

1

Introdução

1.1. Contexto e Motivação

Há mais de um século, estruturas de aço e concreto são utilizadas na construção civil por todo o mundo com o propósito inicial de se aumentar a resistência da edificação contra as ações do fogo e da corrosão. Entretanto, somente na década de 60 do século passado, com o desenvolvimento dos sistemas estruturais mistos, passou-se a combinar perfis de aço com concreto, visando aproveitar as vantagens de cada material, tanto em termos estruturais como construtivos. Segundo a NBR 8800: 2008, as estruturas mistas surgem quando ambos os materiais trabalham solidariamente entre si, sem que haja deslocamento relativo relevante entre eles, comportando-se basicamente como um só material.

Assim, como o desenvolvimento de novos sistemas estruturais mistos, a industrialização da construção civil passou a ser um processo cada vez mais exigido, e vem sendo estimulado devida à necessidade de aumentar a competitividade e a produtividade das obras. Um dos objetivos desse processo é transferir o trabalho realizado nos canteiros para fábricas permanentes e modernas.

Com o advento desses novos sistemas construtivos, passa a existir a possibilidade da realização de edifícios cada vez mais altos. Um exemplo disso é a reconstrução do complexo World Trade Center na cidade de Nova York (EUA). Um dos edifícios, o One World Trade Center (Figura 1.1), está entre os maiores do mundo, com 541,3 m de altura e 94 pavimentos. A construção do edifício foi iniciada em 2006, sendo concluída no ano de 2014.

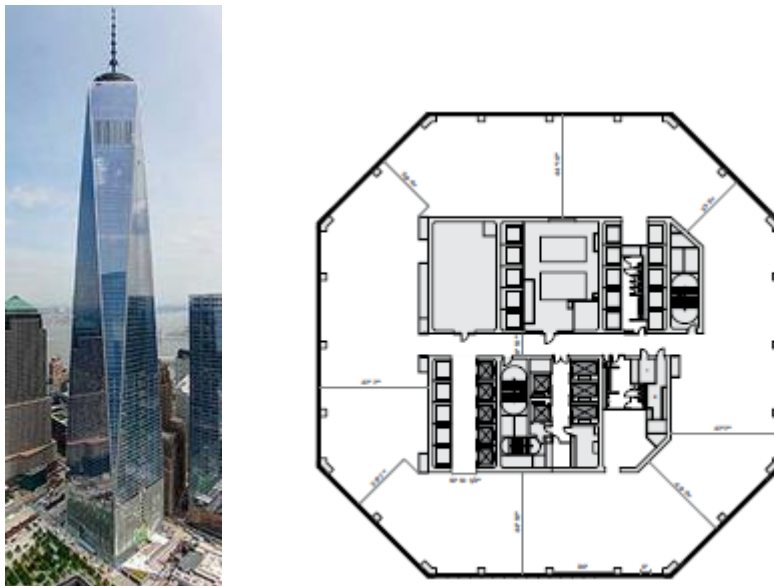


Figura 1.1 - Edifício One World Trade Center e detalhe da planta baixa de um dos seus pavimentos tipo (Fonte: One WTC).

Segundo Lewis e Holt (2011), a torre foi projetada com sistema estrutural misto de aço e concreto. No perímetro da torre, foi construída uma estrutura de aço constituída de vigas e colunas, formando uma espécie de exoesqueleto. Emparelhada com uma parede maciça de concreto, a moldura de aço externa fornece rigidez extra à estrutura do edifício, proporcionando vãos internos livres de colunas para a máxima flexibilidade de uso do espaço interno. Dentro da torre, um núcleo de concreto maciço vai até os andares mais altos, sendo que este núcleo está ligado à estrutura de aço externa através de vigas metálicas com vãos de até 14,3 m. Dentro do núcleo de concreto, o sistema de piso e vigas é de concreto armado, enquanto para as outras áreas foram utilizadas lajes mistas tipo steel deck suportadas por vigas de aço e ligadas via conectores de cisalhamento.

O benefício do uso de elementos mistos pré-fabricados consiste em prover mais economia, rapidez, durabilidade, redução de prazos, estruturas mais seguras, alta qualidade e uma estética agradável, além da versatilidade arquitetônica.

A construção em sistema misto é competitiva para estruturas de vãos médios a elevados, caracterizando-se pela rapidez de execução e pela significativa redução do peso total da estrutura em comparação com os sistemas convencionais de concreto armado.

Pode-se observar que estruturas de aço são parte de um processo produtivo industrializado bastante avançado, sendo que a inclusão do concreto pré-fabricado potencializa os ganhos, e apresenta-se como uma excelente solução construtiva.

A combinação do aço e do concreto tem como finalidade retirar o máximo do desempenho desses materiais. Entretanto, para que isto ocorra, é necessário garantir a melhor interação entre eles. Em vigas mistas, o uso de conectores de cisalhamento, como stud bolt, tem como objetivo realizar esta interação, evitando-se o deslizamento na interface aço-concreto. Contudo, existe um custo que poderia ser evitado, com novas formas de interação como o uso de perfis celulares parcialmente embutidos no concreto.

Em vigas mistas pré-fabricadas, existe também a possibilidade do uso de aberturas na alma para passagem dos dutos de serviço. Com isto, os espaços internos de edifícios podem ser otimizados, diminuindo-se a altura necessária por pavimento e consequentemente a altura total da construção. A compatibilização entre os diversos projetos torna-se mais fácil, além de proporcionar uma melhor condição de manutenção para os sistemas de instalações prediais.

Com a utilização racional das aberturas nas almas dos perfis, pode-se obter uma redução do consumo de materiais e consequentemente uma diminuição nos custos operacionais e de manutenção, assim como nos custos de construção. Por outro lado, tem-se uma redução na resistência e rigidez da viga.

1.2. Revisão Bibliográfica

Vigas mistas de aço-concreto possuem diversos tipos de configurações. Muitas dessas disposições buscam por maior eficiência estrutural atrelada à economia de aço. Entre elas podemos citar os vigamentos de piso tipo Stub-Gider e vigas mistas com perfis parcialmente embutidos na laje de concreto.

Faria (1992) fez um estudo do comportamento e projeto de sistemas de vigamentos de piso tipo Stub-Gider. O trabalho focou-se na implementação computacional do modelo para a análise e dimensionamento do sistema de pisos. O programa de computador é utilizado para fazer a avaliação do consumo de aço, variação de espaçamentos das vigas secundárias e vão do viga principal para o sistema com 3, 4, e 5 *stubs*. Segundo a autora, os resultados da análise paramétrica demonstraram que o sistema com 4 *stubs* parece ser o mais eficiente para vãos de até 11,5 m. A partir daí o sistema com 3 *stubs* predomina. Já o

sistema com 5 *stubs* pode trazer certa economia na laje de concreto, a qual compensa o aumento de aço no vigamento.

Watson et al. (1974) estudou o comportamento de vigas mistas utilizando vigas de aço casteladas parcialmente embutidas no concreto. A conexão entre os dois materiais foi estabelecida através da aderência ao longo da área de contato. Os autores concluíram que a fricção e a adesão natural entre o aço e o concreto foram suficientes para desenvolver a resistência necessária ao cisalhamento longitudinal. A perda de interação entre os dois materiais não afetou a capacidade de desenvolver o escoamento na viga de aço, antes de atingir a ruptura.

Jurkiewicz et al. (2005) analisou o comportamento estático de vigas mistas de aço-concreto com conectores de cisalhamento horizontais. O modelo consiste em um perfil T invertido com a região da alma superior cortada em formato retangular com cantos arredondados. O perfil é parcialmente embutido na laje de concreto. A conexão entre o perfil e o concreto é feita por armaduras transversais que transpassam a alma do perfil. Foram realizados 3 ensaios tipo *push-out* e 1 ensaio de vigas mista em escala real submetida a flexão. Os resultados demonstraram que o modelo proposto pelos autores apresentou comportamento similar ao de vigas mistas utilizando conectores usuais: grande ductilidade, ruptura por flexão (mecanismo plástico), pequenos deslizamentos na interface aço-concreto.

Peltonen et al. (2006) analisou o comportamento da conexão aço-concreto utilizando o efeito “dowel” no concreto preenchendo aberturas de alma em vigas delta. Para este estudo foram utilizados os resultados de 74 ensaios de *push-out*. Os resultados demonstraram que a resistência é governada pelo efeito “dowel” no concreto. Sendo que as resistências mais elevadas foram atingidas com diâmetros das aberturas menores nos perfis delta.

Frangi et al. (2008) apresenta um novo sistema de pisos mistos, integrado às instalações prediais. O sistema é baseado em vigas celulares, feitas a partir de perfis laminados, parcialmente embutidos na laje de concreto. Em laboratório, foi conduzida uma investigação experimental de dois protótipos (viga I e viga II), com vãos de 7,2 m, submetidos a carregamento estático e dinâmico. A viga I, com a laje de concreto na região superior possui uma largura efetiva de 1250 mm e altura total de 300 mm. Já na viga II, a laje de concreto é colocada na região inferior, com largura efetiva de 1250 mm e altura total de 290 mm. Com o intuito

de melhorar a conexão entre o aço e o concreto, foram adicionados dois vergalhões com diâmetro de 16 mm, ao longo da alma do perfil, como mostrado na Figura 1.2.

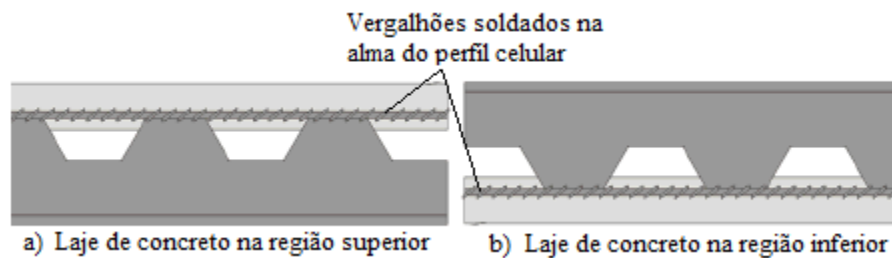


Figura 1.2 - Sistema de vigas mistas proposto por Frangi et al. (2008).

Para ambos os testes, Frangi et al. (2008) percebeu que a armadura soldada ao perfil foi capaz de garantir interação total na seção mista. Entretanto, as vigas mistas apresentaram um grau de fissuração elevado, principalmente a viga (II) com a laje de concreto na região tracionada. O comportamento ao carregamento estático mostrou resultados adequados para a rigidez e resistência última à flexão comparando com o modelo teórico, para ambas as vigas.

Ju et al. (2009) propõem e exploram experimentalmente um novo tipo de viga mista utilizando-se perfis assimétricos com abertura na alma, e revestidos na lateral e em cima por concreto. Conectores de cisalhamento não são utilizados para o modelo proposto. Em vez disso, a resistência ao cisalhamento longitudinal é obtida através da resistência na interface entre o aço e o concreto devido à união destes dois materiais, mais a resistência produzida pelo concreto na região da abertura. Para o sistema proposto a economia pode ser percebida em vãos entre 7,5 e 15 m, com altura mínima de 300 mm.

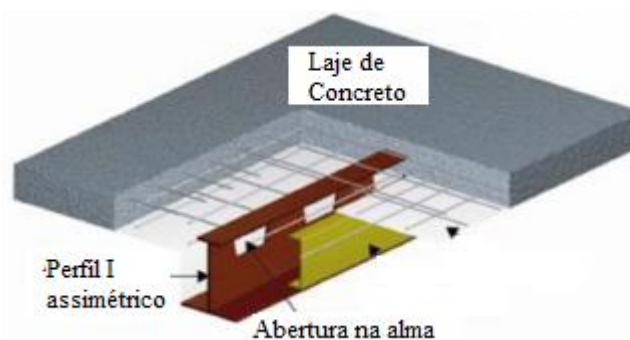


Figura 1.3 - Vista conceitual do modelo proposto por Ju et al. (2009).

Três modelos foram submetidos a carregamento estático para analisar-se a resistência à flexão. O protótipo B-C1P15 é uma viga mista com abertura na alma, o modelo B-Slim também é uma viga mista, entretanto, a alma só possui furos

com 30 mm de diâmetro para a passagem da armadura transversal. E o terceiro ensaio, B-C0P15, foi somente do perfil celular assimétrico. A Figura 1.4 mostra a configuração dos três modelos.

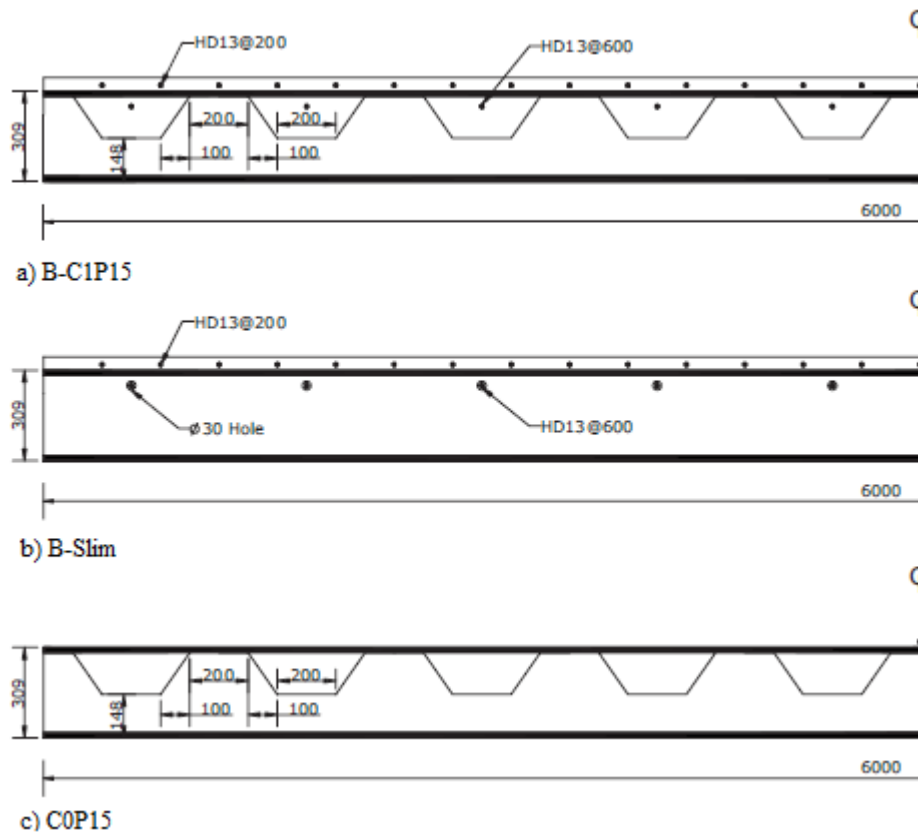


Figura 1.4 - Configuração dos três modelos ensaiados por Ju et al. (2009).

As principais conclusões dos autores sobre o modelo proposto foram:

- A resistência última das vigas mistas excedeu o valor teórico. A ruptura ocorreu devida o esmagamento do concreto na zona de compressão. O comportamento medido foi de acordo com o objetivo de projeto. A concepção do projeto permitiu que o sistema proposto desenvolvesse suficientemente ductilidade, resistência e consequentemente um comportamento misto efetivo.
- O modelo B-C0P15, rompeu devido à flambagem da mesa superior na região com abertura na alma. Este se tornou o ponto crítico devido o perfil ter que suportar as cargas de construção.

Em 2012, Li et al. Fez um estudo do comportamento a flexão e ao cisalhamento de vigas mistas utilizando perfil T invertido com entalhes na alma. Quatro modelos com vãos de 3,48 m e 3,75 m foram testados para investigar o comportamento a flexão. E mais seis protótipos com vãos aproximados de 3m

foram testados para estudar o comportamento ao cisalhamento, para isso o carregamento foi imposto próximo aos apoios. Os autores concluíram que a laje de concreto pode desempenhar um papel significativo em suportar o momento fletor na seção mista. Também verificaram que o modo de ruptura está relacionado com a taxa cortante-vão. Quando o modo de ruptura é por cisalhamento esta taxa é igual à 1,5, e para ruptura por flexão este valor é próximo de 2,5. Os valores encontrados experimentalmente foram condizentes com os resultados teóricos.

Tsavidaridis et al. (2013) estudou o comportamento ao cisalhamento vertical de vigas de aço com aberturas de alma parcialmente embutidas no concreto realizando uma análise experimental e computacional. Neste sistema a laje de concreto é apoiada sobre a mesa inferior do perfil e a conexão entre os dois materiais é realizada através das aberturas do perfil. Os autores conduziram em laboratório o ensaio de quatro protótipos com vãos de 1,5 m submetidos à carga estática. Os resultados dos testes demonstraram que o concreto rompeu primeiro acompanhado pela distorção da alma do perfil. O modelo com abertura de alma preenchida totalmente por concreto apresentou um aumento de 108% da capacidade resistente ao carregamento vertical comparando com a viga de aço com aberturas de alma.

Chen et al. (2015) fez um estudo experimental do comportamento a flexão e do mecanismo de transferência do cisalhamento, para vigas mistas com perfis celulares de pequena altura. A conexão entre o aço e o concreto ocorre na região da abertura que é preenchida com concreto e armaduras transversais.



Figura 1.5 - Modelo representativo dos protótipos SCFB 1 e 2 do ensaio experimental conduzido por Chen et al. (2015).

Foram testados experimentalmente quatro protótipos em escala real. Dois modelos são compostos por perfis assimétricos com aberturas circulares espaçadas regularmente (SCSFB 1 e 2) e outros dois com perfil em T invertido com aberturas no formato semicircular (SCFB 3 e 4).

Baseado nos resultados experimentais os autores chegaram as seguintes conclusões:

- Dois modelos, SCSFB 1 e SCSFB 2, romperam em flexão com o concreto esmagando na zona comprimida e sem ruptura na intercessão aço-concreto. Os Protótipos, SCSFB 3 e SCSFB 4, romperam em cisalhamento com grandes fissuras diagonais, deslizamentos expressivos e ruptura da conexão.
- A conexão, formada por barras incorporadas ao concreto de enchimento, apresentou uma eficiente e significativa capacidade resistente ao cisalhamento e ductilidade. A interação na interface entre o aço e o concreto também se aplica ao modelo de transferência de cisalhamento utilizado no sistema proposto.

1.3. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um estudo sobre um sistema de vigas mistas pré-fabricadas que seja econômico, rápido para montar, eficiente

na utilização dos espaços e que proporcione uma diminuição das perdas de materiais.

Para o sistema proposto foi feita uma avaliação teórico-experimental do comportamento estrutural, objetivando:

- avaliar analiticamente a resistência última à flexão do modelo proposto, assim como estudar a influência de cada elemento no comportamento geral da estrutura;
- fazer uma análise paramétrica para avaliação do comportamento estrutural, selecionando os casos mais competitivos em termos de custo e velocidade de montagem.
- estudar experimentalmente o sistema proposto através de modelos em escala real, avaliando as deformações, os deslocamentos e os modos de ruína.

1.4. Apresentação e Organização da Dissertação

Esta dissertação foi organizada em oito capítulos, sendo que neste primeiro capítulo é feita uma introdução do assunto abordado e apresenta-se a motivação e os objetivos deste estudo.

O Capítulo 2 traz uma revisão teórica sobre vigas mistas de aço e concreto, apresentando-se as principais propriedades e o comportamento estrutural. Também é feita uma descrição teórica do caso de vigas mistas parcialmente embutidas no concreto com abertura na alma do perfil. Para esta configuração de vigas mistas, são apresentados alguns tipos de sistemas oferecidos no mercado. Por último, são mostrados alguns trabalhos realizados abordando o tema.

No Capítulo 3 é feita uma apresentação das considerações adotadas para o sistema misto proposto, mostrando-se detalhes de fabricação e as vantagens do sistema. Também é feita uma abordagem do modelo de cálculo e, com os resultados obtidos teoricamente, é executada uma análise paramétrica.

Na sequência, Capítulo 4, apresenta-se o programa experimental desenvolvido no Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, visando a obter os dados do comportamento à flexão das vigas mistas parcialmente revestidas. Assim, neste capítulo são descritos os modelos ensaiados, as características geométricas finais

da estrutura, os materiais empregados, a preparação, montagem e confecção de cada modelo, a instrumentação e o sistema de aplicação de carga.

O Capítulo 5 apresenta e discute os principais resultados experimentais dos ensaios descritos no programa experimental

No Capítulo 6 é feita uma avaliação teórica da resistência última à flexão para os modelos ensaiados. Os cálculos analíticos foram feitos baseando-se no modelo do Capítulo 3.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente, em termos de resistência última e comportamento elástico, confrontados com aqueles obtidos a partir da aplicação do modelo de cálculo apresentado anteriormente.

O Capítulo 8 apresenta as considerações finais, as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.