



XII CONGRESSO BRASILEIRO  
de PONTES e ESTRUTURAS  
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

## **Modelagem do comportamento de estruturas mistas de seção composta preenchidas com concreto armado**

**Gabriel Amós Alves Cruz Lima<sup>1</sup>, Sebastião Arthur Lopes de Andrade<sup>2</sup>, Raul Rosas e Silva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / gabrielamos.eng@gmail.com

<sup>2</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / andrade@puc-rio.br

<sup>3</sup> Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / raul@puc-rio.br

### **Resumo**

Uma preocupação crescente na construção civil é a obtenção de estruturas mais resistentes e rígidas, além de economicamente viáveis. Sob essa ótica, este trabalho tem o objetivo de avaliar, através de uma modelagem numérica, o comportamento de estruturas mistas com uma seção transversal composta como uma variação de uma seção caixão que possibilita aumentar a distância entre os perfis de aço. Foram estudados dois tipos de seções, uma composta por dois perfis I laminados, e outra por dois perfis U enrijecidos, em ambos os casos conectados por perfis I e preenchidos com concreto armado. Com o uso do software ABAQUS, foi avaliado o comportamento estrutural dos elementos submetidos a carregamentos de flexão, compressão e flexo-compressão. O modelo foi validado através da comparação com dados experimentais de estudos anteriores e resultados previstos pela norma técnica brasileira, conseguindo representar adequadamente o comportamento das curvas momento-deslocamento e força-deslocamento ao longo das análises realizadas. As resistências obtidas a partir dos modelos numéricos foram superiores aos valores esperados pela solução prevista em norma, principalmente no caso do carregamento de compressão. De modo a avaliar a viabilidade econômica do sistema misto proposto, foi realizado o dimensionamento de um galpão industrial, que evidenciou ganho significativo de inércia do modelo proposto em comparação com um sistema comum de seção caixão composta apenas de perfis de aço, resultando em uma economia de até 11% na massa equivalente em aço da estrutura. Por fim, desenvolveu-se um estudo paramétrico para investigar a influência do número e disposição dos conectores, da resistência do concreto e do diâmetro da armadura longitudinal na resistência da estrutura.

### **Palavras-chave**

Estruturas Metálicas; Estruturas Mistas; Análise Computacional de Estruturas.

### **Introdução**

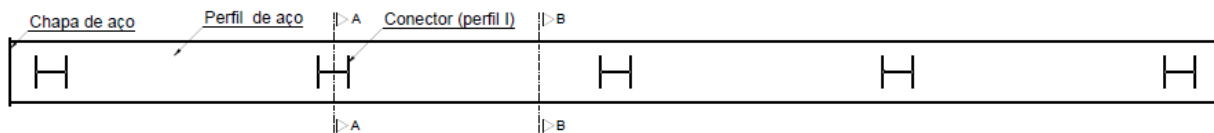
Uma determinada estrutura é denominada de estrutura mista quando consiste na associação de dois ou mais materiais que irão trabalhar juntos para resistir às solicitações. Segundo Figueiredo (1998), essa associação é feita com o objetivo de que a estrutura mista possa combinar as vantagens que cada componente possa oferecer. No caso do concreto e do aço, combina-se a resistência à compressão e o baixo custo do primeiro, com o bom comportamento à flexão do segundo.

Apesar do avanço das pesquisas sobre estruturas mistas ter sido notável ao longo dos anos, essa ainda é uma área com bastante potencial. Isso se deve à demanda do mercado da construção civil por novas soluções estruturais mais eficientes e mais baratas, bem como ao fato de existirem diversos parâmetros que podem influenciar o comportamento desse tipo de elemento estrutural.

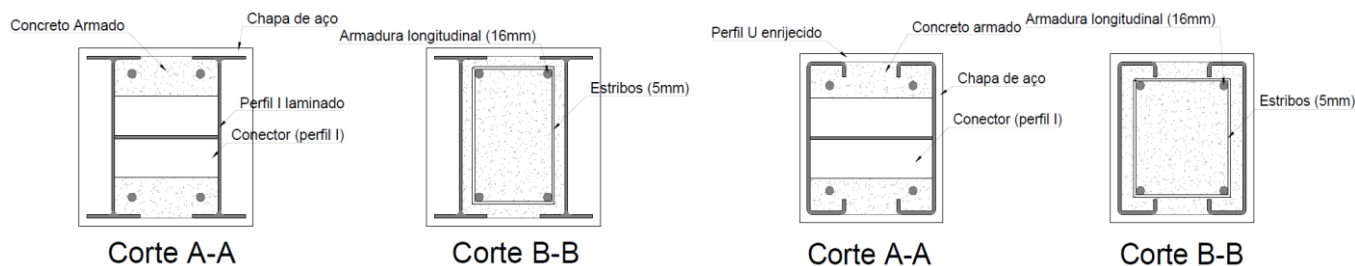
É nesse contexto que o presente trabalho visa analisar sistemas mistos de seções compostas, idealizados pelo Prof. Sebastião Arthur Lopes de Andrade, que apresentem resistência elevada em relação a outras soluções estruturais, e sejam viáveis do ponto de vista construtivo e econômico. O estudo foi focado na análise da resistência das seções propostas, à luz das recomendações da ABNT NBR 8800:2008, e também na realização de uma modelagem computacional.

As seções avaliadas são compostas por dois perfis de aço, tipo I ou tipo U enrijecidos, conectados por perfis I, e preenchidos com concreto armado. O sistema proposto é uma variação de uma seção tipo caixão, em que se utiliza dois perfis metálicos, conectados ao longo do comprimento da estrutura por outros perfis tipo I que irão possibilitar o maior espaçamento e aumentar a inércia da seção composta, e preenchendo-se com concreto armado o interior do espaço entre os perfis de aço.

A Figura 1 apresenta uma visão de um corte longitudinal da estrutura, sem representação da armadura e do concreto. Na Figura 2, tem-se a seção transversal do modelo composto por perfis I laminados, em uma região do conector e omitindo os estribos, e outra na região sem conector, apresentando os estribos. Analogamente, na Figura 3, tem-se a seção transversal para o modelo composto por perfis U enrijecidos.



**Figura 1 - Corte longitudinal do modelo proposto.**



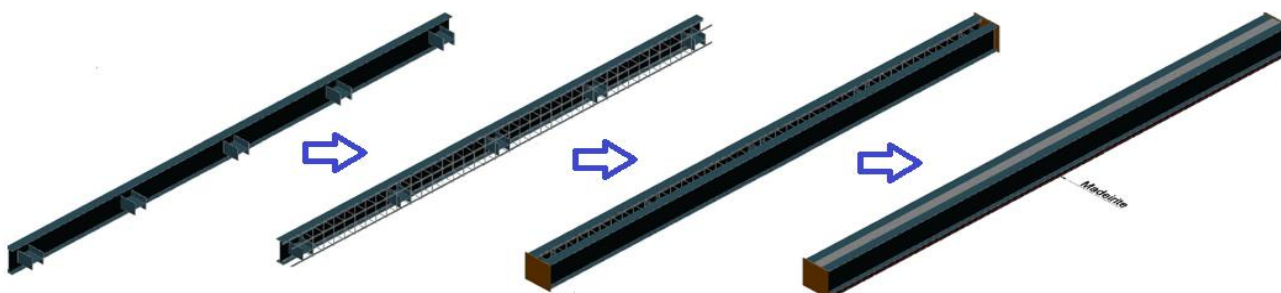
**Figura 2 - Seção transversal do modelo com perfis I, na região dos conectores e dos estribos.**

**Figura 3 - Seção transversal do modelo com perfis U, na região dos conectores e dos estribos.**

O modo de fabricação do sistema dispensa o uso de formas, gerando uma economia no custo da obra e permitindo que se obtenha um canteiro de obras limpo. A seguir, serão descritas as etapas de fabricação para os dois tipos de seções estudadas:

1. Inicialmente, soldam-se os conectores metálicos em perfil I a um dos perfis de aço que irá compor a estrutura;
2. Posicionam-se as armaduras longitudinais e os estribos, utilizando-se espaçadores para garantir o espaçamento de projeto;
3. O segundo perfil de aço é soldado à extremidade livre dos conectores metálicos. Nas extremidades da estrutura, são soldadas chapas de aço que irão garantir o confinamento do concreto, evitando seu derramamento pelas extremidades.
4. Com todos os componentes em aço devidamente soldados, posiciona-se a estrutura sobre um madeirite, de comprimento maior ou igual ao da mesma, e com largura suficiente para fechar a abertura entre os perfis de aço, de modo que se evite o vazamento de concreto por essa abertura, e dispensando-se assim o uso de qualquer outro tipo de fôrma. Em seguida, realiza-se a concretagem por meio da face superior da estrutura, bem como vibração e a cura, conforme recomenda a ABNT NBR 6118:2014.

A Figura 4 ilustra o processo de fabricação para um sistema com seção composta por perfis I; as etapas para a fabricação da estrutura com perfis de aço tipo U enrijecido ocorrem da mesma maneira.



**Figura 4 - Etapas da fabricação do sistema misto proposto.**

Outra opção seria que os componentes em aço já fossem soldados na fábrica e, dessa forma, seria realizado no canteiro apenas a armação e a concretagem. Para facilitar o posicionamento da armadura longitudinal, é

mais conveniente que as chapas das extremidades sejam perfuradas da bitola da armação para possibilitar a passagem das barras de ferro, facilitando o processo.

## Metodologia

A modelagem foi realizada através do software de elementos finitos Abaqus, versão 14.1. O software não exige a declaração das unidades utilizadas para os parâmetros, entretanto é necessário que elas sejam compatíveis entre si. Desse modo, utilizou-se unidade de comprimento em milímetros, tensão em MegaPascal, e força em Newtons.

O aço considerado na modelagem para os perfis de aço e conectores foi o ASTM A-572 Grau 50 (com tensão de escoamento  $f_y = 345MPa$ ) e para a armadura longitudinal, o aço CA-50 ( $f_y = 500MPa$ ). Para ambos foi considerado a elastoplasticidade perfeita (patamar de escoamento constante), que é uma hipótese adequada para o aço estrutural comum (QUEIROZ, 2003; MIRZA; SKRABEK, 1991).

O concreto é um material cuja relação tensão-deformação é não-linear mesmo para pequenos valores de deformações. Para os modelos desenvolvidos nesse trabalho, foi utilizado o modelo *Concrete Damage Plasticity* (CDP) disponibilizado pelo Abaqus. De acordo com o *Abaqus User's Manual* versão 6.10, esse modelo usa uma combinação de um modelo isotrópico de elasticidade e dano, com um modelo isotrópico de plasticidade à tração e compressão, sendo adequado para representar o comportamento inelástico do concreto simples e do concreto armado.

Foi considerado para modelagem um concreto com módulo de elasticidade longitudinal  $E_c = 33GPa$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,2$ , e resistência característica à compressão  $f_{ck} = 30MPa$ . Os parâmetros utilizados como entrada para o modelo CDP no Abaqus são apresentados na Tabela 1 - Parâmetros de entrada para o modelo CDP no Abaqus. Tabela 1.

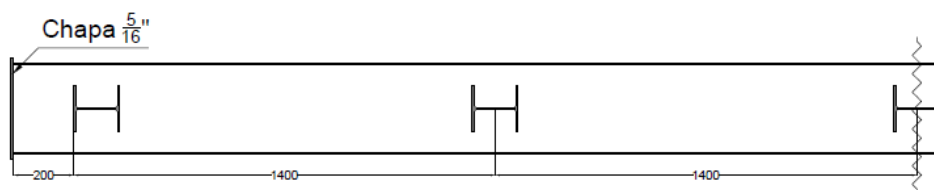
**Tabela 1 - Parâmetros de entrada para o modelo CDP no Abaqus.**

Parâmetro	Valor
Ângulo de Dilatância ( $\Psi$ )	38
Excentricidade ( $\epsilon$ )	0,1
Coefficiente de tensão ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ )	1,16
Fator de forma ( $K_c$ )	2/3
Parâmetro de Viscosidade ( $\mu$ )	0

A curva tensão-deformação para compressão utilizada como parâmetro de entrada para o modelo foi a proposta por Pavlovic (2013), enquanto a curva para tração foi baseada na utilizada por Najafgholipour et al (2017). As curvas de dano utilizadas foram elaboradas conforme o cálculo desses parâmetros descrito por Pavlovic (2013).

A análise numérica foi realizada em 4 tipos de modelos diferentes (IA, IM, UA e UM), compostos apenas por aço ou mistos, considerando-se para a seção com perfis I, o W310x21, enquanto para a seção com perfis U, o perfil Ue280x70x25x6,35. Os perfis são ligados por conectores W150x22,5 e, no caso dos modelos IM e UM, preenchidos com concreto C30, armado longitudinalmente com 4 barras de aço de 16mm.

Os modelos estudados possuem 6m de comprimento, com 5 conectores espaçados de 1400mm entre si, estando os conectores da extremidade a 200mm da borda, conforme ilustra a Figura 5. Nas extremidades, a estrutura é fechada por chapas de 5/16" de espessura. A modelagem dos estribos não foi considerada, pois, para os carregamentos estudados nesse trabalho, foi verificado que a inclusão desses elementos aumentava significativamente o tempo computacional necessário para análise e pouco influenciava no resultado dos parâmetros de interesse.

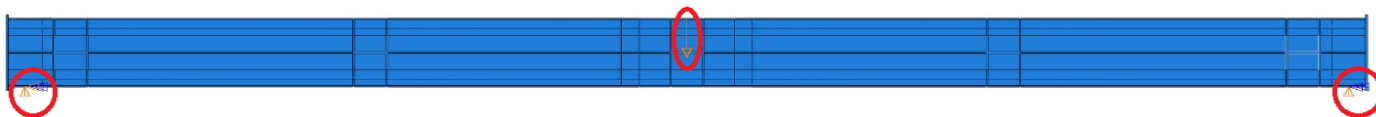


**Figura 5 - Geometria longitudinal da estrutura modelada.**

A discretização do modelo em elementos finitos foi feita considerando-se um tamanho de malha uniforme ao longo de todas as partes do modelo e o elemento utilizado foi o C3D8R.

Os modelos estudados nesse trabalho foram submetidos a carregamentos de flexão, compressão e flexo-compressão. Convencionou-se denominar de eixo múltiplo o eixo que divide a seção de modo que em cada lado tem-se um dos perfis de aço; enquanto o eixo não-múltiplo divide a seção passando pelos dois perfis de aço.

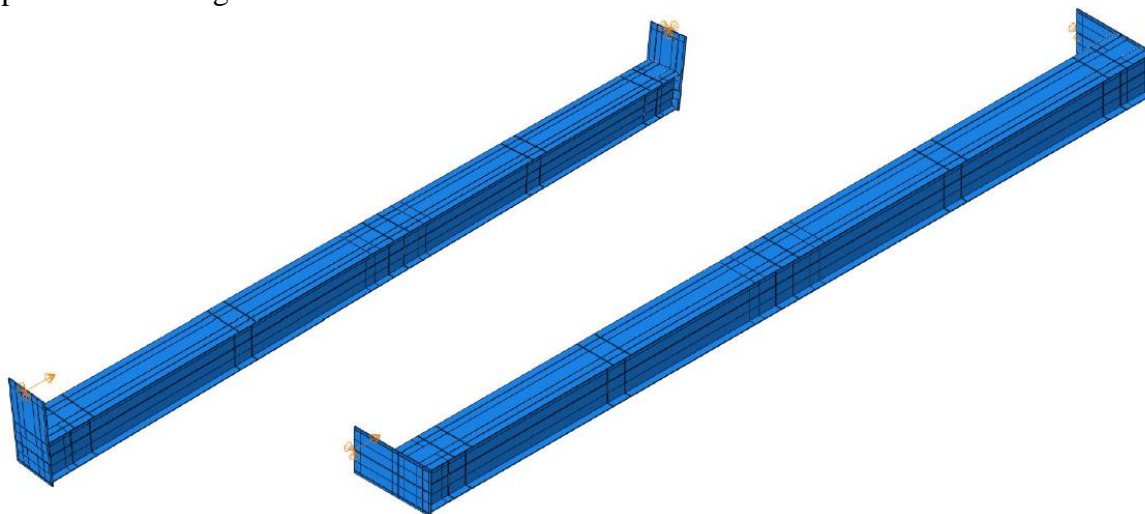
Para o carregamento de flexão, o modelo foi estudado como uma viga bi-apoiada (Figura 6), considerando-se dois casos de flexão, em relação aos dois eixos da viga. Um carregamento vertical total foi considerado distribuído em dois pontos, distantes 250mm para cada lado do centro da viga, simulando as condições experimentais dos estudos de Silva (2018) e Soares (2018). A distribuição do carregamento vertical para os dois pontos foi realizada a partir da aplicação de *Multipoint Constraints* do Abaqus.



**Figura 6 - Condições de contorno da viga no Abaqus, para carregamento à flexão.**

Para o estudo da estrutura submetida a carregamentos de compressão e de flexo-compressão, modelaram-se pilares rotulados em uma extremidade, e submetidos a cargas de compressão na outra extremidade. Para o carregamento de compressão pura, a carga foi aplicada no centro da seção transversal, enquanto para o carregamento de flexo-compressão essa carga foi aplicada com uma certa excentricidade em relação ao centro da seção. Foram considerados casos de excentricidade de tal modo que provocassem flexão em relação a ambos os eixos do pilar.

Foram aplicadas *Rigid Body Constraints* às duas chapas de extremidade, de modo que os nós de referência encontravam-se alinhados ao longo do eixo longitudinal do pilar. Em um nó foi aplicado um carregamento de compressão, e no outro, uma restrição translacional nas 3 direções, possibilitando a rotação. O esquema adotado é apresentado na Figura 7.



**Figura 7 - Esquema de condições de contorno do pilar no Abaqus.**

O modelo estudado caracteriza-se por apresentar alto grau de não-linearidade, tanto física quanto geométrica, com interações complexas entre os elementos nas regiões de contato, envolvendo diferentes tipos de material. Essa complexidade torna extremamente difícil a obtenção de uma convergência para um resultado através de uma análise numérica estática (análise do tipo *Static/Implicit* do Abaqus). Dessa forma, a alternativa utilizada foi realizar uma análise quasi-estática (análise *Dynamic/Explicit* do Abaqus).

Nesse tipo de análise, a integração é feita de forma explícita, garantindo assim que se haja convergência, mas requerendo um acompanhamento da energia cinética ao longo da análise para garantir que seu valor seja muito menor que a energia de deformação que se acumula no sistema. Além disso, há uma variação de forma não suave dos parâmetros de interesse ao longo da análise, devido à menor precisão resultante da integração explícita. Entretanto, o uso desse tipo de análise justifica-se quando a obtenção da convergência pelo modo *Static/Implicit* torna-se inviável devido à complexidade do modelo.

## Resultados

### • Resultados Numéricos

De modo a validar os modelos numéricos estudados nesse trabalho, foram utilizados como parâmetro de comparação aos resultados experimentais e previstos pela norma, as curvas de momento-deslocamento e força-deslocamento da estrutura quando submetidas aos carregamentos analisados.

Foi realizada uma variação no tamanho das malhas de elementos finitos utilizadas nos modelos, e foi verificado que o refinamento da malha para valores inferiores a 50mm pouco influenciava no resultado das cargas últimas, e apenas tornavam o comportamento pós-crítico das curvas dos modelos menos rígido do que para tamanho de malha maiores. Dessa forma, foi utilizada a malha de 50mm para obtenção dos resultados descritos neste trabalho.

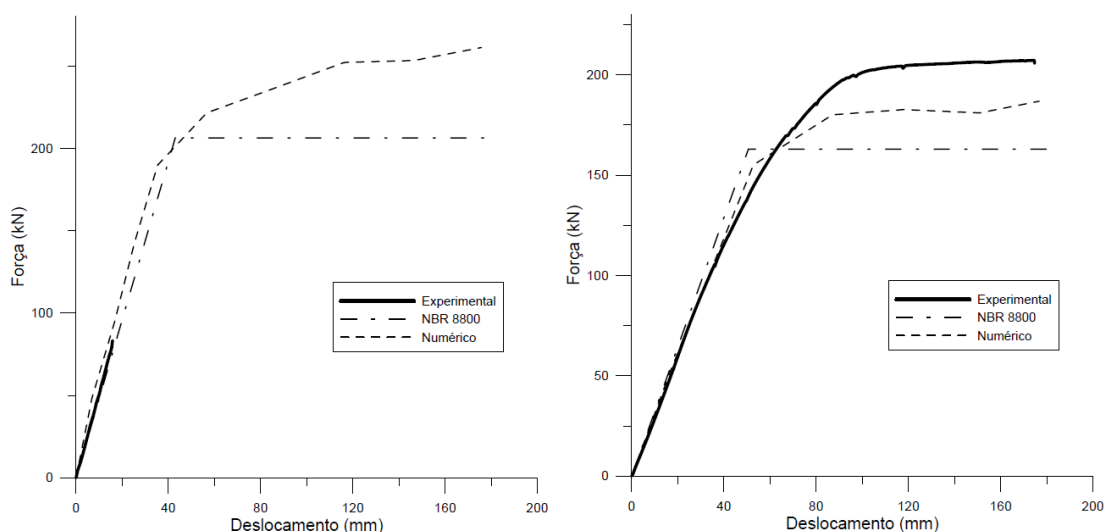
Para o caso do modelo IM submetido à flexão, foi realizada uma comparação com os resultados experimentais dos trabalhos desenvolvidos por Silva (2018) e Soares (2018), e verificou-se que o modelo apresentou resultados bastante próximos aos obtidos experimentalmente.

Para o modelo UM submetido à flexão, e para os casos de carregamento à compressão e flexo-compressão dos modelos IM e UM, não há na literatura estudos experimentais desenvolvidos para os tipos de estruturas mistas estudadas. Dessa forma, a validação se restringiu à comparação com os resultados previstos pela ABNT NBR 8800:2008.

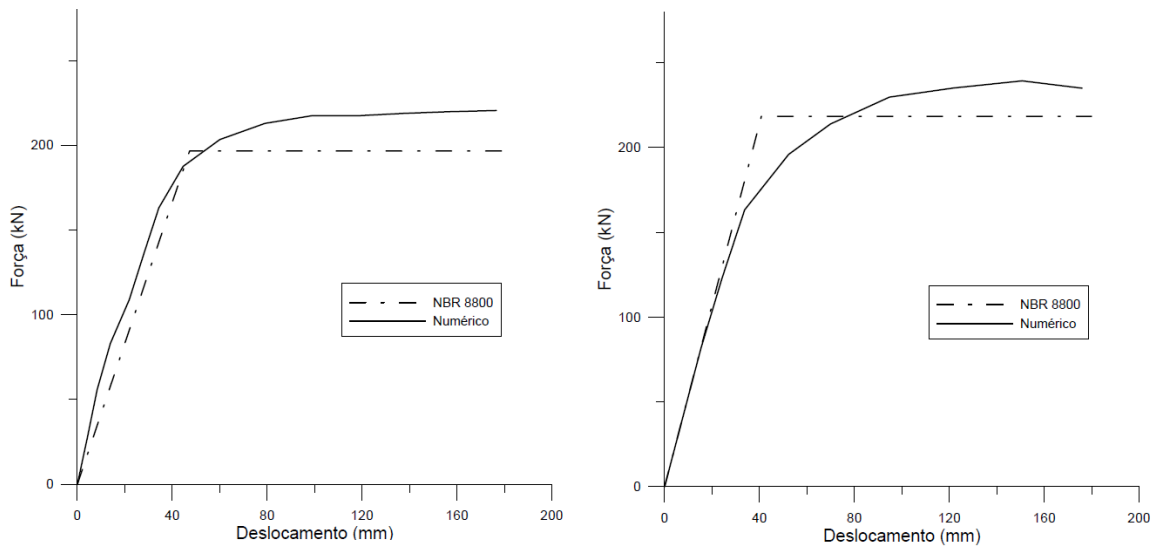
Em todos os casos, os modelos numéricos apresentaram cargas últimas (de momento de plastificação e de força axial máxima) superiores aos previstos pela norma técnica. Para o estudo do modelo IM submetido à flexão (Figura 8), os modelos numéricos apresentaram forças últimas superiores aos resultados previstos pela norma técnica em 25% e 18%, para a flexão nos eixos não-múltiplo e múltiplo. Para o modelo UM (Figura 9), as cargas do modelo numérico superaram em 12% e 8% os resultados esperados pela norma, para flexão nos eixos não-múltiplo e múltiplo, respectivamente.

Já para os carregamentos de compressão (Figura 10), os resultados encontrados através do modelo foram ainda maiores em relação aos resultados previstos pela norma, sendo a força máxima atingida pelo modelo de 37% superior ao previsto pela norma, para o caso do modelo IM, e 50% superior ao resultado da norma para o caso do modelo UM. Esse aumento da resistência no modelo numérico pode ser uma consequência do efeito do confinamento do concreto, visto que tal fenômeno não é considerado nas equações utilizadas pela norma técnica brasileira.

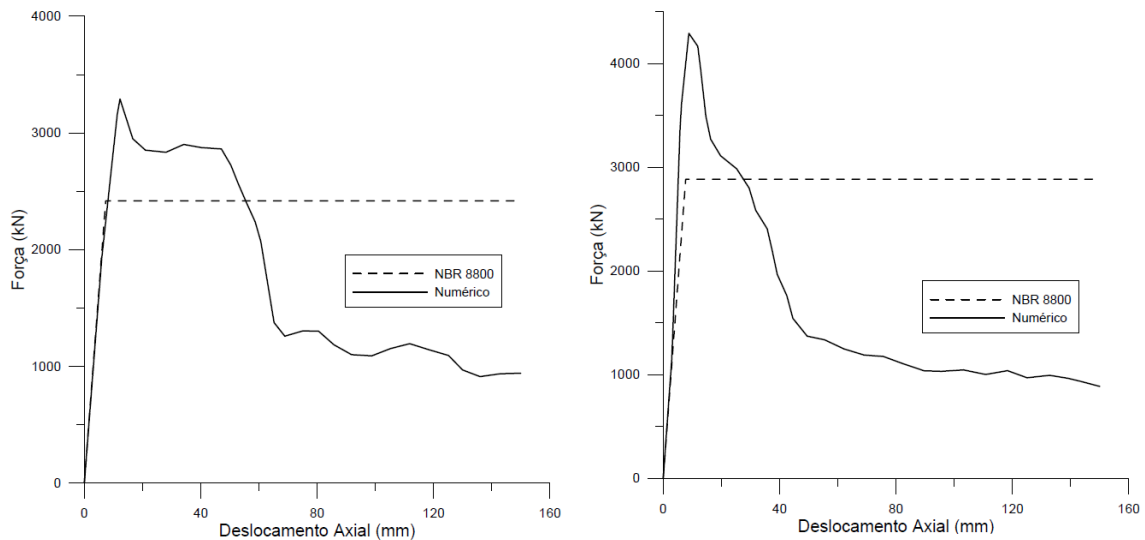
Também foram comparados os resultados numéricos dos modelos mistos (IM e UM) com os modelos de aço (IA e UA) para verificar as vantagens proporcionadas pelo uso de estruturas mistas. Foi verificado um ganho de resistência significativo para todos os carregamentos estudados, mas principalmente para a flexão no eixo múltiplo, onde o ganho de resistência calculado foi de 333% para o modelo IM e 304% para o modelo UM, quando comparados aos respectivos modelos de aço.



**Figura 8 - Comparação entre as curvas momento-deslocamento no meio da viga para o modelo IM submetido à flexão: no eixo não-múltiplo (à esquerda) e no eixo múltiplo (à direita).**



**Figura 9 - Comparação entre as curvas momento-deslocamento no meio da viga para o modelo UM submetido à flexão: no eixo não-múltiplo (à esquerda) e no eixo múltiplo (à direita).**



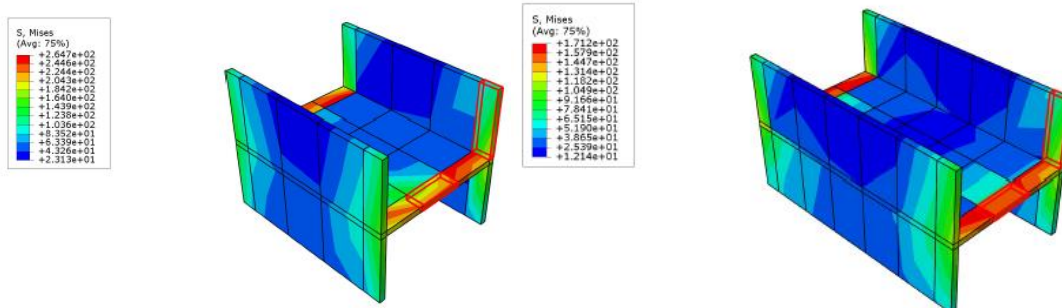
**Figura 10 - Comparação entre as curvas força-deslocamento do pilar para o modelo IM submetido à compressão.**

Em termos de rigidez, os modelos mistos também apresentaram ganhos significativos em relação aos modelos de aço, em especial para o caso de flexão em relação ao eixo múltiplo, em que os valores chegaram a ser mais de 4 e 11 vezes superiores aos modelos com aço, para os modelos com seções I e U, respectivamente.

Analisando a distribuição das tensões de Von Mises nos modelos após a aplicação dos carregamentos, foi possível verificar as regiões mais solicitadas, através da verificação das regiões onde se atingiu a tensão de escoamento do aço. Para o concreto, a fissuração foi avaliada através da análise da distribuição do parâmetro de dano à tração na estrutura.

Conforme esperado, o aço foi mais solicitado nas regiões de tração, já que nas regiões de compressão o concreto contribuiu mais para resistir aos esforços solicitantes, e o concreto apresentou mais fissuras nas regiões tracionadas. Quanto aos conectores, observou-se em todos os modelos, que a região mais solicitada era na alma dos mesmos, conforme ilustra a Figura 11.

O estudo dos modelos submetidos à flexo-compressão foi desenvolvido variando-se as excentricidades do carregamento axial em 100mm, 200mm, 300mm e 400mm, em relação a ambos os eixos da seção, e verificando-se a redução na carga máxima atingida pelos modelos. Conforme a Tabela 2, verifica-se que a força máxima de compressão dos modelos com a aplicação de carga excêntrica ( $N_{max}^{ei}$ ) chegou a reduzir para cerca de 20% da carga máxima de compressão pura ( $N_{max}^{e0}$ ) para excentricidade de 400mm.



**Figura 11 – Distribuição das tensões de Von Mises no conector mais solicitado dos modelos IM (à esquerda) e UM (à direita) submetidos à flexão.**

**Tabela 2 - Comparação da força máxima atingida nos modelos IM e UM submetidos à flexo-compressão em relação aos eixos não-múltiplo e múltiplo.**

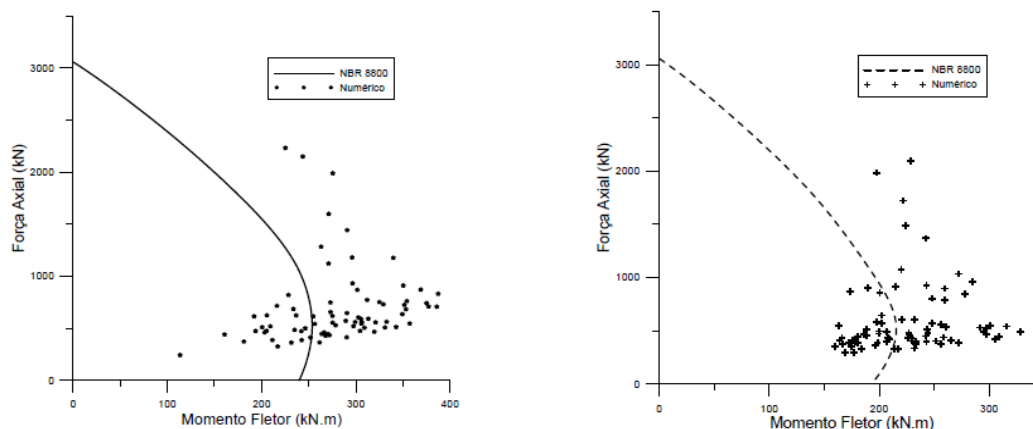
Excentricidade	$N_{max}^{e_i} / N_{max}^{e_0}$			
	Modelo IM		Modelo UM	
	Não-múltiplo	Múltiplo	Não-múltiplo	Múltiplo
100	0,84	0,58	0,68	0,68
200	0,68	0,43	0,45	0,39
300	0,37	0,28	0,27	0,27
400	0,23	0,17	0,18	0,17

A partir dos valores da força ( $N$ ) obtidos na modelagem numérica para a flexo-compressão, foi possível calcular os respectivos momentos fletores ( $M$ ) na seção central dos pilares. O momento fletor correspondente à força atuante em cada ponto da análise foi estimado a partir da multiplicação da força axial pela soma da excentricidade de aplicação da carga ( $e$ ) com a deflexão lateral do pilar devido à flexão ( $u$ ), conforme Equação 1:

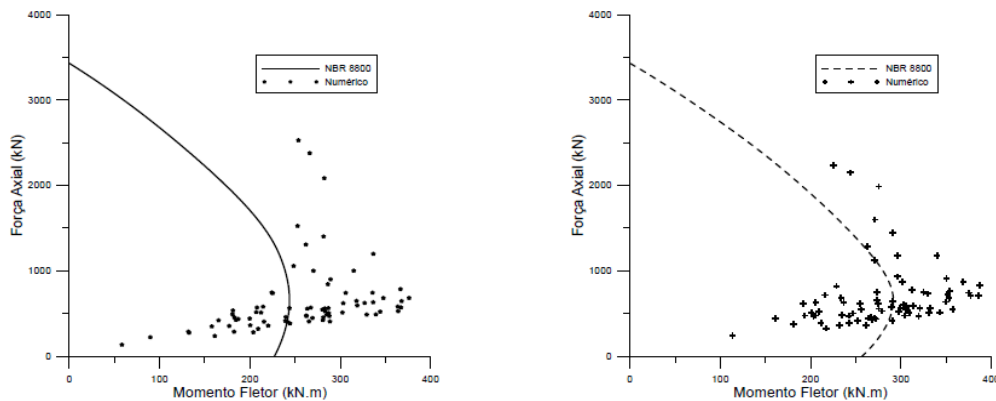
$$M = N \cdot (e + u) \quad (1)$$

Assim, os diversos conjuntos de pontos (Momento-Fletor, Normal) obtidos para cada excentricidade aplicada nos modelos numéricos foram sobrepostos com os diagramas N-M obtidos conforme ABNT NBR 8800:2008.

As Figuras Figura 12 e Figura 13 apresentam os resultados obtidos para os modelos IM e UM, respectivamente. Analisando-as, nota-se que o modelo numérico apresentou muitos pontos acima do diagrama previsto pela NBR 8800:2008, verificando-se assim uma maior resistência do modelo numérico, assim como foi observado para os carregamentos de flexão e compressão pura.



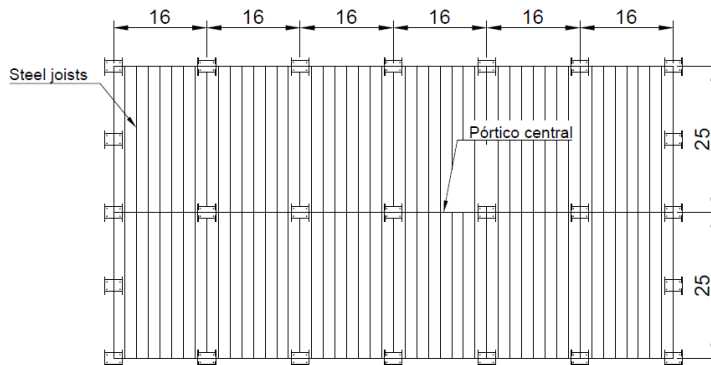
**Figura 12 - Pontos Normal-Momento fletor do modelo numérico em comparação com o diagrama de interação previsto pela NBR 8800, para o modelo IM submetido à flexo-compressão em relação ao eixo não-múltiplo (à esquerda) e múltiplo (à direita).**



**Figura 13 - Pontos Normal-Momento fletor do modelo numérico em comparação com o diagrama de interação previsto pela NBR 8800, para o modelo UM submetido à flexo-compressão em relação ao eixo não-múltiplo (à esquerda) e múltiplo (à direita).**

• **Dimensionamento de um Galpão**

Buscando avaliar o ganho proporcionado pelo uso da seção mista proposta em relação a um sistema comum composto de 2 perfis I formando uma seção caixão, foi realizado o dimensionamento dos pilares e das vigas do pórtico central de um galpão com 6 vãos de 16m e 2 vãos de 25m, e pilares de 12m de altura (Figura 14).



**Figura 14 - Planta de cobertura do galpão estudado como exemplo de aplicação (dimensões: metros).**

O galpão foi dimensionado com base na ABNT NBR 8800:2008, considerando-se os perfis mais leves que atendem aos Estados Limites Último e de Serviço de flexão para vigas, e flexo-compressão para os pilares. Para o carregamento, foram consideradas as cargas permanentes das *steel joists*, terças, telhas metálicas, do peso próprio dos pilares e vigas, e as cargas variáveis de sobrecarga, forros e serviços e pressão do vento.

Para as vigas, a distância entre os perfis de aço na seção mista com perfis I foi admitida de modo que a distância livre de concreto fosse igual ao do modelo numérico IM descrito anteriormente (101mm), e o cobrimento de armadura adotado foi de 25mm. Já para os pilares, de forma a reduzir o deslocamento lateral causado pela força do vento, aumentou-se a distância entre os perfis do modelo misto, de modo a se obter maiores inércias para as sessões, e considerou-se que os pilares fossem posicionados de modo que o eixo de maior inércia fosse o eixo solicitado pelos esforços laterais.

Para a seção com os perfis U, foram dimensionados perfis com altura  $b_w$  semelhante ao valor da altura  $d$  do perfil I dimensionado, com largura  $b_f$  da mesa semelhante ao valor de  $b_f/2$  do perfil I, com a mesma distância entre os perfis, e mesmo diâmetro das barras da armadura longitudinal.

Para comparar o custo equivalente das duas soluções, adotou-se que  $1m^3$  de concreto equivale a 100kg de aço. Dessa forma, a massa equivalente de aço de cada sessão dimensionada foi considerada como o parâmetro de comparação para avaliar qual solução apresenta melhor custo-benefício. Os resultados obtidos para o dimensionamento são apresentados na **Erro! Autoreferência de indicador não válida. Erro! Autoreferência de indicador não válida.**

Conforme resultados da **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, verificou-se, para as vigas, uma economia de 3,7% de massa equivalente em aço ao utilizar a seção mista com perfis I, e de 3,5% com a seção mista composta de perfis U, em comparação com a seção caixão composta apenas pelos perfis I. Para



os pilares, obteve-se uma economia de 11,6% de massa equivalente em aço ao utilizar a seção mista com perfis I, e de 4,5% para a seção com perfis U, em comparação com a seção composta apenas por perfis de aço.

**Tabela 3 - Dimensionamento das vigas e pilares mais solicitados do pórtico central do galpão.**

Modelo	Viga		Pilar	
	Perfil	Massa em aço (kg)	Perfil	Massa em aço (kg)
Aço I	W460x60	1886	W460x68	1630
Misto I	W460x52	1816	W410x53	1441
Misto U	Ue450x115x25x9.5	1821	Ue450x150x25x9.5	1557

#### • Estudo Paramétrico

Por fim, foi realizado um estudo paramétrico para avaliar a influência que o número e a disposição dos conectores da estrutura, a resistência característica do concreto, e o diâmetro da armadura longitudinal utilizada exercem na resistência do modelo com seção mista composta por perfis I. Os resultados numéricos obtidos alterando-se esses fatores foram comparados com os do modelo IM originalmente proposto e modelado, através da análise das curvas força-deslocamento e momento-deslocamento.

Para avaliar a influência do número de conectores na estrutura, foram estudados modelos com 3 conectores e com 7 conectores, mantendo sempre 2 conectores na extremidade e 1 conector central, para comparar com o modelo original com 5 conectores na estrutura.

Os resultados obtidos demonstraram que a redução no número de conectores de 5 para 3 conectores trouxe uma redução significativa na rigidez para o carregamento à flexão no eixo múltiplo. Tal diferença pode se explicar pelo fato de que a carga que gera a flexão no eixo múltiplo é transferida diretamente pelos conectores de um perfil de aço ao outro. No eixo não-múltiplo, o uso de 7 conectores aumentou a rigidez inicial do modelo. Em termos de força última, observou-se que a mudança no número de conectores trouxe pouca influência, conforme resultados da Tabela 4.

**Tabela 4 - Comparação entre as forças últimas obtidas do estudo paramétrico e os resultados obtidos com o modelo IM original.**

Carregamento	Razão entre as forças últimas, em comparação com modelo IM original						
	Nº de conectores		Disposição dos conectores	Resistência do concreto ( $f_{ck}$ )		Diâmetro da armadura	
	3	7	Invertida	40MPa	50MPa	20mm	25mm
Flexão não-múltiplo	0,95	0,98	0,93	1,01	1,01	1,06	1,20
Flexão múltiplo	0,99	1,01	1,10	1,01	1,01	1,05	1,10
Compressão	0,99	1,02	1,01	1,45	1,55	1,18	1,33

No sistema proposto originalmente, os conectores consistem em perfis I posicionados com o eixo fraco coincidindo com o eixo longitudinal do pilar. Nesse estudo, foi analisado um posicionamento invertido, em que o eixo forte do conector ficasse paralelo ao eixo longitudinal do pilar. Observou-se que para a flexão no eixo múltiplo, invertendo-se a posição do perfil obteve-se uma maior resistência (cerca de 10%, conforme Tabela 4) e rigidez da estrutura, enquanto para a flexão no eixo não-múltiplo, a disposição original demonstrou-se mais favorável. Para a compressão, não houve mudança significativa.

Também foi avaliada a contribuição da resistência do concreto na resistência do pilar. O modelo original considerou concreto de  $f_{ck} = 30MPa$ . No estudo paramétrico, foram testados também concretos com  $f_{ck}$  de 40MPa e 50MPa. Para os carregamentos de flexão, os resultados apontaram que o aumento do  $f_{ck}$  quase não trouxe mudança nas curvas para os carregamentos de flexão, conforme esperado pela norma, visto que há aumento da posição da Linha Neutra Plástica e conseqüentemente o momento plástico resistente não aumenta. Para o carregamento de compressão, nota-se um aumento significativo na força resistente do modelo com o aumento do  $f_{ck}$ , na faixa de 45% e 55%, conforme Tabela 4.

Por fim, foi avaliada influência do uso de diâmetros de armadura longitudinal maiores (20mm e 25mm) em comparação ao modelo originalmente estudado (com armaduras de 16mm). Os resultados obtidos demonstraram que, o aumento do diâmetro da armadura trouxe uma contribuição significativa para o aumento da resistência da estrutura, conforme resultados apresentados na Tabela 4, que evidenciam que o maior ganho de resistência ocorreu no caso de carregamento à compressão.

## Conclusões

Em todos os modelos estudados à flexão, o modelo numérico se comportou, no regime elástico, de maneira muito similar à prevista pela NBR 8800:2008. As forças últimas obtidas através do modelo foram superiores aos previstos pela norma, na razão de 25% e 18% para o modelo IM, e 12% e 8% para o UM, em relação aos eixos não-múltiplo e múltiplo, respectivamente. Já nos modelos submetidos à compressão, as forças máximas obtidas via análise numérica foram cerca de 37% e 50% superiores aos resultados previstos, para os modelos IM e UM, respectivamente. Tal aumento significativo da resistência provavelmente deve-se ao efeito do confinamento do concreto, o qual não é considerado nas equações sugeridas pela norma.

O ganho de resistência e de rigidez dos modelos mistos em relação aos compostos apenas por aço foi bastante significativo, principalmente para a flexão no eixo múltiplo, em que o ganho de resistência calculado foi de 333% e 304%, para os modelos IM e UM, respectivamente, quando comparados aos respectivos modelos de aço, e o ganho de rigidez chegou a ser 4 a 11 vezes superior à dos modelos com aço.

Verificou-se que as regiões mais solicitadas dos elementos de aço foram aquelas sujeitas à tração. Os conectores apresentaram maiores níveis de tensões nas almas do que nas mesas. O concreto se demonstrou bastante fissurado nas regiões de tração nas regiões sujeitas a maior momento fletor, conforme esperado.

A aplicação de cargas axiais com excentricidades em relação ao centro da seção permitiu verificar a queda de resistência dos pilares em relação à obtida quando submetidos à compressão pura. Enquanto para a excentricidade de 100mm, a força máxima chegou a variar entre 84% e 58% do valor sem excentricidade, a excentricidade de 400mm resultou em uma força máxima média de 20% da obtida com compressão pura.

O exemplo do dimensionamento do pórtico de um galpão industrial possibilitou verificar uma economia, para os pilares, de 11,6% com o uso da seção mista com perfis I, e de 4,5% com a seção mista com perfis U enrijecidos, em comparação à seção caixão. As seções mistas se destacaram por apresentar grande aumento na força axial resistente e proporcionarem maior inércia com o aumento da distância entre os perfis de aço.

O estudo paramétrico possibilitou verificar que a redução do número de conectores causou significativa queda na rigidez do modelo submetido à flexão no eixo múltiplo. Verificou-se ainda que a disposição original adotada para os conectores resulta em maior resistência para a flexão no eixo não-múltiplo, e a posição invertida é mais vantajosa para a flexão no eixo múltiplo. O uso de concretos com maior resistência característica à compressão não trouxe vantagem significativa no aumento da resistência das vigas submetidas à flexão. Já o aumento da área das armaduras longitudinais dos perfis trouxe ganhos de resistência mais significativos para os casos de carregamento à compressão do que para os carregamentos à flexão.

Assim, este trabalho conseguiu abordar vários aspectos da modelagem numérica dos sistemas mistos propostos, confirmou as vantagens em termos de resistência, rigidez, economia e praticidade que seu uso pode trazer para a construção civil e evidenciou o potencial de competitividade dessa solução estrutural mista em relação a outros sistemas estruturais mais conhecidos do mercado compostos apenas por aço.

## Referências

- ABAQUS. User's manual. Simulia, Rhode Island, EUA, versão 6.10, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, Set. 2008.
- FIGUEIREDO, L. M. B.. Projeto e construção de pilares mistos aço-concreto. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Rio de Janeiro, 1998.
- MIRZA, S. A.; SKRABEK, B. W.. Reliability of short composite beam-column strength interaction. *Journal of Structural Engineering*, 117(8):2320–2339, Ago. 1991.
- NAJAFGHOLIPOUR, M. A.; DEHGHAN, S. M.; DOOSHABI, A. ; NIROOMANDI, A.. Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(7):1200–1225, Ago. 2017.
- PAVLOVIC, M. S.. Resistance of bolted shear connectors in prefabricated steel-concrete composite decks. Tese de Doutorado, University of Belgrade, Belgrade, 2013.
- QUEIROZ, F. D.. Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- SILVA, L. M. R.. Estudo teórico e experimental do comportamento de pilares mistos constituídos de perfil duplo i preenchidos com concreto armado, com flexão no seu eixo não-múltiplo. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- SOARES, R. P.. Estudo teórico-experimental do comportamento de pilares mistos constituídos de perfil duplo i preenchidos com concreto armado, com flexão no seu eixo múltiplo. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.