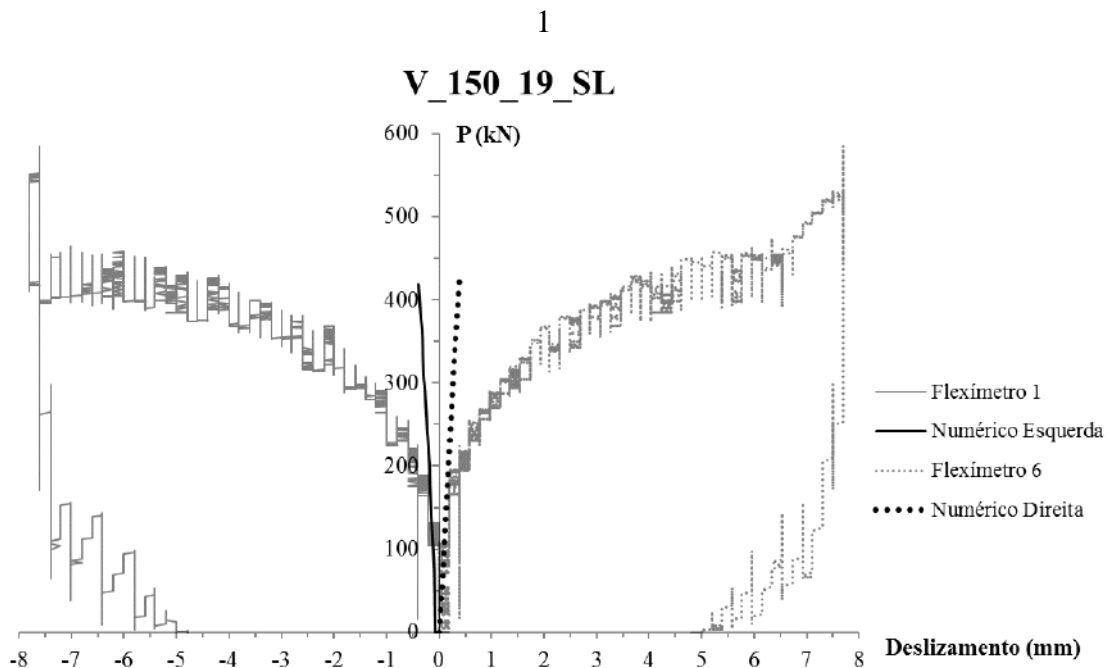


Figura 5.5: Gráfico força x deslizamento comparativo V_150_19_SL.

5.2.2.2 Viga mista V_265_19_SL

Para a segunda viga mista observa-se que os resultados numéricos se comportaram de maneira semelhante a primeira, com maiores aproximações dos valores numéricos e

experimentais até o carregamento igual à 200 kN, entretanto a mesma margem não pode ser observada no lado esquerdo conforme ilustrado na figura 5.6. Após a entrada do ensaio na fase plástica e com a consequente falha da aderência na interface aço-concreto, as curvas experimentais passam a se comportar de certa forma com alguma simetria, mas ainda com algum distanciamento em relação às curvas numéricas.

KOTINDA (2006) atribui diferenças entre resultados numéricos e experimentais a prováveis valores diferentes que cada protótipo de viga deva apresentar no que diz respeito às tensões de adesão relativas ao deslizamento na interface. Ainda assim as diferenças notadas no presente trabalho são de frações de milímetros. Para uma melhora na correlação dos resultados na fase plástica do ensaio, acredita-se que a inclusão de valores da coesão e do coeficiente de atrito entre o aço e concreto calibrados para o ensaio em análise acrescentaria significativamente. Diante da dificuldade de obter estes coeficientes, utilizou-se valores já utilizados em outros trabalhos de outros autores.

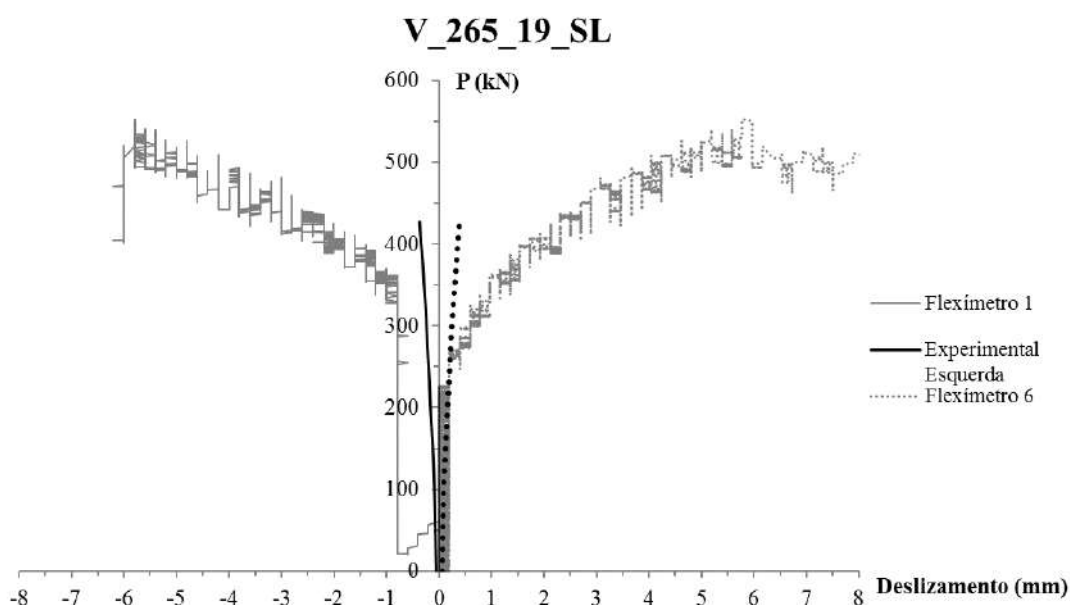


Figura 5.6: Gráfico força x deslizamento comparativo V_265_19_SL.

5.2.3 Tensões longitudinais no meio do vão

Serão apresentadas a seguir as distribuições das tensões normais à seção transversal localizada na metade do vão das vigas mistas V_150_19_SL e V_265_19_SL para o máximo carregamento (indicados nos gráficos) que cada modelo suportou. Os gráficos foram plotados de maneira que a abscissa coincidissem com a interface comum à

laje de concreto e ao perfil metálico. Portanto, a ordenada representa a seção transversal no meio do vão da viga mista.

5.2.3.1 Viga Mista V_150_19_SL

No modelo de ensaio adotado, a viga mista biapoiada é submetida a dois carregamentos concentrados distantes 2111 milímetros das extremidades esquerda e direita, formando um arranjo simétrico em relação à seção transversal no meio do vão (vide figura 3.9). Esta configuração clássica proporciona no trecho entre as seções de aplicação da carga, uma situação de flexão pura, isto é, quando atua unicamente momento fletor. Para as seções localizadas entre as extremidades e os atuadores, diz-se que há flexão simples, ou seja, as seções são solicitadas simultaneamente por momento fletor e força cortante.

A figura 5.7 permite analisar que no modelo V_150_19_SL nota-se uma proximidade da distribuição das tensões com o regime elastoplástico, isto é, para momentos flectores suficientemente elevados, as fibras internas tanto da laje de concreto quanto do perfil metálico, ainda estariam trabalhando no regime elástico (tensões e deformações proporcionais-obedecem a lei de Hooke). Enquanto que as fibras externas atingem o limite de escoamento do material. Observa-se que tanto as tensões no concreto quanto as tensões no perfil encontram-se muito próximas das tensões de escoamento, ou seja, 2,2 kN/cm² (compressão) e 34,5 kN/cm² (tração) respectivamente.

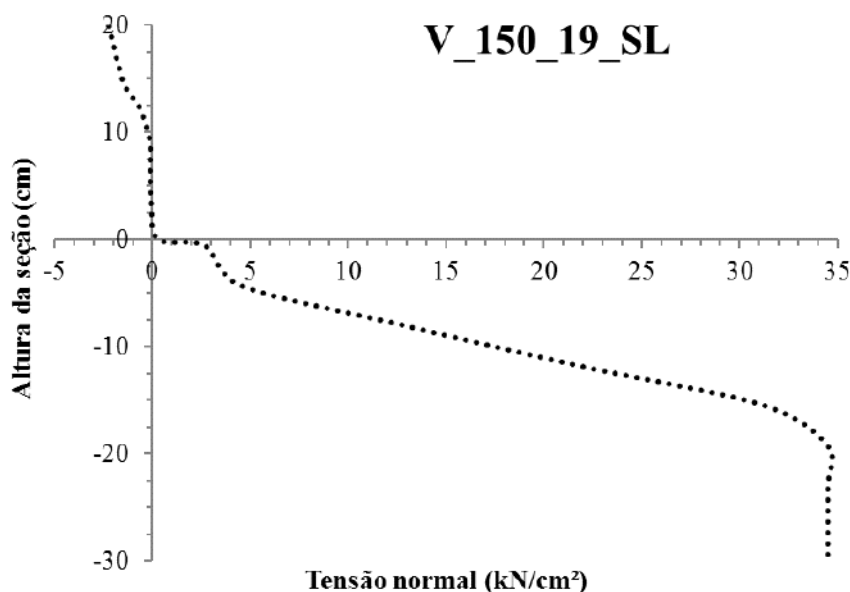


Figura 5.7: Distribuição das tensões normais à seção transversal no meio do vão do modelo V_150_29_SL.

Para o modelo numérico V_150_19_SL, nota-se uma tendência a formação de uma superfície neutra (conjunto de fibras que formam uma superfície plana que não estão submetidas a tensões normais), e esta se posiciona entre a interface comum à laje e ao perfil e ao capeamento da laje. A interseção deste plano neutro com a seção transversal a meio vão recebe o nome de eixo neutro e tende-se a localizar na laje de concreto. Dado tanto o baixo deslizamento na interface, quanto o afastamento vertical do aço e do concreto, os componentes resistiram aos esforços solicitantes de maneira solidária. Desta maneira concluímos que a modelagem numérica referente ao protótipo V_150_19_SL funcionou dentro do conceito da interação total ou completa. No que diz respeito ao grau de conexão da viga mista, de acordo com OEHLERS e BRADFORD (1995) o protótipo funcionou no primeiro caso, no qual a resistência da seção do perfil metálico F_s é menor que a resistência da seção de concreto F_c conforme ilustra-se abaixo:

$$F_c = A_c \cdot f_{ck} \quad (4)$$

$$F_c = 4\,728,7 \text{ kN}$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (5)$$

$$F_s = 2\,816,9 \text{ kN}$$

Assim sendo, o aço tende a escoar antes do concreto, pois este ainda se encontra parcialmente comprimido. A resistência do concreto foi limitada pela resistência do aço e conforme visto anteriormente, a linha neutra encontra-se no concreto.

5.2.3.2 Viga Mista V_265_19_SL

Para o segundo modelo validado obteve-se tensões de compressão no concreto em torno de 1,53 kN/cm², assim como tensões de tração no banzo inferior do perfil metálico em torno de 34 kN/cm², conforme ilustrado na figura 5.8.

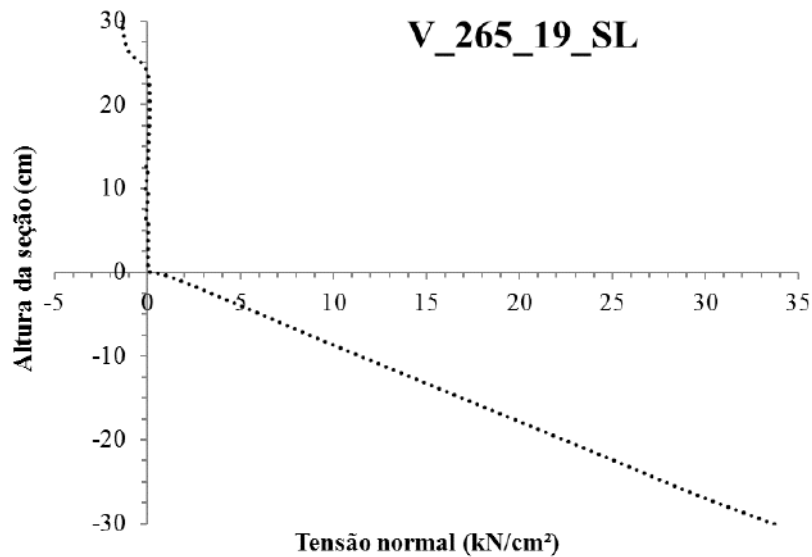


Figura 5.8: Distribuição das tensões normais à seção transversal no meio do vão do modelo V_265_19_SL

A modelagem numérica referente ao protótipo V_265_19_SL também funcionou dentro do conceito da interação total ou completa, isto é, a laje de concreto e o perfil metálico resistem às solicitações de maneira solidária. No que diz respeito ao grau de conexão da viga mista, de acordo com OEHLERS e BRADFORD (1995) a viga mista também comportou-se no primeiro caso, isto é, a resistência da seção do perfil metálico F_s é menor que a resistência da seção de concreto F_c conforme ilustra-se abaixo:

$$F_c = A_c \cdot f_{ck} \quad (4)$$

$$F_c = 9\,799,65 \text{ kN}$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (5)$$

$$F_s = 2\,815,9 \text{ kN}$$

Desta maneira o aço tende a aproximar-se do patamar de escoamento antes do concreto, uma vez que este ainda se encontra parcialmente tensionado. Assim sendo, a resistência do aço limita a resistência alcançada pelo concreto.

5.2.4 Variação das tensões nos elementos

Este tópico tem como objetivo analisar de maneira isolada cada elemento após o final do ensaio. Foi feita uma investigação sobre o porquê de mesmo após a inclusão dos conectores, adição da armadura passiva e inclusão do par de contato, modelos antecessores não foram capazes adentrar a fase plástica do ensaio.

5.2.4.1 Viga mista V_150_19_SL

Para os máximos carregamentos, conseqüentemente com o deslizamento entre a laje de concreto e o perfil de aço, de acordo com a bibliografia clássica consultada, os conectores mais externos do modelo numérico, a laje de concreto e o perfil metálico aproximaram-se de suas resistências características máximas, ou seja, avizinharam-se da plastificação. Em modelos anteriores aos dois apresentados neste trabalho, os conectores de cisalhamento mais externos ultrapassaram bastante as suas resistências características máximas, ou seja, plastificaram-se e continuaram se deformando sem romper, o que permitiu aos conectores vizinhos absorverem parte do fluxo de cisalhamento.

Dá-se o nome de singularidade de tensões a capacidade que acidentes na geometria de uma determinada peça (arestas, furos, rebites, restrições e etc.) possuem de acumular elevadas e fictícias tensões. Em alguns casos este aumento das tensões é causado por algum tipo de falha na malha de elementos finitos, geralmente por falta de refinamento. Em outras análises, este acúmulo é inerente à geometria do modelo trabalhado. Ao se deparar com uma situação dessa é muito comum atribuir estas incongruências à falta de refino da malha de elementos finitos. Uma maneira simples para verificar a qualidade da geometria da malha é aumentar a discretização desta e verificar a convergência dos resultados, que em circunstâncias usuais, tendem a se aproximarem cada vez mais do resultado “real”. Entretanto, em alguns casos, o refino da malha não converge para um valor desejado, o que nos aproxima do caso da singularidade de tensões.

O princípio de Saint-Venant afirma que tensões e deformações, provocadas em pontos suficientemente distantes da região da aplicação do carregamento, serão iguais às tensões e deformações produzidas por quaisquer carregamentos aplicados que tenham a mesma resultante estaticamente equivalente e sejam aplicadas ao corpo dentro da mesma região. Em outras palavras, este princípio afirma que os efeitos localizados causados por

qualquer carga que age sobre um corpo serão dissipados ou atenuados em regiões suficientemente afastadas do ponto de aplicação da carga. Além do mais, a distribuição da tensão resultante nessas regiões será a mesma que a causada por qualquer outra carga estaticamente equivalente aplicada ao corpo dentro da mesma área localizada.

Ao se notar o acúmulo de tensões nos conectores externos de modelos numéricos antecessores, aumentou-se a discretização da malha do conector e conseqüentemente da laje de concreto (no eixo y), de dois elementos, passou-se para três e ainda assim não se observou uma melhora significativa na representatividade das tensões dos conectores. E, assim sendo, impedindo o modelo de suportar carregamentos mais elevados.

Ficou evidente que havia uma concentração de tensões no eixo dos conectores externos que se atenuava nas três direções a partir do nó na base do conector, concordando com o princípio supracitado. De maneira usual, pode-se admitir que haverá uma uniformização das tensões, a uma distância da dimensão do maior lado da seção transversal de onde fora aplicada a carga.

A solução adotada foi inserir elementos semi-rígidos na base dos conectores, com a expectativa de diminuir as tensões nos *stud bolts* mais externos e, conseqüentemente, proporcionar ao modelo computacional a sua entrada no regime plástico. Além do ganho significativo de carga última quando se compara os modelos anteriores, observa-se ainda uma melhora no comportamento das tensões do perfil, da laje de concreto e dos conectores, uma vez que todas se avizinham dos seus respectivos patamares de escoamentos sem discrepâncias. Importante ressaltar que a expectativa se confirma quando observamos que as tensões nos conectores atingem valores mais factíveis, conforme pode-se observar nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11. Para que se obtivesse a curva que simulasse a rigidez das molas, colheu-se do ensaio *push out* referente ao modelo equivalente do ensaiado à flexão. Para a V_150_19_SL analisou-se o ensaio PO 15_19_SL_1. Foi realizada uma aproximação polinomial de grau seis na curva do ensaio experimental, de posse desta equação, retirou-se valores das abscissas espaçadas com intervalos iguais. Obteve-se os valores das ordenadas através do respectivo valor da função, completando-se então os pares ordenados.

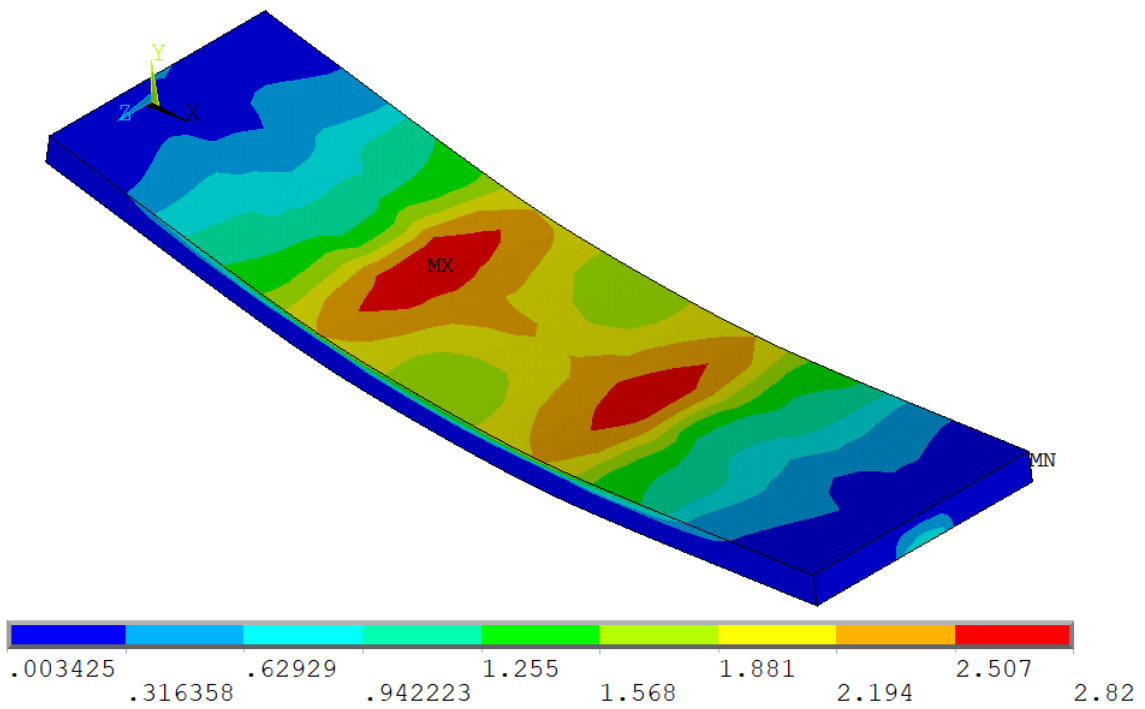


Figura 5.9: Tensões de von Mises em kN/cm² na laje de concreto para carregamento de 407 kN do modelo V_150_19_SL.

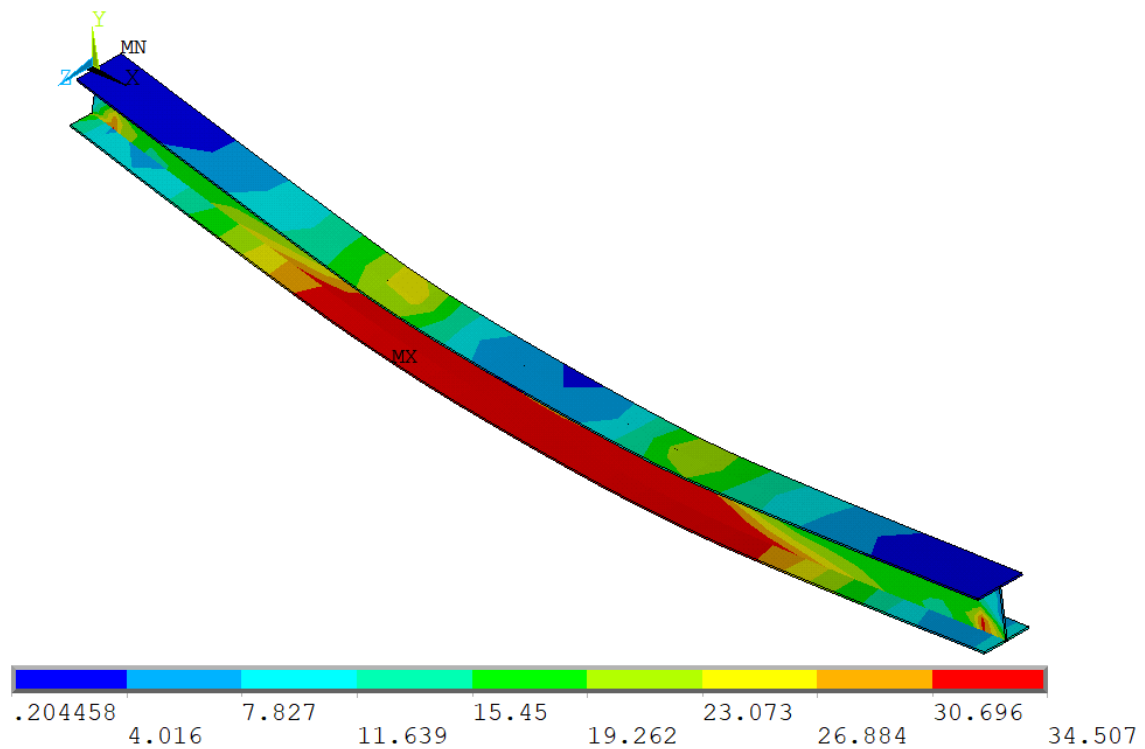


Figura 5.10: Tensões de von Mises em kN/cm² no perfil metálico para carregamento de 407 kN do modelo V_150_19_SL.

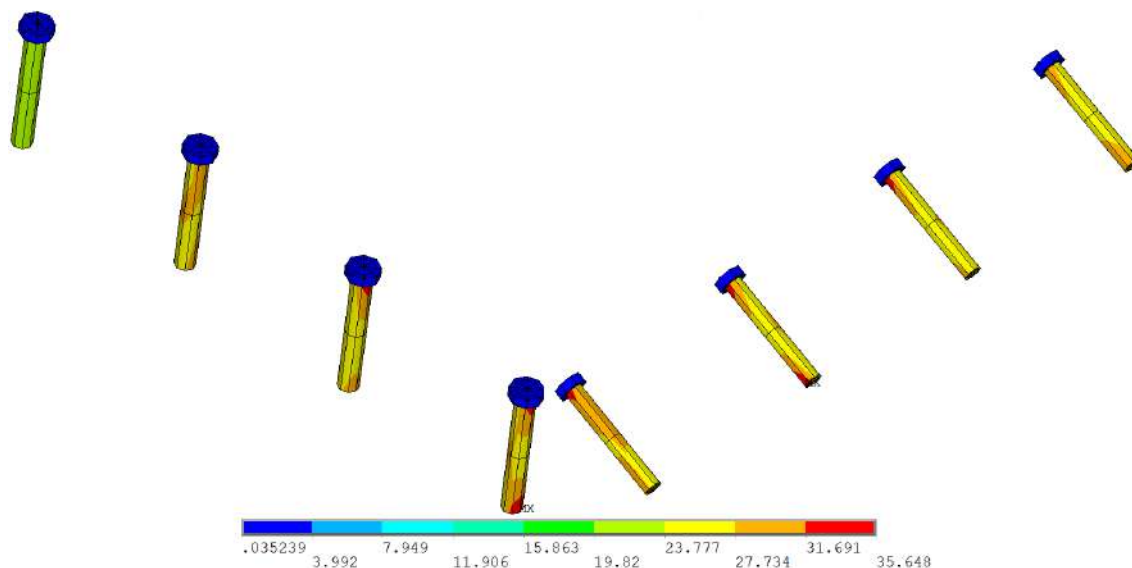


Figura 5.11: Tensões de von Mises em kN/cm² nos conectores de cisalhamento para carregamento de 407 kN do modelo V_150_19_SL.

5.2.4.2 Viga mista V_265_19_SL

O modelo V_265_19_SL forneceu valores das tensões em cada elemento com ordem de grandeza semelhante ao modelo V_150_19_SL, uma vez que todos os valores se aproximaram dos seus respectivos patamares de escoamento, e para o caso do conector de cisalhamento, não houve uma discrepância entre os valores das tensões e seus respectivos patamares de escoamentos, conforme pode-se verificar nas figuras 5.12, 5.13 e 5.14. A curva que representa a rigidez do elemento semi-rígido foi retirada do ensaio PO_265_19_SL_1.

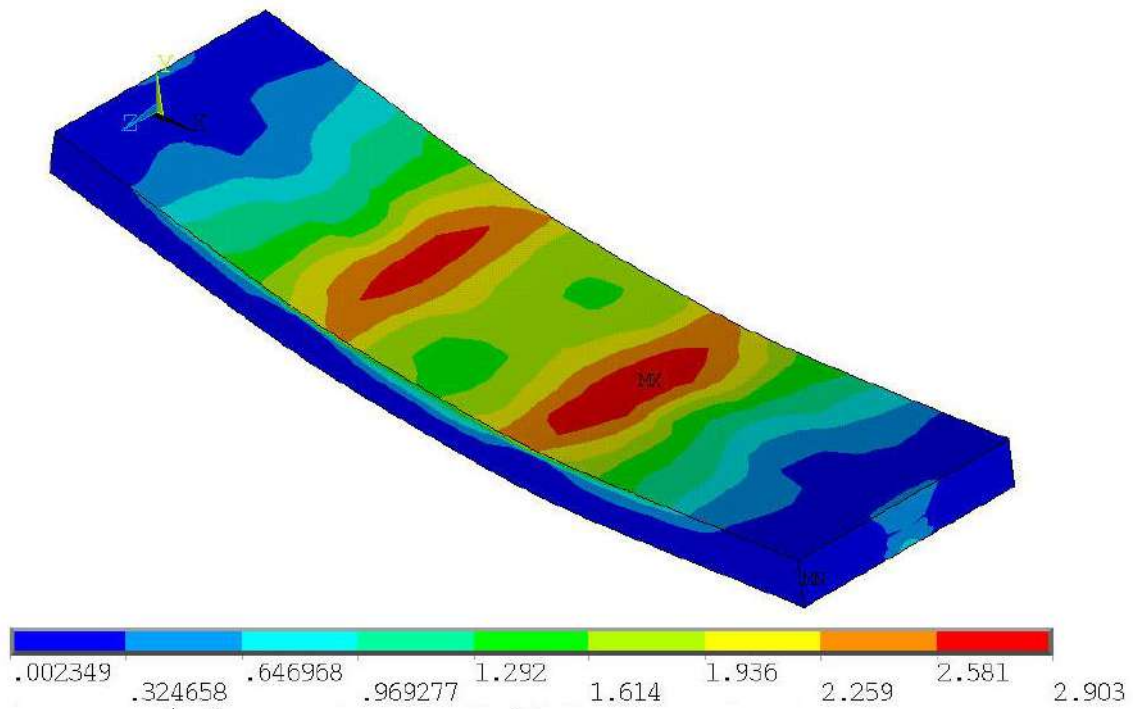


Figura 5.12: Tensões de von Mises em kN/cm² na laje de concreto para carregamento de 519 kN do modelo V_265_19_SL.

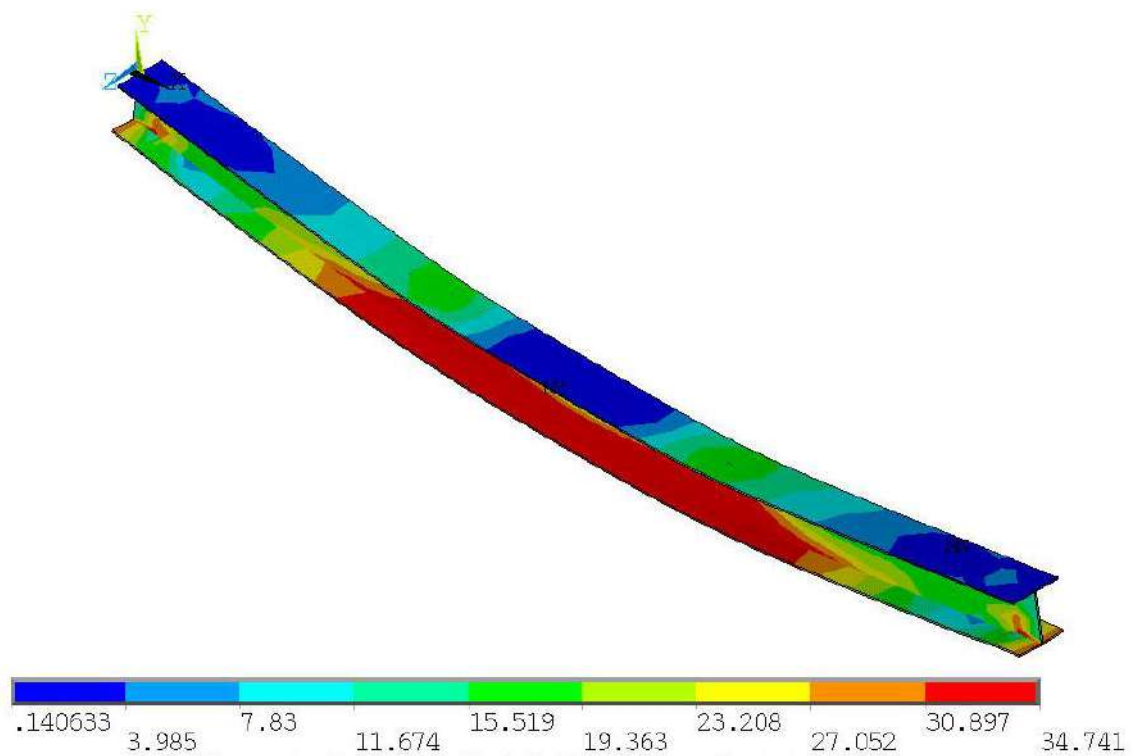


Figura 5.13: Tensões de von Mises em kN/cm² nos conectores de cisalhamento para carregamento de 519 kN do modelo V_265_19_SL.

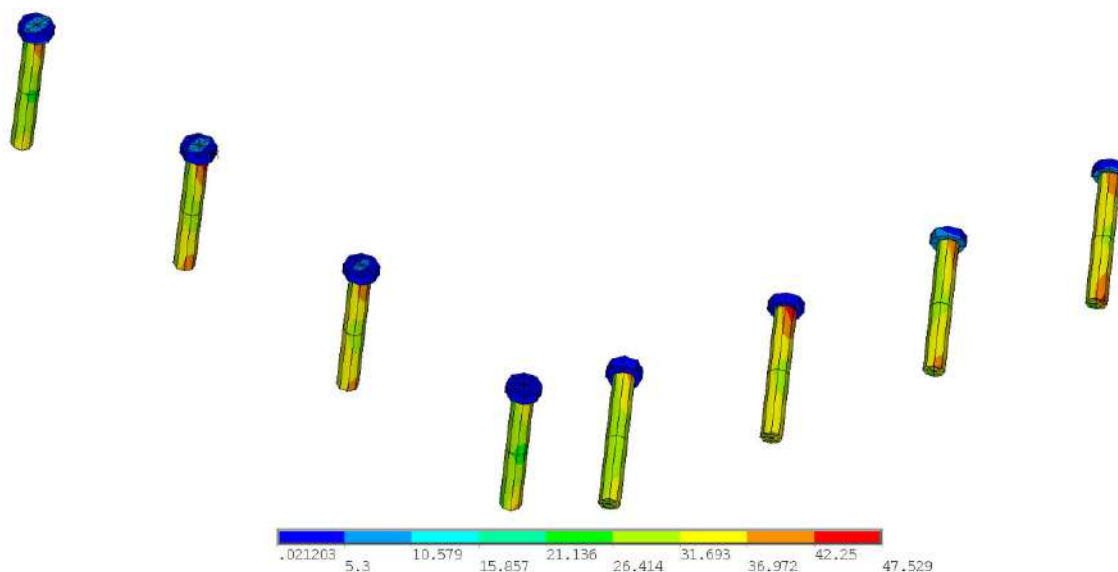


Figura 5.14: Tensões de von Mises em kN/cm^2 nos conectores de cisalhamento para carregamento de 519 kN do modelo V_265_19_SL.

Para todos os códigos numéricos desenvolvidos, o fim do processamento ocorreu por um deslocamento demasiado de um dos nós localizados na interface aço-concreto ou nos conectores de cisalhamento.

Entretanto, ao verificar-se as tensões no referido nó, repara-se que estas são inferiores às tensões últimas (fornecidas nas relações constituintes de cada material). O que se leva a crer que tais deslocamentos excessivos tenham sido causados por instabilidades numéricas, e não por ruptura do elemento (KOTINDA, 2006).

5.2.5 Fissuração na laje de concreto

Com o elemento *solid65* pode-se analisar a formação das fissuras em três planos diferentes. A primeira fissura ocorrida no elemento é representada por um círculo vermelho, a segunda por um círculo verde e a terceira por um círculo azul. Cada um dos círculos citados aparecerá no centróide de seus respectivos elementos e inclinados de acordo com o plano que contém a fissura.

5.2.5.1 Viga mista V_150_19_SL

A formação das primeiras fissuras ocorreu para o carregamento de 75 kN e essas fissuras se localizaram na direção dos atuadores próximo aos banzos superiores, conforme ilustrado na figura 5.15.



Figura 5.15: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 75 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

Para o carregamento igual a 93 kN obteve-se a formação de fissuras que se propagaram ao longo da direção *z* e majoritariamente na face inferior da laje. Estas fissuras foram causadas por tensões longitudinais de tração. Inicialmente, estas fissuras se localizaram na direção dos atuadores, e posteriormente, estas fissuras se estenderam para direção dos apoios como mostra a figura 5.16.



Figura 5.16: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 93 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

Para o carregamento de aproximadamente 151 kN identificou-se uma tendência de formação de fissuras longitudinais (na direção x), a frente dos conectores de cisalhamento, que por sua vez possivelmente possuem associação com o fenômeno do fendilhamento. Também se nota uma tendência destas fissuras atingirem a parte superior da laje e formação de outras fissuras a 45 graus, conforme figura 5.17.



Figura 5.17: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 151 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

A figura 5.18 ilustra o estado de fissuração para o carregamento último que para o modelo computacional foi de 408 kN.

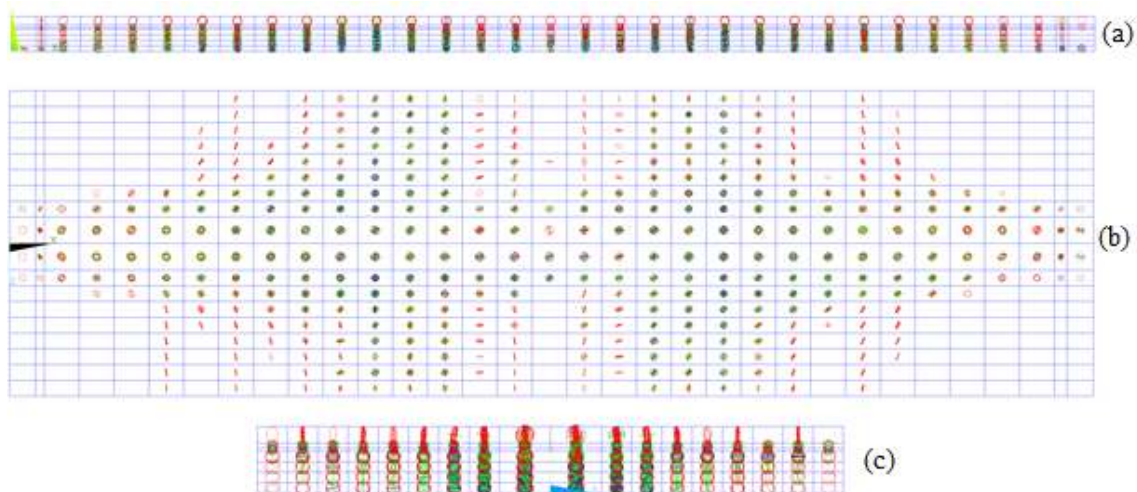


Figura 5.18: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 408 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

5.2.5.2 Viga mista V_265_19_SL

A formação das primeiras fissuras ocorreu para o carregamento de 105 kN e essas fissuras se localizaram principalmente na extensão da região entre os apoios, em toda a direção z e também atingiram metade da altura da laje conforme ilustrado na figura 5.19.



Figura 5.19: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 105 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

Para o carregamento igual a 292 kN, na região central da laje, obteve-se a intensificação na formação de fissuras que se propagaram na direção z e ao longo da altura da laje. Estas fissuras foram causadas por tensões longitudinais de tração, como mostra a figura 5.20. Também é possível notar um acúmulo de fissuras nas proximidades dos

conectores de cisalhamento, que possivelmente possuem associação com o fenômeno do fendilhamento.

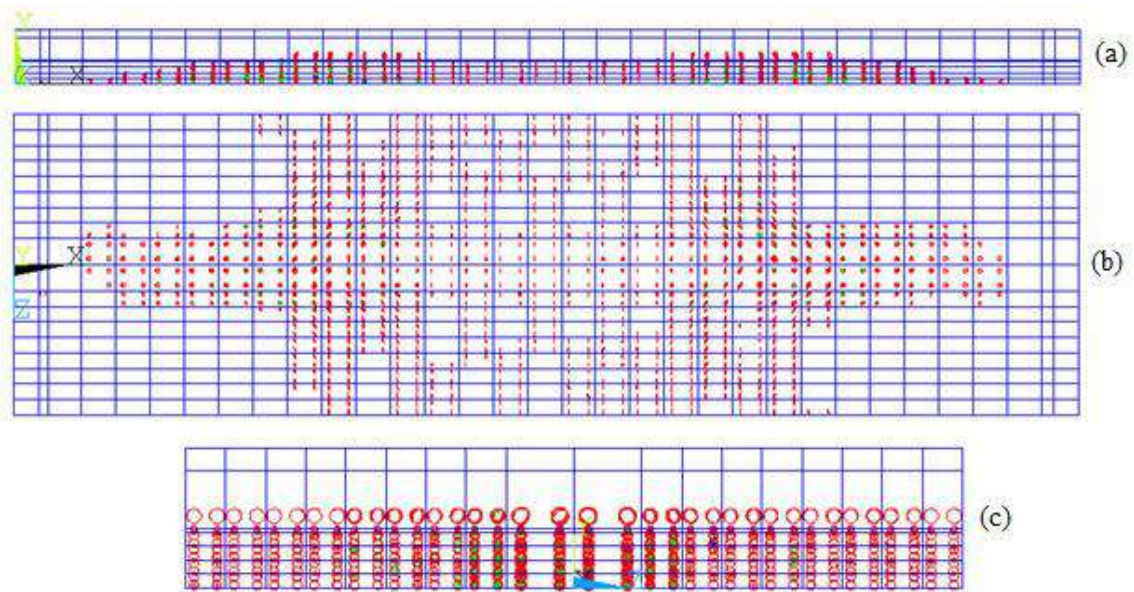


Figura 5.20: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 292 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

Para o carregamento de aproximadamente 383 kN identificou-se uma tendência de formação de fissuras na face superior da laje, conforme figura 5.21.

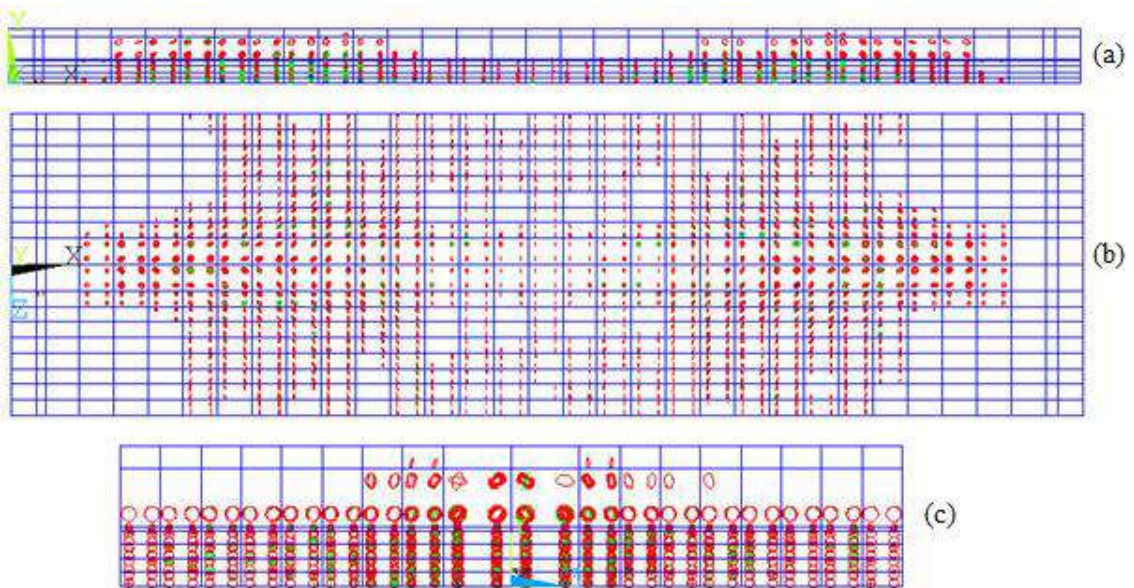


Figura 5.21: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 383 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

A figura 5.22 ilustra o estado de fissuração para o carregamento último que para o modelo V_265_19_SL foi de 520 kN.

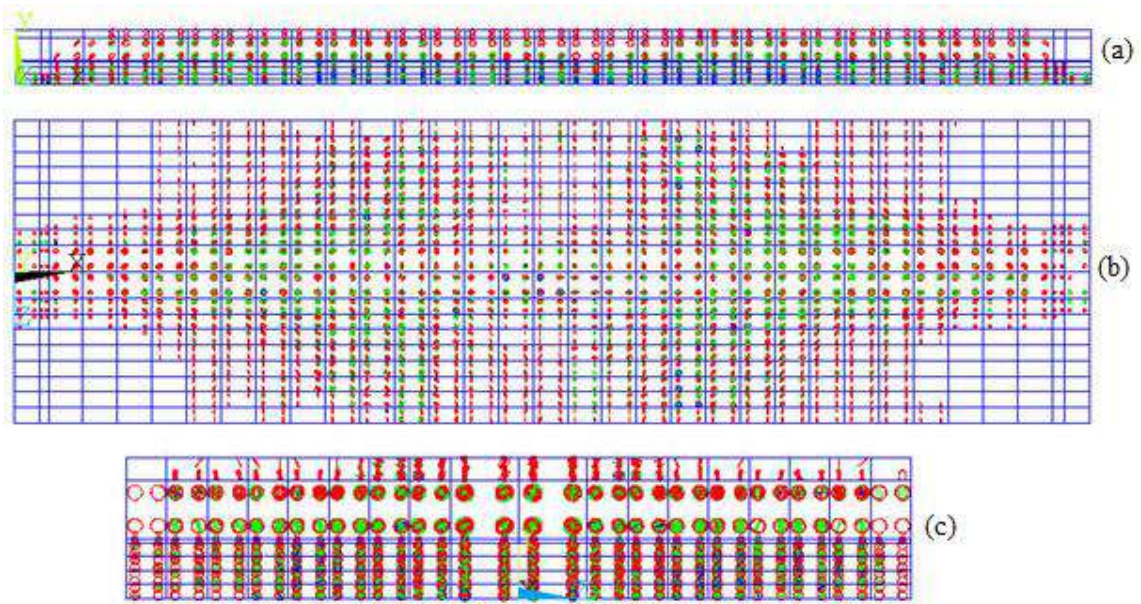


Figura 5.22: Formação de fissuras no modelo computacional – carregamento de 520 kN; vistas (a) lateral, (b) superior e (c) frontal.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo validar os códigos numéricos desenvolvidos para simulação de vigas mistas de aço e concreto com lajes alveolares solicitadas à flexão, através da elaboração de modelos parametrizáveis, através do *ANSYS*, onde foram adotados elementos finitos disponíveis em sua biblioteca interna. A modelagem das vigas evoluiu paulatinamente no sentido de ir do modelo mais simples até o mais sofisticado. Para tanto, desenvolveu-se uma estratégia de geração de malha que fosse ao mesmo tempo conveniente e representativa do modelo experimental.

A representação da laje de concreto através do elemento *solid65* proporcionou maior proximidade com os resultados experimentais, uma vez que a biblioteca deste elemento nos permitiu analisar a propagação da fissuração. A reprodução dos conectores de cisalhamento foi feita por meio de elementos de viga (*link180*) que proporcionou mais rapidez à modelagem e ao processamento, se comparados a elementos do tipo sólido, que além de resultarem em malhas mais refinadas e aumento do esforço computacional, trazem maiores chances de erros no decorrer do processamento.

Um passo primordial para que o modelo pudesse atingir carregamentos mais elevados foi a inserção de elementos finitos do tipo mola (*combin39*), que foi possível devido à realização dos ensaios de *push out* e consequentemente a utilização desses dados experimentais no gráfico (força x deslizamento) a ser inserido no programa.

A utilização do modelo *concrete* oferecido pelo *ANSYS* para o concreto quando submetido a tensões de tração, associado ao critério de plastificação de von Mises para tensões de compressão no concreto, permitiram ao modelo numérico uma maior capacidade em atingir cargas elevadas.

A inclusão do par de contato teve como objetivo fornecer ao modelo a ação da aderência inicialmente existente na interface comum ao aço e ao concreto que impede o deslizamento entre estes componentes até determinado nível de carregamento, e a partir deste momento a aderência se encerra, em concordância dos ensaios experimentais.

Para a validação do modelo numérico compararam-se estes resultados com os obtidos por meio da campanha experimental realizada em BATISTA e LANDESMANN (2016).

No que diz respeito à deflexão linear no meio do vão, as curvas obtidas numericamente apresentaram boas aproximações durante a fase elástica das vigas (trecho

inicial) e carregamentos últimos (na fase plástica) também muito próximos nesta análise não linear.

Com relação aos deslizamentos relativos entre a laje de concreto e o perfil metálico nas extremidades das vigas mistas, de modo geral, também se obteve aproximações em ordem de grandeza semelhantes a outros trabalhos desenvolvidos.

A análise da distribuição das tensões na seção transversal localizada no meio do vão das vigas ilustrou que nos modelos numéricos assim como nos modelos experimentais, ocorreu uma aproximação da plastificação dos componentes das seções mistas.

A análise das tensões de maneira isolada nos componentes da viga mista permite ao profissional uma razoável confiabilidade quanto ao comportamento dos materiais constituintes, dada a dificuldade de aferir as tensões durante o ensaio experimental.

A combinação dos elementos de viga com as molas e o uso de elementos sólidos na laje de concreto possibilitaram a ilustração da concentração das tensões na região esperada, de acordo com a bibliografia consultada. A análise da propagação das fissuras só foi possível devido ao emprego do *solid65*.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

O presente trabalho teve por objetivo a confecção de uma rotina parametrizada para análise de vigas mistas biapoiadas com perfis laminados, conectores do tipo pino com cabeça e lajes alveolares (a alteração relacionada à diferença de peso existente entre as placas alveolares e maciças foi inserida sob a parametrização da densidade e não de maneira discreta). Desta maneira, percebe-se que a simples modificação dos dados de entrada permite ao usuário a análise de uma grande variedade de seções.

Assim sendo a rotina pode ser implementada para que seja possível a consideração de outros tipos de conectores de cisalhamento, ajustes na geometria para análise de perfis formados a frio, inclusão de análise de altas temperaturas, análise de vigas contínuas, pórticos entre outros modelos mais sofisticados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDROUS, A.; AFEFY, H. M.; SENNAH, K. 2017, “Investigation of free vibration and ultimate behavior of composite twin-box girder bridges” *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier Ltda, v.130, p.177-192.

ANSYS. Version 12: SAS – Swanson Analysis Systems Inc., 2009.

ALVA, G. M. S. 2000. *Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800: Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio*. Rio de Janeiro, 2013.

BATISTA, E. M., LANDESMANN A. 2016. *Análise experimental de vigas mistas de aço e concreto compostas por lajes alveolares e perfis laminados*. Programa de Engenharia Civil, PEC, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

CATAI, E. 2005. *Análise dos efeitos da retração e da fluência em vigas mistas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

CHAPMAN, J.C.; BALAKRISHNAN, S. 1964. Experiments on composite beams. *The Structural Engineer*, v.42, n.11, p. 369-383.

CHAVES, I. A. 2009. *Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CLASSEN, M. 2018, “Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib shear connectors”. *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier Ltda, v.142, p.99-112.

DAVID, D. L. 2007. Análise teórica e experimental de conectores de cisalhamento e vigas mistas constituídas por perfis de aço formados a frio e laje de vigotas pré-moldadas. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

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

DIOGENES, H. J. F. 2013. *Análise numérica e experimental de ligações por aderência aço-concreto aplicada em estruturas mistas*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings*. Bruxelles, 2004.

GATTESCO, N., 1999. “Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection”, *Journal of Constructional Steel Research*, v.52, p. 195-218.

HIGAKI, B. E. 2009. *Análise teórica e experimental de vigas mistas aço e concreto e lajes com vigotas pré-moldadas e lajotas cerâmicas em um pavimento tipo*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KIRCHHOF, L. D. 2004. *Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

KOTINDA, T. I. 2006. *Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LOPES, E. D. C., 2012. *Análise dinâmica não linear de pisos mistos considerando-se os efeitos da interação parcial e das ligações viga-coluna e viga-viga*. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MALITE, M. 1990. *Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: ênfase em edifícios*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MALITE, M. 1993. *Análise do comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

OEHLERS, D.J; BRADFORD, M.A., 1995, *Composite steel and concrete structural members. Fundamental behaviour*. New York : Elsevier Science Ltd.

PFEIL, W., PFEIL, M., 2009, *Estruturas de aço: dimensionamento prático*. 8ª ed. Rio de Janeiro, Livros LTC — Técnicos e Científicos Editora Ltda.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R.J.; DA MATA, L.A.C. 2001. *Elementos das estruturas mistas aço-concreto*. Belo Horizonte: O lutador.

QUEIROZ, F.D.; VELLASCO, P.C.G.S.; NETHERCOT, D.A., 2007. “Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection”. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p.505-521.

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

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

SOUZA, P.T.; KATAOKA, M.N.; EL DEBS, A.L.H.C. 2017, “Experimental and numerical analysis of the push-out test on shear studs in hollow core slabs” *Engineering Structures*. Elsevier Ltda, v.147, p.398-409.

TRISTÃO, G. A. 2002. *Comportamento de conectores de cisalhamento em vigas mistas aço-concreto com análise da resposta numérica*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

WILLAM, K. J.; WARNKE, E. D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. *International Association for Bridge and Structural Engineering Proceedings*. Vol. 19. ISMES. Bergamo, Italy. p. 174. 1975.