



COMPORTAMENTO DE VIGAMENTOS TIPO STUB-GIRDER MODIFICADO

Antonyony Carlos Jordão Heitor

Sebastião Arhur Lopes de Andrade

antonyony@outlook.com

andrade@puc-rio.br

Potifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

R. Marquês de São Vicente, 225, 22451-900, Gávea, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo. Neste trabalho foi desenvolvida uma pesquisa sobre o comportamento estrutural de um sistema de vigamento de piso tipo stub-girder (Ritchie, 1984), modificado para melhor aproveitamento dos perfis em sua fabricação. O estudo preliminar é baseado na modelagem numérica com base na análise linear elástica e posteriormente para formulações não lineares a partir do Método dos Elementos Finitos (MEF), com uso do software ANSYS. O cálculo numérico das resistências foi obtido através da norma CAN-S16-10, Design of steel structures, 2010, da CSA (Canadian Standards Association), para as seções críticas do sistema, que foram encontradas através do critério de von Mises. Com base nos resultados obtidos, foram feitas recomendações de projeto do sistema e foram avaliadas as condições de economia de material quando comparadas às vigas mistas. Com vistas à fase de construção, é feita a discussão sobre a possibilidade de obtenção de um método construtivo industrializado, já que o sistema de fabricação é caracterizado pela rapidez de fabricação e a montagem é feita através de painéis pré-fabricados, o que dispensa escoramento na fase de concretagem.

Palavras-chave: Stub-girder, Modelagem numérica, Comportamento estrutural

1 INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas mistas consiste em utilizar, de modo simultâneo, as capacidades do aço e do concreto de resistir a esforços de tração e compressão respectivamente de maneira que sejam aumentadas a resistência e a rigidez do sistema, com gasto otimizado de materiais. O peso-próprio, reduzido nos sistemas mistos, tem um efeito propagador que diminui também os esforços nos elementos que os suportam, incluindo as fundações.

Colaco (1972) propôs o sistema misto de piso tipo *stub-girder*, o qual oferece a integração mecânica e estrutural através de aberturas. Além disso, esse sistema gera economia de peso devido à combinação estrutural proposta entre os *stub-girders* e as vigas transversais a eles. Ele pode ser classificado como híbrido entre uma viga de seção I de alma cheia e uma treliça, sendo o banzo superior a laje de concreto armado, o banzo inferior um perfil laminado de seção H e os *stubs*, formados por perfis laminados de seção I, que conectam os dois elementos (banzos superior e inferior) para garantir a transferência de esforço cortante entre eles.

O sistema é utilizado, principalmente, nos Estados Unidos, tendo o seu aprimoramento ocorrido a partir de diversas pesquisas realizadas no Canadá. É necessário salientar que as tensões que ocorrem na seção em que os três elementos estão interligados são de difícil obtenção, o que cria a necessidade de estudos mais avançados sobre o assunto. O sistema é exibido na Fig. 1.

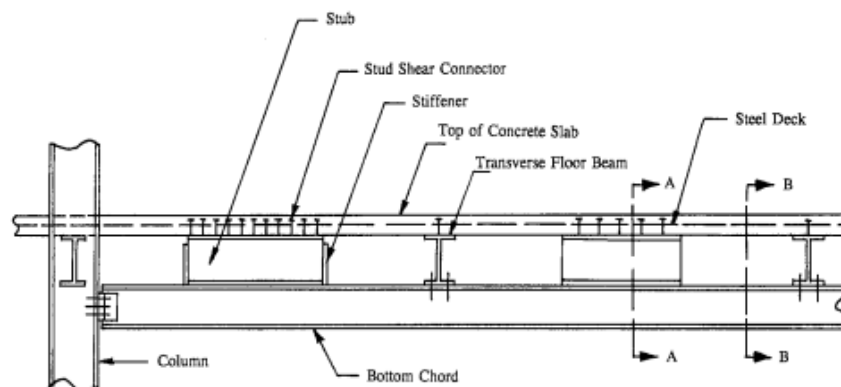


Figura 1. Sistema de piso *stub-girder* convencional

A partir das informações expostas, este trabalho objetiva fazer uma análise do sistema *stub-girder* modificado, sendo utilizado como viga secundária, e uma proposição de que ele seja utilizado em substituição às vigas mistas, com a finalidade de gerar a economia de material e resistência satisfatória. Apropriando-se do método dos elementos finitos através do Software ANSYS, será analisado o comportamento estrutural do sistema, formado por *stubs* de seção laminada W200 x 22,5, banzo inferior formado por seção laminada W150 x 22,5 e banzo superior formado por laje maciça de concreto armado com espessura de 80 mm, tendo o comprimento total de 6000 mm. A abertura é de 960 mm e a região soldada entre *stubs* e banzo inferior é de 700 mm, como proposto por Ritchie (1984). O cálculo numérico da resistência do conjunto foi obtido conforme a CAN-S16-10, *Design of steel structures*, 2010, da CSA (*Canadian Standards Association*).

2 METODOLOGIA

2.1 Geometria do sistema

O sistema modificado é formado por dois *stubs* (W200 x 22,5) de comprimento igual a 2520 mm. O banzo superior é formado por laje maciça de concreto, com espessura igual a 80 mm, comprimento de 6000 mm e largura efetiva, obtida conforme a CAN S16-10, igual a 1500 mm (1/4 do comprimento total). O banzo inferior (W150 x 22,5) tem comprimento igual a 2360 mm.

A partir da modelagem do sistema, foi decidido que a interação entre os *stubs* e a laje maciça é considerada completa e, para isso, de acordo com a CAN S16-10, são necessários 10 conectores de cisalhamento *stud-bolt* (ϕ 19.1 mm) distes entre si de 200 mm, soldados na extensão de cada *stub*. É importante salientar que a carga aplicada será dividida entre o banzo superior e o banzo inferior, de acordo com o rateio de seus momentos de inércia.

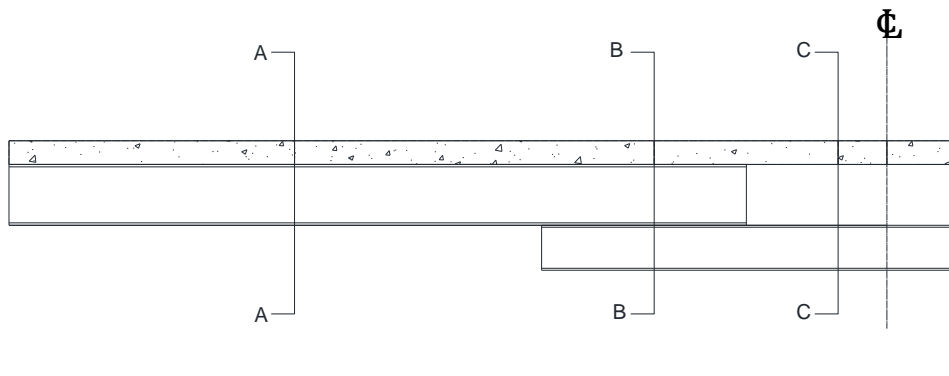


Figura 2. Sistema modificado longitudinalmente

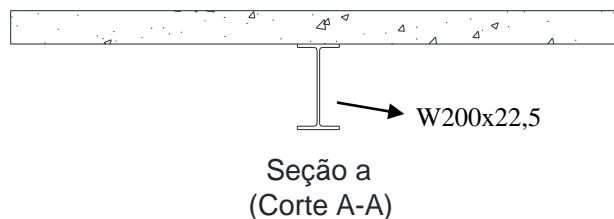


Figura 3. Seção a

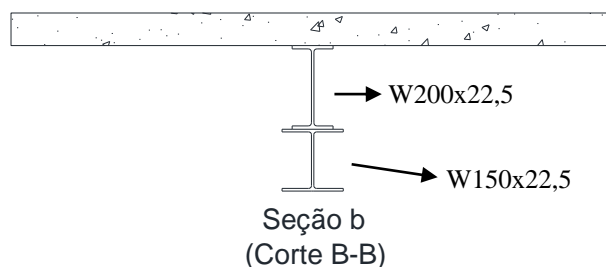


Figura 4. Seção b

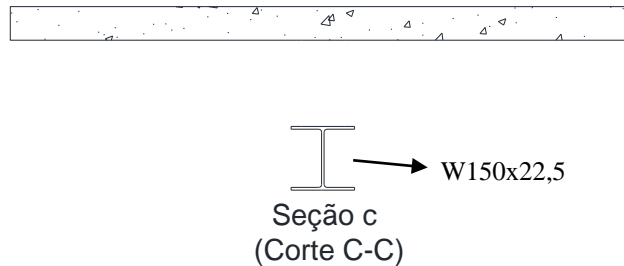


Figura 5. Seção c

2.2 Análise computacional do sistema misto

No que diz respeito à análise não linear dos materiais, para resultados satisfatórios, é necessário inserir as suas propriedades, leis constitutivas, condições de contorno do sistema e aplicação de carregamentos.

Modelo geométrico. Os modelos numéricos foram elaborados utilizando-se elementos sólidos *SOLID185*, presentes na biblioteca de elementos do software ANSYS 15 (2014). O elemento *SOLID185* é utilizado para modelagem tridimensional de sólidos. O elemento é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções X, Y e Z. Este elemento possui plasticidade, hiperelasticidade, enrijecimento devido ao estado de tensões, deformações devidas à fluência e grandes deformações e rotações. A geometria do elemento é apresentada na Fig. 6.

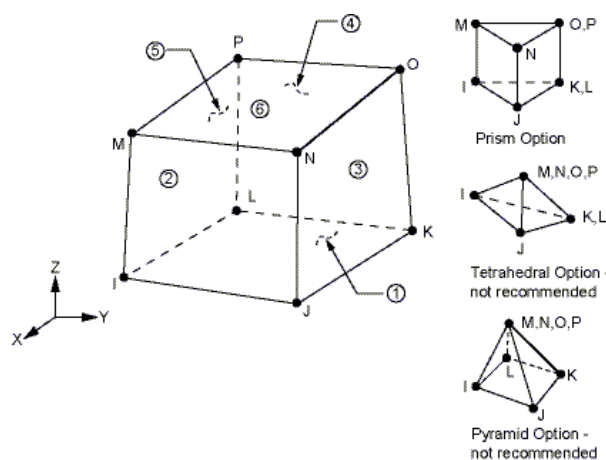


Figura 6. Elemento SOLID185

Propriedades dos materiais. O aço A-572 Grau-50 é utilizado nos perfis laminados, disponíveis no mercado brasileiro, e sua tensão limite de escoamento (f_y) é igual a 345 MPa, valor retirado da Tabela A.2 (Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural) da NBR 8800:2008. De acordo com o item 4.5.2.9 da referida norma, o seu módulo de elasticidade longitudinal (E) é assumido como sendo igual a 200000 MPa e o coeficiente de Poisson (ν) tem valor 0,3. Para as propriedades não-lineares deste material, foi escolhido o modelo bilinear que obedece ao critério de escoamento de Hill (1983), em que ao ser atingida a tensão limite de escoamento do material, ocorre o endurecimento isotrópico do mesmo, provocando um aumento uniforme (relacionado ao coeficiente angular α) do tamanho da superfície de escoamento e resulta em um aumento do valor da tensão.

O concreto é um material cuja modelagem é desafiadora. Por ele apresentar comportamentos diferentes devido aos esforços de compressão ou de tração, o modelo constitutivo deve ser escolhido de maneira cuidadosa para obter resultados de qualidade. Para a análise deste trabalho, não foram avaliados efeitos de fissuração no concreto. O módulo de elasticidade (E_c), obtido da sua curva tensão *versus* deformação é igual a 32903 MPa. Para as propriedades não-lineares do material, o modelo constitutivo que foi escolhido é multilinear e obedece ao critério de plastificação de Von-Mises, cujas características são similares às do modelo bilinear, entretanto existem mais coeficientes angulares e a tensão varia, a partir do escoamento, de acordo com cada um deles. Baseando-se no que foi exposto, será apresentada a curva tensão-deformação multilinear do concreto na Fig. 7.

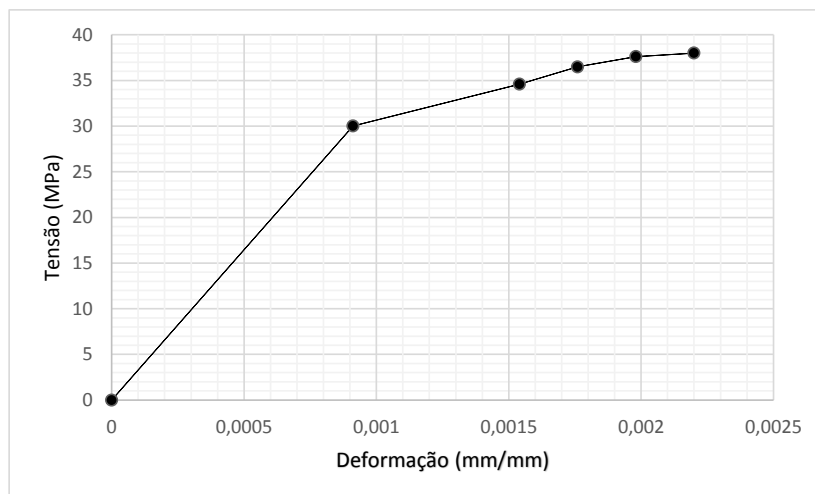


Figura 7. Curva tensão *versus* deformação do concreto

Condições de contorno e aplicação de cargas. Possuir condições de contorno corretas é essencial para uma solução satisfatória do modelo computacional. No caso do sistema proposto, as condições de contorno são idênticas às de uma viga bi-apoiada. Para tanto, a sua aplicação é feita utilizando-se o método *Multipoint Constraints (Rigid Surface Constraint)*, o qual consiste na criação de um nó piloto ao qual são ligados um nó ou um conjunto de nós pelo método *master-slave*. Por meio desse método, as condições aplicadas ao nó piloto (*master*) serão aplicadas também ao conjunto de nós selecionados (*slaves*). Os graus de liberdade restringidos no primeiro apoio são os translacionais nos eixos Y e Z e no segundo apoio, o translacional no eixo Y. Similarmente, o deslocamento aplicado no centro da viga, igual a 80 mm, foi criado com uma restrição no eixo translacional Y no nó piloto localizado no centro do *stub-girder*.

Tipo de Análise. A análise estrutural não-linear é feita pelo ANSYS por meio da aplicação do método *Newton-Raphson*. Com a finalidade de realizar uma previsão do comportamento não linear do material, a carga aplicada (deslocamento no eixo Y igual a 80 mm) foi dividida em uma série de subetapas (*substeps*) que são incrementadas imediatamente após o critério de convergência da subetapa anterior ter sido atendido. A carga é aplicada com incrementos menores durante a fase de escoamento dos materiais. A ruína ocorre quando a solução não atende ao critério de convergência, mesmo com incrementos de carga muito pequenos.

As propriedades dos materiais, inclusive elementos escolhidos para a malha, estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos Materiais

Modelo do Material	Tipo de elemento	Propriedades do Material			
1	SOLID185	Isotrópico Linear			
		EX	200000 MPa		
		PRXY	0,3		
		Isotrópico Bilinear			
		f_y	345 MPa		
		α	20 MPa		
2	SOLID185	Isotrópico Linear			
		EX	32903 MPa		
		PRXY	0,2		
		Isotrópico Multilinear			
		Ponto	Deformação	Tensão (MPa)	
		1	0,00091	30,00	
		2	0,00154	34,59	
		3	0,00176	36,49	
		4	0,00198	37,62	
		5	0,00220	38,00	

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelo programa ANSYS 15 (2014) para o modelo estudado neste artigo, inclusive comparações com as vigas mistas e discussão sobre o que ocorre quando o comprimento total do sistema é variável.

3.1 Configuração deformada

A configuração deformada do sistema modificado pode ser observada na Fig. 8, disposta abaixo.

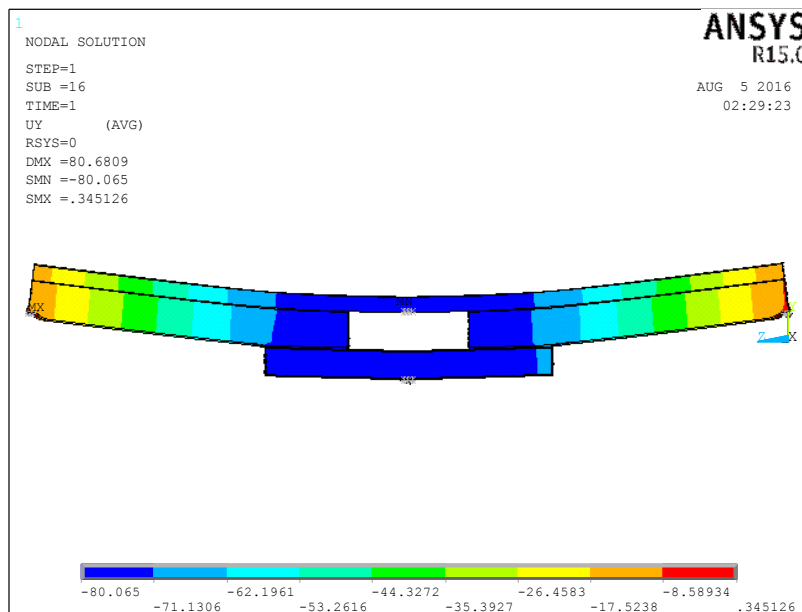


Figura 8. Configuração deformada do sistema

Conforme o esperado, os centros dos banzos superior e inferior têm deslocamentos idênticos, pelo fato de a carga ser aplicada ponderada entre os dois elementos.

3.2 Critério de Von Mises

Por meio do critério de Von Mises, pode-se observar as seções críticas do sistema modificado, as quais são o banzo inferior e a região de transição entre a seção 'a' (considerada neste estudo como sendo a seção de uma viga mista de aço e concreto, ver Fig. 3) e a seção 'b' (em que todos os elementos do sistema modificado estão ligados, ver Fig. 4). Estas seções podem ser observadas na Fig. 9.

3.3 Análise Paramétrica

O comportamento da estrutura foi analisado baseando-se em três modelos distintos, nos quais o parâmetro vão da viga variou entre 4000 mm (SB-4), 5000 mm (SB-5) e 6000 mm (SB-6). A curva carga *versus* deslocamento no ponto de aplicação da carga foi obtida para os três comprimentos e está exposta na Fig. 10.

Conforme pode ser observado na Fig. 10, a carga máxima é inversamente proporcional ao vão da viga. Isso se deve ao fato de o comprimento das seções críticas variar e, conseqüentemente, plastificar devido a cargas menores de acordo com o aumento do mesmo.

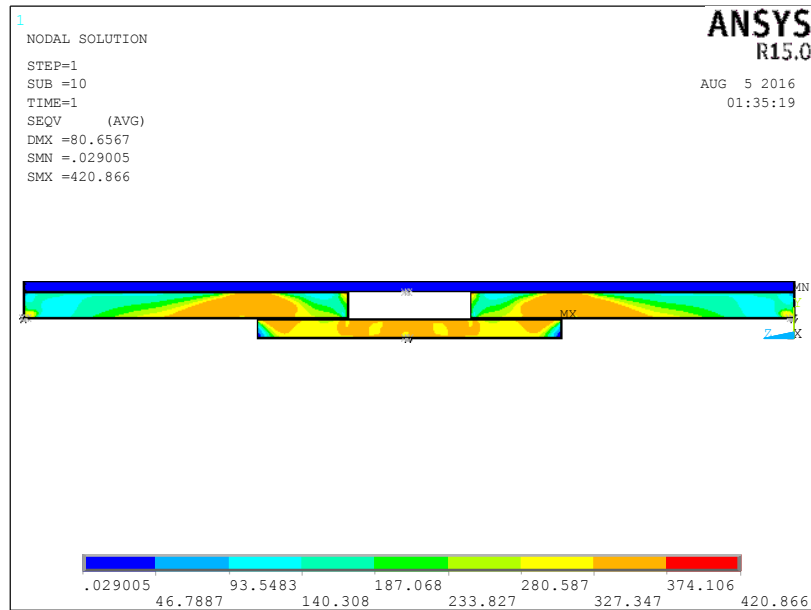


Figura 9. Seções críticas do sistema obtidas pelo critério de Von Mises

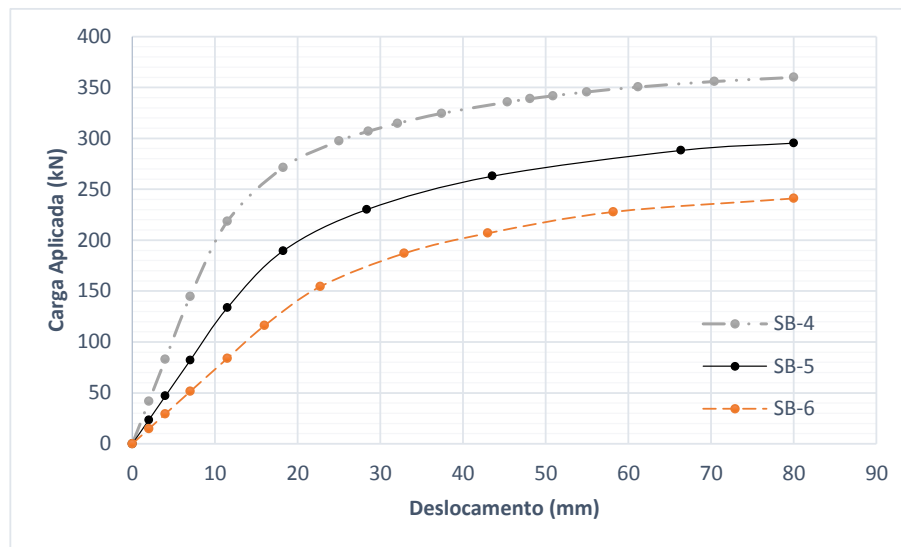


Figura 10. Curva carga versus deslocamento

3.4 Sistema modificado e vigas mistas

O sistema modificado estudado neste trabalho, de comprimento igual a 6000 mm (SB-6) foi comparado a três tipos de viga mista de mesmo comprimento, utilizando diferentes seções de perfis laminados (W250 x 32,7, W310 x 32,7 e W360 x 32,9). A curva carga aplicada *versus* deslocamento no ponto de aplicação da carga foi obtida para os três casos e o sistema modificado. É importante ressaltar que a espessura e a largura efetiva da laje foi considerada a mesma para todos os casos. Os resultados estão dispostos na Fig. 11.

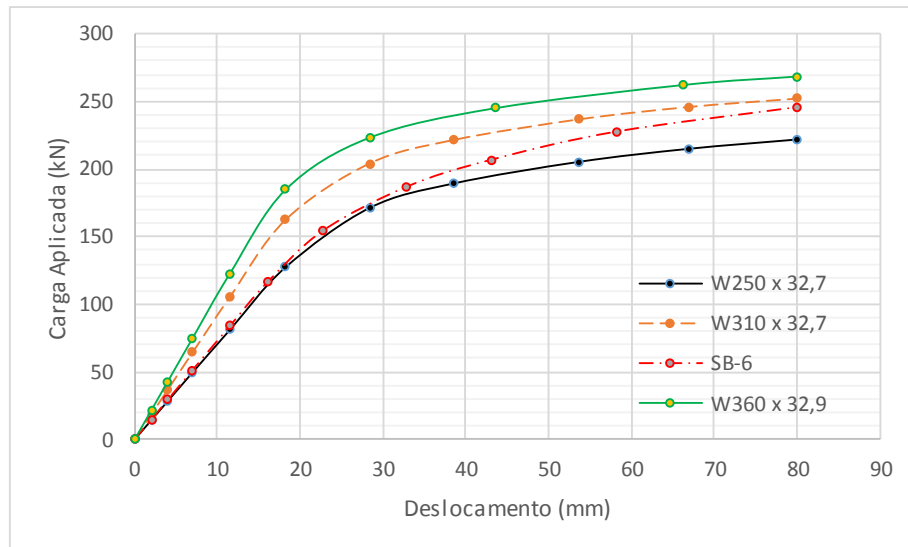


Figura 11. Curva carga *versus* deslocamento para diferentes seções

É possível notar que a rigidez do sistema modificado está em linha com as vigas mistas analisadas, mais próxima da formada por seção W250 x 32,7. Essa rigidez pode ser considerada satisfatória, pois o sistema possui rigidez próxima às vigas estudadas e pesa 166,5 kg (27,75 kg/m), uma diferença mínima de 29,7 kg, ou 15,14% em relação à seção mais leve, que possui peso linear igual a 32,7 kg/m e peso total igual a 196,2 kg.

4 PROJETO DO SISTEMA MODIFICADO

O projeto do sistema modificado foi feito de acordo com a CAN S16-10 para estados limites últimos. Os esforços solicitantes foram obtidos no software FTOOL, cuja análise é linear elástica e a modelagem realizada como proposto por Ritchie (1984), conforme observado na Fig. 12, com a diferença de que a seção 'a' (Fig. 3) será considerada uma viga mista. É preciso reiterar que a carga aplicada será dividida entre o banzo superior e o banzo inferior, como especificado na seção 2 e verificado na seção 3 do presente trabalho.

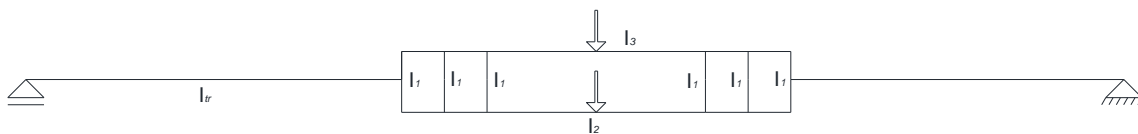


Figura 12. Modelo simplificado para obtenção dos esforços

No modelo simplificado ilustrado acima, I_{tr} simboliza o momento de inércia homogeneizado da seção mista de aço e concreto, calculado como disposto na Eq. (1).

$$I_{tr} = \sum I_i + \sum A_i (\bar{y} - y_i)^2. \quad (1)$$

Em que I_i é o momento de inércia, A_i , a área e y_i a posição do centro geométrico dos elementos (laje e perfil I) isolados e \bar{y} é a posição do centro geométrico da seção mista.

O momento de inércia transformado do *stub* é simbolizado por I_1 e foi dividido em 3 segmentos.

$$I_1 = \frac{t_w L_s^3}{36}. \quad (2)$$

Em que t_w é a espessura da alma e L_s o comprimento total do *stub*.

Os momentos de inércia do banzo inferior (perfil de seção H) e banzo superior (laje de concreto) são representados por I_2 e I_3 , respectivamente.

4.1 Esforços solicitantes

A seção laminada W150 x 22,5 tem momento de inércia I_2 igual a $12,290 \times 10^6 \text{ mm}^4$ e a laje tem momento de inércia homogeneizado I_3 igual a $10,530 \times 10^6 \text{ mm}^4$, fazendo com que o banzo superior receba 46% da carga e o banzo inferior 54%.

A Tabela 2 mostra a que tipo de esforço cada elemento do sistema está submetido.

Tabela 2. Esforços solicitantes atuantes nos elementos do sistema

Seção	Elemento	Esforços Solicitantes
a	Viga Mista	Momento Fletor e Cortante
b	Stub	Tração (devida ao momento oriundo do esforço de compressão da laje) e Cortante Horizontal
c.1	Banzo Inferior	Flexotração
c.2	Banzo Superior	Flexocompressão

4.2 Resistências

As resistências obtidas para cada elemento estão dispostas na Tabela 3, juntamente às cargas máximas que podem ser aplicadas para que cada uma delas seja ultrapassada, levando a estrutura à ruína.

A carga mínima, que deve ser aplicada para que a estrutura vá à ruína, tem valor igual a 144,6 kN e o modo de ruptura ocorrerá devido à flexotração no banzo inferior. Deste modo, a Tabela 4 traz possíveis seções de vigas mistas, as quais poderiam ser utilizadas para esta carga, sem que a taxa de utilização ultrapasse 100%.

Tabela 3. Resistências e cargas máximas possíveis

Seção	Elemento	Resistências	Carga Máxima (kN)	Resistências	Carga Máxima (kN)		
a	Viga Mista	Momento Fletor (kN.m)	147,8	152,4	Cortante (kN)	328,0	676,3
b	Stub	Tração (kN)	268,4	196,7	Cortante Horizontal (kN)	889,4	235,9
c.1	Banzo Inferior	Tração (kN)	900,5	-	Momento Fletor (kN.m)	50,2	144,6
c.2	Banzo Superior	Compressão (kN)	1288,0	343,6	Momento fletor (kN.m)	25,7	215,6

Tabela 4. Momento fletor resistente

Perfil	Momento Fletor Solicitante (kN.m)	Momento Fletor Resistente (kN.m)
250 x 32,7	216,9	236,9
360 x 32,9	216,9	296,4
310 x 32,7	216,9	272,9

Dentre os perfis obtidos, pode-se verificar que entre o mais leve apresenta peso linear igual a 32,7 kg/m, totalizando 196,2 kg na viga de comprimento igual a 6000 mm. O *stub-girder* modificado, estudado neste artigo, apresenta peso total igual a 166,5 kg, viabilizando uma redução de 29,7 kg, ou 15,14% do peso total. Ainda é necessário salientar que a rigidez do sistema modificado é maior que a apresentada pela viga mista comum, satisfazendo mais facilmente aos critérios das normas no que tange deslocamentos máximos permitidos em uma viga de piso ou de cobertura.

No que diz respeito ao projeto do sistema, pode-se avaliar que os elementos menos resistentes foram a viga mista, de comprimento igual a 1820 mm e o banzo inferior, de comprimento igual a 960 mm. Uma análise mais aprofundada pode ser executada, levando-se em consideração mudanças para que a resistência desses elementos aumente, sem acréscimo de peso, de modo que o uso do sistema modificado continue sendo mais vantajoso. Isso pode ser exemplificado com a escolha de um perfil que possui maior altura e maior momento de

inércia, algo que significa um valor mais alto para o momento fletor resistente de cálculo e um perfil de seção H com maior área e momento de inércia também pode ser empregado como banzo inferior, diminuindo a taxa de utilização no que diz respeito à flexotração.

5 CONCLUSÕES

Inicialmente, o presente trabalho realizou um estudo sobre o comportamento estrutural do sistema tipo *stub-girder* modificado considerando suas características e especificidades relacionadas a geometria e material. A partir do referido estudo, executou-se uma análise a partir do resultado das tensões e deformações. O estudo inicial teve a finalidade de entender o comportamento do sistema, incluindo deformabilidade e descoberta das seções críticas do mesmo através do critério de Von Mises, importantes para a obtenção da carga última que ele pode suportar.

Por meio dos resultados obtidos, foi possível fazer uma análise paramétrica buscando entender o comportamento do sistema proposto para diferentes vãos e pode-se notar que ele apresenta uma variação considerável dependendo do vão adotado. Isso mostrou que é necessária uma análise mais aprofundada no que diz respeito a comprimentos possíveis que façam com que a adoção do sistema seja competitiva.

Foi possível também fazer um comparativo entre o sistema modificado e três tipos de vigas mistas formadas por laje e perfil laminado de aço e pode-se notar em relação a esse aspecto, o sistema se mostra como uma alternativa econômica, pois é mais leve e possui rigidez próxima aos modelos estudados.

O projeto do sistema foi executado de acordo com a CAN S16-10, por meio dos estados últimos limites e ao ser comparado com as vigas mistas convencionais, o sistema se mostrou uma boa alternativa, pois ao utilizá-lo ocorrerá geração de economia de material e resistência satisfatória. Verificou-se que os esforços obtidos para o sistema modificado obedecem à análise realizada através do ANSYS, pois as seções críticas, ou seja, aquelas que atingirão a ruína primeiro são as mesmas obtidas por ele, o banzo inferior e a região de transição entre a viga mista (seção 'a') e a região em que todos os elementos estão interligados (seção 'b'). É importante reiterar que pelo fato de o sistema modificado ser formado por dois tipos diferentes de perfil, existe a possibilidade de diferentes configurações que fornecerão a resistência satisfatória e a economia de material quando comparado às vigas mistas.

O sistema tipo *stub-girder* modificado apresenta a vantagem de permitir a reutilização de pequenos comprimentos de perfis que sobram no processo normal de fabricação de estruturas de aço de edificações.

Em virtude do que foi abordado, conclui-se que o sistema pode ser usado como alternativa às vigas mistas. Contudo são necessárias análises mais aprofundadas no que diz respeito à altura dos perfis, comprimento da abertura e da região de solda, espessura da laje e comprimento total do sistema para que sejam obtidas as especificações que farão com que o sistema seja o mais econômico possível e ofereça resistência e rigidez satisfatórias.

REFERÊNCIAS

ANSYS 15.0 ®, 2014. ANSYS – Inc. Theory Reference.

Canadian Standard Association, 2010. S-16, Design of Steel Structures.

Colaco, Joseph P., 1972, Stub-girder system for high-rise buildings. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc.

Hill, R., 1983. The Mathematical Theory of Plasticity. New York: Oxford University Press.

Ritchie, J. K., Chien, E. Y. L., 2008 Design and Construction of Composite Floor Systems. CISC.