

Estudo numérico de vigamentos de piso tipo “stub-girder” modificado

Antonyony Carlos Jordão Heitor^{1*}, Sebastião Arthur Lopes de Andrade¹ e Raul Rosas e Silva¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, antonyony@aluno.puc-rio.br

Numerical study of a modified stub-girder floor system

Resumo

Este estudo tem por objetivo avaliar o comportamento estrutural do vigamento de piso tipo Stub-Girder, modificado para melhor aproveitamento dos perfis em sua fabricação. O estudo é baseado em formulações não lineares físicas por meio do método dos elementos finitos (MEF), com uso do software ANSYS. Para calibrar o modelo numérico, foram utilizados dados de ensaios em escala real disponíveis na literatura. Uma análise paramétrica foi realizada utilizando diversos tipos de perfis disponíveis no mercado brasileiro para que o sistema stub-girder modificado pudesse ser avaliado no que diz respeito à resistência e rigidez, mostrando também que os modelos constitutivos adotados para o concreto mostram excelentes resultados.

Palavras-chave: *Stub-Girder, Estruturas Mistas, ANSYS, constitutive models*

Abstract

The purpose of the research reported in this paper is to evaluate the structural behavior of a Stub-Girder floor system, modified to improve the use of steel profiles in its manufacturing process. A numerical procedure is developed, based on nonlinear analysis through the use of the finite element method (FEM), employing the software ANSYS. To calibrate the numerical model, data from full-scale tests available in the literature were used. A parametric analysis was performed using several types of profiles available in the Brazilian market so that the modified stub-girder system could be evaluated regarding strength and stiffness, as well as demonstrating excellent results in the constitutive models for concrete.

Keywords: *Stub-Girder, Composite Structures, ANSYS, constitutive models*

* autor correspondente

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais e Objetivos

O projeto e a construção de estruturas mistas consistem na utilização simultânea das capacidades do aço e do concreto de modo a 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. Existem diversos sistemas que fazem uso dessas vantagens, sendo alguns exemplos vigas mistas, pilares mistos, lajes mistas, treliças mistas e o sistema de piso tipo Stub-Girder.

Colaco (1972) propôs o sistema misto de piso tipo Stub-Girder, que provê a integração mecânica e estrutural através de aberturas de alma. 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 viga tipo Vierendeel, 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 mostrado na Figura 1.

Este trabalho e a pesquisa associada a ele são mais um esforço no que tange a mostrar as vantagens dos sistemas mistos, marcadamente o sistema de pisos Stub-Girder, que foi modificado dando origem à proposta de um novo sistema de vigamentos por Heitor (2017). Esse sistema reduz o peso da estrutura quando comparado às vigas mistas, além de possuir altura total menor que a dos Stub-Girders tradicionais, sem perder a vantagem de possuir aberturas inerentes a si que facilitam a instalação de serviços, apesar de apresentar como limitação os grandes esforços que ocorrem na região dos *stubs* externos.

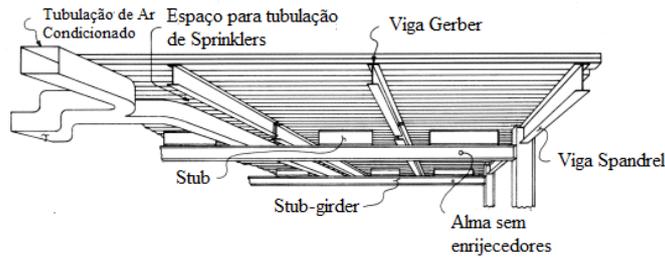


Figura 1 - Sistema de pisos Stub-Girder.

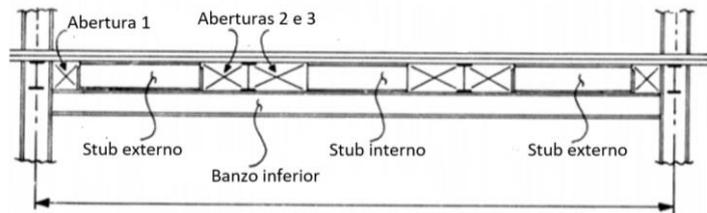


Figura 2 - Sistema de pisos Stub-Girder.

O sistema proposto por Heitor (2017) é composto por diferentes seções e cada uma delas possui um modo de falha distinto. Por meio da integração das tensões obtidas em modelos numéricos preliminares, realizados no software ANSYS 15, concluiu-se que na seção 'a', o sistema funciona como uma viga mista, na seção 'b' o sistema atua como os stubs externos do sistema original e na seção 'c' a laje está submetida simultaneamente a esforços de compressão e flexão e o banzo inferior a esforços de tração e flexão. O sistema modificado é apresentado nas Figuras 3 e 4.

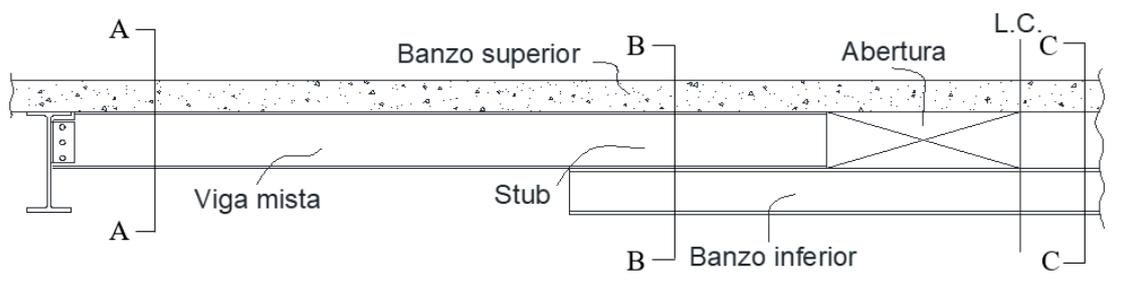


Figura 3 - Sistema de pisos Stub-Girder modificado.

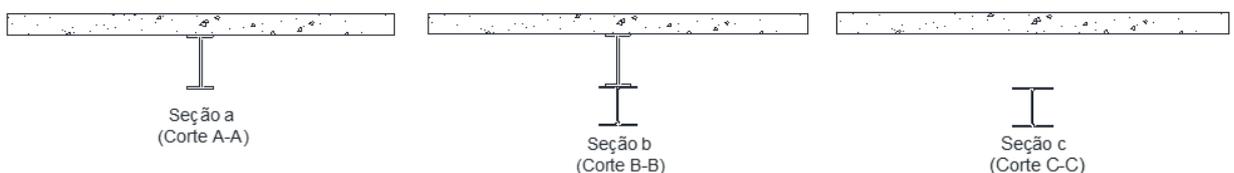


Figura 4 - Sistema de pisos Stub-Girder modificado.

Em projetos em que o sistema Stub-Girder modificado seja utilizado, é importante frisar que as vigas compostas pelo sistema atuam como apoio para as vigas VM2, que estão posicionadas na abertura do sistema modificado (fazendo com que o limite de altura da viga VM2 seja a altura dos *stubs*).



Figura 5 - Layout de um pavimento com uso do sistema Stub-Girder modificado.

A viga VM2 é contínua sobre 3 apoios e as vigas VM1 podem formar pórticos de ligações semirrígidas ou contínuas.

No presente trabalho, o sistema modificado proposto é estudado com maior profundidade com o objetivo de proporcionar melhor entendimento do funcionamento do sistema no que diz respeito a dois importantes aspectos de qualquer sistema construtivo: resistência e rigidez. Nesse contexto, os pontos mais importantes a serem tratados são:

- A validação dos modelos numéricos por meio do método dos elementos finitos com uso do ANSYS 19 realizada em comparação com os resultados obtidos por Lam e Hosain (1977), que realizou diversos ensaios em escala real.
- A avaliação da carga e o modo de ruína da estrutura por meio de modelos numéricos realizados no ANSYS 19, já que essa versão possui novos modelos de material para o concreto, que possibilitam melhores resultados.

2 Sistema de vigamentos de piso Stub-Girder

2.1 Considerações gerais

O sistema de vigamento de pisos Stub-Girder foi introduzido no mercado dos Estados Unidos a partir de 1970. O nome desse sistema misto foi proposto pelo seu principal desenvolvedor, Colaco (1972). O arranjo estrutural, que pode ser observado na Figura

3, representa economia no peso do aço devido à eficiência do sistema misto bem como a combinação entre o projeto das vigas mistas e vigas Gerber.

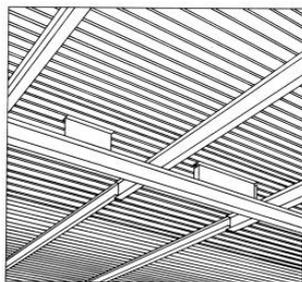


Figura 6 - Sistema de vigamentos de piso tipo Stub-Girder (1984).

No Canadá, esse sistema foi tema de várias pesquisas, incluindo testes em escala real que resultaram em mudanças significativas em comparação ao conceito original. Essas mudanças incluíram a altura dos perfis, acréscimo de enrijecedores nos stubs e reforço na laje de concreto (1984).

2.2 Comportamento estrutural do Sistema Stub-Girder

O sistema de pisos Stub-Girder é basicamente um sistema de vigamento de pisos de transferência de cargas gravitacionais. O sistema envolve conjuntos tipo Vierendeel, que consistem num banzo inferior composto por um perfil de aço de seção W e um banzo superior composto pela laje de concreto. As ligações intermitentes são compostas também por perfis de aço de seção W (que são chamados de stubs) conectados a ambos os banzos com o objetivo de realizar a transferência de esforço cortante entre os dois elementos. Vigas secundárias passam pelas aberturas e são conectadas também a ambos os banzos. Idealmente, o sistema pode chegar a 12 metros de vão, com o sistema de vigas secundárias chegando a vãos de 9 metros. O sistema é muito versátil, particularmente no que diz respeito às vigas secundárias, com a altura das vigas variando de acordo com a configuração estrutural e arquitetônica.

Estruturalmente, o sistema Stub-Girder utiliza vigas de piso contínuas e rótulas são adicionadas próximas aos pontos de inflexão para receber os vãos em balanço. As regiões de momento positivo são projetadas como vigas mistas em conjunto com a laje de concreto, garantindo economia de material e aumento da rigidez.

O Stub-Girder é analisado como uma viga Vierendeel, com a laje de concreto trabalhando como um banzo superior comprimido, o perfil de aço inferior trabalhando como um banzo inferior tracionado, e os stubs como painéis de cisalhamento.

2.3 Critérios de Projeto

Os critérios de projeto apresentados nesta seção foram preparados por Ritchie e Chien (1984) baseados num estudo detalhado do sistema Stub-Girder por muitos anos.

As orientações para o projeto e construção do sistema cobrem considerações sobre a laje de concreto; layout dos stubs e do banzo inferior; construção Gerber; controle de altura e verificações para as vigas Gerber; propriedades estruturais do banzo superior (laje de concreto reforçada); modelagem estrutural dos Stub-Girders para análise computacional; verificações das resistências dos elementos do Stub-Girder; projeto de conectores de cisalhamento; verificações referentes à vibração de pisos e verificações para os escoramentos na fase de concretagem.

2.4 Comportamento dos conectores de cisalhamento

Para que a ação mista ocorra propriamente, é necessário que o concreto e o aço se deformem em conjunto, como um único elemento, portanto, é necessário o uso dos conectores de cisalhamento, que, possuindo resistência suficiente para tal, serão responsáveis pela transmissão dos esforços cisalhantes na interface aço-concreto. O índice η_i tem como função avaliar o grau de interação entre o concreto e o aço e é determinado pela relação entre a seção de momento fletor máximo e a de momento fletor nulo.

Nesse trabalho, o conector de cisalhamento utilizado nos modelos numéricos foi o tipo perfobond, proposto inicialmente pela empresa Leonhardt, Andrä and Partners como alternativa aos stud bolts, que apresentam baixa resistência à fadiga. Esse tipo de conector é formado por uma chapa retangular com furos, que é soldada à viga metálica e embutido na laje de concreto.

Os furos são preenchidos por concreto e os cilindros formados são responsáveis por resistir ao cisalhamento horizontal e impedem que a laje de concreto e a viga de aço se desloquem verticalmente.

Nos modelos numéricos, a equação utilizada para a resistência última dos conectores de cisalhamento foi proposta por Oguejiofor e Hosain (1994, 1997) e é apresentada a seguir:

$$q_u = 4,5h_{sc}t_{sc}f_{uc} + 0,91A_{tr}f_{yr} + 3,31nd^2\sqrt{f_{uc}} \quad (1)$$

onde h_{sc} representa a altura do perfobond; t_{sc} sua espessura; f_{uc} a resistência do concreto à compressão; A_{tr} a área da armadura que passa pelos furos, caso exista; n representa o número de furos e d seu diâmetro e f_{yr} a tensão limite de escoamento do aço da armadura.

3 Modelo numérico

Nesta seção, são apresentadas as informações pertinentes aos modelos numéricos utilizados nesse trabalho. São discutidos e utilizados três modelos para validação, com dados experimentais obtidos por Lam e Hosain (1977).

3.1 Modelagem

O ANSYS Structural Mechanics é um software utilizado para auxiliar engenheiros e pesquisadores na área de modelagem estrutural.

Para modelar a laje de concreto foram utilizados elementos sólidos SOLID186, presentes na biblioteca de elementos do software ANSYS 19 (2018). O elemento SOLID186 permite a modelagem tridimensional de sólidos.

Os perfis de aço foram criados com por meio de elementos de casca SHELL181, que são posicionados nos planos médios das chapas que formam os perfis de aço. O elemento SHELL181 é utilizado para modelagem de estruturas que possuem pequena a média espessura.

No caso da simulação dos conectores de cisalhamento, foram utilizados elementos de mola COMBIN39. Esses elementos possuem dois nós e no caso da análise, possuem apenas um grau de liberdade: translação na direção Z, e recebem como informação, além do material utilizado, a curva carga-deslizamento, que pode ser não-linear, e no caso do modelo SGM-L, simularão o comportamento dos conectores de cisalhamento tipo perfobond e sua curva carga x deslizamento. A Figura 7 mostra a geometria do elemento COMBIN39 e a curva carga x deslizamento que é usada como dado de entrada.

Não foram realizados ensaios do tipo push-out para obtenção da curva carga-deslizamento dos perfobonds, mas há extensivos estudos a respeito de seu comportamento. A curva supracitada foi obtida conforme a Equação 2, proposta por Zheng et al. (2016).

$$V = \frac{V_u}{1 + \left(\frac{s_i}{s}\right)\left(1 - \frac{s}{s_p}\right)^2} \quad (0 \leq s \leq s_u) \quad (2)$$

onde s_i é o deslizamento inicial, que possui valor igual a 0,2 mm para testes tipo push-out de perfobonds, s_p é o valor do deslizamento para a carga máxima atingida, V_u , e finalmente, s_u é o deslizamento último, que tem valor igual a s_p em perfobonds sem armaduras passando pelos furos e $2,5s_p$ nos que possuem. A curva carga-deslizamento obtida é mostrada na Figura 7.

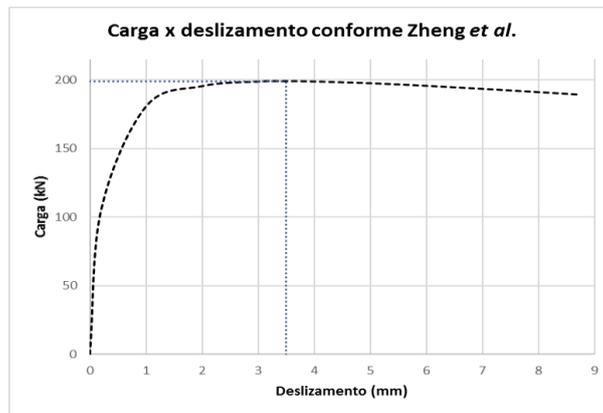


Figura 7 - Curva carga-deslizamento utilizada no modelo.

A carga máxima calculada foi de $V_u = 198,95$ kN.

As armaduras são criadas com uso de dois tipos de elemento: MESH200 e REINF264. Os elementos MESH200 são de uso temporário e apenas fazem parte do processo de criação dos elementos REINF264, já que em suas versões recentes, o ANSYS permite que a armadura seja criada de forma independente.

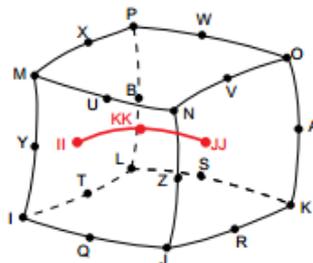


Figura 8 - Elemento REINF264 (ANSYS, 2018).

Os elementos REINF264 recebem como entrada de dados a tensão limite de escoamento do aço das armaduras e sua área.

O método utilizado para criação das armaduras foi o da malha independente, isto é, os nós dos elementos que formam a armadura não dependem da malha da laje de concreto. A criação das armaduras consiste em três etapas: criação de linhas na posição das armaduras dentro dos elementos SOLID185; criação dos elementos MESH200 com as linhas criadas e uso do comando ereinf (2018), que automaticamente transforma os elementos MESH200 em elementos REINF264.

O método da malha independente é de grande utilidade, já que facilita a criação da malha e a parametrização do modelo.

A Figura 9 apresenta o esquema do modelo numérico. Destaca-se que a distância entre as chapas das mesas dos perfis de aço é de $tfs/2 + tfi/2$, onde tfs é a espessura da mesa do perfil superior e tfi a da inferior.

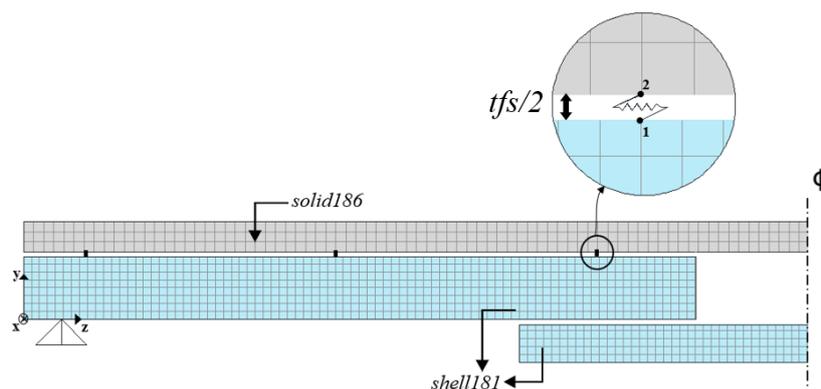


Figura 9 – Esquema do modelo numérico.

A ligação entre os perfis de aço foi utilizada interação total para simular a ligação soldada, ou seja, os nós das mesas dos perfis nessa área têm os mesmos deslocamentos nos eixos x, y e z. Na ligação entre o perfil de aço e a laje foi utilizada interação parcial, logo, os deslocamentos dos nós da laje e do perfil são iguais nos eixos x e y e no eixo z são utilizados os elementos COMBIN39 para simular o comportamento dos perfobonds.

3.2 Modelos constitutivos

Para as propriedades não-lineares do aço, independentemente da tensão limite de escoamento possuída, foi escolhido o modelo bilinear que obedece ao modelo 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 , que para essa análise foi considerado 20 MPa) do tamanho da superfície de escoamento, resultando em um aumento do valor da tensão.

A modelagem do concreto se deu com uso do modelo Drucker-Prager Concrete (1994). Os modelos Drucker-Prager de superfície única geralmente não apresentam grandes diferenças no comportamento à tração e compressão do concreto. Assim, esse modelo utiliza duas superfícies: a superfície de ruptura para o comportamento em tração e tração-compressão, que pode ser obtida conforme Drucker-Prager ou Rankine, e uma superfície para o comportamento à compressão, obtida conforme Drucker-Prager. É importante frisar que a superfície para o comportamento à compressão é diferente da utilizada para o comportamento em tração e tração-compressão, levando em conta a plastificação do concreto, enquanto a primeira se refere ao amolecimento por tração e tração-compressão. A Figura 10 mostra o modelo composto pelas superfícies de Drucker-Prager para tração e compressão.

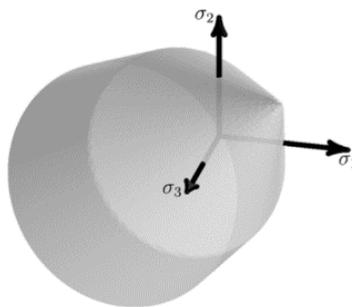


Figura 10 - Modelo composto pelas superfícies de Drucker-Prager para tração e compressão (2018).

No caso do presente trabalho, foram utilizadas apenas superfícies de Drucker-Prager, que, além de apresentarem excelentes resultados, não causam tanta instabilidade na obtenção dos resultados, como ocorre quando a superfície de Rankine é utilizada.

A resistência à tração uniaxial do concreto, bem como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão biaxial foram obtidas no código de modelagem do concreto fib2010 (da Fédération Internationale du Béton) (2012).

As leis de endurecimento, amolecimento e dilatação (do inglês *hardening, softening and dilatation*, ou HSD) regem o comportamento do material após o processo de

plastificação ser iniciado. Estão disponíveis no ANSYS 19 quatro modelos distintos para essas leis, sendo eles *Exponential; Steel Reinforcement; Fracture Energy* e *Linear*.

Após análises preliminares, foi decidido que o modelo utilizado para as leis de endurecimento, amolecimento e dilatação seria o *Exponential*. Esse modelo recebe como dados de entrada a deformação plástica à resistência axial à compressão, κ_{cm} ; deformação plástica na transição para o amolecimento exponencial, κ_{cu} ; tensão relativa no início do endurecimento não-linear, Ω_{ci} ; tensão relativa residual em κ_{cu} , Ω_{cu} ; tensão relativa residual de compressão, Ω_{cr} ; energia de fratura do modo I, G_{ft} e tensão residual de tração, Ω_{tr} .

A energia de fratura foi calculada conforme Benincá (2019), que formulou uma equação, Equação 3, que gera uma curva em que o trecho exponencial é menor e o decaimento não é tão lento quanto quando utilizada a equação para energia de fratura presente no código fib2010.

$$G_{ft} = - \frac{\bar{\kappa} R_t L_i}{\ln(\Omega_{tr})} \quad (3)$$

onde R_t representa a resistência uniaxial à tração, L_i é o comprimento característico do elemento que forma a laje de concreto e $\bar{\kappa}$ a deformação plástica quando a tensão residual de tração é atingida.

3.3 Condições de contorno

No caso do sistema proposto, as condições de contorno são idênticas às de uma viga biapoiada. Para tanto, a sua aplicação é feita utilizando-se o *método Multipoint Constraints (Rigid Surface Constraint)*, que consiste na criação de um nó piloto ao qual são ligados um nó ou um conjunto de nós pelo Método *master-slave*.

3.4 Tipo de análise

A análise estrutural não linear é feita pelo ANSYS 19 por meio da aplicação do método Newton-Raphson. Foram consideradas apenas não-linearidades de material.

3.5 Validação do modelo numérico

Lam e Hosain (1977) realizaram sete ensaios de flexão em escala real (assim como no modelo SGM-L, nesses ensaios a carga foi aplicada no centro da viga), nomeados SGC-1 a SGC-7. Para validação do modelo numérico, foram simulados os ensaios SGC-5, SGC-6

e SGC-7. Todos os modelos possuem 5 stubs de comprimento 305 mm e 4 aberturas de comprimento 533,75 mm e armadura formada por 8 barras de 142,5 mm². A interação aço-concreto foi considerada completa, ou seja, sem deslizamento relativo.

As informações concernentes à geometria e material dos modelos SGC-5, SGC-6 e SGC-7 são mostradas nas Tabela 1, 2 e 3.

Tabela 1 - Modelo SGC-5

SGC-5	Laje	Stub	Banzo inferior
Seção	425,4 x 101,6	S5x10	W6x15,5
L (mm)	3.660	305	3.660
$f_{y\text{mesa}}$ (MPa)	-	323,7	323,7
$f_{y\text{alma}}$ (MPa)	-	336,3	336,3
f_c (MPa)	30,18	-	-
Cobrimento (mm)	19	-	-

Tabela 2 - Modelo SGC-6

SGC-6	Laje	Stub	Banzo inferior
Seção	425,4 x 101,6	S6x12,5	W6x15,5
L (mm)	3.660	305	3.660
$f_{y\text{mesa}}$ (MPa)	-	323,7	323,7
$f_{y\text{alma}}$ (MPa)	-	336,3	336,3
f_c (MPa)	31,01	-	-
Cobrimento (mm)	19	-	-

Tabela 3 - Modelo SGC-7

SGC-6	Laje	Stub	Banzo inferior
Seção	425,4 x 101,6	S8x18,4	W6x15,5
L (mm)	3.660	305	3.660
$f_{y\text{mesa}}$ (MPa)	-	323,7	323,7
$f_{y\text{alma}}$ (MPa)	-	336,3	336,3
f_c (MPa)	29,0	-	-
Cobrimento (mm)	19	-	-

As Figuras 11, 12 e 13 mostram as curvas carga-deslocamento dos ensaios em escala real e dos modelos numéricos.

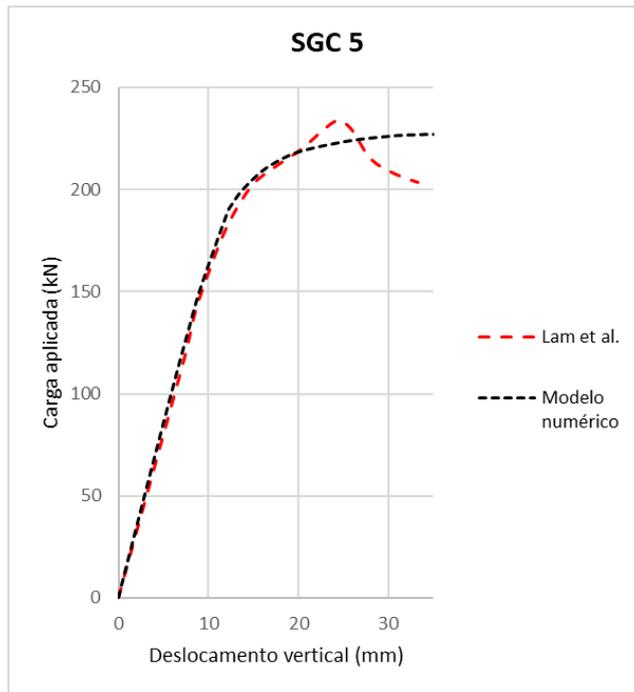


Figura 11 - Curvas carga-deslocamento do modelo SGC-5.

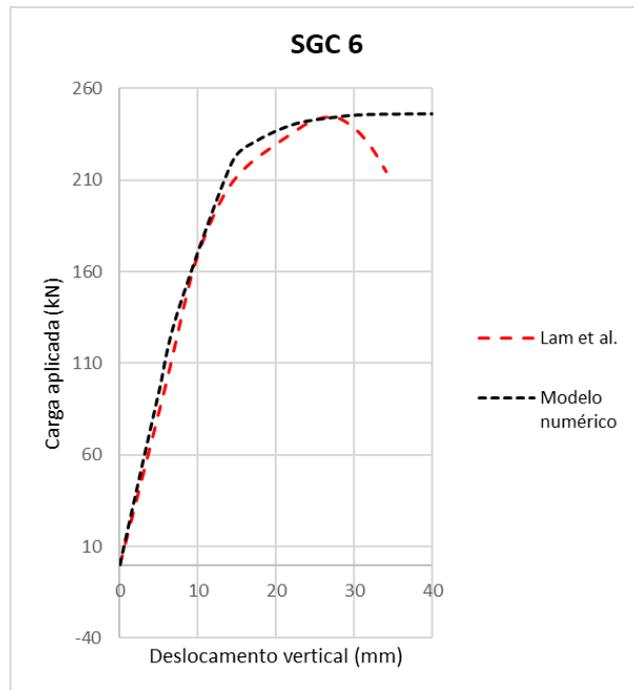


Figura 12 - Curvas carga-deslocamento do modelo SGC-6.

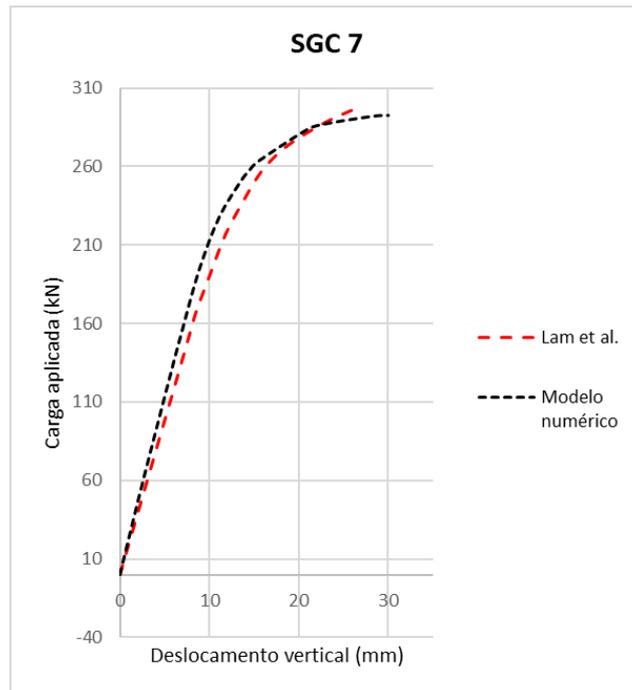


Figura 13. Curvas carga-deslocamento do modelo SGC-7.

Como pode ser observado nas curvas obtidas por meio dos modelos numéricos, a metodologia utilizada, incluindo elementos e modelos constitutivos, mostrou resultados coerentes quando comparada aos ensaios em escala real, já que as cargas máximas e as curvas ascendentes ficaram próximas do comportamento obtido nos testes em escala real. Deve-se salientar que o fato de não haver queda nas curvas dos modelos numéricos se deve ao tipo de modelo constitutivo adotado para o concreto, já que o parâmetro de tensão relativa de compressão, Ω_{cr} , não pode ter valores que sejam muito baixos, o que geraria problemas de convergência nos modelos. Além disso, no modelo SGC-7, a curva carga x deslocamento do teste em escala real apresenta não apresenta ponto de pico pois o ensaio foi finalizado de maneira brusca devido a sua montagem. Constata-se que há dificuldades na região pós-pico tanto nos ensaios experimentais como numéricos, algo ainda a ser pesquisado em futuros estudos, especialmente quanto à convergência do procedimento numérico.

4 Análise paramétrica

Os sistemas modificados estudados são formados por dois stubs de comprimento igual a 2520 mm que proporcionam uma abertura de 480 mm tendo em vista o vão total de 6.000 mm. O banzo superior é formado por laje maciça de concreto armado, com

espessura igual a 100 mm e largura efetiva, obtida conforme a CAN S16-10 (2010), igual a 1.500 mm (1/4 do comprimento total). O banzo inferior tem comprimento igual a 2.360 mm.

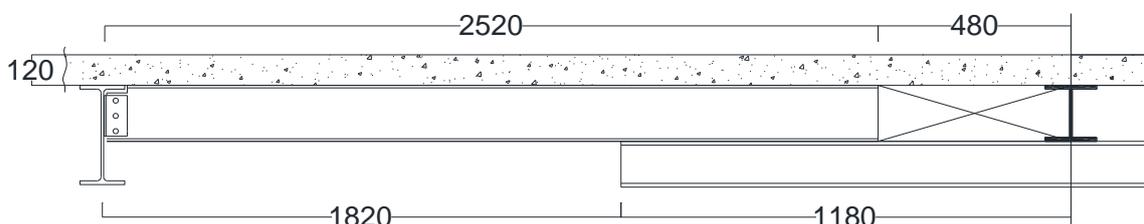


Figura 14 - Geometria do modelo numérico SGM-L (cotas em mm).

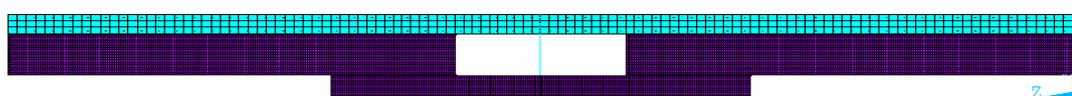


Figura 15 - Geometria do modelo numérico SGM-L.

Após a validação do modelo numérico mostrada na seção anterior, foram realizadas análises em 14 modelos, variando as seções dos stubs mistos e da corda inferior. Em todos os modelos, foram utilizados perfobonds com medidas 180 x 76,2 mm com dois furos de diâmetro de 19 mm espaçados a 80 mm. Além disso, a laje também é a mesma em todos os modelos, possuindo largura efetiva igual a 1.500 mm e espessura igual a 100 mm, com armaduras mínimas, calculadas conforme a NBR 6118:2014 – *Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. A Tabela 4 apresenta as informações dos modelos numéricos analisados.

Tabela 4 - Modelos analisados

	Cód.	Corda Inferior	Stub		Cód.	Corda Inferior	Stub
Grupo 1	SGM-01	W150x29,8	W250x17,3	Grupo 2	SGM-08	W150x37,1	W250x17,3
	SGM-02	W150x29,8	W250x22,3		SGM-09	W150x37,1	W250x22,3
	SGM-03	W150x29,8	W250x25,3		SGM-10	W150x37,1	W250x25,3
	SGM-04	W150x29,8	W250x28,4		SGM-11	W150x37,1	W250x28,4
	SGM-05	W150x29,8	W250x32,7		SGM-12	W150x37,1	W250x32,7
	SGM-06	W150x29,8	W250x38,5		SGM-13	W150x37,1	W250x38,5
	SGM-07	W150x29,8	W250x44,8		SGM-14	W150x37,1	W250x44,8

A análise não linear física foi realizada para os 14 modelos e, na fase de pós-processamento, obtidos os gráficos de força aplicada *versus* deslocamento. A partir desses gráficos são estimadas das as cargas limites para cada modelo.

Dos mesmos gráficos podem ser retiradas importantes informações que auxiliarão no entendimento do sistema no que diz respeito à análise não linear física e ao projeto do sistema por meio do método dos estados limites de acordo com a norma canadense CAN-S16.

Os gráficos condensados para os modelos dos Grupos 1 e 2 são apresentados nas Figuras 16 e 17.

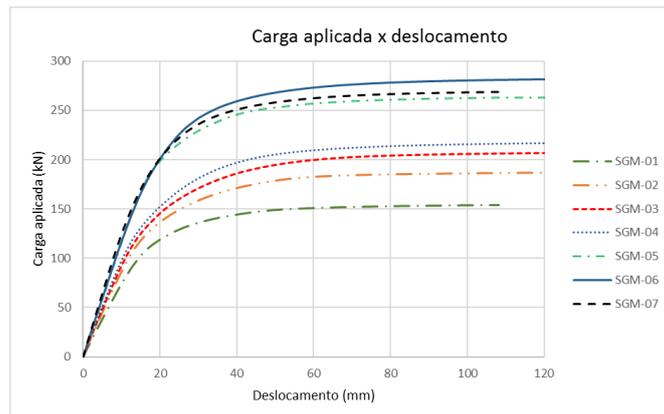


Figura 16 - Curvas carga-deslocamento do Grupo 1.

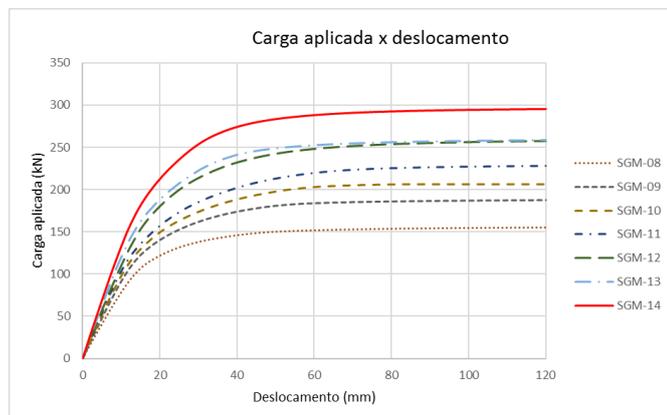


Figura 17 - Curvas carga-deslocamento do Grupo 2.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos para as cargas máximas obtidas para os modelos analisados.

Tabela 5 - Cargas máximas atingidas pelos modelos numéricos

Grupo	Modelo	P_{\max} - ANSYS (kN)	Grupo	Modelo	P_{\max} - ANSYS (kN)
Grupo 1	SGM-01	153,8	Grupo 2	SGM-08	155,6
	SGM-02	187,0		SGM-09	187,6
	SGM-03	206,5		SGM-10	206,0
	SGM-04	216,9		SGM-11	229,0
	SGM-05	263,2		SGM-12	259,1
	SGM-06	282,2		SGM-13	259,7
	SGM-07	270,3		SGM-14	295,9

Como pode ser observado nos grupos 1 e 2, a mudança da corda inferior não afetou os resultados no que diz respeito à carga máxima. Isto porque, no caso dos perfis do grupo 1, a seção crítica em boa parte das seções foi o stub misto; logo, a mudança da corda inferior não afetou os valores da carga máxima de forma expressiva.

Por meio dos resultados obtidos, chegou-se à Equação 4, que mostra quando é válido fazer a modificação da seção da corda inferior caso o tipo de seção para os *stubs* seja mantido o mesmo. Se o fator F_{sbc} for maior ou igual a 0,90, a carga máxima será afetada com a mudança da seção da corda inferior.

$$F_{sbc} = \sqrt{(F_{Abc1} - F_{Abc2})^2 + (F_{Ibc1} - F_{Ibc2})^2} \geq 0,90 \quad (4)$$

onde:

F_{Abc1} é a relação entre as áreas do *stub* e da corda inferior original; F_{Abc2} representa a relação entre as áreas do *stub* e da corda superior que substituirá a original; F_{Ibc1} é a relação entre os momentos de inércia (eixo forte) do *stub* e da corda inferior original e F_{Ibc2} representa a relação entre os momentos de inércia (eixo forte) do *stub* e da corda superior que substituirá a original;

4.1 Laje de concreto

Com o modelo utilizado no ANSYS, pode-se observar o caminho das fissuras por meio das deformações plásticas equivalentes, porém, no caso dos modelos analisados, o banzo superior, formado pela laje de concreto de largura efetiva de 1.500 mm e espessura de 100 mm, nunca foi uma seção crítica. Em poucos modelos a tensão limite de tração do concreto foi atingida. A Figura 18 mostra as tensões longitudinais na base da laje de concreto no modelo SGM-06 (fundo da laje).

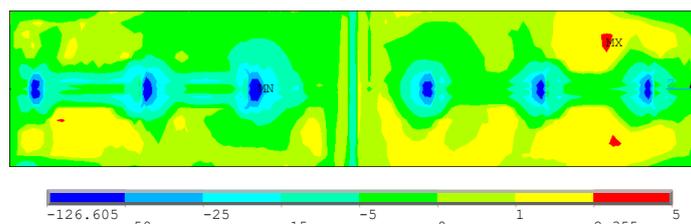


Figura 18 - Tensões longitudinais (MPa) na base da laje de concreto do modelo SGM-06.

É interessante observar que o centro da laje, região que representa a corda superior no sistema stub-girder modificado, não atinge a tensão limite de tração, que no caso do concreto utilizado ($f_{ck} = 30$ MPa), tem valor de 2,355 MPa. Isso pode se dever ao fato de que, pela distribuição da carga aplicada que ocorre entre a laje de concreto e o perfil de aço que forma o banzo inferior, quanto maiores os momentos de inércia dos perfis que o formam, menos carga será distribuída para a laje de concreto.

5 Considerações finais

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre o comportamento estrutural do sistema de vigamento de piso tipo stub-girder de geometria modificada. Após a revisão teórica do sistema original, proposto por Colaco (1972), que apresenta limitações no que diz respeito aos esforços nos *stubs* externos mesmo com o uso de conectores de cisalhamento, e a discussão sobre a geometria do novo sistema, foi executada a validação do modelo numérico, com uso do software ANSYS 19, em comparação com dados experimentais obtidos por Lam e Hosain (1977). O comportamento pós-pico instável não foi adequadamente modelado, mas entende-se que este trecho é de difícil reprodução experimental e numérica e de menor importância para efeitos de estudos paramétricos em regimes de utilização até atingimento do colapso.

Após validado o modelo, foi realizada uma análise paramétrica com 2 grupos de perfis, gerando assim 14 modelos. Foram extraídas as cargas máximas atingidas por eles e discutidas questões como as seções críticas e tensões obtidas para a laje de concreto utilizando os modelos constitutivos mais recentes presentes no ANSYS 19, que apresentaram excelentes resultados. A geometria do sistema modificado permite o uso um número maior de conectores de cisalhamento, não mais apresentando as limitações do sistema original e mantendo a possibilidade de passagem de dutos, tubulações e eletrocalhas. Além disso, foi obtida uma equação para avaliar a possibilidade de mudança do perfil que forma o banzo inferior sem que ocorra desperdício de material.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio à pesquisa.

7 Referências Bibliográficas

- COLACO, J. P. **Stub-girder system for high-rise buildings**. Engineering Journal, AISC, vol. 9, p. 89-95. 1972.
- LAM, Y. W.; REZANSOFF, T.; HOSAIN, M. U. **An experimental investigation of Stub-Girders**. Structural Engineering Research Report nº 14, University of Saskatchewan, Saskatchewan. 1977.
- HILL, R. **The Mathematical Theory of Plasticity**. Oxford University Press., New York, 355 p. 1983.
- RITCHIE, J. K.; CHIEN, E. Y. L. **Design and Construction of Composite Floor Systems**. CISC, 323 p. 1984.
- CHEN, W. F. **Constitutive Equations for Engineering Materials**. Volume 2: Plasticity and Modeling. Elsevier. 1994.
- OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN M. U. **A parametric study of perfobond rib shear connectors**. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 21, p. 614-625. 1994.
- OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN M. U. **Numerical analysis of push-out specimens with Perfobond rib connectors**. Computers and Structures. vol. 62, p. 617-624. 1997.
- CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. S-16-10, **Design of Steel Structures**, 174 p. 2010.
- THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **Model Code 2010**. Bulletin n. 65, Lausanne, 2012.
- ZHENG, S.; LIU, Y.; YODA, T.; LIN, W. **Shear Behavior and analytical model of perfobond connectors**. Steel and Composite Structures, vol. 20, p. 71-89. 2016.
- HEITOR, A. C. J. **Estudo de um sistema de vigamento de piso tipo Stub-Girder modificado**. Dissertação de mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 94 p. 2017.
- ANSYS 19.1®, **Command Reference**. ANSYS – Inc. 2018.
- ANSYS 19.1®, **Element Reference**. ANSYS – Inc. 2018.
- ANSYS 19.1®, **Material Reference**. ANSYS – Inc. 2018.
- ANSYS 19.1®. **Theory Reference**. ANSYS – Inc. 2018.
- BENINCÁ, M. E. **Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto: modelo parametrizado de elementos finitos**. Dissertação de mestrado. UFRGS, Porto Alegre. 204 p. 2019.