

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE TRELIÇAS MISTAS PARA EDIFICAÇÕES DE ANDARES MÚLTIPLOS

Enio Pontes de Deus

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 60.455-790, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: epontes@dem.ufc.br

Resumo

Os sistemas de vigamentos de piso em treliças mistas apresentam maior rigidez e economia em relação ao sistema convencional de pisos, que são apoiados sobre elementos metálicos sem interação. Este trabalho é resultado de uma intensa investigação sobre orientações de projeto e monitoração de um sistema estrutural em treliça mista. Inicialmente, são apresentados os critérios de dimensionamento da estrutura com *deck*-metálico incorporado. Com base nesses procedimentos é desenvolvida uma análise experimental, em escala real, para estudo do comportamento da treliça fabricada de perfis de chapa dobrada e conduzida até a ruína. O dimensionamento considera a ruína controlada pelo banzo inferior sob tensão de ruptura do material. O modo de colapso foi verificado devido a uma fratura frágil que se originou na corda inferior.

Palavras-chave: Estrutura de aço, Treliça mista, Fratura

1. INTRODUÇÃO

As estruturas mistas, face aos avanços conseguidos em nossos dias nas técnicas de construção e aprimoramento dos materiais empregados, permanecem como solução estrutural eficiente e, por isto, bastante difundida no meio técnico (Deus, 1993).

Os estudos dos conceitos relacionados à construção mista tiveram evolução associada historicamente ao desenvolvimento do concreto e do aço como materiais resistentes em um sistema estrutural.

A utilização de elementos treliçados como elementos resistentes em sistemas de pisos mistos surgiu na década de 60 na forma de treliças leves mistas ou *Open-Web Steel Joists*.

Vários ensaios foram conduzidos por diferentes pesquisadores e fabricantes de estruturas, que chegaram à conclusão de que este sistema é uma alternativa viável para sistemas de vigamento em estruturas mistas.

O estudo de **Treliças Mistas** teve origem com Iyengar (1973), que testaram treliças mistas utilizadas em sistemas de pisos para o edifício SEARS TOWER em Chicago.

Bjorhovde (1981), realizou o teste de uma treliça mista com 12000 mm de comprimento e 850 mm de altura, projetada para um edifício em Edmonton, Canadá. O colapso da estrutura foi precipitado pela flambagem da diagonal mais comprimida, com uma carga correspondente a 95% da carga de projeto.

Atualmente, os sistemas estruturais mistos tornaram-se importantes e atrativos para os projetistas, pois além de reduzir o custo de material e mão-de-obra, fornecem um sistema com maior rigidez e resistência, apresentando ainda várias vantagens, como:

- diminuição do peso global da estrutura; aumento de áreas livres de colunas permitindo uma maior flexibilidade na utilização da edificação; redução da altura do viga-piso; redução de flechas; utilização eficiente de dois materiais básicos da construção civil: aço e concreto; padronização dos componentes do sistema estrutural; eliminação dos escoramentos provisórios pela utilização de deck-metálico auto-portante; a montagem ganha em rapidez e precisão simplificando o acompanhamento técnico; utilização de telas soldadas; maior segurança no ambiente de trabalho; possibilidade de trabalho simultâneo em vários pisos; redução dos custos finais.

As treliças são fabricadas utilizando-se perfis selecionados pelo projetista dentro de uma larga variedade de seções de aço disponíveis. As cordas e diagonais podem ser escolhidas entre seções tais como: perfis tubulares de seção quadrada ou retangular, cantoneiras, tês, perfis de chapa dobrada, entre outros.

Afim de simplificar o processo de fabricação, as diagonais das treliças devem ser ligadas por soldas de filete diretamente nas laterais das cordas, dispensando o uso de chapas de ligação (*gusset*), que encarecem a fabricação e diminuem o espaço disponível para passagem de tubulações de serviços (dutos de ar condicionado, tubulações, eletrodutos, etc.).

Entretanto, a eliminação da chapa de *gusset* acarreta uma redução na área disponível para execução das soldas nas extremidades das diagonais provocando a superposição das mesmas quando se procura conservar o ponto de trabalho teórico. Para que seja possível a execução das ligações sem obstrução, é necessário deslocar o ponto de trabalho (PT) provocando excentricidades nos nós da treliça. A consideração destas excentricidades é obrigatória na fase de análise estrutural, de modo que seja possível garantir a resistência adequada dos elementos e das ligações.

Existem outras considerações de projeto que viabilizam a utilização de estruturas mistas:

- Projeto nos estados limites;
- Emprego de conectores de cisalhamento;
- Redução das flechas e vibrações devido ao acréscimo de rigidez, quando submetida às cargas de serviço;

Este trabalho, salvo indicado explicitamente o contrário, atende às recomendações da Norma Canadense CAN S16.1- M94, com base no projeto para estados limites aplicados à treliça leve mista. Como existem poucos resultados referentes a testes de treliças mistas de maior capacidade de carga, escolheu-se então, analisar o comportamento de uma treliça mista através de teste em escala real que caracterize as situações mais comuns de utilização de tais sistemas na prática corrente de profissionais e engenheiros estruturais.

2. DIMENSIONAMENTO DA TRELIÇA MISTA

O dimensionamento consiste em verificações de resistência do sistema estrutural durante as seguintes fases de carregamento:

- instalação do deck-metálico, lançamento do concreto e cargas de ocupação.

Durante as fases construtivas, principalmente durante o lançamento do concreto, a verificação da corda superior se torna imperativa. Isto se deve ao fato da treliça não ser escorada gerando esforços de compressão consideráveis.

Na última fase do dimensionamento, considera-se que a laje de concreto passa a funcionar como corda superior da treliça, pois esta já pode ser considerada como um elemento estrutural plano.

A resistência à flexão de uma treliça mista é obtida quando a seção da corda inferior escoou em tração, e o concreto atinge sua resistência à compressão efetiva. Admite-se que existe uma interação completa e que a linha neutra se situa acima da nervura da laje (Fig. 1). A força resistente de tração fatorada na corda inferior é dada por :

$$T_r = \phi A_s F_y \quad (1)$$

Sendo: A_s = Área da seção transversal da corda inferior e F_y = Tensão de escoamento do aço.

A resistência à compressão efetiva do concreto é calculada utilizando-se uma área efetiva de concreto obtida pela multiplicação da largura efetiva por uma espessura efetiva do mesmo. A largura efetiva é dada pela cláusula 17.3.2 da S16.1. A resistência à compressão é calculada pela seguinte equação:

$$C_r = 0.85 \phi_c f_{ck} a b_e \quad (2)$$

onde : $\phi_c = 0,60$

f_{ck} = Resistência média característica do concreto à compressão;

a = Espessura da parte comprimida da laje de concreto;

b_e = Largura efetiva da laje de concreto.

Para que haja equilíbrio, tem-se:

$$\phi A_s F_y = 0.85 \phi_c f_{ck} a b_e \quad (3)$$

A espessura efetiva de concreto que está submetida à compressão é:

$$a = \frac{\phi A_s F_y}{0.85 \phi_c f_{ck} b_e} \quad (4)$$

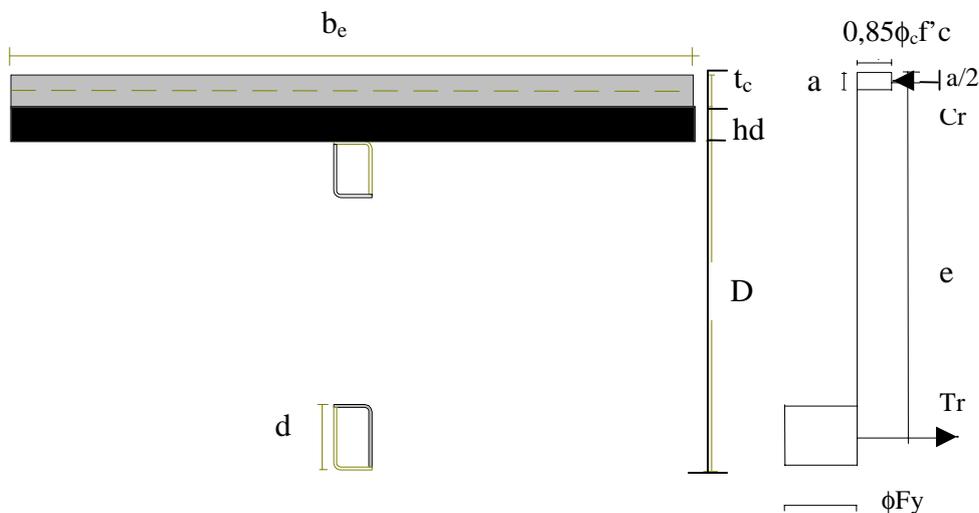


Figura 1. Momento resistente de uma treliça mista.

A condição de “a” ser menor que “t_c” indica que a linha neutra permanece no concreto, obtendo-se com isto uma maior eficiência do sistema estrutural. A área de concreto em tração é desprezada.

O momento resistente último é obtido através da equação a seguir:

$$M_{rc} = \phi A_s F_y e \quad (5)$$

onde “e” representa a distância entre o centro de gravidade da corda tracionada ao centro de gravidade da seção comprimida de concreto.

2.1 Diagonais

As diagonais de uma treliça mista devem ser dimensionadas para suportar o esforço cortante vertical total. Estas barras são solicitadas por esforços axiais e momentos de extremidade nas duas direções, momentos estes decorrentes das rotações impostas nas ligações soldadas pelas deformações da treliça e dos efeitos das excentricidades nodais. Estas excentricidades são causadas pelos deslocamentos dos pontos de trabalho (PT) necessários para a execução destas ligações sem necessidade de cortes adicionais nas extremidades das peças.

Os momentos provenientes das excentricidades fora do plano da treliça são auto equilibrados (Fig. 2).

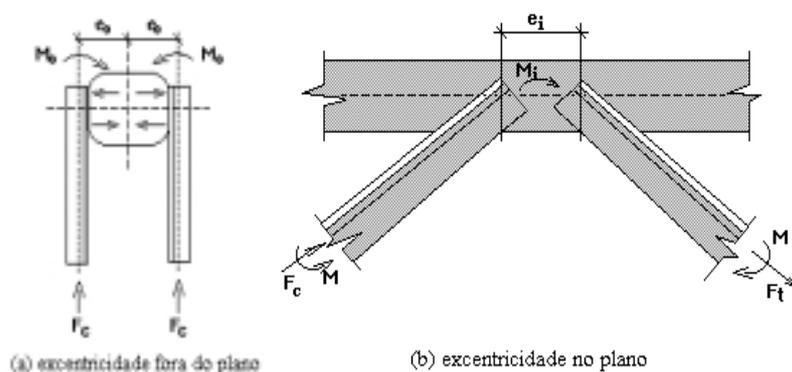


Figura 2. Momentos originados das excentricidades nodais da treliça.

2.2. Conectores de Cisalhamento

No dimensionamento de treliças mistas o cálculo dos conectores é efetuado admitindo-se a interação total entre a laje de concreto e a corda superior da treliça. A força de cisalhamento horizontal resistida pelos conectores entre os pontos de apoio e máximo momento fletor é dada por:

$$V_h = \phi A_{sc} F_y \quad (6)$$

onde : A_{sc} = Área da seção transversal do conector de cisalhamento.

A Norma Canadense CAN S16.1-M94, admite que os conectores de cisalhamento devem ser espaçados uniformemente ao longo do comprimento da corda.

2.3. Dimensionamento da Treliça Testada

Para realização do ensaio dimensionou-se uma treliça mista com 11910 mm de comprimento, com espaçamento de centro a centro entre treliças de 3000 mm. A largura efetiva da laje foi de 2350 mm, largura esta que foi adotada para o ensaio experimental. O deck-metálico utilizado foi fabricado pela PERKROM, e usado invertidamente com 76 mm de altura e tensão de escoamento de 250 MPa. A laje de concreto possuía espessura de 65 mm e f'_c de 20 MPa. O concreto foi armado com uma armadura mínima de tela soldada Q92 (TELCON) e colocado à 96 mm de altura em relação ao fundo do deck-metálico para controle da fissuração da laje.

As cordas e diagonais da treliça foram formadas por tubos retangulares compostos de perfis cantoneira de chapa dobrada. As demais diagonais foram compostas por cantoneiras de chapa dobrada. O aço estrutural adotado para as cordas e diagonais foi o SAC 41. Todas as peças de aço foram padronizadas com uma espessura de 6.35 mm. Adotou-se a configuração tipo *Warren* com 8 painéis, com as diagonais inclinadas aproximadamente a 45° , observando um modo adequado para a determinação de espaços livres para a passagem de dutos das instalações. A altura compreendida entre a superfície de concreto e a face inferior da corda inferior foi de 720 mm.

A treliça mista foi projetada para uma carga permanente total W_D correspondente a 11.7 kN/m e sobrecarga de ocupação W_L de 5.0 kN/m. De acordo com a Norma Canadense S16.1 (CANM, 1989), seções 7.2.2 e 7.2.3 o valor da carga total fatorada W_f é dado por :

$$W_f = \alpha_D W_D + \alpha_L W_L, \quad \text{sendo } \alpha_D = 1.25 \text{ e } \alpha_L = 1.5 \quad (7)$$

Os esforços máximos calculados utilizados no pré-dimensionamento dos elementos da treliça, foram obtidos a partir do valor de W_f correspondente a 263.4 kN, resultando um momento fletor fatorado M_f de 392 kN.m e um esforço cortante fatorado V_f de 132 kN. O momento resistente M_{rc} calculado foi de 441 kN.m, 1.13 vezes o valor de M_f .

Com o objetivo de simular este carregamento, projetou-se a treliça para suportar quatro cargas concentradas, equivalentes a carga distribuída total, aplicadas em quatro nós como mostra a figura 3. A flecha devido à carga correspondente a fase construtiva de lançamento do concreto da laje mista, foi estimada com um valor de 20 mm. A flecha máxima para o carregamento total imposto foi de 13.3 mm, menor que o máximo valor recomendado pela S16.1 de $L/360$ ou 33 mm.

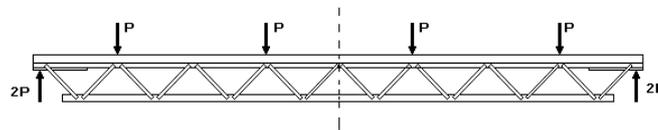


Figura 3. Diagrama de carregamento.

A treliça mista foi dimensionada para que a corda inferior atingisse não mais a tensão de escoamento, mas sua tensão de ruptura (F_u), ou seja:

$$T_r = \phi A_s F_u \quad (8)$$

2.4. Triangularização da Treliça

Entre as configurações conhecidas para treliça escolheu-se a tipo *Warren*, pois ela permite maiores espaços livres entre as diagonais para instalação de dutos e serviços (Fig. 4).

As diagonais da treliça são conectadas diretamente nas cordas por meio de soldas de filete. Devido a este tipo de conexão torna-se necessário a introdução de excentricidades nodais devido ao deslocamento do ponto de trabalho (PT). Esta medida evita cortes adicionais nas extremidades das diagonais que dificultam e aumentam o custo de fabricação (Fig. 5).

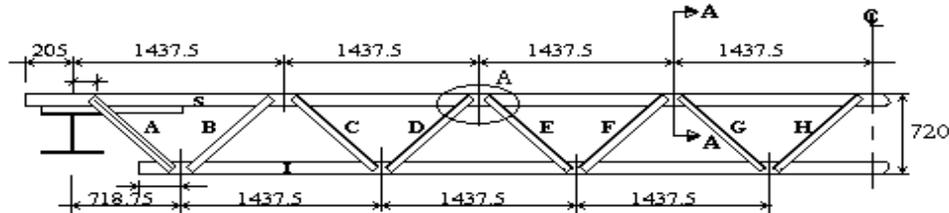


Figura 4. Detalhamento das barras e nós da treliça.

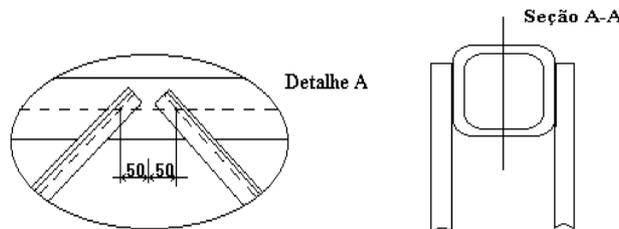


Figura 5. Detalhe A e seção A-A da figura 4.

2.5. Modelagem Para Análise Estrutural

De posse dos desenhos de detalhes (desenho de fabricação) são elaborados os modelos estruturais para serem analisados por computador. O primeiro modelo corresponde à treliça isolada (Fig. 6), onde são consideradas as fases construtivas de colocação do deck-metálico e do lançamento do concreto e não há nenhuma interação entre a laje mista e a treliça. O modelo 2 corresponde à treliça mista (Fig. 7), ou seja, situação em serviço em que há uma interação entre a laje mista e a treliça, sendo analisado sob cargas fatoradas de ocupação superpostas com as cargas permanentes (peso próprio). Neste método, considera-se a fração comprimida da área da seção transversal da laje de concreto como uma área equivalente em aço, transformada pela razão entre os módulos de elasticidade dos dois materiais ($n = E_s / E_c$). As ligações entre os elementos que compõem a laje e a corda superior, são feitas por pequenos segmentos denominados "*shear-links*".

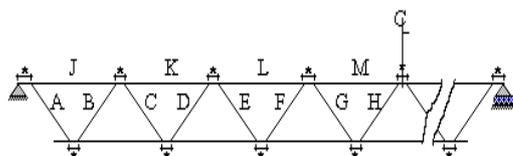


Figura 6. Modelo 1 - treliça isolada (construção não mista).

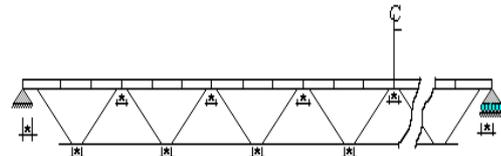


Figura 7. Modelo 2 - Treliça Mista

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo procurou-se investigar vários aspectos do comportamento da treliça, que são:

- deflexão da treliça na fase não mista devido ao peso próprio do concreto no sentido de avaliação do desempenho em construções não escoradas;
- deflexão e tensão nos membros devido à retração do concreto em um período de 90 dias;
- teste da treliça mista até a fase de ruína;
- flecha máxima da treliça mista e possíveis modos de ruína do modelo;
- distribuição de tensões no concreto na região central da treliça;
- comportamento dos conectores de cisalhamento ;
- estado de fissuração longitudinal do concreto;
- determinação dos esforços nas cordas e diagonais.

Ensaio de resistência dos conectores de cisalhamento, foram executados antes do teste destrutivo do modelo para se definir a distribuição dos conectores ao longo da corda superior da treliça. A qualidade do concreto foi avaliada através de testes de compressão de corpos de prova cilíndricos. Antes da ruína ser atingida, o conjunto foi devidamente instrumentado para a determinação da frequência natural da treliça mista. Isto teve como objetivo principal avaliar o aspecto de conforto humano relativo a vibração devido ao impacto de calcanhar ("*Heel Drop*" Test).

3.1. Instrumentação

As medidas das deflexões foram executadas com o uso de um deflectômetro mecânico, com precisão de 0,01 mm e curso máximo de 25 mm, localizado no centro da treliça e tendo como nível de referência a face inferior da corda tracionada. As leituras das deformações nas barras foram efetuadas por 60 extensômetros elétricos de resistência (Strain Gauges) tipo KYOWA e SHOWA com comprimento de resistência de 5 mm, resistência de 120 Ohms e fator de $2,10 \pm 1\%$ (gauge factor). Sua distribuição na estrutura está mostrada na figura 8.

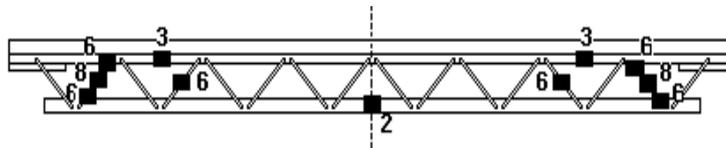


Figura 8. Posicionamento dos extensômetros elétricos na treliça mista.

3.2. Teste Final

Examinando a figura 9, pode-se observar o comportamento da estrutura desde a pré-carga até a ruína, onde a carga aplicada é plotada versus deflexões ocorridas no centro da treliça.

Para a carga de 55 kN foi obtida a tensão de escoamento f_y da corda inferior. Quando a carga total era de 240 kN, ouviu-se grandes estalos simultâneos, ocorrendo uma ruptura brusca, quase sem aviso, da treliça mista, sendo esta seccionada em sua região central. Houve uma ruptura frágil da solda de união das duas metades da treliça metálica. Antes da queda foi possível a percepção do seccionamento da corda inferior.

Os ruídos que antecederam a queda foram originados da ruptura da solda. A carga de ruptura foi então de 60 kN/atuador. A deflexão total no instante que antecedeu a queda da estrutura foi de 55 mm.

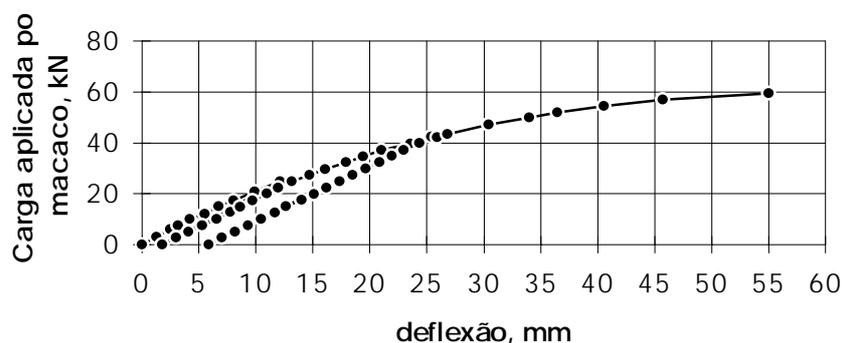


Figura 9. Gráfico carga versus deslocamento no centro da treliça mista.

4. CONCLUSÃO

O estudo experimental desenvolvido neste trabalho possibilitou observar o comportamento de uma treliça mista, em escala real, utilizando perfis leves de chapa dobrada, quando solicitada por quatro cargas concentradas nos quartos de vão.

Para as condições impostas de temperatura e umidade, constatou-se que praticamente não houve retração considerável na laje mista, ocorrendo formação de fissuras com uma abertura média na ordem de 0,2 mm. As deflexões e deformações variaram de forma lenta e contínua num período de 70 dias até estabilizar um valor máximo de 2,8 mm. A consideração especial do uso de tela soldada na laje de concreto contribuiu no controle do fissuramento devido à retração do concreto e variações termohigrométricas.

Uma vez reforçadas as diagonais e demais componentes da treliça para tensões correspondentes a F_u da corda inferior, não verificou-se mais a falha de nenhum componente a não ser da solda existente na corda inferior, que devido ao modo pela qual foi executada, tornou-se o ponto mais fraco levando a estrutura à ruína.

Para as emendas de topo soldadas das cordas da treliça, deve-se adotar medidas que possam garantir uma penetração total através do emprego de juntas pré-qualificadas da AWS. Uma análise posterior desta solda demonstrou uma falta de penetração e um alto índice de porosidade.

5. REFERÊNCIAS

- Salmon C. G., Johnson J. E., 1996. Steel Structures: Design and Behavior: Emphasizing Load and Resistance Factor Design, Hardcover, 4th Edition.
- Deus, E.P., 1993. Treliças mistas para edificações de andares múltiplos com uso de perfis leves de chapa dobrada. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
- Iyengar, S.H., Zils, J.J., 1973. Composite floor system for sears tower. AISC v.10.
- Bjorhovde, R., 1981. Full-scale test of a composite truss. Struc. Eng. Report n. 97, The Univ. of Alberta, Edmonton.
- CAN, 1994. Canadian standards association, CSA S16.1-94, Limit States Design of Steel Structures, Canadá.