



LIGAÇÃO VIGA-PILAR EM FASE DE MONTAGEM PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO: ANÁLISE PARAMÉTRICA VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Erlucivânia Bueno da Silva

Daniel de Lima Araújo

erlucivania@gmail.com

dlaraujo@ufg.br

Engenheira Civil, Mestranda em Estrutura do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estrutura e Construção Civil – PPG-GECON da EEC/UFG.

Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil – PPG-GECON da EEC/UFG.

Escola de Engenharia Civil – UFG, Rua Universitária, nº 1488, Qd. 86, Lt Área, Setor Universitário, Goiânia – GO. CEP: 74605-220.

Abstract. *A ligação é uma das fases fundamentais no projeto de estruturas pré-moldadas, sendo responsável por interligar os elementos e permitir a transferência dos esforços, interferindo diretamente na estabilidade global da estrutura e nas fases construtivas. Em Oliveira Júnior (2012) é proposta uma ligação semirrígida entre viga e pilar pré-moldados com alto grau de resistência que pode ser empregada em casas de força de centrais hidrelétricas. Devida à elevada altura dessa estrutura, o autor propõe uma ligação provisória durante a fase de montagem que dispensa a necessidade de escoramento durante a fase construtiva. Essa ligação é composta por um consolo metálico formado por chapas metálicas soldadas em forma de "U", embutido no pilar, e um dente metálico, embutido na viga, formado por chapas de aço soldadas em forma de perfil tubular, retangular e vazado. Este trabalho tem por objetivo estimar a resistência dessa ligação provisória via modelagem computacional empregando o método do elemento finito usando o programa DIANA 9.6. Observou-se que retirar uma faixa da malha do pilar ao redor do consolo e aplicar elementos de interface apenas entre as superfícies de contato aço-concreto são os principais fatores que influenciam o comportamento da ligação.*

Keywords: *Ligação viga-pilar, Concreto Pré-Moldado, Dente metálico, Consolo Metálico, Método do elemento finito.*

1 INTRODUÇÃO

O comportamento das estruturas pré-moldadas é consideravelmente influenciado pelo tipo de ligação existente entre os elementos que as compõem. De acordo com a sétima edição do Precast Concrete Institute (PCI, 2010), as ligações tem a função de transferir carregamento, restringir movimentos e garantir a estabilidade estrutural. Para isso, o dimensionamento e o projeto das ligações devem levar em consideração além dos processos construtivos, critérios que contemplem a resistência para transferir a força à qual será submetida durante a vida útil, a ductilidade, a durabilidade, a resistência ao fogo e a ações indiretas como retração e fluência. Uma das tipologias de ligações comum nas estruturas pré-moldadas são as ligações viga-pilar. Entre elas são estudadas as ligações com consolos e dentes metálicos embutidos que contribuem para a eliminação do consolo aparente.

Em Oliveira Júnior (2012) é proposta uma ligação viga-pilar pré-moldados classificada como semirrígida com alto grau de resistência podendo ser empregada em casas de força de centrais hidrelétricas. Devido à elevada altura dessa estrutura, o autor propõe uma ligação provisória durante a fase de montagem que dispensa a necessidade de escoramento. Essa ligação é composta por um consolo metálico formado por chapas metálicas soldadas em forma de “U” embutido no pilar (Fig. 1), e um dente metálico formado por chapas de aço soldadas em forma de perfil tubular, retangular e vazado embutido na viga (Fig. 2). Durante a montagem das peças pré-moldadas o dente é encaixado sobre a viga e as abas laterais do consolo fornecem o travamento lateral, proporcionando maior estabilidade. A ligação é finalizada preenchendo o rebaixe da viga com concreto reforçado com fibras.

No manual do PCI (2010) são apresentados modelos de cálculos simplificados para o dimensionamento das ligações viga-pilar com consolos e dentes metálicos embutidos. No entanto, quando são utilizados tubos, perfis ou chapas soldadas, deve-se também empregar normas específicas de estruturas metálicas para dimensioná-los.

A ligação com elementos metálicos de suspensão mostrados na Fig. 2a, denominado “Cazaly Hanger”, vem sendo usado desde 1960 na indústria de pré-moldados, permitindo que as peças sejam içadas com maior rapidez e economia. Outra vantagem é a possibilidade de diminuir a altura das peças estruturais, permitindo pés-direitos menores e, conseqüentemente, redução dos gastos com materiais.

A associação da ligação “Cazaly Hanger” com dente metálico é usual na ligação viga-pilar quando se deseja embutir o consolo na ligação. Neste caso, o consolo normalmente tem a forma de um perfil caixa e é preenchido com concreto. A associação da ligação “Cazaly Hanger” com consolos abertos, entretanto, não é usual, carecendo de maiores estudos para identificar a eficiência dessa associação. O objetivo desse trabalho é, portanto, avaliar, por meio de modelagem computacional pelo Método dos Elementos Finitos, a resistência desse tipo de ligação e comparar o resultado obtido com os modelos de cálculo propostos pelo PCI (2010) para o dimensionamento dos elementos da ligação, isto é, o consolo metálico e a ligação “Cazaly Hanger”.

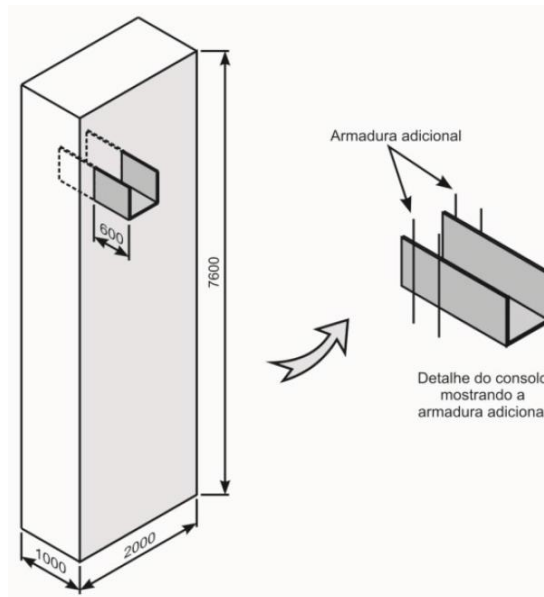
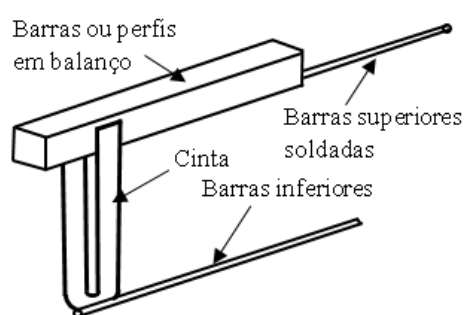
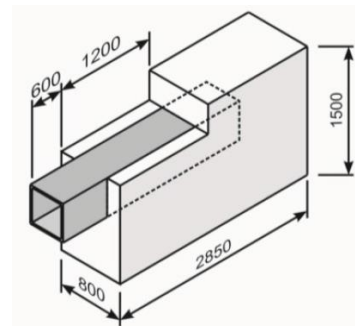


Figura 1. Modelo da proposta presente em Oliveira Júnior (2012) – dimensões em mm.



(a) Componentes da Cazaly Hanger (JOY; DOLAN; MEINHEIT, 2010)



(b) Dimensões, em mm, da viga pré-moldada (OLIVEIRA JUNIOR, 2012)

Figura 2. Principais elementos da ligação “Cazaly Hanger” e dimensões da viga pré-moldada proposta por Oliveira Junior (2012).

2 MODELO COMPUTACIONAL

Nesta seção são apresentados os aspectos gerais da estratégia de modelagem adotada para analisar o comportamento da ligação viga-pilar apresentada em Oliveira Junior (2012). Para tanto foi utilizado o programa DIANA[®] versão 9.6 no qual está acoplado a versão 3.3.0 do MIDAS FX+ (TNO, 2015).

Na Figura 3 é apresentada a geometria do pórtico estrutural simulado neste trabalho e que foi estudado por PRADO (2014). O mesmo é composto por vigas e pilares pré-moldados ligados na fase de montagem por consolos em forma de “U” embutidos no pilar e dentes com seção retangular vazada inserido na viga (ligação “Cazaly Hanger”). No pilar pré-moldado tipo A, o dente de 12,5 mm encaixa no consolo de 7,5 mm de espessura e no pilar pré-moldado tipo B o dente de 7,5 mm apoia no consolo de 12,5 mm.

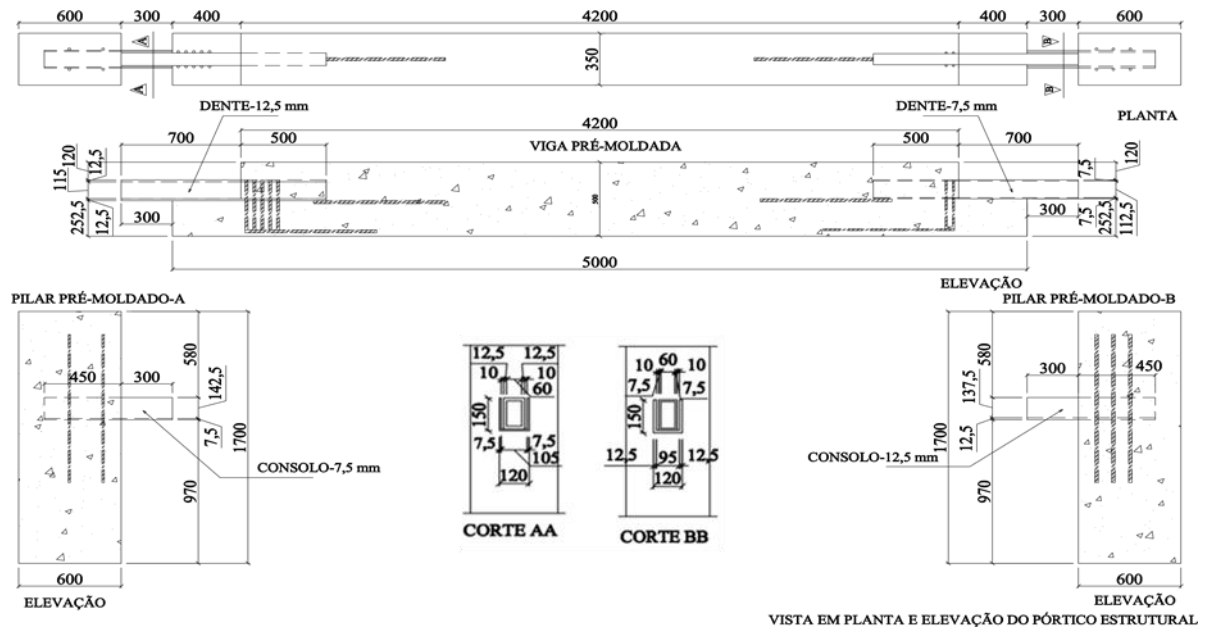


Figura 3. Geometria do pórtico analisado. (PRADO, 2014)

Neste trabalho é analisado apenas a ligação com consolo-7,5 mm e dente-12,5 mm. Para tanto, foram gerados sete modelos que apresentam as seguintes características em comum: geometria, tipo e tamanho dos elementos, modelo constitutivo dos materiais, carregamento aplicado, condição de contorno e algoritmos de solução. As diferenças entre eles devem-se às diferentes formas de considerar a aderência entre as peças metálicas e o concreto, a forma de modelagem da interface de contato entre o dente e a viga e a posição da seção de engastamento do consolo no pilar.

2.1 Geometria

A geometria dos modelos analisados neste trabalho é a mesma para todos os modelos computacionais. Inicialmente foram criados, no MIDAS Fx+, sólidos formando as geometrias da viga e dos dentes, posteriormente dos consolos e pilares, e por último foram geradas as linhas que simulam as armaduras da viga e dos pilares como mostrado na Fig. 4.

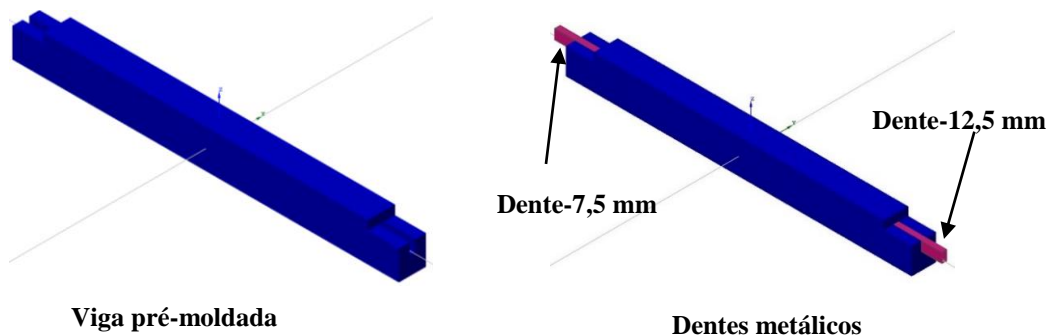


Figura 4. Geometria do modelo computacional.

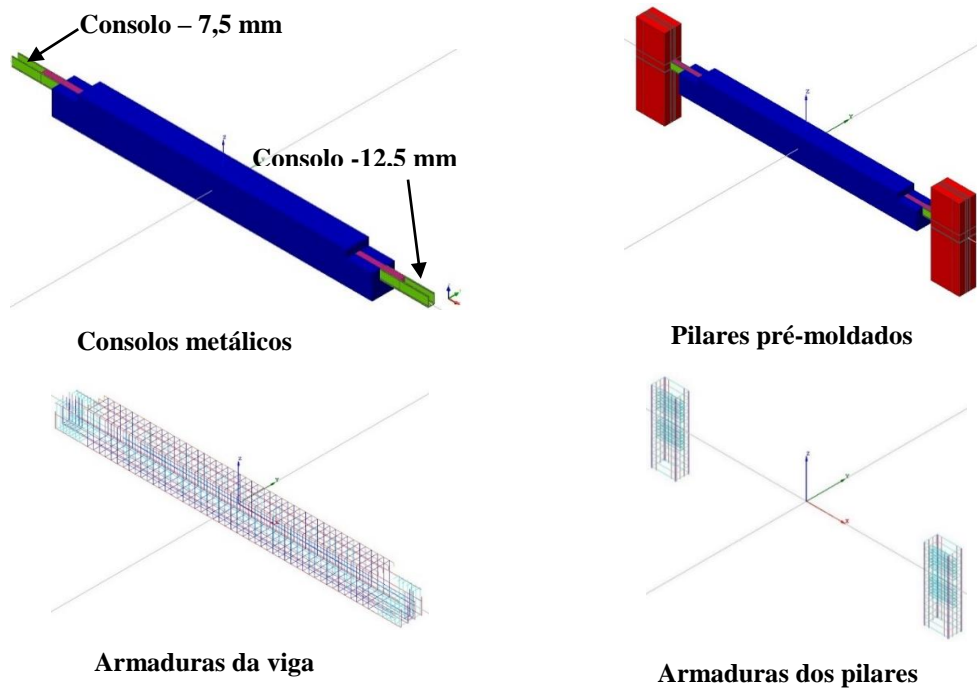


Figura 4. Geometria do modelo computacional (continuação).

2.2 Propriedades dos materiais

Na Tabela 1 são apresentados, os valores das propriedades dos materiais atribuídos a viga e pilares pré-moldados e os valores das propriedades atribuídos para os vergalhões e aço das chapas dos dentes e consolos metálicos (PRADO, 2014).

Tabela 1. Propriedades do concreto e das armaduras e chapas de aço.

Propriedades do concreto			
Peças estruturais	Energia da fratura para o Modo I (N/mm)	Energia da fratura na compressão (N/mm)	Resistência à tração (N/mm ²)
Viga pré-moldada	0,15	14,95	3,55
Pilares pré-moldados	0,15	14,88	3,54
Propriedades das armaduras e das chapas de aço			
Diâmetro efetivo (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Área (mm ²)	Tensão de escoamento (N/mm ²)
6,3	6,38	31,97	644
8	7,94	49,51	617
10	10	78,23	557

Tabela 1. Propriedades do concreto e das armaduras e chapas de aço (continuação).

Diâmetro efetivo (mm)	Diâmetro nominal (mm)	Área (mm ²)	Tensão de escoamento (N/mm ²)
12,5	12,5	122,72	599
16	15,9	198,56	574
20	20	314,16	500
25	24,9	486,95	551
Chapa de aço -7,5 mm	-	-	266,8
Chapa de aço - 12,5 mm	-	-	297,3

Foram ainda, atribuídos o módulo de elasticidade teórico do aço, $E = 200000$ MPa, e coeficiente de Poisson igual a 0,2 para o concreto e 0,3 para o aço e armaduras.

2.3 Modelos constitutivos dos materiais

O modelo constitutivo atribuído ao concreto foi o de fissuração distribuída do tipo "Deformação Total com Fissuras Fixas" com lei de amolecimento linear na tração, Fig. 5, e comportamento parabólico na compressão conforme mostrado na Fig. 6.

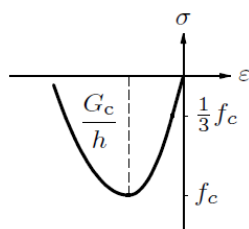


Figura 5. Relação tensão-deformação parabólica para o concreto na compressão. (Manual de teoria do DIANA, 2014)

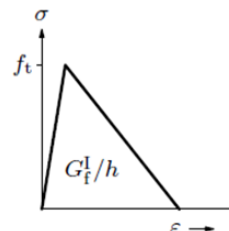


Figura 6. Curva de amolecimento linear para o concreto na tração. (Manual de teoria do DIANA, 2014)

A energia da fratura do concreto para o Modo I foi calculada de acordo com as prescrições do Código Modelo 2010 da FIB (2012), sendo a energia de fratura na compressão do concreto estimada em cem vezes a energia da fratura do concreto para o Modo I, uma vez que os resultados experimentais indicam que esse valor varia entre 50 e 100 vezes (FEENESTRA, 1993).

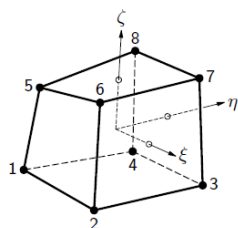
As armaduras dos pilares e das vigas foram discretizadas usando os Reinforcements, um recurso do programa DIANA[®] que altera a matriz de rigidez do elemento atravessado por ele e enrijece os elementos envolvidos permitindo simular o comportamento dos vergalhões no concreto armado.

Para as armaduras e chapas de aço dos consolos e dentes metálicos foi empregado um modelo de plasticidade do tipo Von Mises, sendo o aço considerado como material elastoplástico perfeito.

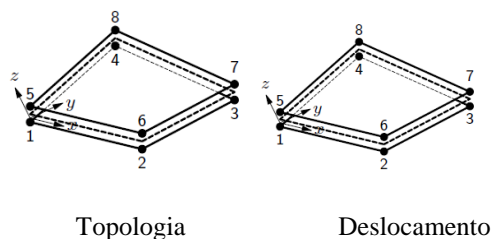
O contato entre as peças metálicas e o concreto foi representado no modelo computacional por meio de elementos de interface, os quais podem ser de interface estrutural, para análises estruturais, e interface estrutural-fluído, para análises de fluidos e estrutura dinâmicas. Nesta análise foram aplicados os elementos de interface estrutural. Foram adotados modelos constitutivos linear ou de fissuração discreta (*discrete cracking*). No primeiro, é fornecido o valor de D_{11} e D_{22} que são, respectivamente, os módulos de rigidez normal e tangencial da interface. No segundo, além dos parâmetros citados, devem ser fornecidos os dados de resistência à tração e energia no modo I de fratura da interface.

2.4 Elementos Finitos

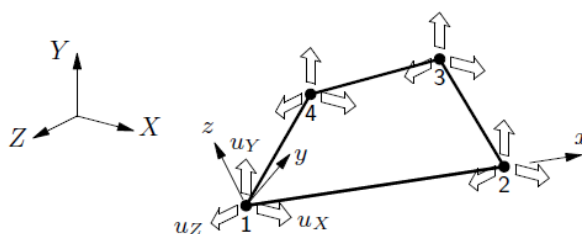
O elemento sólido isoparamétrico HX24L (Fig. 7-a) de oito nós com função de interpolação linear foi utilizado na discretização das peças metálicas e de concreto. Para representar a interface entre o pilar-consolo e dente-viga foi utilizado o elemento Q24IF (Fig. 7-b), o qual é constituído por interface de duas camadas, cada uma com quatro nós. O elemento de contato Q12CT, utilizado para representar o contato entre o dente e o consolo metálicos (Fig. 7-c), é um elemento finito quadrilateral de quatro nós, com função de interpolação linear utilizado para simular contato entre duas superfícies em modelos tridimensionais.



(a) Elemento finito HX24L usado para o concreto e aço.



(b) Elemento finito Q24IF usado na ligação dente-consolo, consolos-pilares, vigas-dentes.



(c) Elemento finito Q12CT usado para representar o contato entre o dente e consolo metálicos.

Figura 7. Elementos finitos utilizados na modelagem. (Manual de teoria do DIANA, 2014)

2.5 Malha do modelo de elemento finito

Os modelos computacionais desenvolvidos são formados pelos nove conjuntos básicos de elementos mostrados na Fig. 8, sendo eles; (1) volume para aplicação dos deslocamentos durante o processamento do modelo, (2) a viga, (3) dente-12,5 mm, (4) dente-7,5 mm, (5) consolo-7,5 mm, (6) consolo-12,5 mm e os pilares (7). As armaduras estão inseridas grupos dos pilares e das vigas.

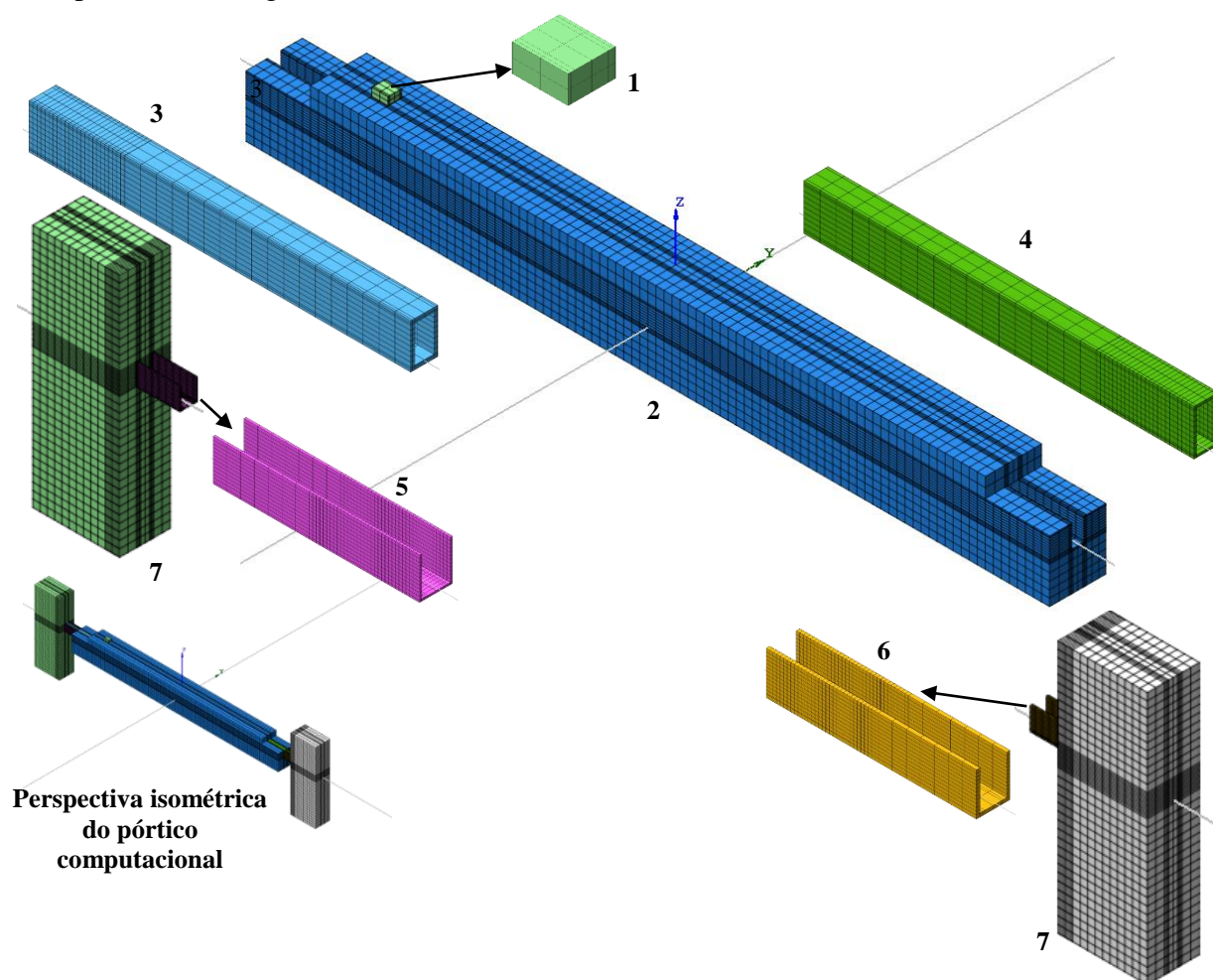


Figura 8. Conjuntos de elementos finitos que formam os modelos computacionais.

A região de contato entre o dente e a viga, o consolo e o pilar e entre o dente e o consolo foi considerada de diferentes maneiras durante as análises. De forma geral, os modelos podem ou não apresentar elementos de interfaces e de contato nessas regiões.

A interface do consolo com o pilar foi aplicada apenas no trecho inicial entre a face frontal do pilar e o primeiro par de armaduras adicionais soldadas no consolo. Outra consideração realizada foi permitir o livre afastamento entre as chapas de aço e o concreto quando a interface desses elementos fosse solicitada à tração. Logo, não foram aplicados os elementos de interfaces nas faces superiores das mesas e das almas dos consolos.

A possibilidade do comportamento da ligação ser afetado pela qualidade do concreto ao redor e abaixo do consolo-7,5 mm foi verificada retirando a faixa de malha mostrada na Fig. 9. A largura dessa faixa de malha, de 12,5 mm, foi baseado na distância da seção crítica

recomendada pelo PCI (2010), que para o consolo em questão foi estimada em 12,5 mm. Esse valor correspondia, ainda, à metade do cobrimento da armadura do pilar.

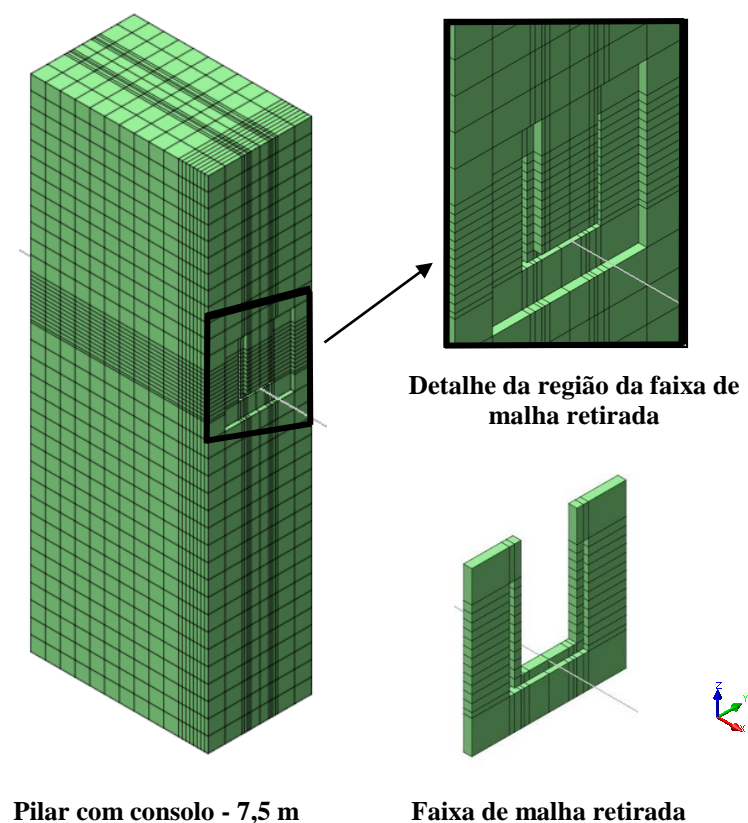


Figura 9. Faixa de malha retirada do pilar ao redor do consolo-7,5 mm.

2.6 Condição de contorno

Em todos os modelos computacionais foram restringidas as rotações e translações das bases dos pilares nas direções x , y e z . Também foram impostas as restrições das translações nas direções de y ao longo de uma das laterais dos pilares e da viga, e de x nos quatro nós dos cantos da face superior do volume criado para aplicação do carregamento. No modelo que possui elemento de contato foi aplicado, também, restrição à translação na direção de x nos nós das faces posteriores dos pilares.

O carregamento foi aplicado sob forma de deslocamento, sendo imposto 1 mm a todos os nós da face superior do volume destinado a aplicação do carregamento. Em todos os modelos o deslocamento vertical foi aplicado em 10 incrementos de 0,1 mm seguidos de 5000 incrementos de 0,01 mm, totalizando 51 mm.

A Figura 10 mostra as restrições e deslocamentos aplicados no modelo computacional com elementos de contato entre o dente-12,5 mm e o consolo-7,5 mm (os demais modelos não possuem apenas as restrições das translações laterais na direção de x).

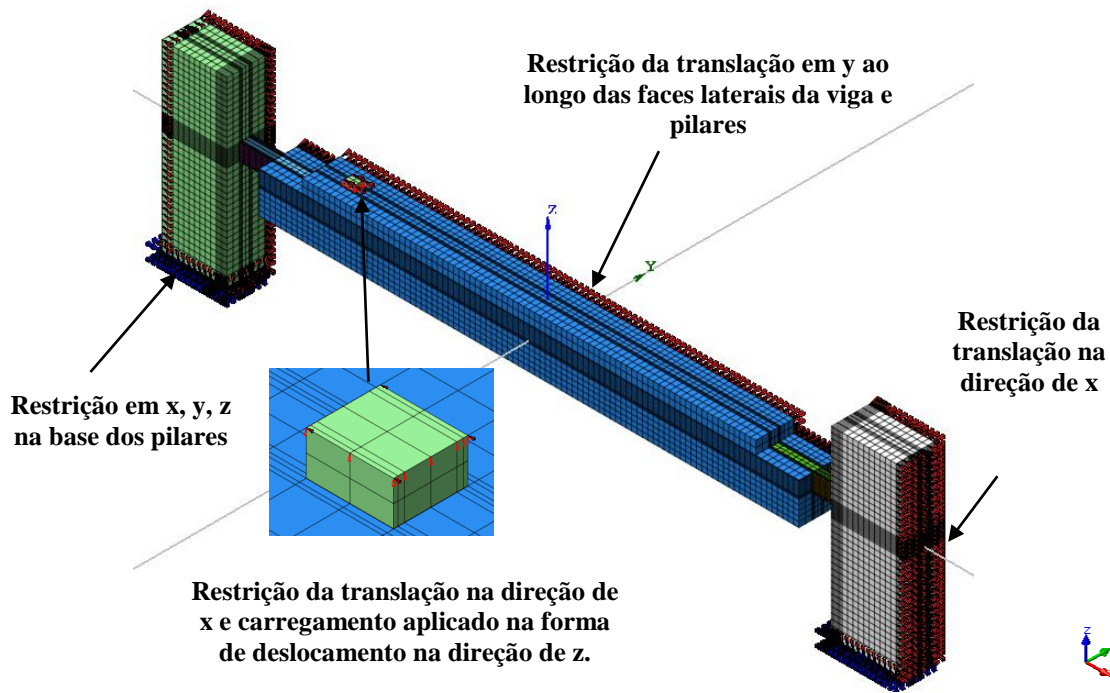


Figura 10. Restrições e carregamento do modelo computacional.

2.7 Método de solução e critério de convergência

O sistema de equações gerado pelo DIANA[®] foi solucionado pelo método de resolução de equações *Linear Stiffness*. As análises foram realizadas com controle de deslocamento, sendo o critério convergência satisfeito quando a norma de energia atingisse valores menores ou iguais à tolerância estabelecida, no caso 1%.

3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ANALISADOS

A seguir tem-se uma descrição dos modelos computacionais analisados.

Modelo I (M-I) – Nesse modelo foi considerada a aderência perfeita entre o dente e a viga, entre o pilar e o consolo e entre o dente e o consolo. A malha de elementos finitos foi composta por 72526 nós e 61949 elementos. Nesse modelo, não há escorregamento entre as peças metálicas e dessas com o concreto.

Modelo II (M-II) – Assim como no Modelo I, foi considerada aderência perfeita entre o dente e a viga, entre o pilar e o consolo e entre o dente e o consolo. No entanto, foi retirada a primeira faixa de malha envolta do consolo de 7,5 mm. A malha de elementos finitos foi constituída por 72526 nós e 61875 elementos. O objetivo desse modelo era identificar a influência da definição de uma seção crítica para engastamento do consolo no pilar, como recomendado pelo PCI (2010).

Modelo III (M-III) – Foi considerada aderência perfeita entre o dente e o consolo e aplicados elementos de interface entre a viga e o dente e entre o pilar e o consolo. A malha de elementos finitos foi composta por 74841 nós e 63987 elementos. O objetivo desse modelo era avaliar a influência do escorregamento entre as peças metálicas e o concreto. Para isso, foi variada a rigidez tangencial do elemento de interface.

Modelo IV (M-IV) – Nesse modelo a região de contato entre a viga e o dente e entre o consolo e o pilar foi considerada com aderência perfeita e entre o dente e o consolo foi aplicado elementos de interface. A malha de elementos finitos foi formada por 72802 nós e 62189 elementos. O objetivo desse modelo era avaliar a influência do escorregamento entre o consolo e o dente metálico e para isso foi variada a rigidez tangencial do elemento de interface.

Modelo V (M-V) – No Modelo V foram aplicadas interfaces entre a viga e o dente, entre o pilar e o consolo e entre o dente e o consolo. A malha de elementos finitos apresentava 75475 nós e 64395 elementos. O objetivo desse modelo era avaliar a influência conjunta do escorregamento entre as peças metálicas e o concreto e entre o consolo e o dente metálico.

Modelo VI (M-VI) – Nesse modelo foi considerada aderência perfeita entre a viga e o dente, entre o pilar e o consolo e entre o dente e o consolo. Na interface entre o dente-12,5 mm e o consolo-7,5 mm foram aplicados elementos de contato. O objetivo era verificar a influência de eventuais grandes escorregamentos que pudessem ocorrer entre o dente e o consolo na ligação. A rede de elementos finitos foi composta por 72687 nós e 62285 elementos.

Modelo VII (M-VII) – O Modelo VII possui elementos de interface entre a viga e o dente e entre o pilar e o consolo. Entre o dente e o consolo foi considerado aderência perfeita, isto é, não haveria escorregamento entre as duas peças metálicas. Nesse modelo a faixa de malha envolta do consolo de 7,5 mm foi retirada de modo a identificar a influência conjunta do escorregamento entre as peças metálicas e o concreto e a definição de uma seção crítica interna ao pilar. A malha de elementos finitos foi composta por 74771 nós e 63853 elementos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados como parâmetro de análise os gráficos de força *versus* deslocamento e força *versus* deformação do consolo de 7,5 mm de espessura. O deslocamento e deformações foram extraídos dos nós mostrados na Fig. 11. As forças máximas (F_{\max}) apresentadas nas legendas dos gráficos correspondem às forças máximas alcançadas pelo modelo computacional.

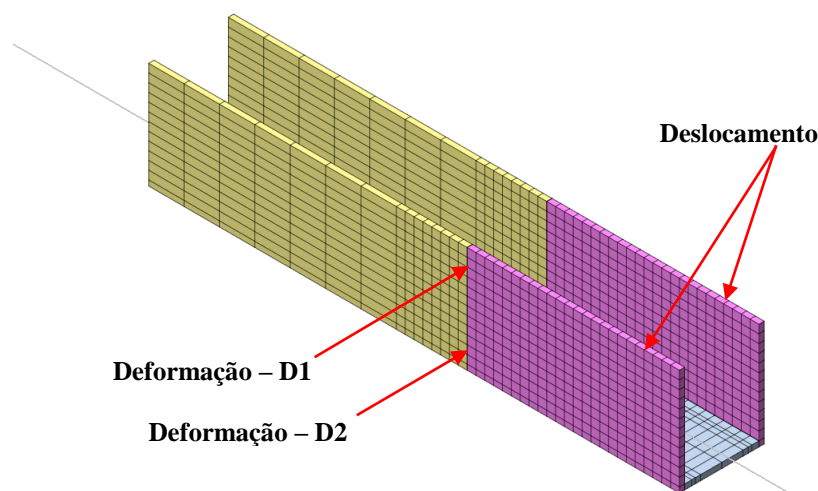


Figura 11. Nós considerados para extrair as deformações e deslocamento nos modelos computacionais.

4.1 Influência da posição da seção crítica

O modelo M-I com interação total (aderência perfeita entre todas as superfícies de contato aço-aço e aço-concreto) foi tomado como referência. Para verificar a influência da posição da seção crítica de análise do consolo-7,5 mm foi gerado o modelo M-II sem a primeira faixa da malha ao redor do consolo e com a seção crítica a 12,5 mm da face do pilar. Foram comparados os resultados das curvas Força *versus* Deslocamento vertical (Fig.12) e Força *versus* Deformações (Fig. 13) no consolo-7,5 mm para os modelos M-I e M-II.

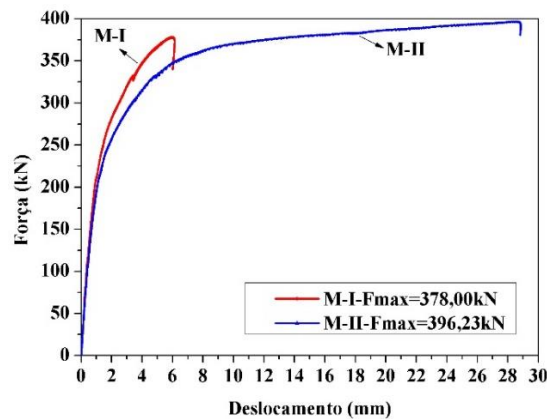


Figura 12. Gráficos Força *versus* Deslocamento no consolo-7,5 mm-modelos M-I e M-II.

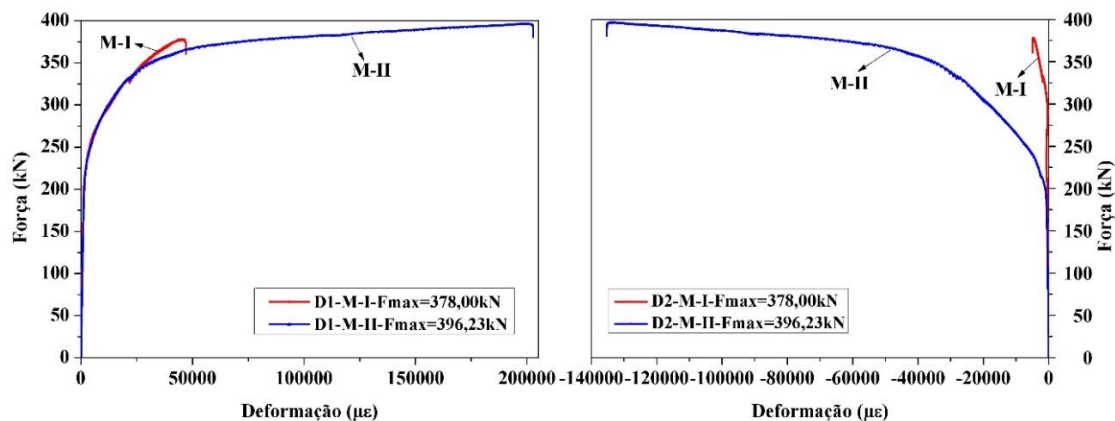


Figura 13. Gráficos Força *versus* Deformação no consolo-7,5 mm - modelos M-I e M-II.

Observando as curvas apresentadas na Figura 12, tem-se que o modelo M-II alcançou uma força 5% superior ao do modelo M-I. A rigidez tangente inicial foi igual nos dois modelos até 0,3 mm. Posteriormente, o modelo M-II apresentou maiores deslocamentos. Para a força de 378 kN a rigidez secante (K_s) dos modelos M-I e M-II, são, respectivamente, 62,05 kN/mm e 27,73 kN/mm. Isso demonstra que a seção de engastamento do consolo tem influência no resultado, sendo maior a influência na rigidez da ligação que na sua resistência. O valor adotado para a seção crítica parece adequado. Em uma obra essa camada de concreto pode ser comprometida devido, por exemplo, à dificuldade de adensamento do concreto nessa região o que, conseqüentemente, produz um concreto de qualidade inferior e proporciona o esmagamento do concreto na região inferior do consolo quando a ligação for solicitada.

Pelas curvas Força *versus* Deformação na região D1, Fig. 13-a, observa-se que ao retirar a faixa de malha do pilar ao redor do consolo-7,5 mm, o modelo computacional M-II obteve

deformações acima dos valores reais de deformação do aço, uma vez que o modelo constitutivo utilizado para os perfis metálicos era do tipo elastoplástico perfeito sem limite de deformação.

Pelas curvas Força *versus* Deformação na região D2, Fig. 13-b, verifica-se que ao considerar a seção crítica a 12,5mm da face do pilar, o modelo M-II atingiu a força máxima computacional com deformações bem superiores ao do modelo M-I. Além disso, ele passa a apresentar deformações maiores que o modelo M-I para um nível de força aproximado de 200 kN, valor inferior ao observado para a região tracionada do consolo. Isso sugere que a retirada dessa faixa de malha poderia ser realizada de forma gradual ao longo do carregamento, atingido o valor adotado apenas na ruína do consolo.

4.2 Influência da aderência aço-concreto

A influência da aderência entre o consolo e o pilar e entre a viga e o dente foi analisada variando os valores de rigidez tangencial das interfaces lineares aplicadas entre essas superfícies de contato. Foram adotados os valores $D_{22}= 1 \text{ N/mm}^3$, $D_{22}= 50 \text{ N/mm}^3$ e $D_{22}= 100 \text{ N/mm}^3$. As Figuras 14 e 15 comparam os resultados extraídos dos modelos computacionais com o modelo de referência M-I.

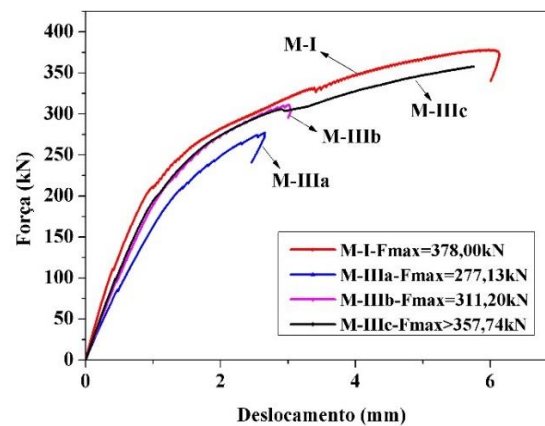


Figura 14. Gráficos Força *versus* Deslocamento no consolo-7,5 mm - modelos M-I e M-III.

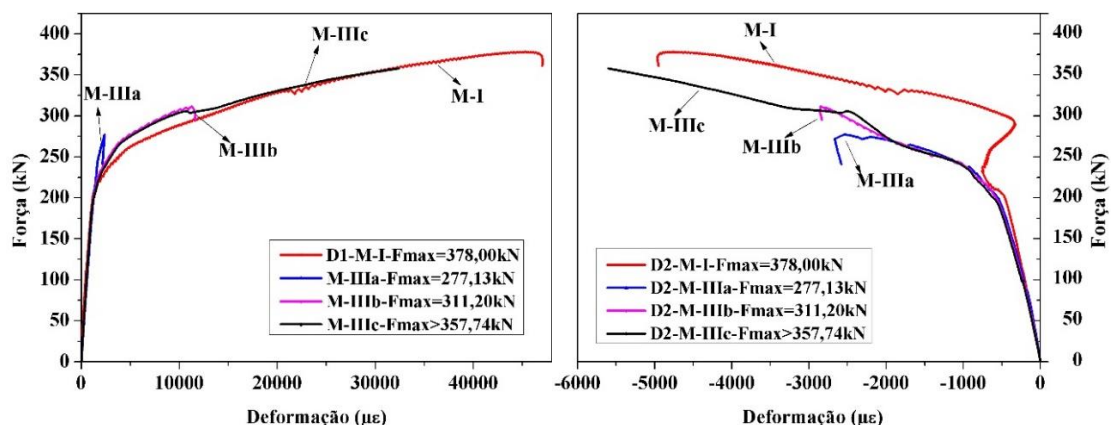


Figura 15. Gráficos Força *versus* Deformação no consolo-7,5 mm - modelos M-I e M-III.

Da Figura 14 é possível identificar as rigidezes tangente inicial (K_0) e secante (K_s) dos modelos M-I e M-III, as quais são apresentadas na Tabela 2. A rigidez secante foi calculada

para o carregamento de 277,13 kN para o modelo M-IIIa e 311,20 kN para os demais modelos. A rigidez tangente inicial foi calculada para a força de 45 kN.

Tabela 2. Rigidezes tangencial inicial e secante dos modelos M-I e M-III.

Modelos	K_0 (kN/mm)	K_s (kN/mm)
M-I	300,71	112,00
M-IIIa	191,80	104,52
M-IIIb	218,55	103,46
M-IIIc	232,40	92,22

Observando os resultados da Tabela 2, verifica-se que ao aplicar interfaces entre o concreto e o aço no modelo computacional e aumentar o valor da rigidez tangencial das mesmas, tem-se maior rigidez tangente inicial e menor rigidez secante. Para valores crescente da rigidez tangente da interface (D_{22}) os modelos tendem a reproduzir o comportamento do modelo M-I.

Pelos gráficos da Figura 15 tem-se que na região tracionada (D1), com exceção do modelo M-IIIa e considerando até o valor de deformação de ruptura da chapa de aço do consolo (2,2 ‰), a presença da interface não modifica o comportamento da ligação. O mesmo não foi observado na região comprimida (D2) onde se observa, a partir de uma força de 250 kN, maiores deformações nos modelos M-III.

4.3 Influência do escorregamento na interface entre o dente e o consolo

Com o objetivo de analisar o comportamento da ligação sujeita apenas ao escorregamento na superfície aço-aço, ou seja, na interface entre o dente e o consolo, foi criado o modelo M-IV. Para realizar essa análise foram considerados $D_{22}= 1 \text{ N/mm}^3$, $D_{22}= 50 \text{ N/mm}^3$ e $D_{22}= 100 \text{ N/mm}^3$ para a rigidez tangencial da interface. A Fig. 16 apresenta o gráfico comparando as curva Força *versus* Deslocamento dos modelos M-I e M-IV.

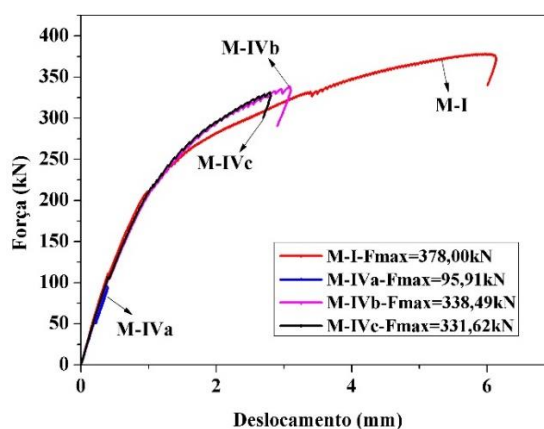


Figura 16. Gráficos Força *versus* Deslocamento no consolo-7,5 mm-modelos M-I e M-IV.

O modelo M-IVa convergiu apenas até a força de 95,91 kN, sendo desconsiderado. Nota-se por meio da Fig. 16 que os modelos MI, M-IVb ($D_{22}=50$ N/mm) e M-IVc ($D_{22}=100$ N/mm) apresentaram comportamento semelhante até o deslocamento de 1,3 mm. Após esse valor as curvas do modelo M-IVb e M-IVc apresentaram-se superiores aos resultados do modelo M-I. Tal comportamento não era esperado, pois um modelo computacional com escorregamento entre o dente e o consolo deveria atingir força máxima de convergência inferior à força do modelo com interação total (M-I). Visando entender tal comportamento analisou-se a região de contato entre o dente e o consolo e foi constatado que houve o escorregamento do dente em direção ao pilar. Isso pode explicar o ganho de rigidez dos mesmos, uma vez que esse deslocamento diminui o braço de alavanca, o que, conseqüentemente, aumenta a força resistente.

4.4 Influência da aderência aço-concreto e do escorregamento dente-consolo

Visando estudar a interação entre a aderência das peças metálicas com o concreto (pilar-consolo e viga-dente) e o escorregamento na interface dente-consolo, foi desenvolvido o modelo M-V. Neste caso, para as interfaces lineares aço-concreto foi adotado o valor de rigidez tangencial constante e igual a $D_{22}=100$ N/mm³. Isso porque, com esse valor, obtiveram-se os maiores deslocamentos e deformações no modelo computacional. A análise paramétrica foi realizada variando a rigidez da interface entre o dente e o consolo, atribuindo $D_{22}=1$ N/mm³, 50 N/mm³ e 100 N/mm³. As curvas de Força *versus* Deslocamento dos modelos computacionais M-I, M-IIIc, e M-V são apresentados na Fig. 17. Na Tabela 3 tem-se a rigidez secante para a força de 315,21 kN e as rigidez tangencial inicial adotando uma força de 45 kN.

Por meio da análise do gráfico da Figura 17 e da Tabela 3, nota-se que o modelo M-V apresentou rigidez secante superior à do modelo M-I. Isso mostra que a possibilidade de escorregamento na interface aço-concreto ao longo da ligação não foi suficiente para reduzir a rigidez do modelo computacional devido à deformação na interface entre o dente e o consolo.

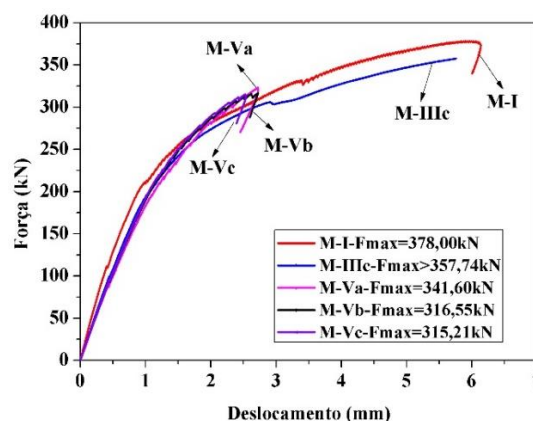


Figura 17. Gráficos Força *versus* Deslocamento no consolo-7,5 mm-modelos M-I, M-III e M-V.

Tabela 3. Rigidezes tangencial inicial e secante dos modelos físico, M-I, M-IIIc e M-V.

Modelos	K_0 (kN/mm)	K_i (kN/mm)
M-I	300,71	109,46
M-Va	214,35	122,78
M-Vb	219,67	116,95
M-Vc	222,55	124,85
M-IIIc	232,4	89,78

4.5 Análise do elemento de contato

O modelo M-VI possui elemento de contato entre o dente-12,5 mm e o consolo-7,5 mm e aderência perfeita entre as peças metálicas e o concreto. Como pode ser notado na Fig. 18 mesmo utilizando um valor elevado do coeficiente de atrito ($\mu = 2$ e coesão nula) esse modelo apresentou convergência apenas durante o trecho inicial da curva força-deslocamento. Desta forma, não foi possível utilizar elementos de contatos para simular o escorregamento e eventual abertura entre o dente e o consolo.

A baixa força de convergência nesse modelo pode ser devida ao modelo constitutivo utilizado para representar o cisalhamento no contato, uma vez que neste caso a resistência ao cisalhamento depende diretamente da força normal. Esta, por sua vez, era baixa nas primeiras etapas de carregamento e a coesão era nula, o que impediu o modelo de alcançar o equilíbrio com o aumento do deslizamento no contato.

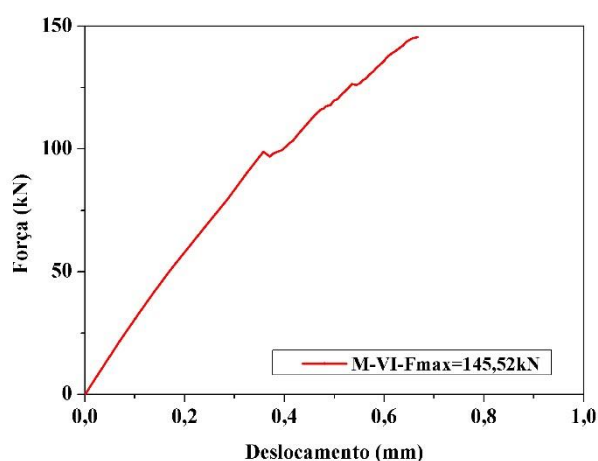


Figura 18. Gráficos Força versus Deslocamento no consolo-7,5 mm-modelo M-VI.

4.6 Influência da aderência aço-concreto e da seção de engastamento do consolo

As análises anteriores mostraram a forte influência da posição da seção crítica, simulada pela retirada da primeira faixa de malha ao redor do consolo-7,5 mm, e, secundariamente, a

influência da perda de aderência na interface aço-concreto entre as peças metálicas e o concreto. Por essa razão, foi desenvolvido o modelo computacional M-VII que possuía aderência perfeita entre o consolo e o dente, interface entre pilar-consolo e viga-dente e a ausência da faixa de malha ao redor do consolo-7,5 mm.

Os modelos computacionais M-VIIa, M-VIIb e M-VIIc possuem valores de rigidez tangencial da interface linear iguais a $D_{22}= 1 \text{ N/mm}^3$, $D_{22}= 50 \text{ N/mm}^3$ e $D_{22}= 100 \text{ N/mm}^3$, respectivamente. Para o modelo M-VIIId foi atribuído o modelo de interface *discrete cracking* com $D_{22}= 100 \text{ N/mm}^3$. Os gráficos mostram a evolução do deslocamento vertical (Fig. 19) e das deformações (Fig. 20) no consolo-7,5 mm ao longo da aplicação do carregamento.

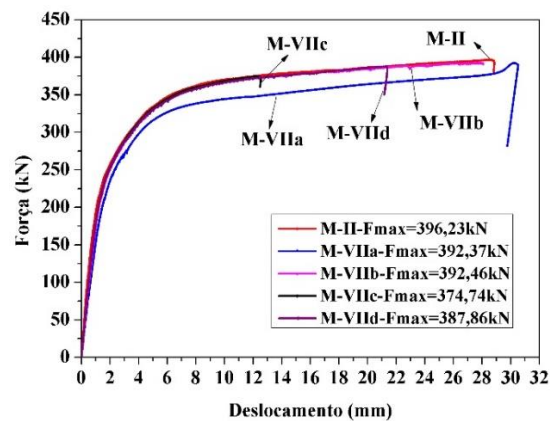


Figura 19. Gráficos Força versus Deslocamento no consolo-7,5 mm-modelos MII e M-VII.

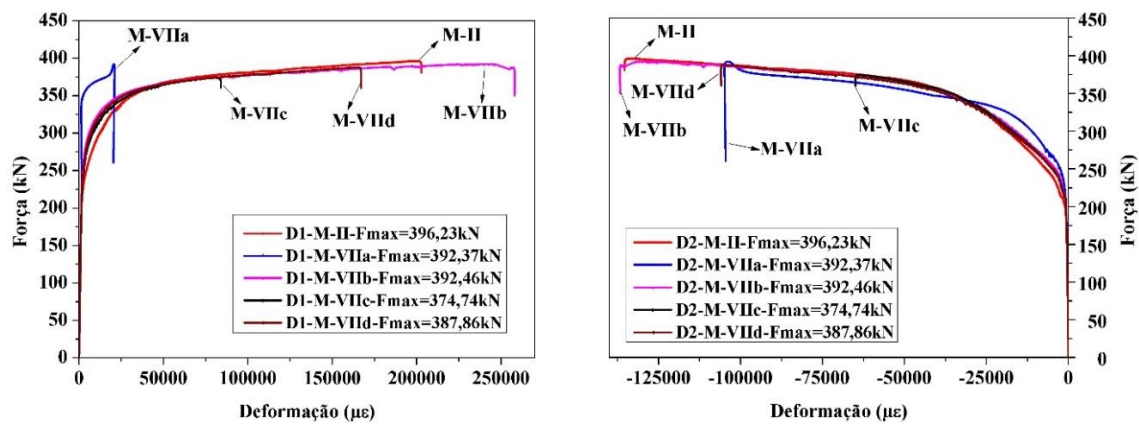


Figura 20. Gráficos Força versus Deformação no consolo-7,5 mm - modelos M-II e M-VII.

Observando as Figuras 19 e 20, nota-se que o modelo sem interface (M-II) e os modelos com interfaces, com exceção do modelo M-VIIa, apresentaram curvas semelhantes, diferenciando apenas quanto a força última de convergência e aos limites de deslocamento e deformação alcançados. Percebe-se, também, que a consideração da interface não linear teve pouca influência no comportamento da ligação. Isso mostra que a posição da seção de engastamento do consolo no pilar tem maior influência que eventuais escorregamentos na interface aço-concreto. Contudo, vale ressaltar que no modelo computacional esse escorregamento foi permitido apenas na região antes da armadura de reforço soldada ao consolo, conforme recomendação do PCI (2010).

4.7 Comparação do modelo computacional com a NBR 8800 (ABNT, 2008) e o PCI (2010)

A análise dos modelos mostrou que o parâmetro que mais influenciou na resistência da ligação foi a alteração da posição da seção de engastamento do consolo. Sendo assim, para efeito de comparação da força máxima computacional com a resistência estimada pelo PCI (2010), foi escolhido o modelo M-VIIc que também possuía interface na região aço-concreto, porém com elevada rigidez tangencial.

O modelo de cálculo do PCI (2010) indica que, nessa ligação, o elemento mais frágil é o consolo metálico, o qual deveria romper por flexão. Neste caso, a estimativa do PCI (2010) se baseia no fato de poder haver plastificação total da seção transversal, fato que não ocorre no caso de perfis de seção aberta. Na Tabela 4 são apresentadas as forças de início de escoamento do consolo, calculada de acordo com o recomendado na NBR 8800 (ABNT, 2008), e de plastificação total da seção transversal estimada pelo modelo de cálculo do PCI (2010). Também são apresentadas, para comparação, as forças obtidas da modelagem computacional do modelo M-VIIc.

Tabela 4. Força de início de escoamento e de plastificação do consolo proveniente dos modelos teóricos e computacional M-VIIc.

Modelos	Força de início de escoamento	Força de plastificação
Teórico	141,65 kN	218,33 kN
MVII-c	168,11 kN	217,98 kN

O consolo-7,5 mm do modelo M-VIIc começou a escoar com uma força 2,5% maior que o valor estimado pela NBR 8800 (ABNT, 2008). O valor da força de plastificação do modelo M-VIIc foi praticamente o mesmo que o estimado pelo modelo de cálculo do PCI (2010). Neste caso, a força de plastificação do modelo M-VIIc foi obtida do panorama de deformação do consolo, quando o mesmo apresentava as maiores deformações longitudinais (Fig. 21). Esses resultados mostram uma boa aproximação do modelo computacional com os modelos normativos, mostrando que as recomendações desses modelos podem ser aplicadas ao consolo metálico em estudo, mesmo se tratando de um perfil de seção aberta.

A Tabela 5 apresenta as forças de início de escoamento do dente de 12,5 mm de espessura estimada pelo método da NBR 8800 (ABNT, 2008) e a obtida pelo modelo computacional MVII-c. O modelo M-VIIc apresentou uma força de início de escoamento e plastificação respectivamente 32,4% e 30,7% maiores que o estimado pelo modelo teórico.

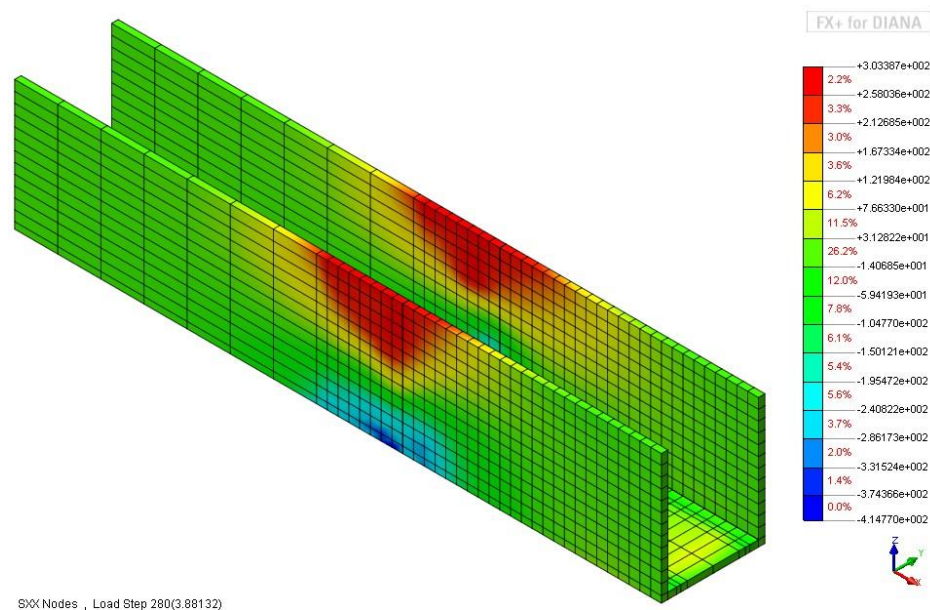


Figura 21. Distribuição de tensões na lateral do consolo-7,5 mm - Força de ruptura na ligação= 217,98 kN.

Tabela 5. Força de início de escoamento e de plastificação do dente estimada pela NBR 8800 (ABNT, 2008) e obtidas do modelo M-VIIc.

Modelos	Força de início de escoamento	Força de plastificação
Teórico	182,7 kN	235,82 kN
MVII-c	241,81 kN	308,26 kN

5 CONCLUSÃO

A análise dos modelos mostrou que o parâmetro que mais influenciou na resistência da ligação foi a alteração da posição da seção de engastamento do consolo, simulada pela retirada da primeira faixa de malha ao redor do consolo-7,5 mm e secundariamente, a consideração dos elementos de interface apenas entre as superfícies de contato aço-concreto. Considerando o modelo de cálculo do PCI (2010), a ligação deve resistir a uma força mínima de 218,33 kN, relacionada à ruptura por flexão do perfil do consolo -7,5 mm. A força de ruptura da ligação do modelo computacional M-VIIc foi igual a 217,98 kN e ocorreu por plastificação da seção do consolo-7,5mm. Esses resultados mostram que as recomendações modelo de cálculo do PCI (2010) podem ser empregadas ao consolo metálico em estudo, mesmo se tratando de um perfil de seção aberta. De acordo com o modelo de cálculo da NBR (8800), a força de escoamento e de plastificação do dente -12,5 mm são, respectivamente, 182,7 kN e 235,82 kN. No modelo computacional M-VIIc o dente escoou e plastificou com forças 32,4% e 30,7% superiores aos valores estimados. Logo, pode se utilizar o método da NBR (8800) para o dimensionamento do dente nessa ligação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES pela concessão da bolsa de estudo. Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa. À Marcela Kataoka.

REFERÊNCIAS

- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800 – *Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, 2008, 129p.
- FEENSTRA, P.H.; BORST, R. *ASPECTS ROBUST COMPUTATIONAL MODELING FOR PLAIN AND REINFORCED CONCRETE*. HERON, The Netherlands, v. 38, n. 4, p. 1-76, 1993.
- JOY, W.T.; DOLAN, W. C.; MEINHEIT, D.F. *Concrete capacity design of Cazaly hangers in shallow members*. PCI JOURNAL, v. 55, n.4, p. 100-128, 2010.
- OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. *LIGAÇÃO VIGA-PILAR EM ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO SOLIDARIZADOS POR CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO: ANÁLISES ESTÁTICAS E DINÂMICA*. 2012. 254f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- PRADO, L. P. *Ligações de montagem viga-pilar estruturas de concreto pré-moldado – Estudo de caso*. 2014. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- PRECAST/ PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. *PCI Design Handbook*. 7. ed. Chicago, 2010. 828 f.
- TNO. DIANA: *Finite Element Analysis – User’s Manual FX+ for DIANA*. Release 9.6. 1. ed. The Netherlands: TNO DIANA, 2015. 464p.
- TNO. DIANA: *Finite Element Analysis – User’s Manual Theory*. Release 9.6. 1. ed. The Netherlands: TNO DIANA, 2014. 292p.