

ESTUDO NUMÉRICO DOS MÉTODOS DE CONVERGÊNCIA PARA ANÁLISE DE CONECTORES CRESTBOND APLICADOS EM PILARES MISTOS DE SEÇÃO ESBELTA

COMPARATIVE STUDY OF CONVERGENCE METHODS FOR NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF CRESTBOND CONNECTORS APPLIED TO SLENDER CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Pereira, A. C.

Caldas, R. B.

Santos, L. R.

Lopes, C. C. C

Vilela, P. M. L.

eng.arianycardoso@gmail.com

caldas@dees.ufmg.br

lucasrsantos@gmail.com

crisianeccamposlopes@gmail.com

paulinhamlvilela@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte 31270-901, Minas Gerais, Brasil

Resumo.

Este artigo apresenta um estudo comparativo dos diferentes métodos de convergência em análises numéricas não lineares do comportamento dos conectores Crestbond quando utilizados como dispositivos de transferência de carga nos pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC). A etapa experimental foi realizada na Universidade Federal de Minas Gerais e, a partir dos resultados obtidos, foi proposto um modelo numérico, elaborado no software Abaqus, capaz de representar o ensaio. No processo de desenvolvimento dos modelos numéricos, testou-se a eficiência de diferentes métodos de convergência para verificar qual deles apresentaria o melhor custo-benefício em relação ao custo computacional e ao poder de convergência. Os métodos presentes na biblioteca do Abaqus analisados no presente estudo foram: *Static General*, *Static Riks* e *Dynamic Implicit*. No entanto, também foram feitas abordagens sobre o método *Dynamic Explicit*. O método *Dynamic Implicit*, bem como o *Dynamic Explicit*, é geralmente, utilizado em problemas dinâmico e com maior grau de deformação. No entanto, esse método pode ser adotado em ensaios mecânicos quando estes apresentam um acréscimo de carga, ou deslocamento, com aceleração consideravelmente baixa, podendo considerar o ensaio como quase estático. Realizadas as análises, verificou-se que os métodos estáticos não foram capazes de obter convergência após ocorrer um decréscimo de força no processo iterativo, apesar de praticamente coincidir com a curva obtida pelo método *Dynamic Implicit*. Sendo assim, verificou-se que o método *Dynamic Implicit* não apresentou um custo computacional elevado e demonstrou melhor convergência, se tornando o método de convergência escolhido para todos os modelos numéricos do presente estudo.

Palavras-chave: Métodos de Convergência; Pilares Mistos; Métodos Estáticos, Métodos Dinâmicos.

Abstract.

This paper presents a comparative study of the different convergence methods in nonlinear numerical analyzes of the behavior of Crestbond used as shear connector in concrete filled steel tube (CFST) columns. The experimental stage was carried out at the Federal University of Minas Gerais. From the results obtained, a numerical model was proposed, elaborated in Abaqus software, being responsible to represent the test. In the process of developing the numerical model, the efficiency of different convergence methods was tested to verify which one would present the best performance related to the computational cost and the convergence power. The methods present in the Abaqus library analyzed in the present study were: Static General, Static Riks and Dynamic Implicit. Furthermore, approaches about Dynamic Explicit method were also considered to the analysis. The Dynamic Implicit method, as well as the Dynamic Explicit method, is generally used for dynamic problems with higher degree of deformation. However, this method can be adopted in mechanical tests when they present a load increase, or displacement, with considerably low acceleration, and it may consider the test as almost static. After the analysis, it was found that the statics methods were not able to achieve convergence after a decrease force of the iterative process, although it practically coincides with the curve obtained by the Dynamic Implicit method. Thus, it was found that the Dynamic Implicit method did not present a high computational cost and showed better convergence, becoming the chosen for all numerical models of the present study.

Keywords: Convergence methods; Concrete filled steel tube; Static Methods, Dynamic Methods.

1 Introdução

Os pilares mistos de aço e concreto são aqueles compostos por um perfil de aço e concreto (armado ou não) onde a interação entre os elementos que compõem a seção é garantida, permitindo que atuem solidariamente quando solicitados. Dentre os tipos de pilares mistos existentes, o presente estudo aborda os pilares mistos preenchidos com concreto (PMPC). Apesar do aumento significativo da aplicação de PMPC nos últimos anos, devido as diferentes vantagens que este apresenta, no Brasil, o uso desse tipo de elemento estrutural ainda é pequeno, isso quando comparado a outros sistemas construtivos já consolidados, como as estruturas de aço e estruturas de concreto armado.

Sabe-se que o desempenho dos PMPC está diretamente relacionado ao grau de interação existente entre a superfície do aço e do concreto e à dificuldade de conectá-los às vigas. Diante desse cenário, as recentes pesquisas desenvolvidas na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) confirmaram a eficiência do conector Crestbond para ser utilizado como dispositivo de transferência de forças e de ligação viga-pilar em PMPC de seção compacta (CALDAS *et. al.*[3]; AGUIAR [1]; CARDOSO [4]) e, em PMPC de seção esbelta (SANTOS [9]).

No entanto, esse tipo de conexão traz consigo os desafios da complexa geometria do conector somado ao comportamento heterogêneo do concreto, à interação entre o aço e o concreto e o comportamento não linear do pilar. Ainda que existam estudos experimentais visando entender o comportamento dessa região, por vezes essas análises se tornam dispendiosas e alguns dados não conseguem ser coletados ou monitorados. Por outro lado, as análises numéricas se apresentam como uma alternativa eficiente, permitindo uma extrapolação dos modelos ensaiados, possibilitando estudos dos parâmetros de interesse. E, neste contexto, os métodos de convergência numéricos são de suma importância para que possa se obter uma boa calibração numérica.

Assim, o presente artigo visa avaliar três métodos de convergência implementados no *software* de elementos finitos Abaqus e, verificar qual deles fornece uma melhor representação às situações em que se utiliza os conectores de cisalhamento aplicados aos pilares mistos de seção esbelta.

2 Programa Experimental

O programa experimental foi constituído de dois modelos de pilares mistos preenchidos com concreto de seção esbelta utilizando conectores Crestbond como dispositivos de transferência de forças. Neste estudo, esses modelos são denominados como Modelo A e Modelo B. O Crestbond é um conector de cisalhamento em chapa com recortes regulares, ver “Figura 1”. Esse tipo de conector em chapa, no âmbito internacional, é conhecido *Composite Dowels* e, dentre esses, pode-se citar outras geometrias muito utilizadas como *Clothoid-Shape* e *Puzzle-Shape*, ver “Figura 2”.

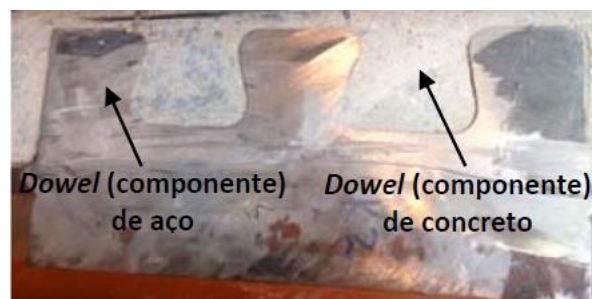


Figura 1. Conector Crestbond com 3 dentes de aço em conexão com o concreto (CARDOSO [4])

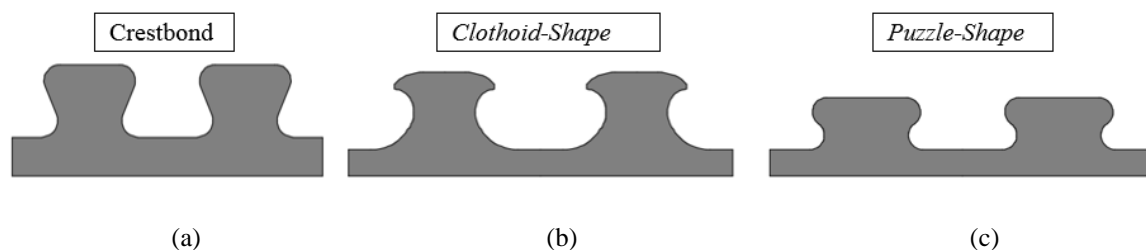


Figura 2. Exemplos de conectores de geometria aberta – *Composite Dowels*: (a) Crestbond (b) *Clothoid-Shape*; (c) *Puzzle-Shape*. (CARDOSO [4])

O modelo A foi confeccionado com o uso de armaduras de reforço no concreto, diferentemente do modelo B, mais informações a respeito das configurações geométricas estão na “Tabela 1”.

Tabela 1. Configuração dos modelos experimentais analisados

<i>Modelo</i>	<i>Seção</i>	<i>Dimensões (mm)</i>	<i>Aço do tubo</i>	λ^*	<i>Aço do conector</i>	<i>Configuração do Conector</i>	<i>Armadura Interna</i>
A	Circular	380x1,50	SAE J403 1010	253	ASTM A1018	2 <i>dowels de aço</i>	Sim
B	Circular	230x1,50	SAE J403 1010	153	ASTM A1018	2 <i>dowels de aço</i>	Não
* λ representa o índice de esbelteza da seção transversal do pilar misto							

Os dois modelos estudados possuíam altura de 750 mm com uma cota de arrasamento de 50 mm entre a extremidade inferior do núcleo de concreto com a chapa-base do dispositivo de ensaio de cisalhamento. Segundo a configuração de ensaio idealizada, o núcleo de concreto foi apoiado e o tubo de aço permaneceu livre para se deslocar em relação ao concreto. O ensaio foi realizado de modo assimétrico, sendo o carregamento aplicado na direção longitudinal da chapa do conector Crestbond, que estava restringida à rotação em relação ao seu posicionamento inicial. A “Figura 3” apresenta os modelos experimentais avaliados neste estudo.

O ensaio de cisalhamento adotado foi baseado nos procedimentos de execução apresentados na norma europeia EN 1994-1-1: 2004 [5]. Por fim, verificou-se que a metodologia utilizada no ensaio se mostrou eficiente, permitindo caracterizar o conector Crestbond quanto à ductilidade, capacidade resistente, rigidez e modos de falha.

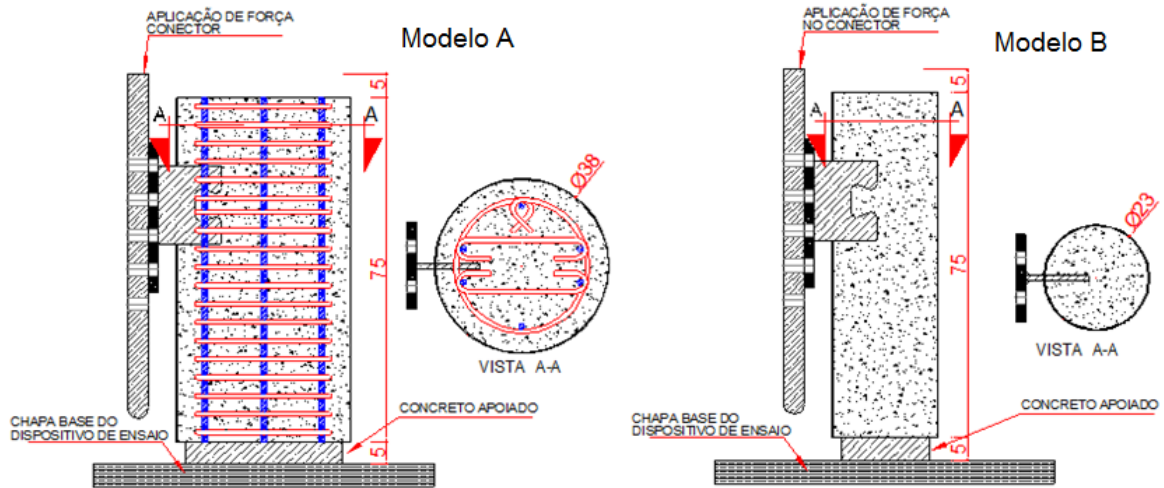


Figura 3. Modelos experimentais A e B, respectivamente

3 Modelo de elementos finitos

Os modelos numéricos (Figura 4) foram simulados no programa de elementos finitos ABAQUS e foram baseados no programa experimental apresentado no item 2. Dentre as investigações realizadas para se alcançar uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, é possível destacar o estudo das condições de contorno, dos modelos constitutivos dos materiais da seção mista do PMPC e dos métodos de convergência (foco deste artigo).

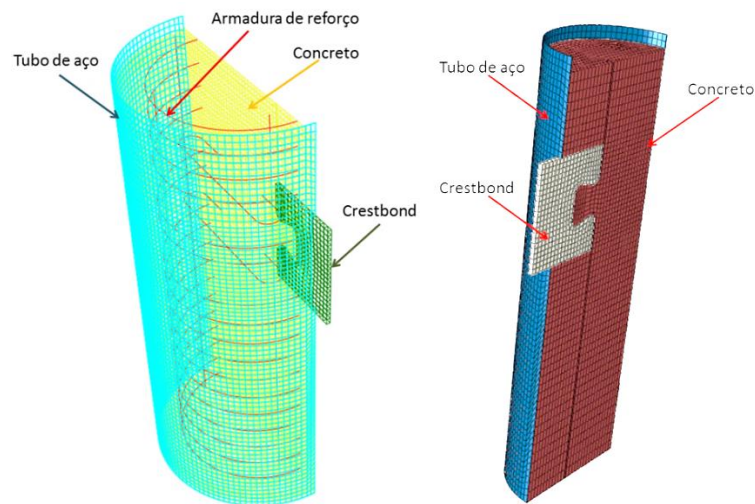


Figura 4. Modelos numéricos: Modelo A e Modelo B, respectivamente.

3.1 Modelos numéricos

Os elementos de malha adotados para a modelagem do tubo de aço, concreto e conectores adotados foram do tipo C3D8 (linear, hexaédrico e sólido), esse tipo de elemento possui oito nós com três graus de liberdade por nó. Já as armaduras no núcleo de concreto do Modelo A foram modeladas

com elementos do tipo *Beam* – B31. Esses elementos estão apresentados na “Figura 5”.

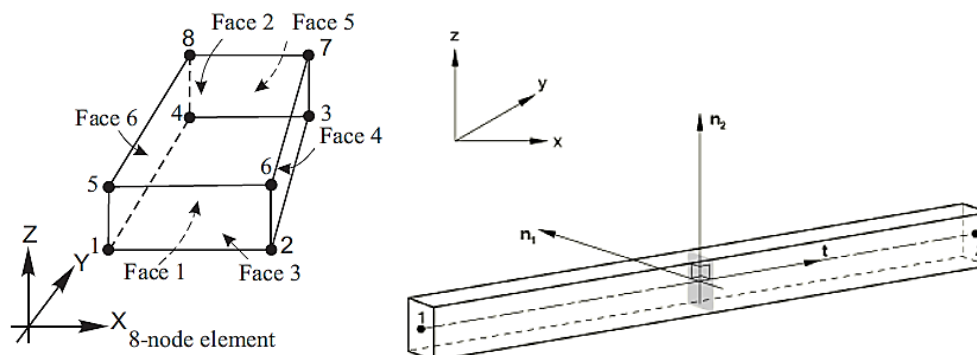


Figura 5. Elemento de Malha C3D8 e *Beam*, respectivamente. (SIMULIA, [10])

A distribuição da malha pode ser verificada na “Figura 6”. No Crestbond e na região limitada pela conexão mista foram utilizados elementos de malha com comprimento igual a 8 mm. Para o concreto situado na região superior ao conector, utilizaram-se elementos de malha com comprimento variando entre 10 mm e 15 mm. Para o concreto situado na região inferior ao conector, utilizaram-se elementos de malha com comprimento variando entre 10 mm e 20 mm. Por fim, foram escolhidos elementos de malha com comprimento de 8 mm para a direção correspondente ao eixo transversal do modelo.

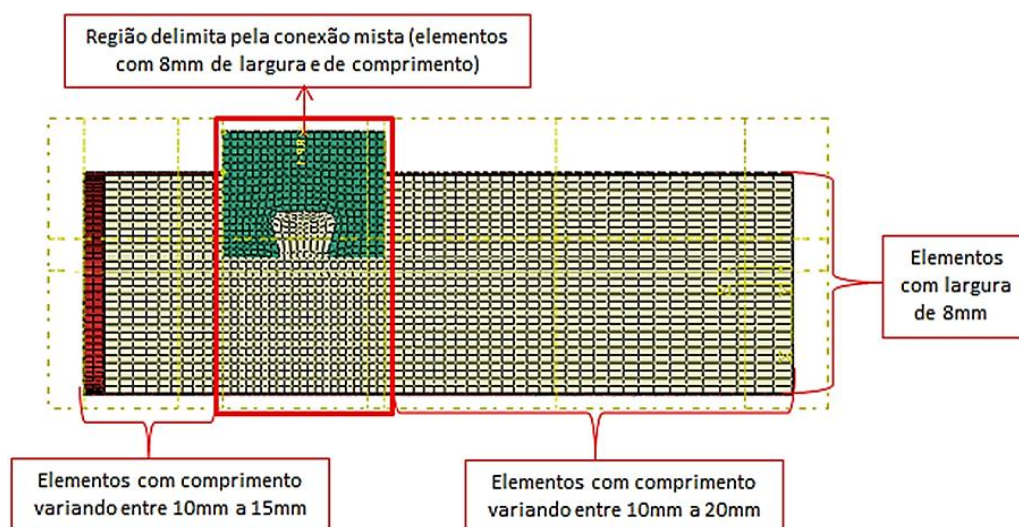


Figura 6. Distribuição da malha no modelo

É sabido que nas simulações não lineares geralmente incluem problemas de contato (situação da mecânica dos sólidos em que há mudança nas condições de contorno do problema e que só podem ser definidas ao longo da análise) e esse fator implica diretamente na convergência do modelo. Sendo assim, com base nos estudos realizados por Santos [8], o contato entre concreto, perfil de aço e conectores em chapa foi simulado considerando que para o contato entre o conector e o concreto o coeficiente de atrito estático seria igual a 0,5, entre o conector e o tubo igual a 1,0, para simular a solda, e um atrito de 0,17 entre o tubo e o núcleo de concreto, visto que no ensaio experimental foi passado desmoldante no interior do tubo.

No ABAQUS, é possível definir os pares de contato no módulo *Interactions*, sendo que a busca pelas superfícies dos elementos pode ser realizada de duas formas: automática pela ferramenta *find*,

contact pairs ou manual, selecionando as superfícies dos elementos. Na “Figura 7” é possível observar o contato entre o conector e o tubo (a), o conector e o concreto (b) e o tubo e o concreto (c).

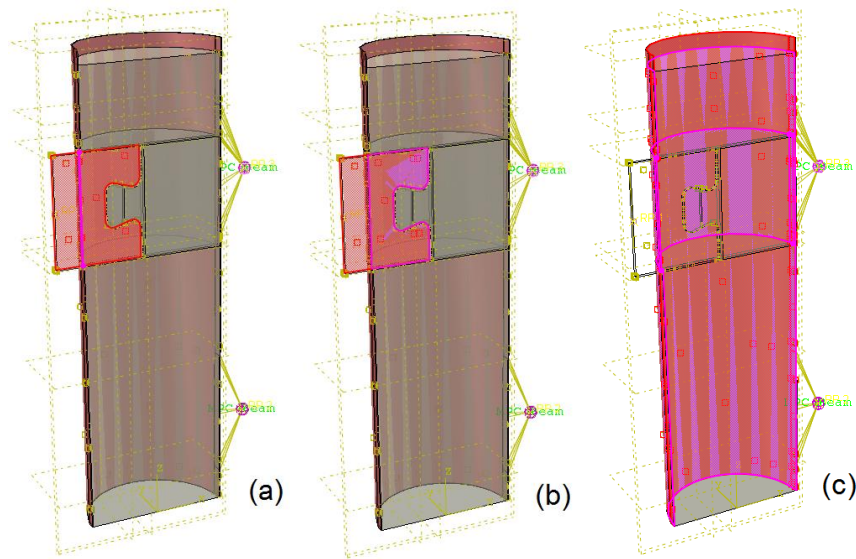


Figura 7. Vista em perspectiva dos pares de contato formados pelo ABAQUS: (a) contato Crestbond-Tubo; (b) Crestbond-Concreto; (c) Tubo-Concreto

O contato entre concreto, perfil de aço e conectores em chapa foi simulado através de interações face a face, sendo necessário definir isoladamente em cada par de contatos, qual o elemento de maior rigidez. Starossek e Falah [11] mencionam que os elementos que possuem rigidez maior e menor nos pares de contato são definidos como *master* e *slave*, respectivamente. Em todas as interações ficou definido o contato do tipo rígido, onde se admite o mínimo de penetração entre as superfícies dos elementos.

A superfície da chapa do conector Crestbond foi acoplada a um nó de referência, denominado como *Reference Point (RP)*, ilustrado na Figura 8. À medida que os deslocamentos foram incrementados no *RP*, a superfície da chapa do conector acompanhava os deslocamentos aplicados. Este artifício simulou a aplicação dos deslocamentos quase-estáticos realizados pelo atuador de carga durante a análise experimental.

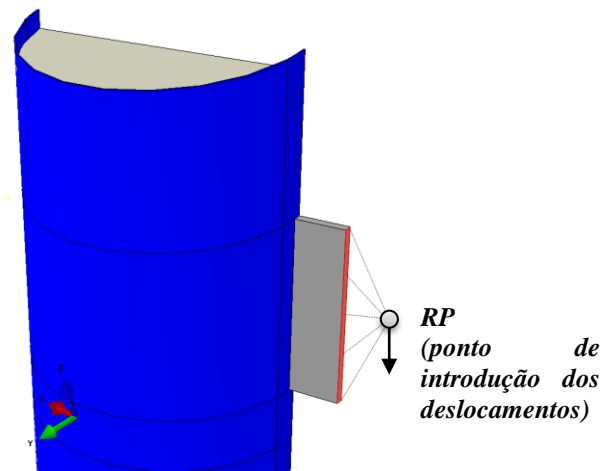


Figura 8 – Ponto de introdução dos deslocamentos

Como modelo constitutivo para descrever o comportamento do concreto, empregou-se o modelo de dano com plasticidade presente na biblioteca do Abaqus como *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Segundo a documentação do Abaqus (SIMULIA, [10]), o CDP apresenta a vantagem de simular a degradação da rigidez do concreto na compressão e na tração, além de simular o comportamento do material quando confinado.

O CDP é constituído pelos seguintes parâmetros numérico: ângulo de dilatância (ψ), razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial (σ_{b0}/σ_{c0}), razão entre o segundo invariante de tensão do meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão (K_c), viscosidade (μ_{vis}) e a excentricidade (ϵ). Os valores desses parâmetros foram assumidos iguais aos utilizados por Cardoso [4] e Santos [8], sendo eles: $\psi = 36^\circ$, $\epsilon = 0,00005$, $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1,16$, $K_c = 2/3$ e $\mu_{vis} = 0,1$.

Dentre os fatores necessários para configurar o modelo CDP, tem-se: o comportamento do concreto submetido à compressão (Figura 9), o comportamento do concreto submetido à tração (Figura 10) e as variáveis de dano no concreto.

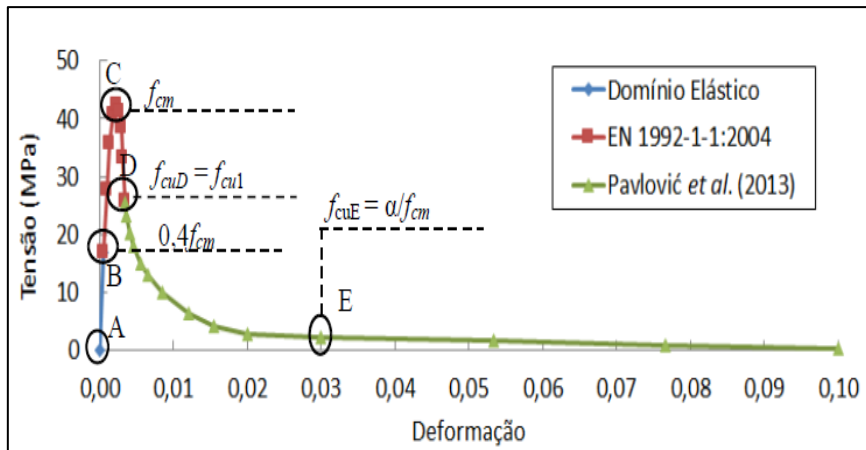


Figura 9. Diagrama tensão de compressão versus deformação para um concreto com $f_{cm} = 42,2$ MPa (CARDOSO [4])

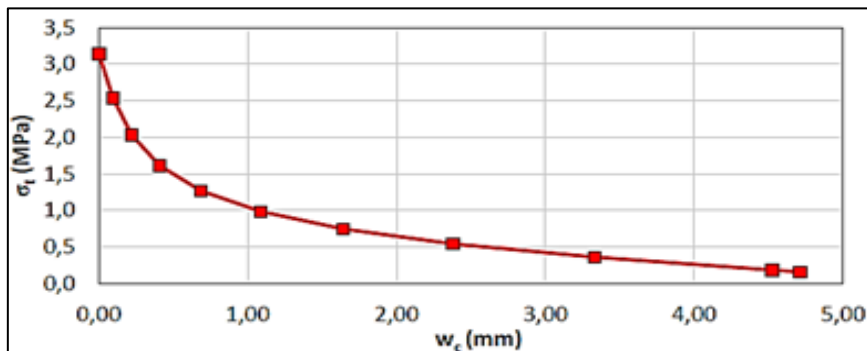


Figura 10. Curvas tensão versus abertura de fissura utilizada no estudo de Santos [8].

A magnitude da degradação do concreto é governada por duas variáveis independentes, d_c (dano à compressão uniaxial), e d_t (dano à tração uniaxial), determinadas pelas Equações 1 e 2:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \quad (1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ctm}} \quad (2)$$

A respeito do modelo constitutivo adotado para representar o aço do tubo e do conector, utilizou-se o modelo elastoplástico utilizado por Cardoso [4], ver “Figura 11”. O comportamento do aço se dá até a tensão de ruptura (ponto A até ponto F), sendo que após essa tensão, adicionou-se um trecho de descarregamento (G a H) como um artifício numérico para simular possíveis danos no aço. É possível observar os pares de tensão-deformação utilizados na “Tabela 2”.

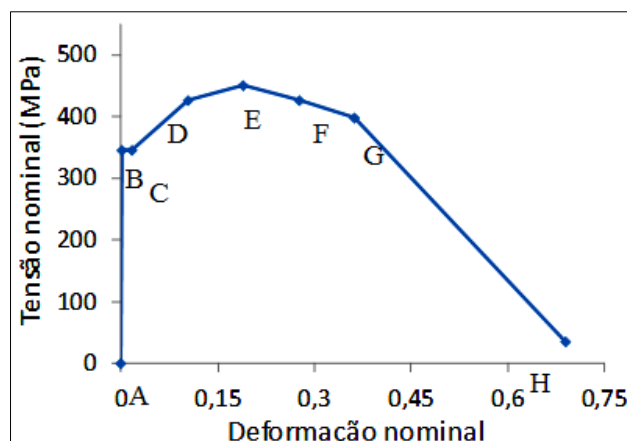


Figura 11. Curva tensão versus deformação do aço para os conectores e tubo de aço. (CARDOSO [4])

Tabela 2. Pares tensão-deformação do aço para os conectores e tubo de aço (CARDOSO [4])

Ponto	Tensão (MPa)	Deformação	Ponto	Tensão (MPa)	Deformação
A	0	0	E	$110\varepsilon_y$	f_u
B	ε_y	f_y	F	$160\varepsilon_y$	$0,95f_u$
C	$10\varepsilon_y$	f_y	G	$210\varepsilon_y$	$f_y + 0,5(f_u - f_y)$
D	$60\varepsilon_y$	$0,95f_u$	H	$400\varepsilon_y$	$0,1f_y$

3.2 Solução não linear

Uma análise linear só é válida quando a estrutura sofre apenas pequenas deformações e deslocamentos e seu material tem comportamento elástico linear, obedecendo a Lei de Hooke (PESSOA [7]). Isso porque nessas condições a rigidez do elemento se mantém inalterada.

Analisar de modo linear um material simplifica muito a formulação e a solução do problema, afinal, parte-se da equação fundamental da análise por elementos finitos (Equação 3), onde para a resolução deste caso, considera-se que a matriz de rigidez se mantém constante:

$$[F] = [K] \times [d] \quad (3)$$

onde:

[F] é o vetor de forças nodais;

[K] é a matriz de rigidez do sistema;

[d] é o vetor de deslocamentos nodais.

Hinton *et al.* [6] afirmam que todas as estruturas reais apresentam comportamento não-linear. Essa não linearidade, em análises da mecânica estrutural, podem ter três origens distintas: (a) da constituição do material, quando houver mudanças na rigidez em condições operacionais, (b) das condições de suporte, como contatos e restrições, quando essas se alteram ao longo da análise e (c) de mudanças na geometria, quando esta começa a sofrer grandes deformações.

Desta forma, quando o modelo analisado passa a apresentar deformações significativas ou mudanças no comportamento do material (surgimento de pontos de plastificação ou início do processo de fissuração), é possível verificar a influência dos efeitos não lineares nos resultados obtidos, geralmente levando a uma mudança na rigidez do elemento. Neste momento, a solução da equação dos

elementos finitos se torna mais complexa, pois ao passo que a análise avança a matriz de rigidez [K] muda, uma vez que esta varia conforme a geometria, características do material e as condições de contorno. Sendo assim, para soluções não lineares, torna-se necessário a utilização de processos iterativos (como os métodos implícitos) ou através de métodos explícitos, onde não se realiza iterações.

3.3 Métodos de análise

Como dito anteriormente, para realizar as análises numéricas foi utilizado o software Abaqus. Este programa apresenta dois tipos de solucionadores: os métodos implícitos (ABAQUS/Standard) e os métodos explícitos (ABAQUS/Explicit).

O ABAQUS/Standard é o módulo de solução mais geral do software capaz de resolver problemas lineares e não lineares de forma implícita, ou seja, resolvendo os sistemas de equações em cada incremento do processo de solução. A técnica de solução é baseada na matriz de rigidez do modelo e é incondicionalmente estável. Entretanto, por ser um método mais exato, demanda mais tempo computacional para a resolução do problema. Este módulo é indicado para análises estáticas e dinâmicas lineares ou com níveis discretos de não linearidade (SIMULIA, [10], apud BELCHIOR, [2]). Dentre os procedimentos implícitos mais utilizados em análises de elementos mistos, tem-se: *Static General*, *Static Riks* e *Dynamic Implicit*.

O ABAQUS/Explicit é um módulo de solução especial desenvolvido para a resolução mais rápida de problemas dinâmicos com grandes deformações e deslocamentos. Enquanto o Standard faz iterações para determinar a solução, o *Explicit* determina a solução sem iterações, através da previsão com um método de integração explícita. Este módulo requer um menor esforço computacional, porém ele é um método condicionalmente estável, apresentando maiores dificuldades de convergência que o Standard. (SIMULIA [10], apud BELCHIOR [2]), destacando-se o método *Dynamic Explicit*.

3.3.1 Métodos numéricos implícitos

Para solucionar problemas não lineares, os métodos numéricos implícitos utilizam um procedimento iterativo e permitem a adoção de métodos de controle de deslocamento para contornar dificuldades de convergência, onde se começa pela configuração inicial da estrutura e depois se determina as reações, tensões e esforços à medida que se aumenta o deslocamento aplicado. Dentre os modos mais utilizados, têm-se o *Static General*, *Static Riks* e *Dynamic Implicit*.

O *Static General* (análise geral estática – Newton Raphson) é um método estático por definição e bastante recomendado para análises onde não se há uma dependência com o tempo e quando os efeitos de inércia podem ser negligenciados. Apesar de apresentar resultados confiáveis, seu poder de convergência em modelos que simulam elementos mistos de aço e concreto é regular, podendo ser incapaz de convergir em situações mais complexas. Isso se deve principalmente ao fato de que a análise geral estática só permite aplicar deslocamento ou carregamento diretamente nos nós/elementos do seu modelo na mesma etapa. Então, em algumas situações esses acabam sofrendo deformações excessivas e a maneira como a carga estava sendo transferida/aplicada venha sofrer alterações.

Como alternativa e visando uma melhor convergência nos modelos, tem-se o método *Static Riks* (*Riks* modificado). Esse procedimento, apesar de ser utilizado para soluções não lineares de todos os tipos, apresenta vantagens mais significativas em análises de instabilidade.

No entanto, em muitos casos a modelagem numérica se baseia em estudos experimentais e pode ocorrer que a análise estática não consiga representar e convergir até o final do ensaio, isso porque há um considerável aumento da não linearidade do problema.

Sendo assim, tem-se como opção o método *Dynamic Implicit* que apesar de ser utilizado para análises dinâmicas, também utiliza o método implícito de convergência, sendo um método iterativo como os demais.

Para a adoção do método dinâmico implícito são necessárias algumas configurações, o primeiro

ponto é ativação do modelo de solução “quase-estática”, para assegurar que a aceleração seja praticamente nula, depois se necessário acionar a função de pós-processamento *smooth* presente no programa, pois pelo fato de ser um método dinâmico que pode causar um aumento no ruído na curva de resultados. O método *Dynamic implicit* foi utilizado por Santos [8] e Cardoso [4], mostrando boa convergência e resultados satisfatórios, se mostrando eficiente para análise de conectores aplicados em pilares mistos preenchidos com concreto.

3.3.2 Métodos numéricos explícitos

Como havia sido citado, um método numérico explícito bastante utilizado para solucionar problemas é o *Dynamic Explicit*. Esse processo, diferentemente dos outros métodos apresentados anteriormente, adota um método explícito de convergência, sendo esta uma metodologia incondicionalmente convergente.

Mesmo com diferenças como o fato de não realizar iterações, a análise explícita apresenta algumas similaridades com o método *Dynamic Implicit*, uma vez que também gera ruídos que precisam ser amenizados pela função *Smooth* e também pode ser utilizado para modelar procedimentos “quase estáticos”.

Além disso, quando se utiliza o *Dynamic Explicit* em análises quase estáticas, exige-se altos custos computacionais, além do aumento do tempo de processamento para realizar simulações no tempo real de ensaio. Para tentar contornar esse problema, o ABAQUS disponibiliza dois recursos para reduzir o tempo de processamento das análises: o *time scaling* e o *mass scaling*. No entanto, esses recursos tendem a aumentar as forças de inércia no modelo numérico, levando a resultados algumas vezes irrealistas (SIMULIA [10]).

Os métodos *Dynamic Explicit* e *Dynamic Implicit* são geralmente utilizados em problemas dinâmicos. Contudo, podem ser utilizados também em problemas quase-estáticos, quando se apresenta uma aceleração consideravelmente baixa, podendo-se considerar o problema como estático. No método *Dynamic Explicit*, os deslocamentos nodais são atualizados diretamente, não precisando da inversão da matriz de rigidez, não ocorrendo o processo iterativo de convergência. Dessa forma, esse método pode levar a erros se o tamanho do passo da análise numérica for muito longo (CARDOSO [4]).

4 Resultados

Para se definir a rigidez, a ductilidade e a capacidade resistente do conector de cisalhamento, alguns parâmetros que definem o comportamento estrutural do mesmo devem ser definidos, para isso é necessário obter a curva de força *versus* deslocamento relativo da conexão.

Essa curva pode ser traçada através de resultados obtidos experimentalmente ou numericamente. Geralmente, parte-se da curva obtida no ensaio de cisalhamento para se calibrar o modelo numérico a adotado para estudos paramétricos posteriores.

Nesta perspectiva, plotou-se os resultados experimentais e numéricos obtidos através dos diferentes métodos de convergência, permitindo verificar a representatividade de cada método numérico. As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados alcançados no Modelo A e Modelo B, respectivamente.

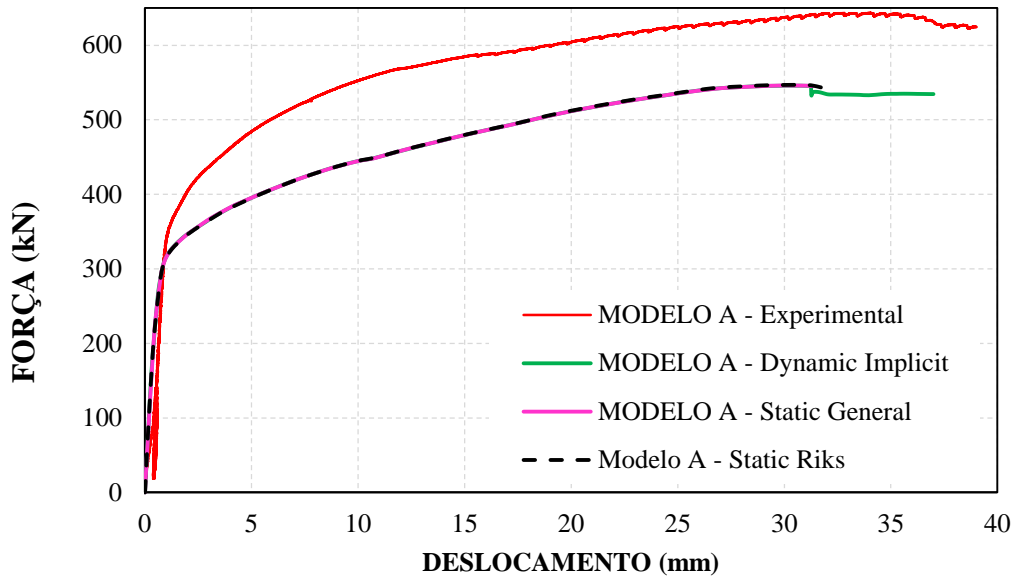


Figura 12. Curva força *versus* deslocamento relativo do Modelo A

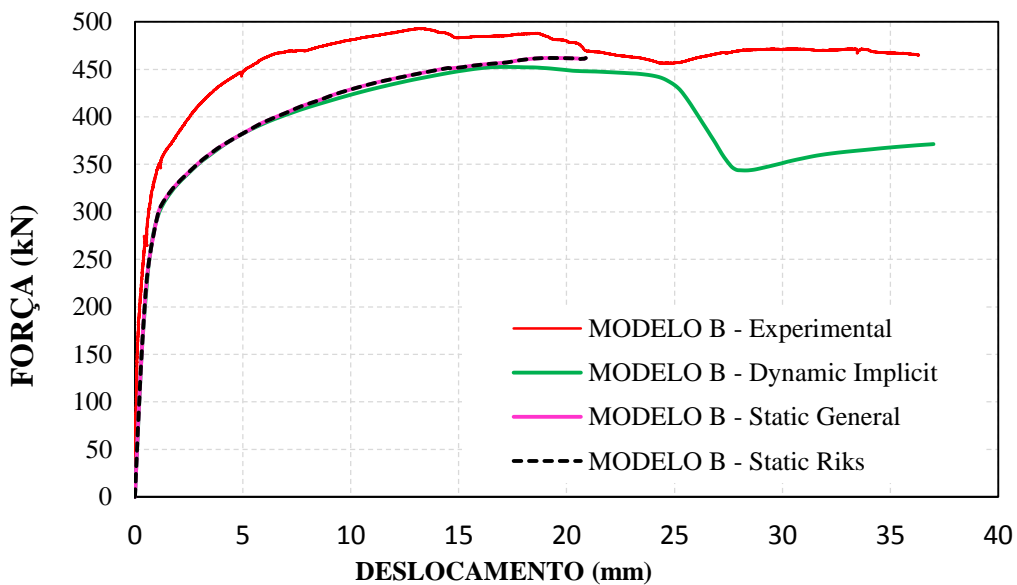


Figura 13. Curva força *versus* deslocamento relativo do Modelo B

Desta análise, pode-se observar que apesar de praticamente coincidir os resultados, para o Modelo A, o método *Static General* apresentou menor poder de convergência que o *Static Riks* que, por sua vez, não conseguiu acompanhar até o final do ensaio. No Modelo B, o comportamento foi similar, com a diferença que, nesse caso o *Static General* e o *Static Riks* se sobrepuseram tanto na força quanto no deslocamento atingido.

Dentre os métodos de convergência avaliados no presente estudo, verifica-se que o *Dynamic Implicit* mostrou um melhor poder de convergência nos modelos A e B, de maneira que as curvas numéricas não foram finalizadas prematuramente em face as curvas experimentais. Portanto, acredita-se que esse método seja capaz de representar melhor os modelos numéricos em situações que se utilizam os conectores de cisalhamento em pilares mistos, visto que neste caso, os pares de contato são mais complexos (ver Figura 7) e, as deformações dos elementos finitos na região da conexão são

bastante elevadas.

Entretanto, quando se utiliza o método de convergência *Dynamic Implicit* é necessário avaliar se, de fato, a velocidade de controle dos deslocamentos incrementados nos modelos numéricos possuía níveis baixos de aceleração, i.e, se o modelo numérico foi realmente simulado em uma condição “quase-estática”. Para isso, faz-se necessário o balanço energético dos modelos numéricos. Caso a aceleração seja baixa, a energia cinética consumida do modelo numérico será significativamente menor que a energia interna total consumida. Em relação aos modelos A e B, os balanços energéticos estão apresentados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

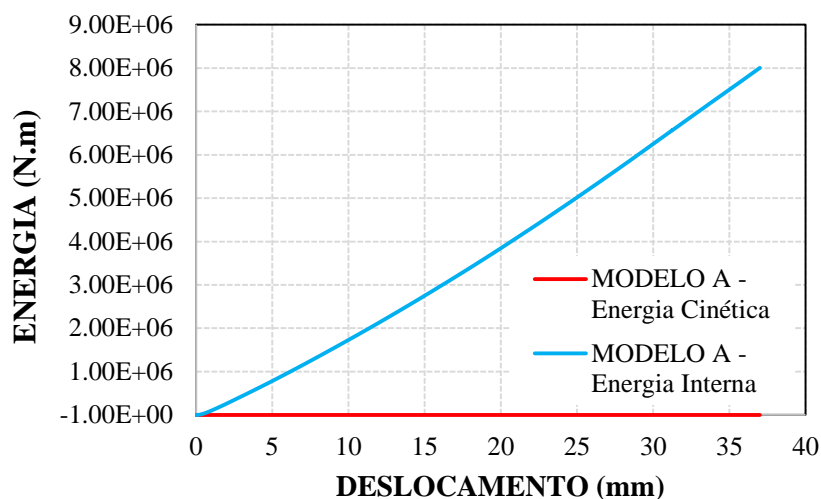


Figura 14. Balanço energético do Modelo A

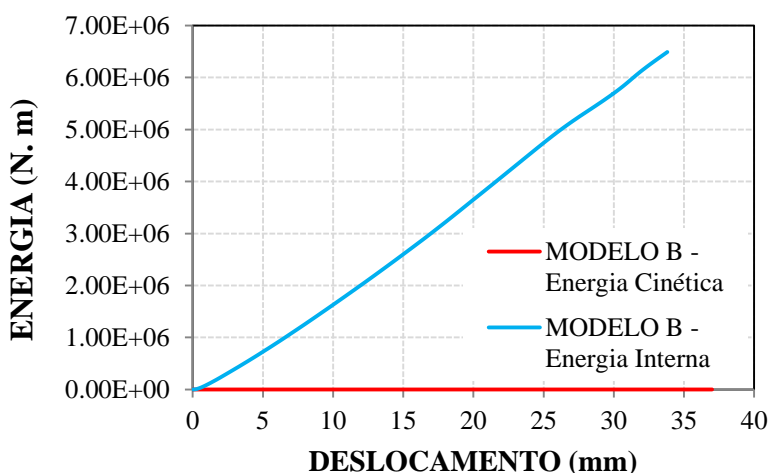


Figura 15. Balanço energético do Modelo B

Verifica-se nas “Figuras 14 e 15” acima que à medida que os incrementos de deslocamentos foram maiores, a energia total consumida pelos modelos A e B foi significativamente maior que a energia cinética dos mesmos, confirmando que esses modelos foram submetidos em uma simulação “quase-estática”.

Cardoso [4] avaliou a convergência de diversos métodos de análise (*Static General*, *Riks modificado*, *Dynamic Implicit* e *Dynamic Explicit*) em modelos de ensaio de cisalhamento *push-test*,

para se verificar qual apresentaria o melhor custo-benefício em relação ao esforço computacional e ao poder de convergência. Para o método de *Static General*, Cardoso [4] verificou que a curva obtida foi praticamente coincidente com a curva obtida pelo *Dynamic Implicit*. Contudo, a análise numérica foi finalizada prematuramente devido a grandes distorções encontradas nos elementos finitos. Pelo método de *Riks* não foi possível obter a convergência dos resultados devido a um eventual decréscimo de força, com a análise numérica sendo interrompida no momento em que a rigidez da curva se anulava. E, por fim, pelo método *Dynamic Implicit* não houve um custo computacional elevado, sendo que esse método demonstrou melhor convergência que o método de Newton Raphson e *Riks*.

Adicionalmente, na “Figura 16”, apresenta-se a configuração deformada do Crestbond para o modelo B, sendo que à esquerda apresenta-se o conector após o ensaio e, à direita, o modelo numérico plotado para a escala de tensões referente ao critério de von Mises limitada ao valor da tensão de escoamento da chapa do conector, igual a 341 kN. De maneira geral verifica-se que o conector apresentou um padrão de deformação bastante coerente com o conector da análise experimental. Também se verifica que o escoamento foi bastante pronunciado na chapa do conector, evidenciando os elevados níveis de deformação em regime plástico.

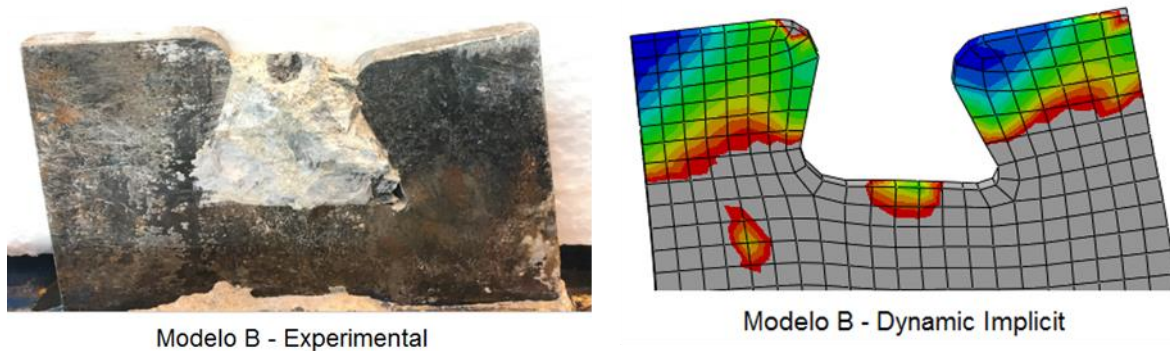


Figura 16. Configuração deformada do Crestbond do Modelo B

5 Conclusão

Foram discutidas ao longo do trabalho as dificuldades de se modelar e prever o comportamento de estruturas com diferentes tipos de não linearidades sejam elas: geométricas (grandes deslocamentos), físicas (alteração das propriedades constitutivas do material) ou devido à alterações na condições de contorno.

Apresentaram-se dois modelos de pilares mistos preenchidos com concreto de seção esbelta utilizando o conector em chapa Crestbond como conector de cisalhamento. Esses modelos foram ensaiados e, a partir dos resultados experimentais, obtiveram-se curva de força versus deslocamento relativo que possibilitaram o desenvolvimento de um modelo numérico calibrado para o problema.

Para tanto, foi necessária a realização de diferentes análises, dentre elas estudos e testes para avaliar qual o método de convergência seria o mais adequado para o problema. Dentro os procedimentos estudados, podem-se citar os métodos estáticos (*Static General* e *Static Riks*) e os métodos dinâmicos (*Dynamic Implicit* e *Dynamic Explicit*) presentes na biblioteca do programa de elementos finitos Abaqus.

Realizadas as análises, observou-se que os dois métodos estáticos apresentaram bons resultados, com a desvantagem de abortarem prematuramente, ou seja, exibindo um menor poder de convergência. De toda forma, para os modelos ensaiados, até mesmo o método *Static General*, que apresentou a menor convergência de todos, poderia ter sido adotado. No entanto, como se objetiva a realização de estudos paramétricos que analisem situações extremas, há a possibilidade de que este

procedimento não consiga convergir. Para evitar essa dúvida sobre a garantia da capacidade de convergência e por apresentar resultados muito próximos aos métodos estáticos sem aumento significativo no custo computacional, optou-se pelo método Dynamic Implicit.

Como foi apresentado, o método Dynamic Implicit foi feito para carregamentos dinâmicos, mas artifícios oferecidos pelo Abaqus permite que a análise ocorra a uma aceleração muito baixa para tornar a simulação estática.

Pelo fato de se ter obtido bons resultados com os métodos Static General, Static Riks e Dynamic Implicit, optou-se por não realizar simulações com o método dinâmico explícito (Dynamic Explicit) para a calibração do modelo.

Como curiosidade, pode-se afirmar que o método Dynamic Explicit converge de qualquer maneira, até em análises onde se possui peças sobrepostas, mesmo sabendo que dois corpos não ocupam o mesmo lugar. Diferentemente do que ocorreria com os demais métodos, uma vez que estes apresentariam problemas com contato.

Como conclusão, pode-se dizer que para análises de pilares mistos preenchidos com concreto, o método Dynamic Implicit apresenta melhores resultados e custo computacional viável. Além disso, verificou-se que os métodos que apresentaram os resultados mais próximos do experimental não foram o que tiveram o maior poder de convergência, essa característica pode ser tomada como sugestão no processo de escolha do melhor método de convergência, onde a ordem de testes com custo/benefício comprovado seria: 1 – *Static General*, 2 – *Static Riks*, 3 – *Dynamic Implicit* e 4 – *Dynamic Explicit*.

6 Referências

- [1] AGUIAR, O. P. (2015). Estudo do Comportamento de Conectores Crestbond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2015.
- [2] BELCHIOR, I. M. R. M. (2012). Modelagem numérica do processo de corte em rocha para perfuração de poços de petróleo. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [3] CALDAS, Rodrigo Barreto; FAKURY, Ricardo Hallal; VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; RODRIGUES, Francisco Carlos; PAES, José Luiz Rangel; CASTRO E SILVA, Ana Lydia Reis (2010). Análise teórico-experimental de dispositivos de transferência de cargas em pilares mistos formados por tubos de aço preenchidos com concreto. Novembro/2010. Projeto de Pesquisa – Edital FAPEMIG 15/2010 Programa Primeiros Projetos – PPP.
- [4] CARDOSO, H. S. (2018). Avaliação Do Comportamento De Conectores Constituídos Por Chapas De Aço Com Recortes Regulares — Ênfase Em Conectores De Geometria Crestbond Aplicados Em Pilares. Tese de Doutorado (Em desenvolvimento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2018.
- [5] EN 1994-1-1:2004. EUROCODE 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.
- [6] HINTON, E., Wood, R., BICANIC, N., White, P. e HELLEN, T., 1992 –Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis – NAFEMS Nonlinear Working Group, Swansea, Reino Unido.
- [7] PESSOA, T. F. P. (2012). Análise numérica de medidas de contenção de sólidos em rochas produtoras de óleo do Brasil. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO), Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

[8] SANTOS, L. R. (2017). Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares Mistos Circulares Preenchidos com Concreto. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2017.

[9] SANTOS, L. R. (2018). Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares Mistos Circulares Preenchidos com Concreto. Projeto de qualificação de Doutorado- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, 2018.

[10] SIMULIA, Dassault Systèmes Corp. (2011). Abaqus Documentation, v. 6.11, Providence, RI, USA.

[11] STAROSSEK, U.; FALAH, N (2008). Force transfer in concrete-filled steel tube columns. Proceedings, 5th European Conference on Steel and Composite Structures – Eurosteel 2008, Graz, Austria, September 3-5.