

1. INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O sistema construtivo misto em aço e concreto são muito eficientes estruturalmente, por se beneficiar das principais vantagens que os materiais aço e concreto podem oferecer. A utilização das vigas mistas é uma alternativa muito vantajosa para obras de grande porte, onde são vencidos grandes vãos, como viadutos, pontes, terminais rodoviários, plataformas marítimas e infraestruturas aeroportuárias.

Para situações de projeto que combinam grandes vão e elevados carregamentos a utilização dos elementos mistos podem não ser suficiente para resistir, com economia os esforços e as deformações. Nestes casos outras técnicas para melhorar o desempenho da estrutura devem ser estudadas. Dentre as técnicas existentes, a aplicação de protensão apresenta-se como uma alternativa eficiente, pois além de proporcionar a possibilidade de vencer maiores vãos, atendendo a exigências ou necessidades arquitetônicas, proporciona também uma possível redução das dimensões transversais dos perfis metálicos.

A técnica de protensão em estruturas de aço tem sido usada desde de 1837, com a construção de uma ponte em treliça protendida nos EUA. No entanto, somente no início da década de 1950 tem-se registros de pesquisas sistemáticas focadas na aplicação da protensão em estruturas mistas de aço e concreto como reforço estrutural de pontes, que é uma das possíveis aplicações desta técnica. Estes primeiros estudos relacionados ao tema foram destinados a ensaios experimentais, onde destacaram-se alguns autores, como Lee (1952), Sterian (1969), Szilard (1959), Hoadley (1963), Tachibana et al. (1963), Belenya (1977).

A partir da década de 1980, foram iniciados os estudos e pesquisas voltados ao desenvolvimento de modelos analíticos, detalhes construtivos e critérios de projeto, o que proporcionou uma maior disseminação do conhecimento sobre o tema. Dentre os principais autores que realizaram estes estudos, destacam-se: Nie et al. (2009); Nie et al. (2011) e

Ronghe e Gupta (2002).

Somente a partir da década de 1990, estas vigas mistas de aço e concreto com protensão passaram a ter seu comportamento investigado e simulado por meio de análises numéricas. De acordo com Souza, Maia e De Nardin (2015), grande parte desses estudos teve como principal objetivo o desenvolvimento de formulações numéricas com base no método dos elementos finitos, incluindo efeitos não lineares, distorções e instabilidades do perfil de aço. As análises numéricas permitem uma calibração do modelo através de resultados experimentais presentes na literatura, o que possibilita que haja uma extrapolação para que sejam analisados os casos que não foram ensaiados experimentalmente. Dentre os estudos mais recentes nesta linha de pesquisa destacam-se Dabaon, Sakr e Kharoub (2005), Bursi et al. (2008), Nie et al. (2011) e Ibrahim, Mohaisen e Ahmed (2012).

Dabaon, Sakr e Kharoub (2005) desenvolveram uma modelagem numérica em vigas mistas protendidas no software ANSYS®, considerando interação parcial na interface entre os materiais. Após a calibração do modelo, os autores analisaram o comportamento da estrutura com a alteração da configuração do cabo de protensão em retilíneo e poligonal. Já Nie et al. (2011), desenvolveram uma modelagem numérica através do software MSC.MARC® em vigas mistas protendidas contínuas, com perfil constituído de seção tipo caixão. E, mais recentemente, Ibrahim, Mohaisen e Ahmed (2012), realizaram uma metodologia de modelagem através do software ANSYS®, para vigas mistas protendidas biapoiadas, considerando interação parcial na interface entre os diferentes materiais e com variações no traçado do cabo de protensão. Ambos esses estudos foram calibrados através de resultados experimentais e foram concluídos com resultados satisfatórios.

Nelsen (2012) fez uma caracterização do comportamento do elemento estrutural aqui tratado descrevendo as características e a funcionalidade de cada um de seus componentes constituintes que em resumo são: perfil de aço

conectado a uma laje de concreto, por meio de conectores de cisalhamento e cabos de protensão, de acordo com a Figura 1.

Além disso, Nelsen (2012) adaptou os procedimentos de dimensionamento da ABNT NBR 8800:2008 pertinentes a vigas mistas de aço e concreto para incluir a protensão, o que permitiu aferir os efeitos de alguns parâmetros como excentricidade e conformação do cabo de protensão no comportamento do elemento estrutural. No entanto, não havia comprovação experimental ou numérica das expressões de dimensionamento utilizadas.

Souza, Maia e De Nardin (2015) desenvolveram uma metodologia para análise numérica de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa. Foi utilizado o método dos elementos finitos por meio do programa Ansys®. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais disponíveis afim de aferir a modelagem numérica. A metodologia para modelagem numérica desenvolvida foi apenas satisfatória para representar o comportamento estrutural de vigas. Na modelagem da interface entre aço e concreto, não foi incluído o contato e o atrito entre os materiais, sendo a vinculação entre aço e concreto efetiva somente nos pontos onde existem os conectores de cisalhamentos. Este fato é apontado pelos autores como responsável pelas maiores diferenças entre resultados teóricos e

experimentais; além de relatar outras dificuldades com o programa escolhido tanto do ponto de vista operacional como no ponto de vista numérico.

Como exposto até aqui, os estudos sobre o comportamento de vigas mistas com protensão remontam a década de 1930 passando por diferentes fases e com objetivos distintos. Percebe-se um uma preocupação inicial de caracterizar e viabilizar a aplicação prática do sistema. Em seguida o foco das investigações passa a ser o entendimento do comportamento destas estruturas com o desenvolvimento de estudos com bases experimentais e numéricas. No Brasil, as pesquisas sobre o tema são menos frequentes destacando os trabalhos de Sampaio Júnior (1976), Gonçalves (1992), Ferreira (2007), Rezende (2007), Nelsen (2012) e Souza et al. (2013) que basicamente desenvolveram estudos analíticos visando o desenvolvimento de procedimentos de projetos e estudos do comportamento estrutural por meio de análise numérica.

1.1 OBJETIVOS

Neste contexto, este artigo tem como principal objetivo propor uma modelagem numérica com base no método dos elementos finitos utilizando o programa ABAQUS®, com o intuito de representar de forma satisfatória o comportamento de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa.

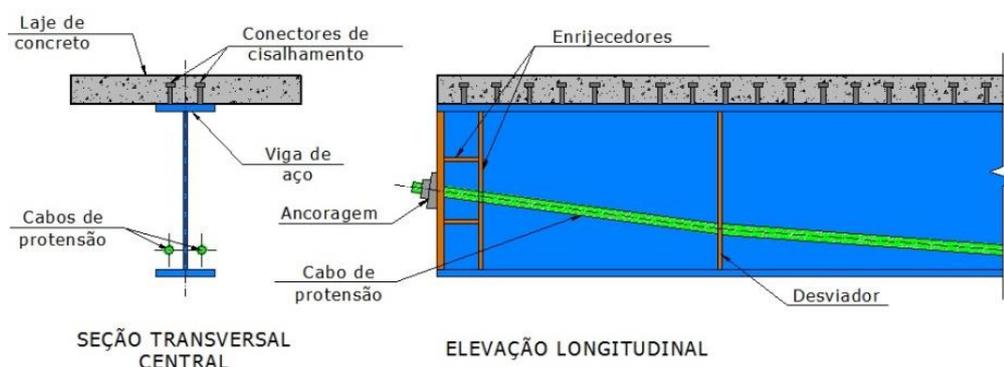


FIGURA 1: Configuração mais comum de viga mista de aço e concreto protendida.

FONTE: Nelsen (2012).

2. METODOLOGIA

2.1 MODELAGEM NÚMERICA DE VIGAS MISTAS PROTENDIDAS

Foram simuladas um total de três vigas mistas protendidas na tipologia convencional (perfil de aço sob laje de concreto). A principal diferença existente entre as vigas modeladas está no traçado e posição do cabo de protensão. A descrição geral das vigas VMP1, VMP2 e VMP3 são apresentadas no Quadro 1; essas vigas foram analisadas experimentalmente por Ayyub, Sohn e Saadatmanesh (1990) e Saadatmanesh, Albrecht e Ayyub (1989). Na modelagem numérica cada uma das vigas foi simulada numericamente incluindo a modelagem da interface aço concreto com os conectores e, posteriormente, considerando o

acoplamento perfeito entre laje e perfil de aço, sem a modelagem dos conectores.

Para as vigas mistas protendidas apresentadas no Quadro 1, o trabalho conjunto entre os diferentes materiais que compõem a seção transversal é garantido por conectores de cisalhamento de diâmetro igual a 16 mm, com espaçamentos transversais indicados nas figuras e espaçamentos longitudinais de 93 mm.

Os cabos de protensão das três vigas ensaiadas são ancorados nos enrijecedores de borda do perfil, sem qualquer aderência com o concreto e, além disso, tem sua direção alterada por desviadores que também possuem a função de enrijecedores intermediários.

A Tabela 1 apresenta detalhes sobre as propriedades geométricas e características dos materiais de cada uma das vigas analisadas.

QUADRO 1: Características gerais das vigas mistas protendidas modeladas

Viga	Ilustração	Informações
VMP1		Viga ensaiada por Ayyub, Sohn e Saadatmanesh (1990). É composta por cabos de protensão retilíneos, sendo estes posicionados acima de mesa inferior do perfil de aço.
VMP2		Viga ensaiada por Ayyub, Sohn e Saadatmanesh (1990). A viga é composta por cabos de protensão que possuem traçado poligonal, sendo este nas extremidades posicionado no centro de gravidade da seção mista e entre as cargas posicionado logo acima de mesa inferior do perfil metálico.
VMP3		Viga ensaiada por Saadatmanesh, Albrecht e Ayyub (1989). É composta por cabos de protensão retilíneos, sendo estes posicionados abaixo da mesa inferior do perfil de aço.

FONTE: Os autores.

TABELA 1: Propriedades mecânicas dos materiais componentes das vigas mistas protendidas modeladas.

Viga		VMP1	VMP2	VMP3
Perfil de aço	E (MPa)	215000	215000	215000
	f_y (MPa)	411.6	411.6	367
	f_u (MPa)	565.4	565.4	520
Laje de Concreto	E_{cs} (MPa)	32000	32000	28593
	f_{cm} (MPa)	40	40	33.4
	f_{ct} (MPa)	4	4	3.34
Armadura passiva	E (MPa)	200000	200000	200000
	f_{yk} (MPa)	500	500	500
Cabo de protensão	E (MPa)	200000	200000	200000
	f_y (MPa)	1620	1620	910
	f_u (MPa)	2017	2017	1090
	Força aplicada (N)	173500	173500	98000
Conector de cisalhamento	E (MPa)	206000	206000	206000
	f_y (MPa)	345	345	345
	f_u (MPa)	415	415	415

FONTE: Os autores.

2.2 METODOLOGIA PARA ANÁLISE NUMÉRICA

A seguir são apresentados os aspectos gerais da modelagem numérica desenvolvida. Descreve-se a construção da geometria, discretização, tipos de elementos finitos utilizados, condições de contorno, aplicação do carregamento e critérios para análise não linear.

2.2.1 Geometria da malha em elementos finitos

Para reproduzir a geometria e os componentes da estrutura investigada experimentalmente, foram modelados a laje de concreto, armadura passiva, perfil de aço, armadura ativa e conectores de cisalhamento. A Figura 2 apresenta a geometria do modelo.

A laje de concreto foi modelada com o elemento tipo sólido C3D8R e o perfil de aço com

elementos de casca tipo SHELL S4R. A armadura passiva da laje e a armadura ativa de protensão foram modeladas com o elemento de barra TRUSS T3D2. E, finalmente, os conectores de cisalhamento foram modelados com o elemento de viga BEAM B31. Os principais detalhes desses elementos são apresentados na seção seguinte.

2.2.2 Discretização

A seleção dos elementos finitos pré-definidos contidos na biblioteca do software ABAQUS®, para representação dos materiais desta pesquisa, foi realizada com base em alguns aspectos, que englobam o comportamento do elemento, esforço computacional, número de graus de liberdade e em estudos presentes na revisão da literatura. O Quadro 2 apresenta tais elementos adotados.

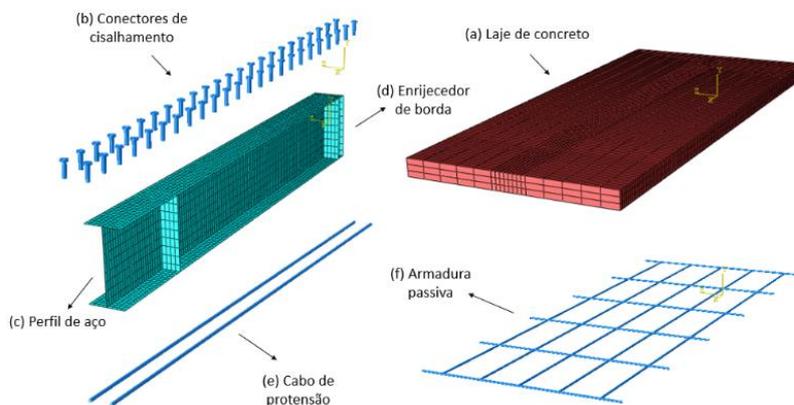
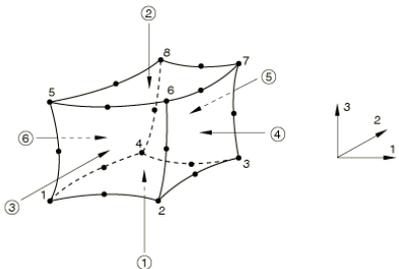
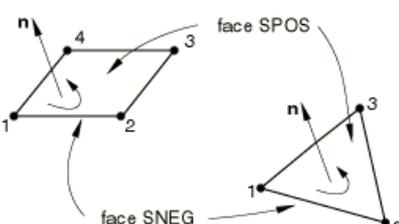
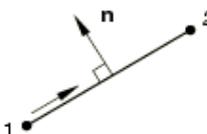
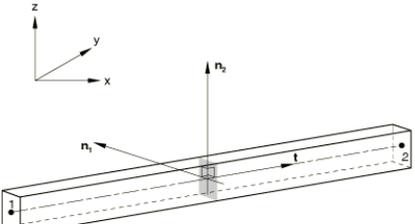


FIGURA 2: Grupo de elementos finitos modelados.

Fonte: Os autores.

QUADRO 2: Elementos finitos selecionados para representação das vigas mistas protendidas

Elemento	Figura	Dados do elemento
Sólido C3D8R		Possui 8 nós com 3 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z). Suporta análise plástica com grandes deformações, deslocamentos e também fissuração. Permite também a inserção de barras de armadura em seu interior.
Shell S4R		Possui 4 nós com 6 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos mesmos). É apropriado para representar elementos planos ou curvos com espessuras moderadas. Foi selecionado para discretizar o perfil metálico e os enrijecedores, por apresentar fluência, plasticidade, grandes deslocamentos e grande capacidade de deformação.
Truss T3D2		Possui 2 nós com 3 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z). É apropriado para representar barras, treliças ou cabos sujeitos a esforços uniaxiais. Este elemento permite deformações iniciais e foi utilizado para representar as armaduras passiva e ativa.
Beam B31		Possui 2 nós com 6 graus de liberdade por nós (translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos mesmos). Foi utilizado para modelagem dos conectores de cisalhamento, pela simplicidade existente em sua utilização e permite a consideração da não linearidade física e geométrica.

FONTE: Documentação do ABAQUS® (2014).

Quanto as dimensões das malhas, inicialmente foi utilizada uma malha de aproximadamente 43 mm nos elementos sólido *C3D8R*, e nos elementos shell *S4R*. Posteriormente, reduziu-se as dimensões dessa malha para aproximadamente 22 mm no perfil de aço e na região da laje que possui contato com este perfil. Essa redução realizada, gerou uma melhora significativa na convergência numérica e, conseqüentemente, nos resultados finais, sem

afetar de maneira considerável o tempo de processamento do modelo. Imagina-se que essa melhora obtida, se deu pelo fato da carga do ensaio ser aplicada nessa região, o que resultou numa melhor convergência.

Os conectores de cisalhamento foram discretizados com quatro elementos do tipo BEAM B31, sendo um elemento para a cabeça do conector, e os outros três para o corpo. Na base do conector foram criados dois nós em pontos muito

próximos para permitir que o mesmo possa ser vinculado simultaneamente ao perfil de aço e a laje de concreto.

Os cabos foram discretizados em elementos cuja dimensão foi dada pela distância entre os desviadores, conforme é possível visualizar na Figura 3. Isso garantiu que o cabo acompanhasse a deformação da viga através dos pontos de

inflexão, conforme ocorrência no ensaio real.

2.2.3 Definição das relações constitutivas dos materiais

O Quadro 3 apresenta os modelos constitutivos adotados para representação de cada material, aço e concreto, que foram utilizados para a análise não linear.

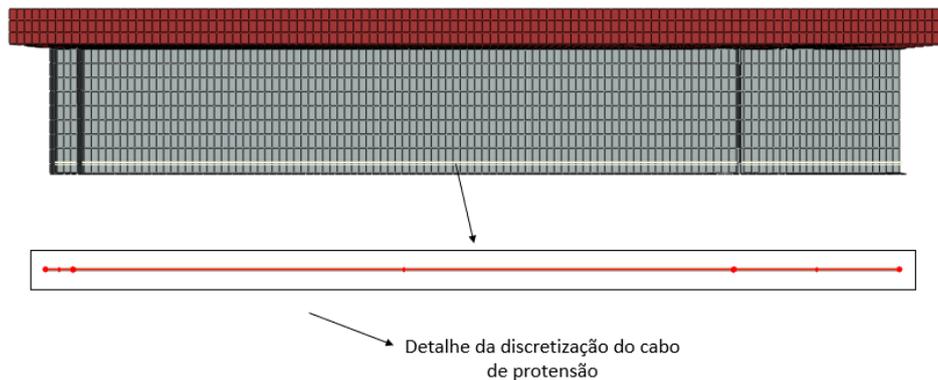


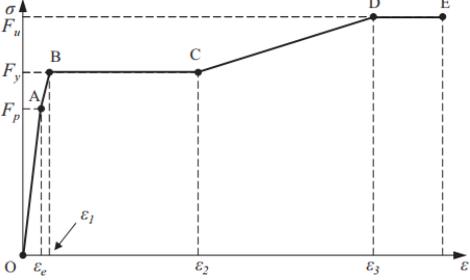
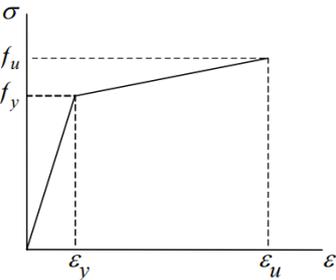
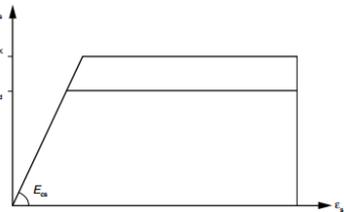
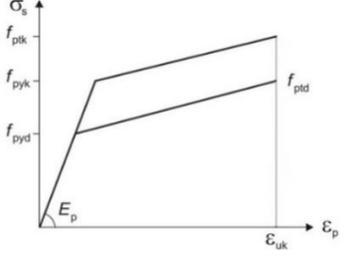
FIGURA 3: Detalhe da discretização do cabo de protensão.
FONTE: Os autores.

QUADRO 3: Modelos constitutivos para representação dos materiais.

Material	Modelo constitutivo	Descrição do modelo
Concreto à compressão		A representação do comportamento do concreto foi realizada através do modelo de dano plástico (concrete damaged plasticity), disponível na biblioteca de materiais do software ABAQUS®. A relação tensão x deformação adotada para representar o concreto submetido à compressão foi fundamentada e extraída da norma Eurocode 2 (2004 draft of prEN 1992-1-1). Foram adotados os valores das características físicas obtidas nos ensaios experimentais.
Concreto à tração		Para o concreto tracionado foi adotado o modelo de dano plástico (concrete damaged plasticity) contido no software ABAQUS®.

(Continua ...)

QUADRO 3: Modelos constitutivos para representação dos materiais. (Continuação).

Material	Modelo constitutivo	Descrição do modelo
Perfil de aço		Para o aço foi utilizado um diagrama multilinear da relação tensão x deformação com os valores de tensões e deformações obtidos experimentalmente da caracterização do aço.
Conectores		Para o aço dos conectores foi utilizado um diagrama bi-linear com encruamento isotrópico.
Armadura passiva		Para o aço da armadura passiva foi adotado o diagrama tensão x deformação com base no modelo elasto-plástico perfeito, indicado pela ABNT NBR 6118:2014.
Armadura ativa		O aço da armadura de protensão foi utilizado o diagrama tensão x deformação bilinear conforme ABNT NBR 6118:2014.

FONTE: Adaptado de Eurocode 2 (2004 draft of prEN 1992-1-1), Han (2001), ABNT NBR:6118, Documentação do ABAQUS® (2014).

2.2.4 Condições de acoplamento e vinculações

Todos os conjuntos modelados foram acoplados entre si seguindo os procedimentos a seguir:

- Armadura passiva / laje: A vinculação existente entre a armadura passiva e a laje de concreto foi estabelecida através do item *embedded constrain* contido no software ABAQUS®. Com a utilização desta ferramenta, os graus de liberdade dos nós nos elementos que representam a armadura são restringidos à translação para valores interpolados dos correspondentes graus de liberdade dos elementos que representam a laje de concreto.
- Perfil de aço / laje (Tie constraint): Para este caso específico, não foram modelados os conectores de cisalhamento. As duas superfícies em contato foram vinculadas através do comando *Tie constraint*; o que impede os escorregamentos relativo entre as duas

- superfícies em contato.
- Perfil de aço / laje (Interações de contato): Outra estratégia para se modelar a interface aço/concreto foi por meio de superfícies de contato. As propriedades de contato utilizadas na interface se destinam ao comportamento normal (*normal behavior*) e comportamento tangencial (*tangential behavior*). O comportamento normal foi definido como sendo “*hard contact*”, o que faz com que a penetração entre as superfícies seja imperceptível. Já para o comportamento tangencial, foi adotado um coeficiente de atrito igual a 0.4, de acordo com o que foi utilizado por Pathirana et al. (2016). Nesta estratégia de modelagem da interface, para garantir a vinculação perfil-laje foi necessária a modelagem de conectores de cisalhamento, onde foram aplicados os seguintes acoplamentos:
 - Perfil de aço / conector: Os nós que constituem a base dos conectores foram acoplados, através do comando *Tie constraint*, aos nós correspondentes da mesa superior do perfil de aço. Esta técnica se mostrou eficiente nos estudos de Xing et al. (2016) e Gil, Goñi e Bayo (2012). Este comando permitiu uma vinculação, entre os nós da base dos conectores e a mesa superior do perfil, que estão em contato, de modo que todos os graus de liberdade fossem restringidos.
 - Laje / conector: O contato entre estes dois materiais, foi realizado através do comando *embedded constrain*. Esta ferramenta simula de maneira satisfatória a ação do conector no interior do concreto,
 - conforme ocorreu no estudo de Gil, Goñi e Bayo (2012).
 - Cabo de protensão / enrijecedor de borda: A vinculação existente entre o cabo de protensão e os enrijecedores de borda, foi realizada através da restrição tipo *Tie*. O uso dessa ferramenta permitiu que houvesse uma junção entre o cabo e os enrijecedores, de modo que todos os graus de liberdade dos nós coincidentes fossem restringidos, permitindo que os esforços de protensão fossem transmitidos à viga.
 - Cabo de protensão / desviadores: O acoplamento existente entre o cabo de protensão e os desviadores, que são também enrijecedores intermediários, foi estabelecido através do *coupling* contido no módulo *interaction* do software. Esta ferramenta fornece a opção para o usuário determinar quais os graus de liberdade serão restringidos nos nós em contato e, no caso do presente trabalho, foram restringidos todos os graus de liberdade, exceto a translação na direção $U1(x)$, visto que, os desviadores permitem livre movimentação do cabo no seu sentido longitudinal.
- Os vínculos externos foram simulados conforme Figura 4 onde foram restringidos todos os graus de liberdade, exceto a translação na direção do eixo x e a rotação em torno do eixo z .
- Com o intuito de reduzir o número de elementos e , conseqüentemente, o tempo de processamento do modelo, foi utilizada a técnica de simetria, onde somente a metade da estrutura é modelada, conforme é perceptível na Figura 4.

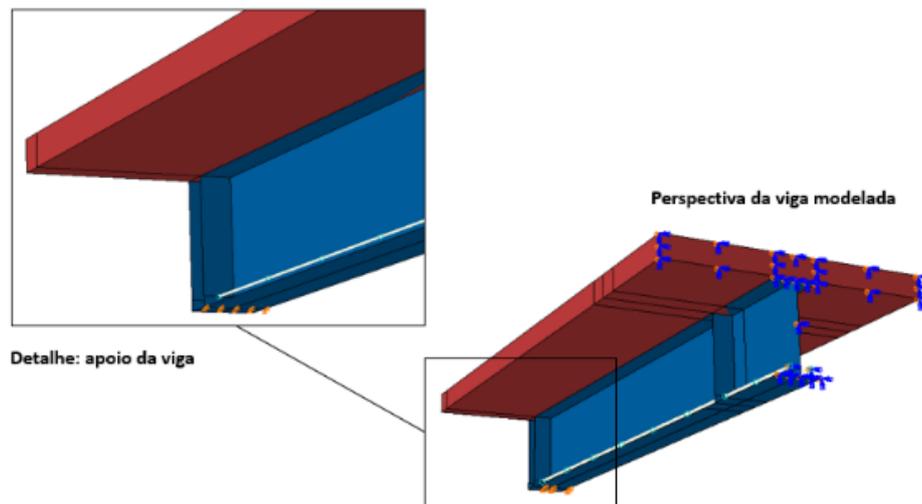


FIGURA 4: Vinculação no apoio da viga no modelo numérico.

FONTE: Adaptado do ABAQUS®(2018).

2.2.5 Procedimento para aplicação dos carregamentos

A aplicação do carregamento foi dividida em três etapas, conforme é apresentado a seguir:

- Etapa inicial (*initial step*): Inicialmente foi aplicada a força de protensão no cabo. Para isso optou-se em utilizar o recurso disponível no software ABAQUS®, designado *created predefined field* contido no módulo *load* do programa.
- 2ª etapa (*step 1*): Esta etapa é referente a aplicação do peso próprio da estrutura. Para cada uma das partes que constituem a seção mista foram atribuídas as suas respectivas densidades e posteriormente imposta a ação gravitacional.
- 3ª etapa (*step 2*): Nesta etapa foram aplicadas as cargas externas à estrutura. Estas cargas externas foram pontuais e para evitar problemas de convergência devido a concentração de tensões no local, foi necessário aplica-las distribuídas em uma pequena área da face superior da laje de concreto.

Em função da não linearidade considerada para os materiais constituintes da viga mista de aço e concreto protendidas, os carregamentos tanto do peso próprio, quanto os de

utilização, foram aplicados de forma incremental.

3. ANÁLISE RESULTADOS

Uma das questões sobre a simulação numérica se refere a modelagem da interface entre aço e concreto, incluindo ou não os conectores de cisalhamento. Portanto, os protótipos apresentados no Quadro 1 foram simulados com duas hipóteses de modelagem desta interface. Na primeira considerando laje e viga acopladas em todos os nós comuns sem conectores de cisalhamento; e a segunda hipótese modelando a interface com os conectores de cisalhamento, considerando a interação entre estes, sendo o contato existente entre a viga de aço e a laje de concreto simuladas por meio de interações de contato. A Tabela 2 apresenta a nomenclatura dos modelos desenvolvidos para posterior análise dos resultados.

3.1 CAPACIDADE RESISTENTE

Os valores dos momentos máximos resistentes das vigas são apresentados na Tabela 3. Nesta tabela estão os valores obtidos analiticamente, experimentalmente e numericamente. O momento máximo resistente para viga mista com protensão foi obtido de acordo com as expressões desenvolvidas por Nelsen (2012).

TABELA 2: Vigas modeladas.

Viga	Interface aço-concreto
VMP1_1	Sem conector
VMP1_2	Com conector
VMP2_1	Sem conector
VMP2_2	Com conector
VMP3_1	Sem conector
VMP3_2	Com conector

FONTE: Os autores.

TABELA 3: Síntese dos resultados numéricos e experimentais

Resultados analíticos		Experimentais	Numéricos	
viga	Momento máximo (kN.m)	Momento máximo (kN.m)	modelo	Momento máximo (kN.m)
VMP1	626,69	713,70	VMP1_1	698,21
			VMP1_2	666,65
VMP2	626,69	713,70	VMP2_1	719,87
			VMP2_2	673,56
VMP3	468,88	586,51	VMP3_1	591,80
			VMP3_2	582,77

FONTE: Os autores.

Analisando os resultados da Tabela 3, é perceptível a boa representatividade entre os momentos máximos obtidos analiticamente, experimentalmente e numericamente.

Os momentos de plastificação obtidos analiticamente através das formulações desenvolvidas por Nelsen (2012), se mostraram mais conservadores em relação aos resultados experimentais e numéricos. Já os resultados numéricos, ficaram bem próximos dos experimentais, onde a maior diferença ocorreu com a viga VMP1_2, chegando a 6,59%. A viga com o momento último mais próximo do experimental foi a VMP3_2, com uma diferença de 0,64%.

Com relação a influência da modelagem dos conectores nos resultados de momento máximo das vigas, as maiores diferenças ocorreram

nas vigas VMP1 e VMP2, chegando a uma porcentagem de 4,52% e 6,43%, respectivamente. Acredita-se que essas diferenças ocorreram devido a deformação gerada nos conectores de cisalhamento e, conseqüentemente, ao pequeno deslizamento na interface entre os materiais aço e concreto.

3.2 DESLOCAMENTO E CONFIGURAÇÃO DEFORMADA

A validação do modelo numérico foi realizada por meio de comparações com os resultados obtidos experimentalmente por Saadatmanesh, Albrecht e Ayyub (1989) e Ayyub, Sohn e Saadatmanesh (1990). As figuras 5 e 6 apresentam a relação força x deslocamento das vigas apresentadas na Tabela 2.

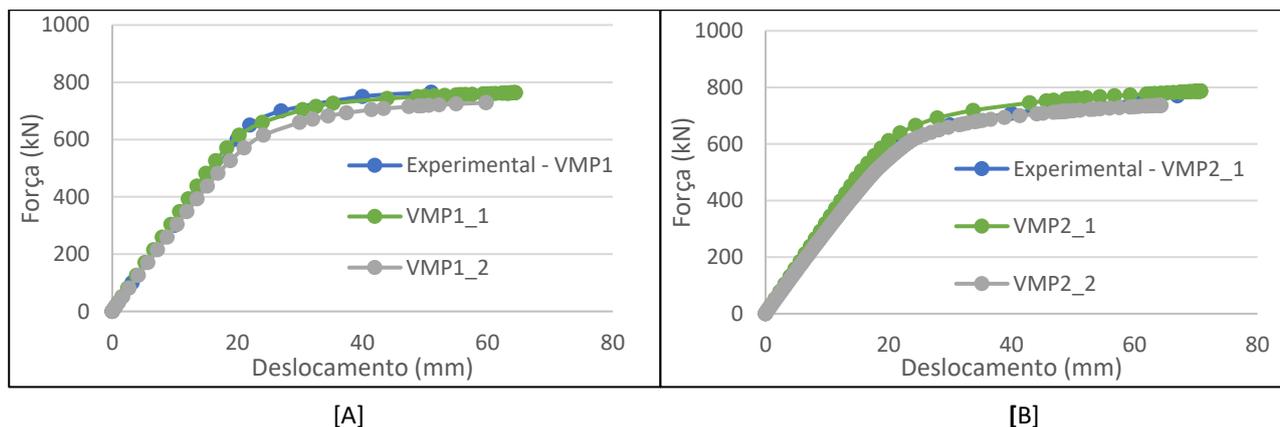


FIGURA 5: [A] Comportamento força aplicada x deslocamento no meio do vão das vigas VMP1 e [B] VMP2.

FONTE: Os autores.

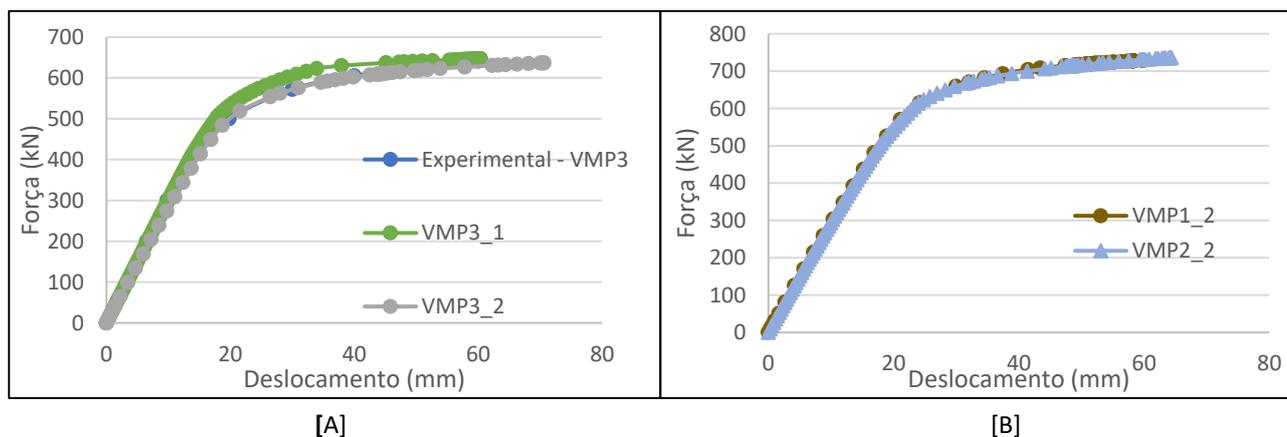


FIGURA 6: [A] Comportamento força aplicada x deslocamento no meio do vão das vigas VMP3 e [B] comportamento força aplicada x deslocamento no meio do vão das vigas VMP1_2 e VMP2_2.

FONTE: Os autores.

Pela análise dos resultados, é possível perceber que existe uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. Os modelos sem conectores apresentaram comportamento mais rígido, pois foram impedidos os deslocamentos ou deslizamentos na interface entre os materiais e conduziram a resultados numéricos mais distantes dos experimentais. Portanto, serão admitidos como modelo representativo do comportamento das vigas mistas com protensão, aqueles que incluem os conectores na simulação da vinculação aço-concreto.

Como a única diferença entre as vigas VMP1 e VMP2 está somente no traçado do cabo de protensão, o gráfico apresentado na Figura 6(B) permite a comparação entre o comportamento dessas duas situações. A viga VMP1_2 com cabo

reto apresentou deslocamento vertical máximo de 54,80 mm e momento resistente de 666,65; enquanto a viga VMP2_2 com cabo poligonal apresentou deslocamento vertical máximo de 61,24 mm e momento resistente de 673,56. Não são diferenças significativas, de modo que se possa concluir, que neste caso, o traçado do cabo terá maior influência somente nos aspectos construtivos.

3.3 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Os gráficos da Figura 7 relacionam as grandezas força aplicada x deformação das fibras extremas das vigas mistas protendidas, ou seja, da fibra superior do concreto e da mesa inferior do perfil de aço.

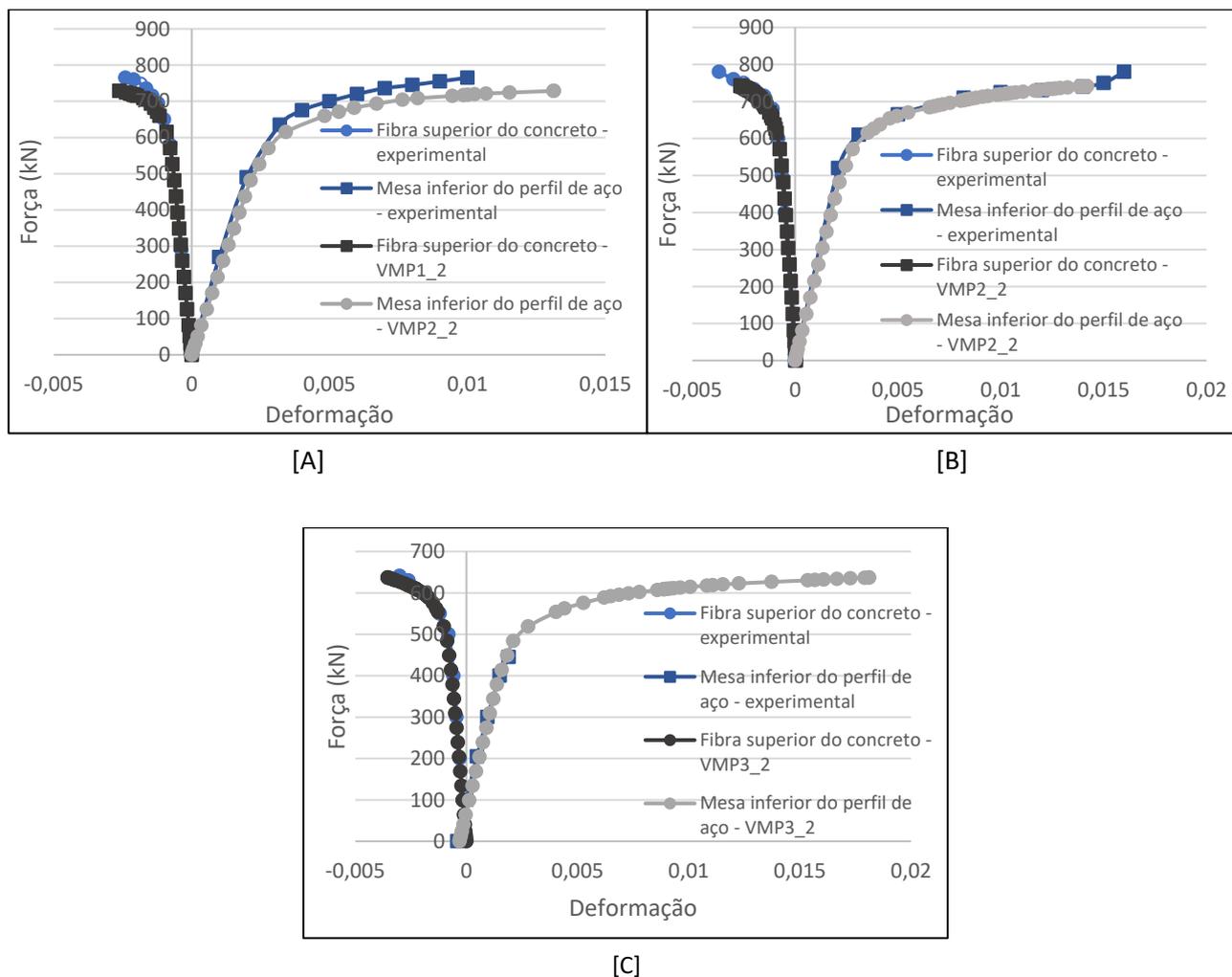


FIGURA 7: Comportamento força aplicada x deformação da fibra superior do concreto (lado esquerdo) e força aplicada x deformação na mesa inferior do perfil de aço (lado direito) no meio do vão das vigas [A] VMP1; [B] VMP2 e [C] VMP3.

FONTE: Os autores.

Pelos gráficos da Figura 7, percebe-se a boa correlação entre os resultados, o que mostra mais uma vez que o modelo reproduziu o comportamento experimental de forma satisfatória. Além disso, é visível o quanto a ductilidade do aço é maior em relação ao concreto, pois enquanto a deformação máxima do aço para ambas as vigas foi em torno de

0,015, a da fibra superior do concreto esteve em torno de 0,003.

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam a distribuição de tensões no estágio final de carregamento, no meio do vão das vigas VMP1_2, VMP2_2 e VMP3_2, respectivamente, o que torna possível perceber as tensões elevadas na mesa inferior do perfil e na fibra superior do concreto.

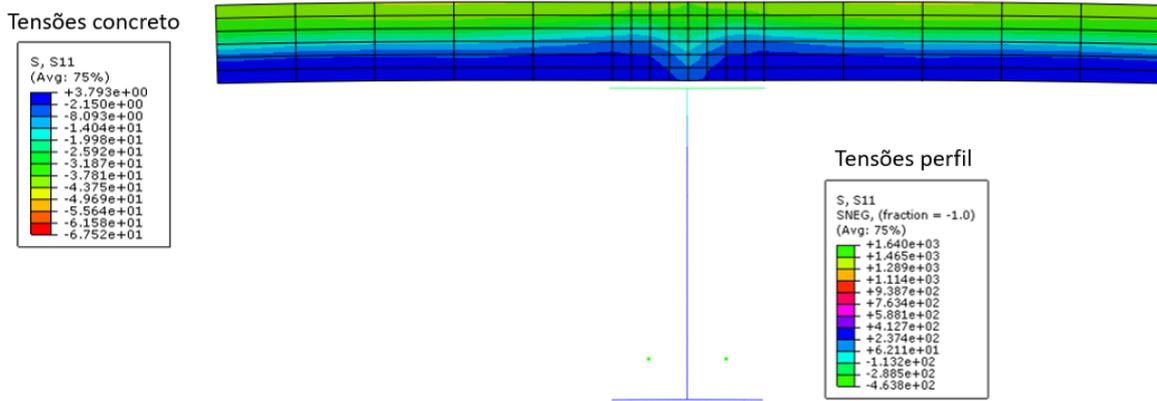


FIGURA 8: Distribuição de tensões da viga VMP1_2 no estágio final – Unidade das tensões em Mpa.
FONTE: Adaptado do ABAQUS® (2018).

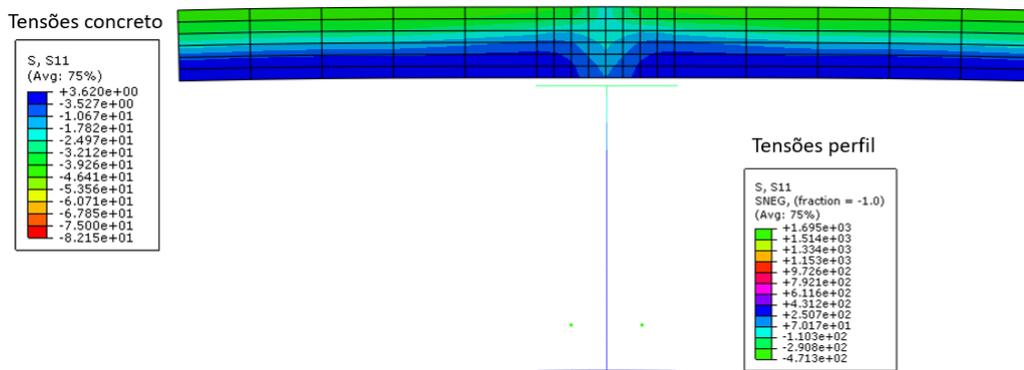


FIGURA 9: Distribuição de tensões da viga VMP2_2 no estágio final – Unidade das tensões em Mpa.
FONTE: Adaptado do ABAQUS® (2018).

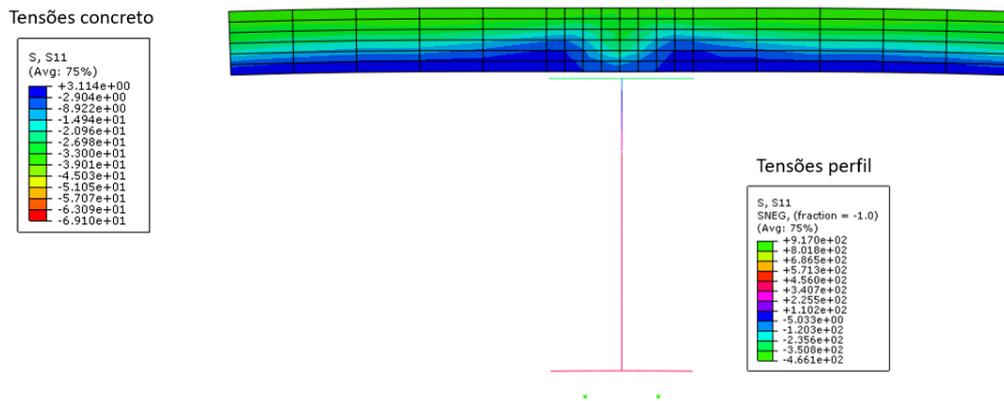


Figura 10: Distribuição de tensões da viga VMP3_2 no estágio final – Unidade das tensões em Mpa.
FONTE: Adaptado do ABAQUS® (2018).

Ao analisar-se a distribuição das tensões na seção mista, é possível identificar que nas vigas VMP1_2, VMP2_2 e VMP3_2, existem duas linhas neutras plásticas, sendo na porção superior do perfil de aço e na parte inferior da laje de concreto. Houve esta ocorrência somente nos casos onde na modelagem da interface aço-concreto foram incluídos os conectores de cisalhamento. Esta

estratégia representou melhor a interface, permitindo escorregamento relativo entre laje e perfil de aço, caracterizando uma situação de interação parcial.

A modelagem numérica permite ainda a verificação de tensões na região das ancoragens, sendo esta análise um dos aspectos mais importantes na fase de projetos, devido à grande

concentração de esforços atuantes no local. A Figura 11 apresenta esta distribuição de tensões para duas situações: após aplicação da força de protensão e peso próprio da viga e após a aplicação dos carregamentos externos.

3.4 ACRÉSCIMO DE FORÇAS NOS CABOS DE PROTENSÃO

Após a aplicação das forças de protensão iniciais, os cabos sofrem um acréscimo de tensões devido a aplicação das forças externas nas vigas. Os

gráficos da Figura 12, apresentam o acréscimo de força nos cabos de protensão em função da força externa aplicada nas vigas.

Percebe-se que o modelo numérico representa bem o comportamento dos cabos de protensão. Para as vigas VMP1 e VMP2 o acréscimo na força de protensão inicial foi de 43,23% e 46,11% respectivamente. O acréscimo na força de protensão nos cabos são significativos, o que requer atenção na verificação destes elementos no projeto de vigas mistas protendidas.

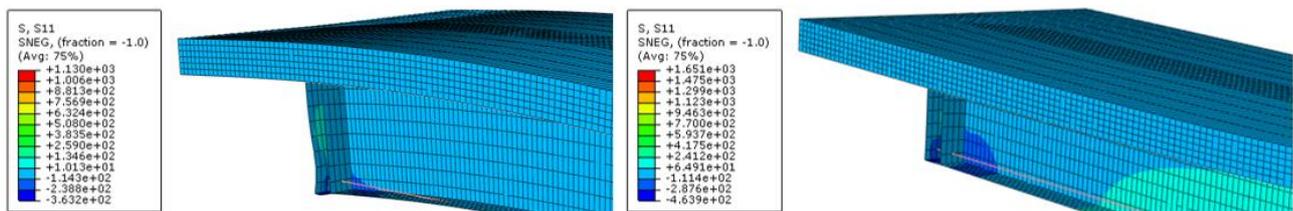


FIGURA 11: Demonstração da concentração de tensões nas placas de ancoragem no ato da protensão e configuração final.

FONTE: Adaptado do ABAQUS® (2018).

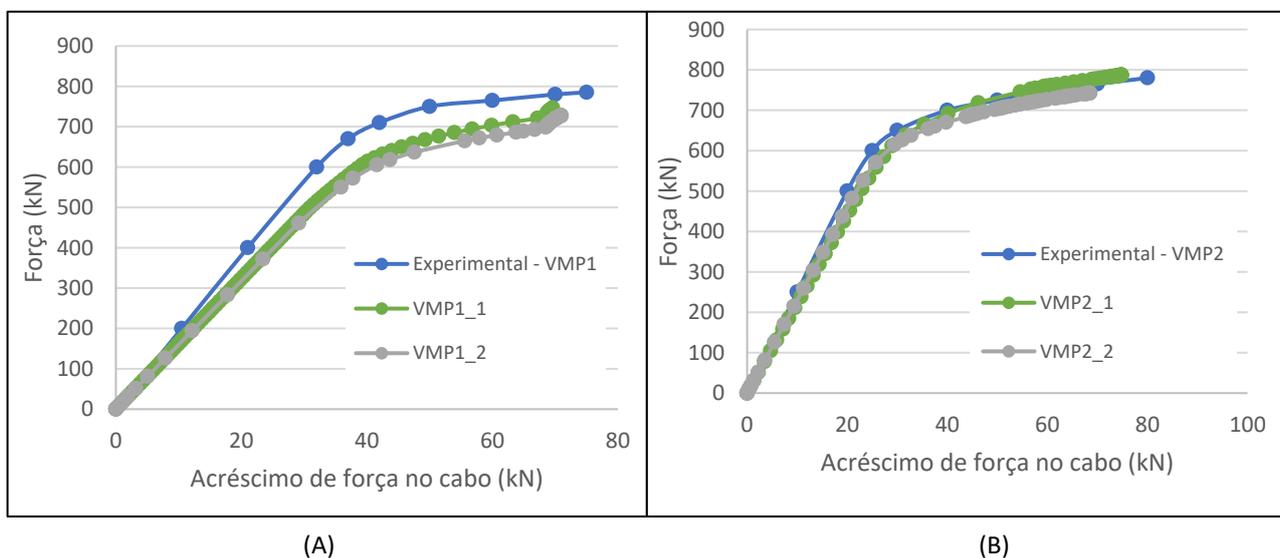


FIGURA 12: Comportamento força aplicada x acréscimo da força de protensão das vigas (A) VMP1 e (B) VMP2.

FONTE: Os autores.

4. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma estratégia de modelagem numérica através do software ABAQUS®, que representasse de forma satisfatória o comportamento das vigas mistas de aço e concreto protendidas.

Diversas são as formas de modelagem da interface aço-concreto, conforme é possível perceber na literatura. Com base nisso, a vinculação entre os diferentes materiais foi estabelecida de duas maneiras, sendo ora acoplando as superfícies entre aço e concreto sem modelar o conector, e ora simulando a vinculação entre aço-concreto-conector com interações de contato na interface e a presença física do conector de cisalhamento. Pelos resultados apresentados e nas situações aqui estudadas, é necessária a modelagem dos conectores para melhor representar o comportamento das vigas mistas protendidas, sobretudo em situações de interação parcial.

Na análise da distribuição de tensões na seção, no centro do vão, é possível perceber as tensões elevadas na fibra superior do concreto e na mesa inferior do perfil. Além disso, é possível captar que para o caso onde a vinculação laje-perfil foi estabelecida através da modelagem dos conectores de cisalhamento, existem duas linhas neutras plásticas, sendo uma localizada na parte inferior da laje de concreto e a outra na porção superior do perfil de aço. Isso ocorreu devido ao pequeno deslizamento verificado na interface, em função da deformação dos conectores.

Com base nos resultados expostos e nos aspectos mencionados, fica evidente que a metodologia para modelagem numérica desenvolvida é adequada para simular as vigas mistas protendidas ensaiadas experimentalmente, sobretudo nos casos onde foram modelados os conectores de cisalhamento, satisfazendo assim o objetivo proposto nesse trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS Versão 6.14 **Documentation**. ABAQUS, Simulia, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.
- AYYUB, B.; SOHN, Y. G.; SAADATMANESH, H. Prestressed composite girders under positive moment. **Journal of Structural Engineering**, [S.l.], v. 116, n. 11, p. 2931-2951, Nov. 1990.
- BELENYA, E. **Prestressed load-bearing metal structures**. 1ª ed. Moscow: MIR Publishers, English translation, 1977. 463 p.
- DABAON, M. A.; SAKR, M. A.; KHAROUB, O. Ultimate behavior of externally prestressed Composite beams with partial shear connection. In: ELEVENTH INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON STRUCTURAL AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 11th, 2005, Cairo. **Proceedings...** Cairo: Ain Shams University, 2005. p. 1-12.
- EL-SHAER, M. A. A.; MUKHTAR, S. M. Behavior of Prestressed Simple and Continuous Partially Composite Steel-Concrete Beams. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 6, n. 4, p. 309-320, April 2016.
- FERREIRA, A. C. **Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos**. 2007. 276 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília.
- GIL, B.; GOÑI, R.; BAYO, E. Experimental and numerical validation of a new design for three-dimensional semi-rigid composite joints. **Engineering Structures**, v. 48, p. 55-69, 2012.
- GONÇALVES, R. M. **Alguns aspectos relativos à inspeção e recuperação de pontes de aço: ênfase em pontes ferroviárias**. 1992. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- HOADLEY, P. G. Behavior of prestressed composite steel beams. **American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division**, v. 89, n. ST3, p. 21-34, June 1963.

- IBRAHIM, A. M.; MOHAISEN, S. K.; AHMED, Q. W. Finite element modeling of composite steel-concrete beams with external prestressing. **International Journal of Civil & Structural Engineering**, v. 3, n. 1, p. 102–116, 2012.
- KIRCHHOF, L. D. **Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço e concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio**. 142 f. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 2006. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- LEE, D. H. Prestressed Concrete Bridges and Other Structures. **The Structural Engineer**, v. 30, n. 12, p. 302-313, December 1952.
- NELSEN, A. C. H. **Comportamento estrutural de viga mista de aço e concreto com protensão externa**. 2012. 194 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção civil) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- NIE, J.; TAO, M.; CAI, C. S.; LI, S. Deformation analysis of prestressed continuous steel-concrete composite beams. **Journal of Structural Engineering-Asce**, v. 135, n. 11, p. 1377–1389, Nov. 2009.
- NIE, J.; ASCE, M. T. S. M.; ASCE, C. S. C. F.; LI, S. Analytical and numerical modeling of prestressed continuous steel-concrete composite beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 137, n. 12, p. 1405–1418, December 2011.
- PATHIRANA, S. W.; UY, B.; MIRZA, O.; ZHU, X. Flexural behaviour of composite steel-concrete beams utilising blind bolt shear connectors. **Engineering Structures**, v. 114, p. 181–194, 2016.
- REZENDE, C. R. **Análise estrutural de vigas metálicas protendidas**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo.
- RONGHE, G. N.; GUPTA, L. M. Parametric Study of tendon profiles in prestressed steel plate girder. **Advances in Structural Engineering**, [S.l.], v. 5, n. 2, p 75-85, Apr. 2002.
- SAADATMANESH, H.; ALBRECHT, P.; AYYUB, B. M. Experimental study of prestressed composite beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 115, n. 9, p. 2348–2363, Sep. 1989.
- SOUZA, A. S. C.; NELSEN, A. C. H.; MAIA, W. F.; DE NARDIN, S. Estudo paramétrico do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 2, n. 3, p. 186 - 205, Dez. 2013.
- SOUZA, A. S. C.; MAIA, W. F.; DE NARDIN, S. Análise numérica de vigas mistas de aço e concreto protendidas. **Revista da Estrutura de Aço**, v. 3, n. 4, p. 220 - 238, Dez. 2015.
- STERIAN, D. S. Introducing Artificial Initial Forces into steel Bridge Decks. **Acier-Stahl-Steel**, v. 34, n. 1, p. 31-37, January 1969.
- SZILARD, R. Design of prestressed composite steel structures. **American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division**, v. 85, n. ST9, p. 97-123, November 1959.
- TACHIBANA, Y.; KONDO, K.; ITO, K. Experimental study on composite beams prestressed with wire cables. Symp. **Japan Soc. for the Promotion of Sci.**, Tokyo, Japan, 1963.
- XING, Y.; HAN, Q.; XU, J.; GUO, Q.; WANG, Y. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 123, p. 79–92, 2016.