



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

André de Oliveira Faria

Análise Numérica de Conectores de Cisalhamento tipo Parafuso em Pilares Mistos de
Seção Circular Preenchida com Concreto

Ouro Preto

2018

André de Oliveira Faria

Análise Numérica de Conectores de Cisalhamento tipo Parafuso em Pilares Mistos de
Seção Circular Preenchida com Concreto

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Ouro Preto como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho

Coorientadora: Me. Ellen Martins Xavier

Ouro Preto

F224a Faria, André de Oliveira.
Análise Numérica de Conectores de Cisalhamento tipo Parafuso em
Pilares Mistos de Seção Circular Preenchida com Concreto [manuscrito] /
André de Oliveira Faria. - 2018.

62f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho.
Coorientadora: Prof^a. MSc^a. Ellen Martins Xavier.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Conector de Cisalhamento. 2. PMPC. 3. Seção Tubular Circular. 4. Ensaio
Push-Out. 5. Análise Numérica. I. Sarmanho, Arlene Maria Cunha. II.
Xavier, Ellen Martins. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624

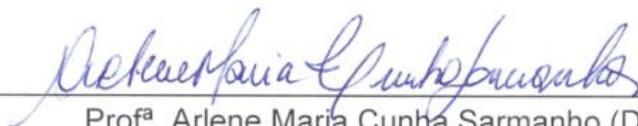
Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

2018

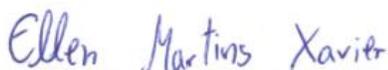
André de Oliveira Faria

Avaliação da influência da esbeltez do perfil tubular na resistência de conector
de cisalhamento em pilares mistos

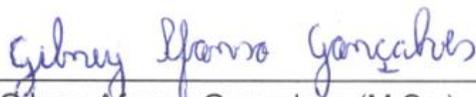
Monografia de conclusão de curso
para obtenção do grau de Engenheiro
Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto defendida e aprovada em
19 de Dezembro de 2018 como parte
dos requisitos para a obtenção do
Grau de Engenheiro Civil. Banca
examinadora:



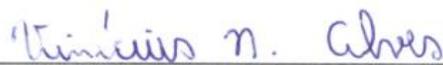
Prof^ª. Arlene Maria Cunha Sarmanho (D.Sc.) – UFOP



Ellen Martins Xavier (M.Sc.) – UFOP



Gilney Afonso Gonçalves (M.Sc.) – UFOP



Prof. Vinícius Nicchio Alves (D.Sc.) – UFOP

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Batista e Lenir, pelo apoio incondicional e por não medirem esforços na busca por esse sonho.

Ao meu irmão Vinícius por todos os ensinamentos e apoio. À minha irmã Ana Carolina pelo exemplo de garra e determinação.

À Bruna pelo companheirismo e por sonhar e lutar comigo durante a busca por esse sonho.

Agradeço de forma especial à professora Arlene pelos ensinamentos, oportunidade, confiança e paciência na orientação deste trabalho.

À Ellen pela atenção, ajuda e ensinamentos.

Ao João Batista pela amizade e sinceridade.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Estruturas, que exerceram um papel fundamental na realização das pesquisas.

À Universidade Federal de Ouro Preto e Fundação Gorceix.

RESUMO

As estruturas mistas, constituídas por perfis tubulares de aço preenchidos por concreto, tem ganhado espaço no mercado desde o seu surgimento no final do século XIX. Dentre os modelos estruturais convencionais, os preenchidos ganham destaque por reunirem as vantagens da utilização do aço e concreto em um único elemento. Para a interação entre os materiais são utilizados conectores das mais diversas formas, sendo que no caso de pilares preenchidos por concreto, uma alternativa é o uso de conectores do tipo parafuso. Este trabalho compreende o estudo numérico do comportamento estrutural de pilares mistos formados por perfis tubulares de seções circulares preenchidos por concreto simples, com conectores de cisalhamento do tipo parafuso de alta resistência. Os conectores estudados são utilizados na região de introdução de carga como no caso da ligação das vigas em pilares. A utilização dos conectores parafusos é de grande interesse prático por apresentar facilidade de instalação e baixo custo. Para a análise numérica foi utilizado o programa comercial em elementos finitos ABAQUS e o modelo foi calibrado com resultados experimentais obtidos em trabalhos anteriores. Com o modelo numérico calibrado, foi avaliado, além do comportamento, a capacidade de carga do conector de cisalhamento e em seguida foi realizado um estudo sobre a influência da variação da esbeltez do perfil tubular na capacidade de força resistente do conector de cisalhamento, bem como foi feita a comparação dos resultados numéricos com os teóricos obtidos por meio das formulações propostas pela ABNT NBR 16239:2013. Com os resultados obtidos observou-se que o modelo numérico desenvolvido representou de maneira satisfatória o comportamento experimental, validando a sua utilização. Além disso, verificou-se que as equações propostas pela norma se apresentaram muito conservadoras e podem ser ajustadas de modo a fornecer um valor de resistência mais adequado.

Palavras chave: Conector de Cisalhamento; PMPC; Seção Tubular Circular; Ensaio Push-Out; Análise Numérica.

ABSTRACT

The mixed structures, made up of tubular steel profiles filled by concrete, have gained space in the market since its emergence in the late nineteenth century. Among the conventional structural models, the filled ones are highlighted because they combine the advantages of using steel and concrete in a single element. For the interaction between the materials, connectors of different shapes are used and, in the case of columns filled by concrete, an alternative is the use of bolt type connectors. This work comprises the numerical study of the structural behavior of mixed columns formed by tubular profiles of circular sections filled with simple concrete, with high strength bolt type shear connectors. The connectors studied are used in the region of load introduction as in the case of connecting the beams to columns. The use of the bolt connectors is of great practical interest because it is easy to install and inexpensive. For the numerical analysis, the ABAQUS finite element commercial program was used and the model was calibrated with experimental results obtained in previous works. With the calibrated numerical model, the load capacity of the shear connector was evaluated, followed by a study on the influence of the slenderness variation of the tubular profile on the strength of the shear connector, as well as the numerical results were compared with the theoretical ones obtained through the formulations proposed by ABNT NBR 16239: 2013. With the results obtained it was observed that the numerical model developed satisfactorily the experimental behavior, validating its use. In addition, it was observed that the equations proposed by the standard was very conservative and can be adjusted to provide a more adequate resistance value.

Keywords: Shear Connector; CFTC; Circular Tubular Section; Push-Out Test; Numerical Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de seções transversais de pilares mistos: (a) perfil I de aço revestido por concreto; (b) perfil I de aço parcialmente revestido por concreto; (c) e (d) tubo de aço com seção retangular, quadrada ou circular preenchidos por concreto.	15
Figura 1.2 - Tensões de confinamento em seções circulares e arqueamento das tensões em seções quadradas e retangulares.	16
Figura 1.3 - Tipos de conectores de cisalhamento: (a) parafusos comuns ou de alta resistência;	17
Figura 1.4 - Conectores de cisalhamento na ligação de pilar com viga: (a) parafusos comuns ou de alta resistência; (b) pinos com cabeça.....	18
Figura 1.5 - Parafuso como conector de cisalhamento.	19
Figura 2.1 - Representação do protótipo.....	24
Figura 2.2 - Parafuso FRIEDBERG A325 utilizado.	25
Figura 2.3 - Representação interna do protótipo.....	26
Figura 2.4 - Representação do protótipo em posição de ensaio.	27
Figura 3.1 - Modelo numérico: (a) vista interna detalhando o núcleo de concreto e conectores; (b) vista externa representando o tubo metálico.	28
Figura 3.2 - Elemento de malha C3D8.	29
Figura 3.3 - Detalhe da região interna do protótipo definida com elemento C3D10.	29
Figura 3.4 - Malha utilizada para o parafuso: (a) detalhe representando o lado externo do parafuso; (b) representação da malha utilizada no corpo do parafuso.....	30
Figura 3.5 - Condição de contorno para a base do protótipo: (a) detalhe especificando a região restringida; (b) condição de contorno da base do protótipo experimental.	31
Figura 3.6 - Região de aplicação de carga destacada em vermelho: (a) detalhe especificando a região de aplicação de carga; (b) posição do atuador de carga no ensaio experimental.....	31
Figura 3.7 - Lado restringido para translação em x e rotação em y e z evidenciado em azul. Lado restringido para translação em y e rotação em x e z evidenciado em vermelho.	32

Figura 3.8 - Relação entre Energia Interna e Energia Cinética do modelo numérico.....	33
Figura 3.9 - Superfície definida como corpo rígido e localização do ponto referência (RP- 1).....	33
Figura 3.10 - Curva tensão-deformação representada pela norma europeia.....	36
Figura 3.11 - Curva tensão-deformação da norma europeia, com complemento sugerido por Van Gysel e Taerwe (1996).	37
Figura 3.12 - Relação tensão <i>versus</i> deformação do concreto conforme fornecido ao ABAQUS.	38
Figura 3.13 - Comportamento do concreto à tração.....	39
Figura 3.14 - Parâmetros utilizados por Kim (2010) para os ajustes das coordenadas das curvas.....	41
Figura 3.15 - Comportamento à tração do concreto.....	42
Figura 3.16 - Reposta do concreto ao carregamento uniaxial para tração (a) e compressão (b).....	42
Figura 3.17 - Curva de dano do concreto à compressão.	43
Figura 3.18 - Curva de dano do concreto à tração.....	44
Figura 3.19 - Curva tensão <i>versus</i> deformação para o aço do tubo.....	46
Figura 3.20 - Curva tensão <i>versus</i> deformação para o aço dos parafusos.	46
Figura 3.21 - Identificação dos tipos de contatos existentes.	49
Figura 4.1 - Comparação modelo numérico e modelos experimentais.	50
Figura 4.2 - Identificação do deslocamento de 6mm.....	51
Figura 4.3 – Dano à compressão gerado após a análise.....	52
Figura 4.4 - Dano à compressão para a altura de 250 mm.	52
Figura 4.5 - Variação das tensões de <i>von Mises</i> limitadas ao valor da tensão de escoamento do parafuso.....	53
Figura 4.6 - Variação das tensões de <i>Von Mises</i> limitadas ao valor da tensão de escoamento do tubo.....	53
Figura 4.7 - (a) modelo com espessura de 5,2 mm; (b) modelo numérico representando o protótipo experimental; (c) modelo com espessura de 11,2 mm.....	55
Figura 4.8 – Resultados obtidos por meio da avaliação das espessuras.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço do tubo.	25
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço dos parafusos.....	25
Tabela 3.1 - Parâmetros numéricos do CDP.....	44
Tabela 3.2 - Relações constitutivas utilizadas para o tubo de aço e parafusos.	46
Tabela 3.3 - Referência de atritos utilizados.	48
Tabela 4.1 - Relação entre força máxima experimental ($P_{máx, exp}$) e numérica (P_{num}).	51
Tabela 4.2 - Avaliação teórica da resistência do conector de cisalhamento.	54
Tabela 4.3 - Modelos numéricos analisados a partir da variação de t.....	54
Tabela 4.4 - Resistência máxima apresentada após análise.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Interações entre aço e concreto	13
1.2	Pilares mistos	14
1.2.1	Confinamento em pilares mistos preenchidos por concreto	15
1.3	Conector de cisalhamento	17
1.4	Revisão bibliográfica	19
1.5	Objetivos	21
1.6	Justificativa	21
1.7	Metodologia	21
2	ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL	23
2.1	Avaliação teórica da resistência do conector de cisalhamento	23
2.2	Geometria dos protótipos	24
2.3	Caracterização do aço	25
2.4	Caracterização do concreto	26
2.5	Execução dos ensaios experimentais	26
3	ANÁLISE NUMÉRICA	28
3.1	Visão geral do modelo	28
3.2	Tipo de elemento e refinamento da malha	29
3.3	Condições de contorno	30
3.4	Método de solução	32
3.5	Propriedades mecânicas dos materiais	34
3.5.1	Concreto	34
3.5.2	Aço	45

3.6	Contatos	47
4	RESULTADOS E ESTUDO NUMÉRICO	50
4.1	Comparação dos resultados	50
4.2	Varição da esbeltez da seção do tubo	54
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Para compreender uma estrutura mista é necessário o entendimento das suas características e das variáveis que regem o seu comportamento. Neste capítulo apresenta-se uma visão geral sobre a interação entre aço e concreto, conceito de pilar misto e o confinamento por concreto, e o uso dos conectores de cisalhamento.

1.1 Interações entre aço e concreto

O aço é um material que apresenta grande relação entre resistência e peso específico, levando a elementos mais esbeltos e, conseqüentemente, mais propícios a instabilidades. Por outro lado, o concreto tem como característica se adaptar a qualquer tipo de forma e apresentar uma grande facilidade de execução, contudo, possui elevado peso próprio e baixa resistência à tração. Nesse sentido, os sistemas mistos reúnem as características dos dois componentes ao permitir que o aço trabalhe à tração e o concreto à compressão, contornando as deficiências de cada material quando utilizados separadamente.

As estruturas mistas, constituídas por perfis tubulares de aço preenchidos por concreto, tem ganhado espaço no mercado desde o seu surgimento no final do século XIX. A partir da década de 1960 essas estruturas começaram a ser mais estudadas e conquistaram maior aplicabilidade na construção civil.

Quando comparado ao concreto armado, o sistema misto proporciona redução no peso da estrutura e dispensa a utilização de formas e escoramentos. Em relação ao aço, a tecnologia mista permite a melhoria do comportamento estrutural em situações de incêndio e corrosão (CBCA, 2012).

As interações entre o aço e concreto são caracterizadas pela distribuição de tensões cisalhantes na interface desses materiais. Segundo Silva (2006), na interface aço-concreto existem três mecanismos de transferência de tensões que compõem a aderência natural do aço com o concreto: a adesão, a aderência mecânica e o atrito.

A adesão, também caracterizada como aderência química, surge durante as reações de pega do cimento, etapa em que surgem as ligações físico-químicas na interface aço-concreto (ARAUJO, 2009). Nesse mesmo sentido, Oliveira (2008) afirma que a adesão é solicitada nos estágios iniciais do carregamento para pequenos deslocamentos e pode ser desprezada para efeito de resistência.

A aderência mecânica é caracterizada pelo engrenamento mecânico entre a superfície rugosa do tubo de aço e o concreto. Ao aumentar o carregamento na estrutura surge a tendência de deslocamento relativo entre a superfície dos dois materiais, porém, com o efeito do confinamento do concreto, surgem tensões normais resistentes ao deslizamento que dificultam a separação desses materiais. Nesse sentido, a aderência mecânica se assemelha a um mecanismo parcial de atrito.

O mecanismo de transferência de tensões por atrito está ligado ao grau de força normal aplicada e ao coeficiente de atrito da interface, de modo que o coeficiente de atrito depende do grau de rugosidade da superfície do tubo e se essa superfície possui algum tipo de lubrificação. Esse coeficiente pode variar de zero, condição para superfície coberta por lubrificação, a 0,6, condição sem adição de lubrificante (SILVA, 2006).

1.2 Pilares mistos

O pilar misto refere-se a um elemento estrutural sujeito à compressão, no qual o aço trabalha juntamente com o concreto, sem haver o escorregamento relativo significativo na superfície de contato, sujeito a momentos fletores devido a imperfeições e cargas transversais. Os pilares mistos podem se apresentar como perfis envolvidos ou preenchidos por concreto (CALDAS, 2004).

Segundo Xavier (2017), a adição de concreto a um perfil metálico, configurando um pilar misto, contribui para aumentar sua capacidade resistente à medida em que reduz os efeitos de flambagem local e global do perfil metálico.

A norma ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios classifica os pilares mistos conforme mostrado na Figura 1.1.

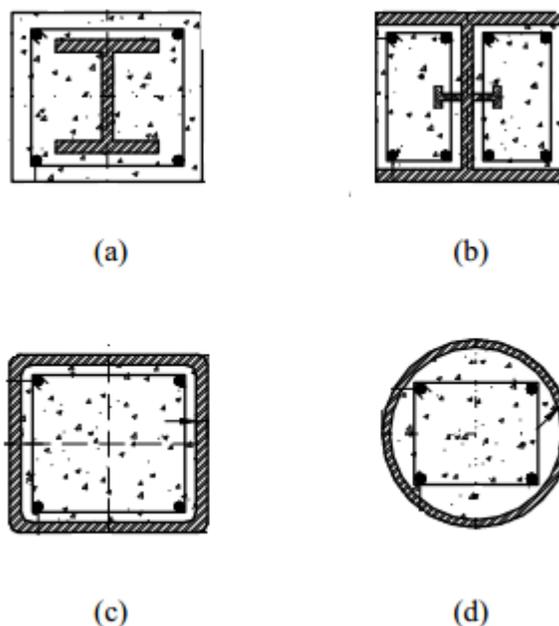


Figura 1.1 - Tipos de seções transversais de pilares mistos: (a) perfil I de aço revestido por concreto; (b) perfil I de aço parcialmente revestido por concreto; (c) e (d) tubo de aço com seção retangular, quadrada ou circular preenchidos por concreto.

FONTE: ABNT NBR 8800:2008.

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 prescreve procedimentos para o dimensionamento de elementos estruturais em aço com perfis tubulares e abertos. Entretanto essa norma não abrange todos os aspectos relativos aos sistemas estruturais tubulares. Para abordar questões específicas sobre o comportamento de perfis tubulares em aço e mistos de aço e concreto, em 2013 foi aprovada pela ABNT a norma Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares (ABNT NBR 16239:2013) (FAKURY et al., 2012).

Este trabalho tem como enfoque o estudo do pilar misto tubular circular preenchido por concreto (PMPC), como ilustrado na Figura 1.1 (d).

1.2.1 Confinamento em pilares mistos preenchidos por concreto

O concreto tem como característica se adaptar a qualquer tipo de forma, de modo que o formato da forma em que esse material se encontra influencia na sua capacidade

resistente. Ao ser inserido no interior de um tubo metálico o concreto passa a se encontrar confinado pelas paredes do material, de modo que, ao sofrer solicitações de compressão, sua resistência pode aumentar. Tal fato ocorre porque a ação das paredes laterais que o tubo de aço exerce sobre o concreto diminui o seu comportamento frágil.

Richart, Brandtzaeg e Brown (1928) desenvolveram os primeiros estudos sobre o efeito do confinamento e constataram que o concreto confinado apresenta maior rigidez e resistência à compressão quando comparado ao concreto não confinado, de modo que o efeito permite o aumento da tensão máxima atingida e também a sua deformação.

Segundo Neto (2016) o confinamento do concreto pode ocorrer de duas formas, dividindo-se em ativo e passivo. No primeiro, pressões são aplicadas lateralmente ao cilindro de concreto e mantidas constantes durante a aplicação da força axial. Já no confinamento passivo, um elemento é carregado axialmente e impedido de se expandir lateralmente, sendo, portanto, o tipo de confinamento presente em pilares mistos.

Com respeito ao formato da seção transversal do perfil que envolve o concreto, nas seções circulares o concreto é submetido a um mesmo grau de confinamento radial. O mesmo não ocorre nas seções quadradas ou retangulares, em que o concreto situado no centro do perfil e nos cantos é exposto a um grau de confinamento maior do que aquele localizado nas laterais. Esse comportamento é verificado porque ocorre o arqueamento das tensões de confinamento do centro da seção para os cantos conforme ilustra a Figura 1.2 (De Nardim, 1999).

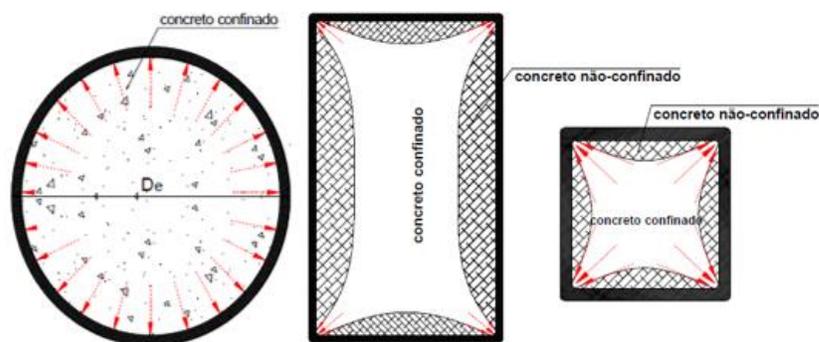


Figura 1.2 - Tensões de confinamento em seções circulares e arqueamento das tensões em seções quadradas e retangulares.

FONTE: De Nardim (1999).

1.3 Conector de cisalhamento

Garantir que uma estrutura mista trabalhe de maneira adequada está em assegurar de que haja a transferência de carga entre o tubo de aço e o núcleo de concreto. Em situações de solicitações mais elevadas, apenas a aderência natural dos dois materiais não é capaz de garantir essa transferência e evitar com que ocorram deslocamentos relativos significativos entre as duas superfícies. Nesses casos utilizam-se meios mecânicos através dos conectores de cisalhamento, mossas, ressaltos, etc.

Os conectores de cisalhamento são dispositivos utilizados para absorver e transmitir forças longitudinais de cisalhamento presentes na interface aço-concreto. A norma ABNT NBR 16239:2013 descreve os conectores de cisalhamento para estruturas mistas como sendo de dois tipos, os parafusos comuns ou de alta resistência (Figura 1.3 a) objetos de estudo desse trabalho, e os pinos com cabeça (Figura 1.3 b), comercialmente conhecidos como *stud bolts*. Segundo a norma, os parafusos comuns ou de alta resistência podem ser utilizados para este fim, desde que apresentem espaçamento entre seus eixos, em qualquer direção, maior ou igual a seis vezes o seu diâmetro.

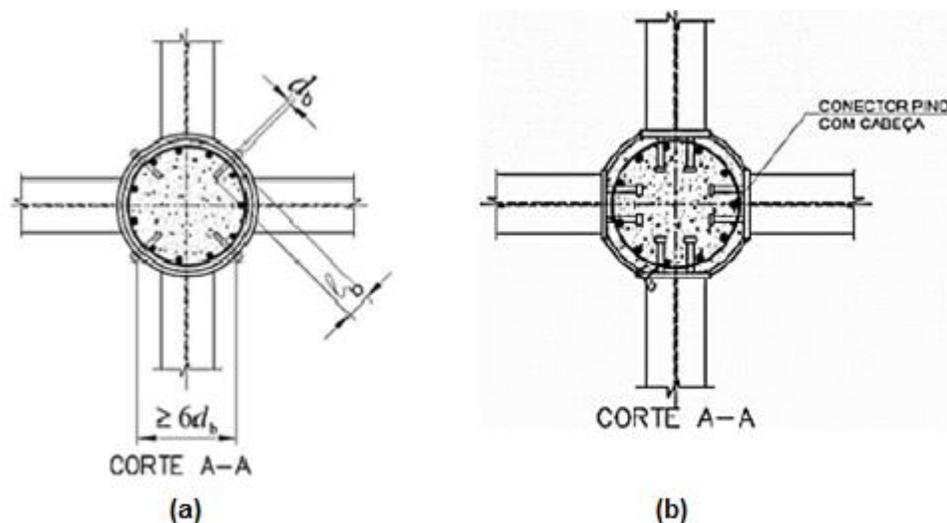


Figura 1.3 - Tipos de conectores de cisalhamento: (a) parafusos comuns ou de alta resistência; (b) pinos com cabeça.

FONTE: ABNT NBR 16239:2013.

Os parafusos comuns ou de alta resistência passam pelo perfil tubular através de furos feitos previamente, penetrando também no concreto (Figura 1.4 a). Para os pinos com cabeça são realizadas aberturas nas paredes do tubo de aço, soldando chapas com os conectores instalados (Figura 1.4 b), de modo que a solda entre a chapa e o tubo deve ser adequadamente dimensionada.

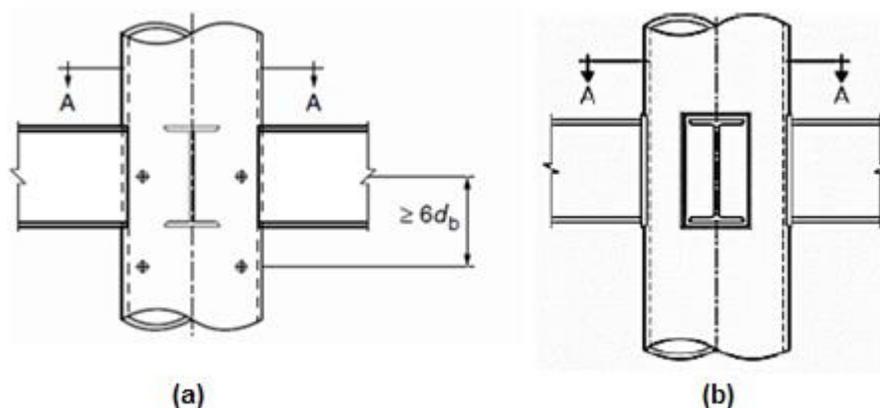


Figura 1.4 - Conectores de cisalhamento na ligação de pilar com viga: (a) parafusos comuns ou de alta resistência; (b) pinos com cabeça.

FONTE: ABNT NBR 16239:2013.

A ductilidade, capacidade que o conector tem de se deformar mantendo um nível considerável de resistência, é outro aspecto utilizado para a classificação de um conector, definindo-os como frágeis ou dúcteis. Para efeito de norma, de acordo com a EN 1994-1-1:2004 (Eurocode 4: Projeto de Estruturas Mistas de Aço e Concreto - Parte 1-1: Normas e Regras Gerais para Edifícios), um conector é considerado dúctil quando a sua capacidade de deslizamento característico for maior ou igual a 6 mm.

A verificação do comportamento estrutural dos conectores de cisalhamento é feita por meio da realização de ensaios de cisalhamento direto, conhecidos como *push-out*, padronizados na norma europeia EN 1994-1-1:2004. A norma inclui a especificação das dimensões dos modelos a serem ensaiados e a determinação da capacidade nominal dos conectores. Por meio dos ensaios é possível a obtenção da curva força-deslizamento, força última e do modo de colapso da ligação. Segundo Cardoso (2014) esse método de ensaio apresenta certas limitações ao simular o comportamento de um

pilar misto preenchido por concreto, sendo mais indicado para representar o comportamento de vigas mistas. Diante disso, esse tipo de ensaio pode sofrer algumas alterações afim de melhor representar o comportamento dos PMPC. Para Starossek & Falah (2009), o deslocamento relativo entre o aço e o concreto é muito menor em um pilar real quando comparado aos ensaios padronizados *push-out*.

O estudo deste trabalho leva em consideração a utilização de parafusos de alta resistência como conectores de cisalhamento conforme ilustra a Figura 1.5.



Figura 1.5 - Parafuso como conector de cisalhamento.

FONTE: Dias (2009)

1.4 Revisão bibliográfica

De Nardim (1999) realizou o estudo de pilares mistos preenchidos com concreto de alta resistência. Identificou que o confinamento promove a ductilização do concreto, mudando o seu comportamento quando comparado com o concreto livre. Para os pilares de seções circulares foi notado maior grau de confinamento quando comparado às seções quadradas, decrescendo ainda mais para as seções retangulares.

Simões (2008) estudou sobre a influência do efeito de confinamento do concreto na resistência de pilares mistos de seção circular. Comparando com os valores teóricos prescritos pelas principais normas de dimensionamento, verificou que o efeito confinamento amplia a capacidade de resistência teórica da estrutura.

Cardoso (2014) realizou a análise teórica-experimental e numérica da transferência de carga em PMPCs, utilizando parafusos de alta resistência do tipo ASTM A325 como conectores. Observou-se que apesar do tratamento interno realizado nos modelos experimentais, com pintura dos tubos e aplicação de cera desmoldante, a transferência de carga por atrito se apresentou bastante significativa. Além disso, foi

verificado que o modelo analítico descrito pela ABNT NBR 16239:2013 previa a ocorrência de ruptura dos parafusos por cisalhamento, o que não foi observado nos modelos numéricos e experimentais, onde houve o colapso pela ruptura do concreto.

Neto (2016) analisou o uso de parafuso estrutural como conector de cisalhamento em PMPC de seção circular. Notou-se que a esbeltez do tubo influencia na rigidez e na resistência da conexão, em função do aumento das tensões de confinamento no concreto, sendo que quanto menor a esbeltez do tubo maior é a capacidade resistente do parafuso.

Prates (2017) fez o estudo numérico de conectores tipo parafusos instalados com rebite para transferência de carga em PMPCs com perfis formados a frio. Foi notado que as equações de dimensionamento sugeridas pela norma brasileira de tubos apresentavam caráter conservador. A autora verificou que, ao levar em conta o efeito do confinamento, os resultados numéricos se aproximavam de forma mais efetiva dos resultados teóricos. Além disso, assim como Cardoso (2014), foi notado que a falha ocorreu predominantemente devido ao esmagamento do concreto.

Santos (2017) realizou a análise numérica de parafusos conectores em PMPCs. Observou que ao aumentar o comprimento líquido e o diâmetro do conector obtinha-se um ganho praticamente linear da capacidade resistente. Por outro lado, foi avaliado que a capacidade resistente do parafuso não apresentou variação significativa ao aumentar a quantidade de conectores utilizando várias linhas de parafusos instalados no pilar misto.

Xavier (2017) promoveu a análise teórico-experimental do uso de parafuso estrutural como conector de cisalhamento em pilar retangular misto. Observou que o aumento da resistência total do protótipo não é proporcional aos acréscimos de parafusos na estrutura. Além disso, devido ao confinamento, os protótipos de seções transversais menos esbeltas atingiram uma resistência por conector maior do que aqueles mais esbeltos.

1.5 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar numericamente, por meio de programa comercial em elementos finitos (ABAQUS v.6.14), a capacidade de carga do conector de cisalhamento, tipo parafuso, em perfis tubulares circulares preenchidos por concreto (PMPC's) com a variação da esbeltez do perfil tubular. Como objetivo específico tem-se: a comparação dos resultados numéricos obtidos com as formulações da norma ABNT NBR 16239:2013 e o programa experimental realizado por Neto (2016).

1.6 Justificativa

O sistema misto reúne características de dois componentes que, quando utilizados individualmente, apresentam limitações características. Ao permitir que o aço trabalhe à tração e o concreto à compressão, a estrutura mista cria uma nova combinação que resulta em vantagens econômicas e tecnológicas para a engenharia de estruturas.

O trabalho conjunto de perfis metálicos preenchidos por concreto é alvo de várias pesquisas que buscam a compreensão e a melhor interação entre os dois materiais. Tendo em vista a complexidade e custo de se fazer uma análise estrutural de maneira experimental, torna-se necessário o auxílio de programas computacionais a fim de tornar mais rápido todo o processo e garantir maior eficiência de análise. Além disso, tem-se o fato de que a descrição numérica de elementos mistos ainda é nova em estudos teóricos. As avaliações feitas neste trabalho visam uma contribuição para aproximar o comportamento da estrutura mista por meio de um modelo computacional.

1.7 Metodologia

No presente trabalho será utilizado o software comercial em elementos finitos ABAQUS v.6.14. Trata-se de um programa de simulação computacional com ampla aplicação nas diversas áreas da engenharia e já consolidado no mercado nacional e internacional.

A partir dos resultados experimentais, obtidos na pesquisa de Neto (2016), a modelagem numérica foi calibrada e realizou-se um estudo considerando a variação da espessura do perfil. Este trabalho se concentra na avaliação da influência da esbeltez do perfil tubular na capacidade de carga do conector de cisalhamento em PMPCs, comparando os resultados numéricos com os resultados obtidos em pesquisa realizada por Neto(2016) no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá. Os resultados da análise numérica são comparados com as especificações da norma ABNT NBR 16239:2013, considerando diferentes espessuras, ou seja, das seções mais esbeltas até as mais espessas.

2 ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as prescrições de norma que definem a resistência de um conector e a descrição do modelo experimental realizado por Neto (2016), o qual se caracteriza como o referencial desse trabalho.

O modelo experimental foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” da Universidade Federal de Ouro Preto e se trata de um pilar misto, composto de perfil tubular circular preenchido por concreto, com uso de parafuso estrutural como conector de cisalhamento.

2.1 Avaliação teórica da resistência do conector de cisalhamento

É possível calcular a capacidade resistente de cálculo de cada parafuso através das expressões fornecidas pela ABNT NBR 16239:2013. Para parafusos comuns ou de alta resistência deve-se considerar o menor valor encontrado entre a Equação 2.1, que verifica a resistência ao esmagamento do concreto sob a região de contato com o conector tipo parafuso, e a Equação 2.2, que refere-se à força de cisalhamento resistente de cálculo do parafuso e ao esmagamento da parede do tubo.

$$V_{Rd} = l_b d_b \sigma_{c,Rd} \leq 5 d_b^2 \sigma_{c,Rd} \quad (2.1)$$

$$V_{Rd} = 0,4\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4 \gamma_{a2}} \leq 2,4 d_b t \frac{f_u}{\gamma_{a2}} \quad (2.2)$$

Onde:

l_b é o comprimento líquido do parafuso, descontando-se a espessura da parede do tubo;

d_b é o diâmetro do parafuso;

$\sigma_{c,Rd}$ é a tensão resistente de cálculo à pressão de contato do concreto;

f_u e f_{ub} são a resistência à ruptura do aço do tubo e do parafuso, respectivamente;

γ_{a2} é o coeficiente de ponderação da resistência do aço estrutural à ruptura;

t é a espessura da parede do tubo.

A tensão resistente de cálculo à pressão de contato do concreto ($\sigma_{c,Rd}$) pode ser calculada, segundo a ABNT NBR 8800:2008, pela Equação 2.3.

$$\sigma_{c,Rd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c \gamma_n} \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq f_{ck} \quad (2.3)$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

γ_n é um coeficiente de comportamento, igual a 1,40;

γ_c é o coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

A_1 e A_2 são, respectivamente, a área carregada sob a placa de apoio e a área da superfície de concreto. Tomando-se A_2/A_1 igual a 4, segundo a ABNT NBR 16239:2013.

2.2 Geometria dos protótipos

A geometria do modelo é caracterizada por um perfil circular de aço com espessura de 8,2 mm, 219 mm de diâmetro e 500 mm de altura. O interior do tubo é preenchido por concreto com resistência característica (f_{ck}) de 14,16MPa e média (f_{cm}) de 19,7MPa. Foram utilizados quatro parafusos como conectores de cisalhamento e os mesmos foram posicionados a meia altura do tubo de aço, dispostos simetricamente de modo a respeitar a distância mínima, estabelecida pela ABNT NBR 16239:2013, entre linhas de eixo dos parafusos (Figura 2.1).

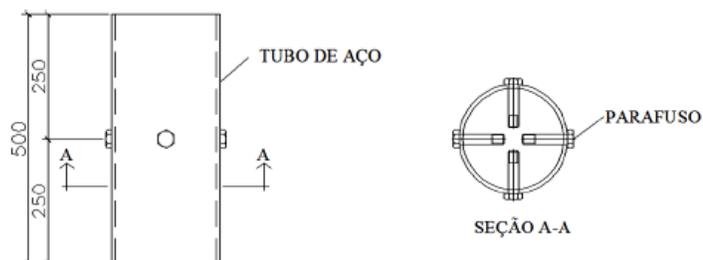


Figura 2.1 - Representação do protótipo.

Fonte: Neto (2016)

2.3 Caracterização do aço

Os perfis tubulares estruturais foram fabricados pela empresa Vallourec do Brasil, a qual também forneceu os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do aço, presentes na Tabela 2.1. O aço empregado na fabricação dos perfis é do tipo VMB350 (valores nominais: $f_y = 350\text{MPa}$ e $f_u = 485\text{MPa}$, segundo a norma ASTM A 501 grau B).

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do aço do tubo.

Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
219	8,2	385	582

O aço dos parafusos é do tipo A325 (valores nominais: $f_y = 635\text{MPa}$ e $f_u = 825\text{MPa}$, segundo a norma ABNT NBR 8800:2008) como mostra a Figura 2.2 . As dimensões foram obtidas por meio da medição com o auxílio de paquímetro e se encontram descritas na Tabela 2.2.



Figura 2.2 - Parafuso FRIEDBERG A325 utilizado.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do aço dos parafusos.

Nº de parafusos (unid)	Comprimento (mm)	Espessura da cabeça (mm)	Diâmetro do fuste (mm)	Diâmetro da rosca (mm)	Comprimento da rosca (mm)
4	101,6	8,1	12,8	10,8	25

2.4 Caracterização do concreto

A concretagem do modelo foi feita com a utilização de concreto usinado pela empresa Lafarge de Ouro Preto. Foram retirados três corpos de prova de concreto cilíndricos de 150x300mm e obtidas as resistências características (f_{ck}) igual a 14,6 MPa e média (f_{cm}) igual a 19,7MPa, conforme mencionado anteriormente.

O protótipo foi concretado sobre uma forma de madeirite, para que se obtivesse uma superfície de aplicação de carga nivelada e lisa. Na extremidade inferior tem-se uma região de vazio com 50 mm sem preenchimento, afim de permitir a movimentação do concreto quando solicitado. A Figura 2.3 representa a configuração do protótipo já em posição de ensaio.

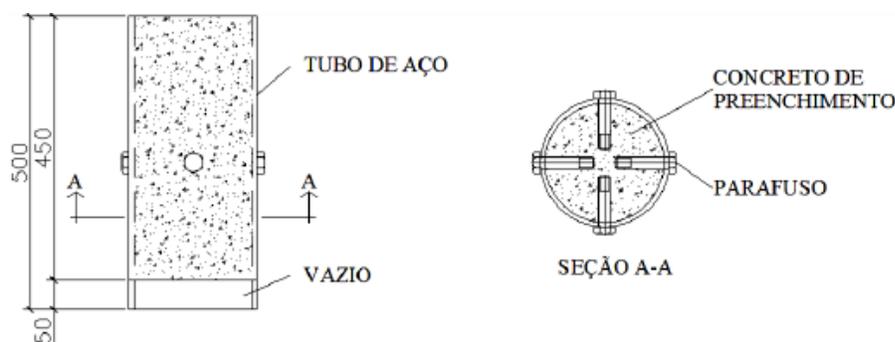


Figura 2.3 - Representação interna do protótipo.

Fonte: Neto (2016)

Antes da concretagem a os protótipos foram limpados internamente e lubrificadas com uma camada uniforme de graxa.

2.5 Execução dos ensaios experimentais

O protótipo foi ensaiado com carga de compressão centrada aplicada diretamente no núcleo de concreto por controle de deslocamento. Com o intuito de garantir a verticalidade e a centralização da carga aplicada ao longo do ensaio, foi utilizada uma

rótula acoplada ao prato superior da prensa. Assim, a base do pilar ficou em contato com o prato inferior e o topo com a rótula do prato superior, conforme ilustra a Figura 2.4.



Figura 2.4 - Representação do protótipo em posição de ensaio.

Fonte: Neto (2016)

O procedimento de ensaio foi tomado a partir de uma adaptação do ensaio push-out previsto pela norma europeia de estruturas mistas EN 1994-1-1:2004. O critério de parada foi a perda de carga equivalente a 20% da carga máxima. Durante o ensaio experimental foram medidos os valores de carga aplicada e, por meio do LVDT vertical mostrado na Figura 2.4, o deslocamento do protótipo.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo será abordado o processo de modelagem numérica pelo método de elementos finitos através do programa comercial ABAQUS v.6.14. A simulação consiste em avaliar o comportamento do conector de cisalhamento tipo parafuso em pilares mistos preenchidos com concreto.

Inicialmente será feita uma abordagem sobre a visão geral do modelo, partindo para a consideração dos tipos de elementos e malhas utilizadas, condições de contorno, incrementos, definição dos materiais e, por fim, as interações entre as superfícies.

3.1 Visão geral do modelo

Devido à dupla simetria presente no protótipo experimental, apenas um quarto da seção transversal foi modelada. Tal configuração permite agilidade na confecção do modelo, menor tempo de processamento e, posteriormente, maior facilidade de análise dos resultados. O protótipo é constituído por um pilar circular metálico preenchido por concreto, com quatro conectores localizados à meia altura. A Figura 3.1 apresenta a modelagem numérica desenvolvida no programa ABAQUS v.6.14.

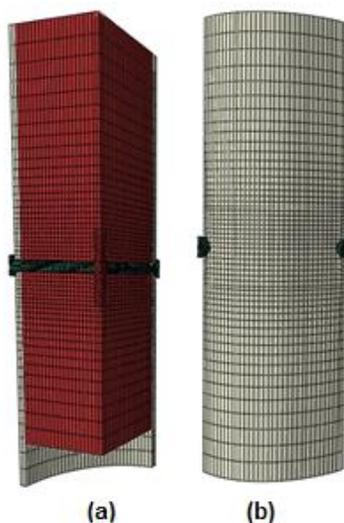


Figura 3.1 - Modelo numérico: (a) vista interna detalhando o núcleo de concreto e conectores; (b) vista externa representando o tubo metálico.

3.2 Tipo de elemento e refinamento da malha

O perfil metálico e os parafusos foram modelados com elementos do tipo C3D8, caracterizado como linear, hexaédrico e sólido. Esse tipo de elemento possui oito nós e três graus de liberdade por nó, permitindo translações nas direções principais X, Y e Z (Figura 3.2).

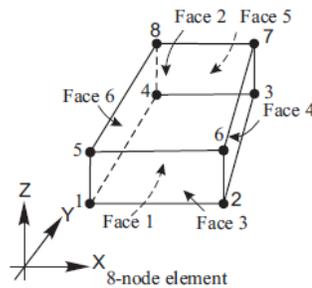


Figura 3.2 - Elemento de malha C3D8.

Fonte: SIMULIA (2014)

Para o núcleo de concreto foi utilizado também o elemento C3D8 em grande parte da estrutura, com exceção da região de cor bege, mostrada na Figura 3.3, modelada com elemento de malha C3D10, caracterizada como tetraédrica. Tal configuração foi necessária devido à geometria do concreto junto à extremidade dos parafusos, segundo Santos (2017) e Cardoso (2014).

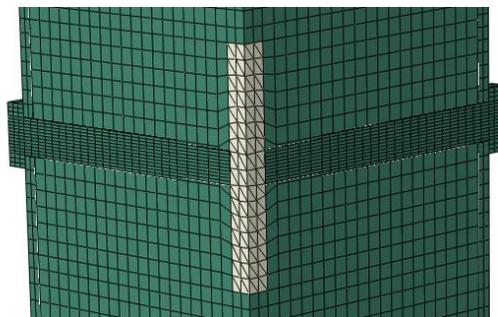


Figura 3.3 - Detalhe da região interna do protótipo definida com elemento C3D10.

A discretização da malha de elementos finitos foi realizada a partir dos estudos numéricos realizados por Santos (2017).

Os elementos utilizados no tubo de aço e núcleo de concreto tiveram, na direção longitudinal, malha com dimensão variável entre 5,0 mm e 20,0 mm, de modo que na região em torno dos conectores a malha apresentou tamanho máximo de 5,0 mm. Na direção transversal do pilar foi considerada a dimensão constante de 5,0 mm. Segundo Prates (2017) a mudança gradual da malha na direção do eixo longitudinal do pilar contribui para a redução de problemas de convergência dos modelos.

Para o parafuso foi considerado o tamanho máximo de 3,0 mm em todas as direções, assim como considerado por Cardoso (2014), Santos (2017) e Prates (2017). Houve maior discretização da malha de elementos finitos nos parafusos pois é através deles que ocorre a maior transferência de carga do núcleo de concreto para o tubo de aço. A Figura 3.4 ilustra a configuração de malha utilizada para os parafusos.



Figura 3.4 - Malha utilizada para o parafuso: (a) detalhe representando o lado externo do parafuso; (b) representação da malha utilizada no corpo do parafuso.

3.3 Condições de contorno

A definição das condições de contorno no modelo se tornam necessárias afim de retratar as condições de ensaio do protótipo experimental e também descrever condições

equivalentes às partes omitidas no modelo, tendo em vista a modelagem de apenas um quarto da estrutura devido à simetria.

A base do tubo de aço foi considerada completamente engastada, restringindo o deslocamento e a rotação em todas as direções (Figura 3.5).

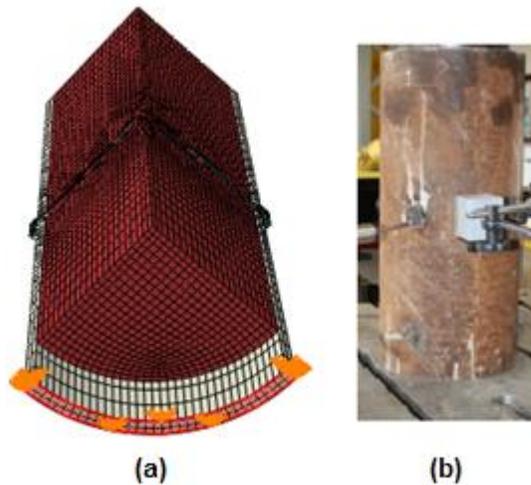


Figura 3.5 - Condição de contorno para a base do protótipo: (a) detalhe especificando a região restringida; (b) condição de contorno da base do protótipo experimental.

Para o topo do núcleo de concreto, região a qual recebeu aplicação de carga nos ensaios experimentais, foi permitido o deslocamento apenas na direção longitudinal do núcleo, restringindo todos os outros deslocamentos e não permitindo rotações (Figura 3.6).

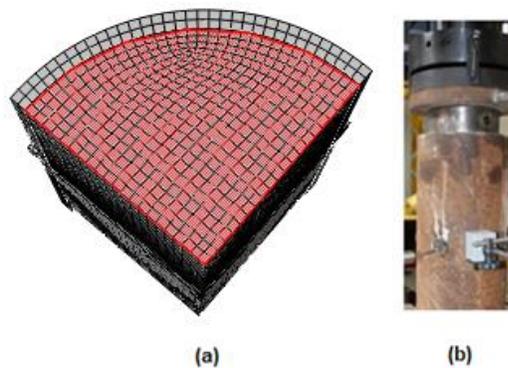


Figura 3.6 - Região de aplicação de carga destacada em vermelho: (a) detalhe especificando a região de aplicação de carga; (b) posição do atuador de carga no ensaio experimental.

Como o estudo apresenta apenas um quarto do protótipo experimental, foi utilizada a função *symmetry* para descrever as condições de contorno que representam a dupla simetria do modelo. Assim, todas as restrições de simetria estão representadas na Figura 3.7.

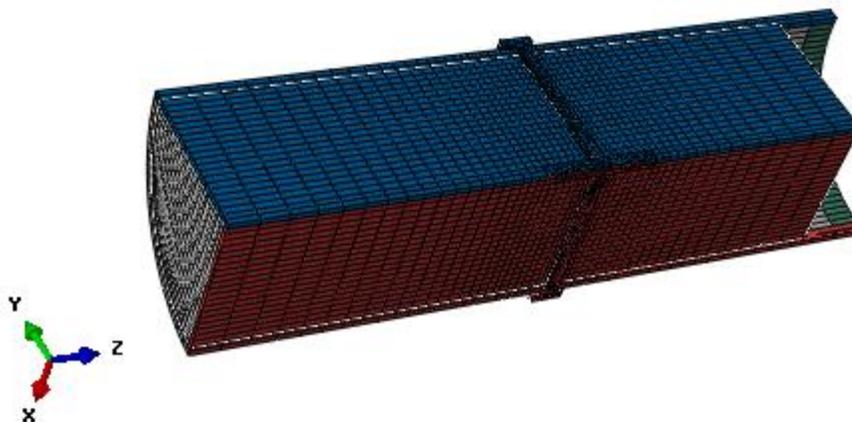


Figura 3.7 - Lado restrigido para translação em x e rotação em y e z evidenciado em azul. Lado restrigido para translação em y e rotação em x e z evidenciado em vermelho.

3.4 Método de solução

A calibração do modelo foi feita a partir da análise não linear, em que foi utilizado no ABAQUS o método de análise *Dynamic Implicit*, com a opção de incremento do tipo quase-estática. Segundo Genikomsou e Polak (2015) se trata de um método dinâmico, contudo pode ser utilizado em problemas estáticos com baixo carregamento, além de apropriado para problemas não-lineares que envolvem esforços cisalhantes e perda de rigidez do concreto.

A Figura 3.8 mostra a relação da Energia Interna com a Energia Cinética desenvolvida ao longo da análise numérica, evidenciando que a cinética é consideravelmente inferior à energia interna total, viabilizando a utilização do método *Dynamic Implicit*. A utilização do método proporcionou melhor convergência e menor tempo de processamento quando comparado ao método Riks de análise estática.

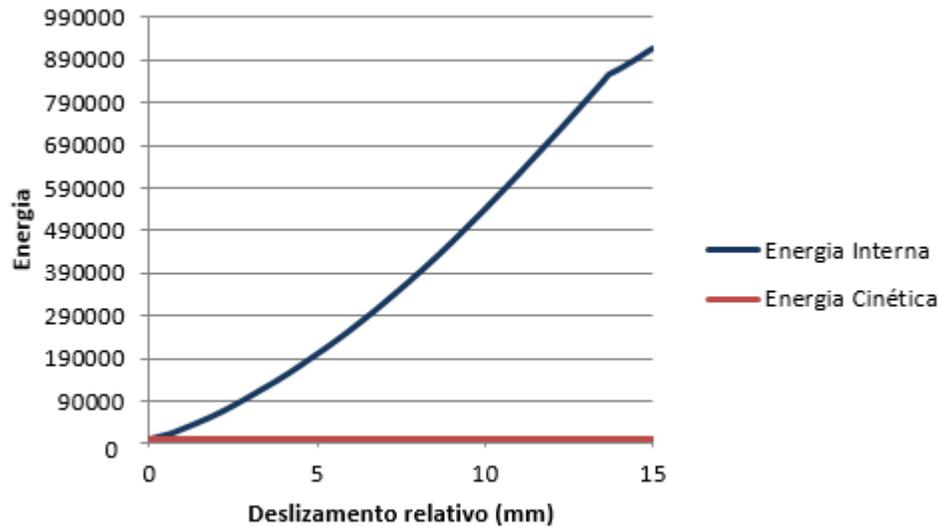


Figura 3.8 - Relação entre Energia Interna e Energia Cinética do modelo numérico.

A análise estrutural foi feita através do controle de deslocamento por meio da utilização da função *rigid body*. Nesse sentido, em busca de representar a transferência de carga do atuador para o protótipo experimental, a superfície do topo do concreto foi considerada como um corpo rígido (Figura 3.9). Um ponto referência foi ajustado ao centro de massa desse corpo no início da análise computacional. Assim, foi feito o controle de deslocamento desse ponto na direção longitudinal do núcleo de concreto. Este artifício simulou a aplicação de sucessivos deslocamentos por meio do atuador de carga.

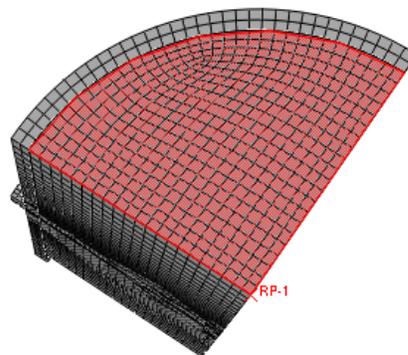


Figura 3.9 - Superfície definida como corpo rígido e localização do ponto referência (RP- 1).

3.5 Propriedades mecânicas dos materiais

Os comportamentos dos materiais foram inseridos ao programa por meio de leis que descrevem suas características. Nesse sentido, foram utilizadas formulações para descrever o comportamento do aço presente no tubo metálico e parafuso, bem como o concreto presente no interior do perfil.

3.5.1 Concreto

Para representação do comportamento do concreto, afim de levar em conta o efeito do dano e do confinamento provocado pelo tubo de aço, foi utilizado o modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity (CDP)*, disponível no programa ABAQUS v.6.14.

Segundo a documentação do programa, o modelo é projetado para aplicações nas quais o concreto é submetido à condições arbitrárias de carga. Além disso, o modelo simula a degradação da rigidez elástica do concreto tanto na tração quanto na compressão.

3.5.1.1 Comportamento à compressão uniaxial em domínio elástico

No modelo constitutivo CDP as deformações elásticas (ϵ_{el}) e plásticas (ϵ_{pl}) são calculadas de maneira independente e somadas para se obter a deformação total, conforme a expressão abaixo:

$$\epsilon = (\epsilon_{el}) + (\epsilon_{pl}) \quad (3.1)$$

onde: (ϵ_{el}) é função somente do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson e (ϵ_{pl}) obtido por meio de curvas tensão *versus* deformação.

A EN1992-1-1:2004 define o módulo de elasticidade do concreto (E_{cm}) e o coeficiente de Poisson (ν) como sendo:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \text{ (GPa)} \quad (3.2)$$

$$\nu = 0,2 \quad (3.3)$$

3.5.1.2 Comportamento à compressão uniaxial em domínio inelástico

Para definir o comportamento plástico do concreto foi necessário fornecer ao software a relação de tensão *versus* deformação plástica.

A norma europeia EN1992-1-1:2004 propõe uma lei que descreve o comportamento do concreto submetido à compressão uniaxial, caracterizando seu comportamento até a deformação última (ϵ_{cu1}). Nesse sentido, a Figura 3.10 apresenta o diagrama sugerido pela norma, sendo o diagrama regido pela Equação (3.4).

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (3.4)$$

onde:

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \quad (3.5)$$

$$k = 1,05 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{cu1} = \frac{3,5}{1000} \quad (3.8)$$

E_{cm} é o módulo secante do concreto, definido conforme mostra a Figura 3.10.

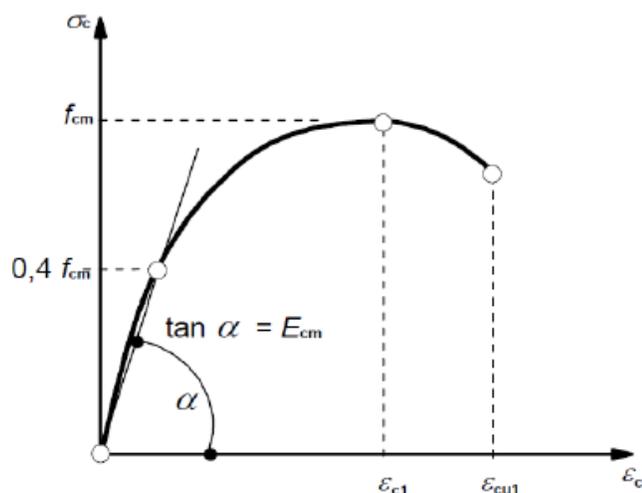


Figura 3.10 - Curva tensão-deformação representada pela norma europeia.

Fonte: EN1992-1-1:2004.

Com a análise da curva, nota-se que o valor limite da deformação do concreto é ε_{cu1} . No entanto, segundo estudos acadêmicos, é comum que os PMPCs sejam submetidos a aplicações de cargas que provoquem elevadas deformações por compressão na região próxima aos conectores. Nesse sentido, com o acionamento dos conectores, o concreto situado em torno dos parafusos supera a deformação correspondente a ε_{cu1} . Assim, a curva não consegue descrever o comportamento do concreto para níveis de deformação além daquela provocada na deformação última.

Van Gysel e Taerwe (1996) sugerem uma adaptação realizada na curva da norma europeia para deformações superiores à correspondente ao f_{cm} . O autor adapta a formulação proposta por Sargin (1969) e propõe uma curva semelhante à mostrada na Figura 3.11.

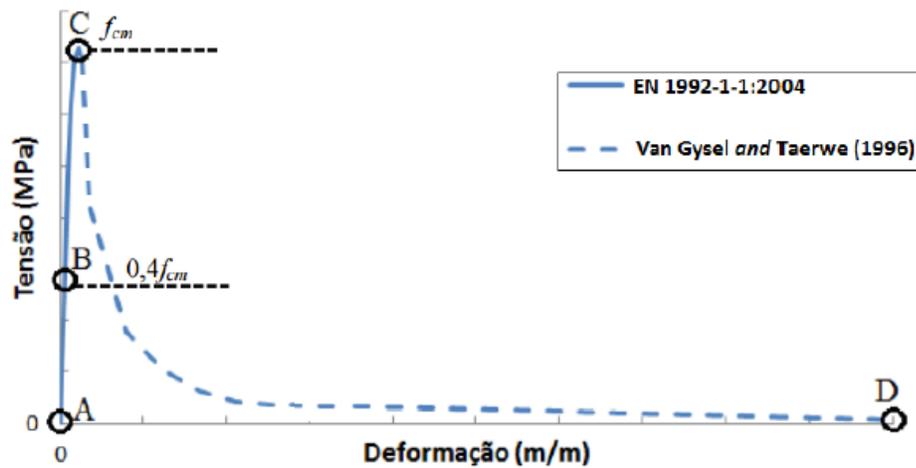


Figura 3.11 - Curva tensão-deformação da norma europeia, com complemento sugerido por Van Gysel e Taerwe (1996).

Fonte: Santos (2017)

Nota-se que a curva é composta por três trechos complementares, sendo cada um deles descrito por uma formulação distinta:

- 1º Trecho (A-B): Lei de Hooke

$$\sigma_c = E_{cm} \varepsilon_c \quad (3.9)$$

- 2º Trecho (B-C): EN1992-1-1:2004

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (3.10)$$

- 3º Trecho (C-D): Van Gysel e Taerwe (1996)

$$\frac{\sigma_c(\eta)}{f_{cm}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\eta-1}{\eta_2-1}\right)^2} \quad \eta > 1, \text{ onde } \eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (3.11)$$

Onde: η_2 é o parâmetro de ajuste do concreto.

Após análises realizando a variação de η_2 , o valor que garantiu melhor convergência do modelo foi o de 2,5.

O programa ABAQUS tem por característica lidar separadamente com o comportamento tensão *versus* deformação do concreto em compressão uniaxial fora da faixa elástica. Segundo a documentação do programa, os dados de deformação são fornecidos em termos de deformação inelástica ao invés de deformação plástica. Nesse sentido, a deformação inelástica compressiva é definida como a deformação total (ε) menos a deformação elástica (ε_{el}) correspondente ao material não danificado. Para isso, utilizou-se a expressão que segue:

$$\varepsilon^{in} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (3.12)$$

Utilizando a expressão acima para os pontos que compõem a curva de comportamento do concreto, chega-se à relação tensão *versus* deformação em domínio inelástico conforme solicitado na modelagem. A Figura 3.12 retrata a curva fornecida ao programa.

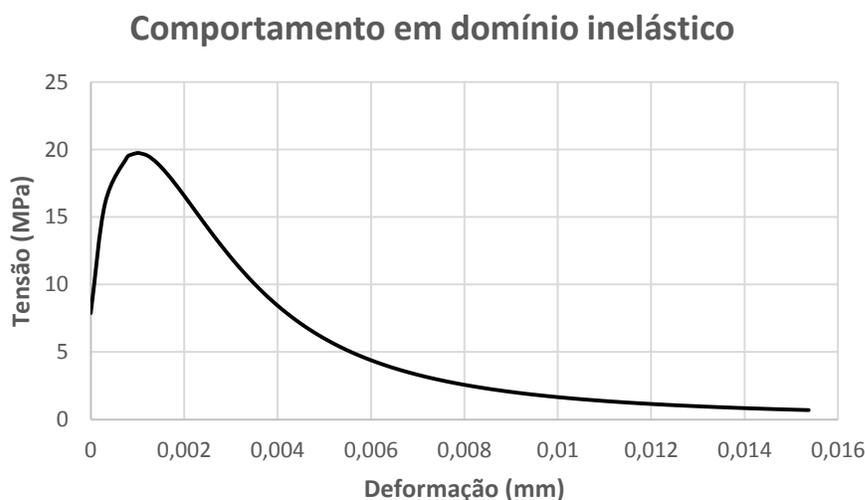


Figura 3.12 - Relação tensão *versus* deformação do concreto conforme fornecido ao ABAQUS.

3.5.1.3 Comportamento do concreto submetido à tração

Para a resposta uniaxial de tração do concreto, o programa sugere a curva representada na Figura 3.13. Pela curva tem-se que o comportamento do material é elástico linear até alcançar o valor da tensão de ruptura (f_{ctm}), a qual corresponde ao aparecimento de microfissuras no concreto. Após atingir esse pico, há uma queda de rigidez devido à formação de fissuras.

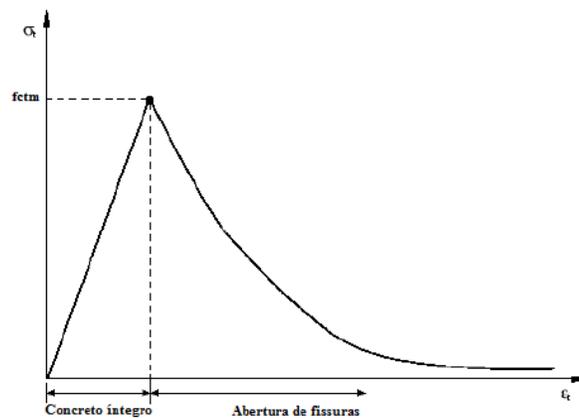


Figura 3.13 - Comportamento do concreto à tração.

Fonte: Aguiar (2015)

Para o cálculo da resistência à tração do concreto (f_{ctm}) foi utilizada a equação da norma europeia EN 1994-1-1:2004, a qual é apropriada para concretos de resistência igual ou inferior às classes C50 e C60. A Equação 3.13 apresenta a fórmula utilizada.

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad (3.13)$$

A avaliação da fase pós-pico pode ser representada pela relação tensão *versus* deformação pós-falha conforme descrito na Figura 3.13. No entanto, segundo SILVA (2013), em análises com pouca ou nenhuma armadura, essa abordagem pode gerar resultados sensíveis à malha. Por isso, o ABAQUS disponibiliza uma opção adicional para

definir o comportamento frágil do concreto, o critério da tensão *versus* deslocamento, em que o deslocamento é representado pela abertura de fissura.

Neste trabalho adotou-se o modelo não linear polinomial cúbico baseado nas equações matemáticas de Bézier, proposto por Kim e Nguyen (2010). Após avaliarem várias curvas tensão *versus* abertura de fissura na fase pós pico, os autores concluíram que este modelo é o que representa melhor o comportamento do concreto à tração.

A Equação (3.14) apresenta a formulação de cálculo para esse modelo e a Figura 3.14 ilustra a curva normalizada.

$$B(t) = \left[\frac{w}{w_c}(t), \frac{\sigma_t}{f_{ctm}}(t) \right] = (1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t)t^2 P_2 + t^3 P_3 \quad (3.14)$$

Onde:

$\frac{w}{w_c}(t), \frac{\sigma_t}{f_{ctm}}(t)$ são pares de coordenadas normalizados em função do tempo t ;

$0 \leq t \leq 1$;

P_0, P_1, P_2, P_3 são parâmetros de ajuste das coordenadas das curvas de Bézier;

w_c é o valor da abertura de fissura fictícia.

Para os parâmetros de ajuste foram adotados os valores sugeridos por Kim e Nguyen (2010), que são:

$$B(t) = \left[\frac{w}{w_c}(t) \right], \begin{Bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0,05 \\ 0,1 \\ 1,0 \end{Bmatrix}; \quad B(t) = \left[\frac{\sigma_t}{f_{ctm}}(t) \right], \begin{Bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1,0 \\ 0,3 \\ 0,2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

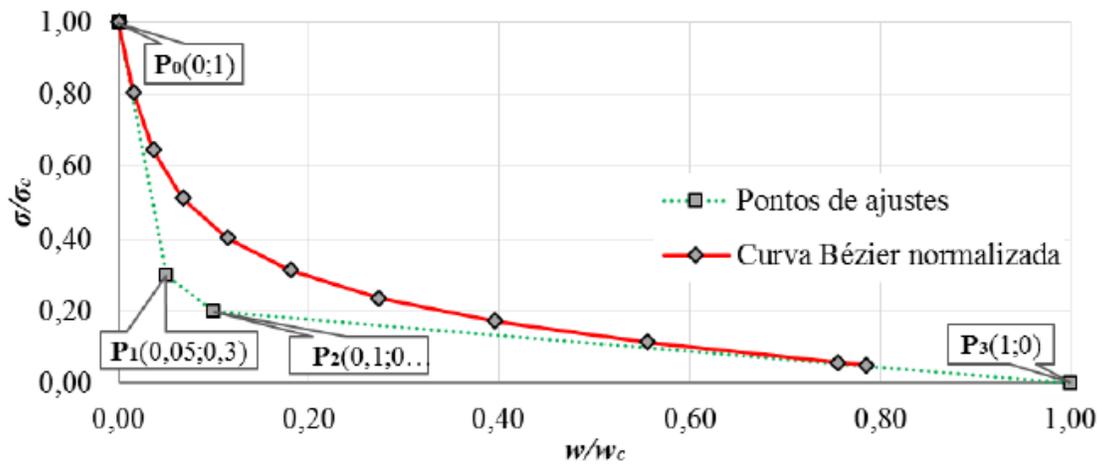


Figura 3.14 - Parâmetros utilizados por Kim (2010) para os ajustes das coordenadas das curvas.

Fonte: Santos (2017)

A construção do gráfico tensão *versus* abertura de fissuras a ser fornecido para o ABAQUS foi realizada a partir das equações que seguem abaixo.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_t}{f_{ctm}}(t) f_{ctm} \quad (3.16)$$

$$w = \frac{w}{w_c}(t) w_c \quad (3.17)$$

A melhor convergência do modelo se deu para uma abertura fictícia de fissura (w_c) igual a 6 mm. A Figura 3.15 ilustra os dados inseridos no programa para essa variável do concreto.

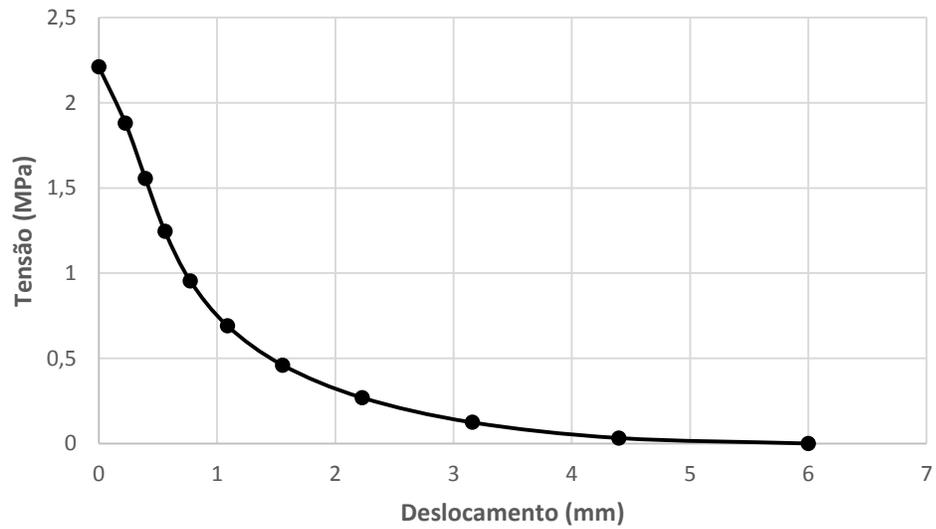


Figura 3.15 - Comportamento à tração do concreto.

3.5.1.4 Degradação da rigidez do concreto

Segundo Aguiar (2015), a degradação da rigidez do concreto ocorre quando se tem um descarregamento partindo de um ponto situado no ramo pós-crítico da curva tensão *versus* deformação, conforme ilustrado na Figura 3.16.

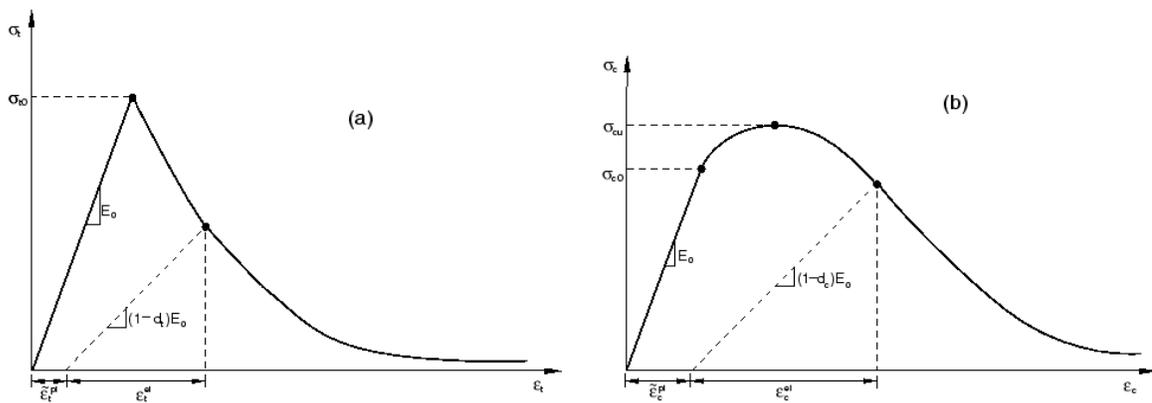


Figura 3.16 - Resposta do concreto ao carregamento uniaxial para tração (a) e compressão (b).

Fonte: SIMULIA (2014)

Com a avaliação das curvas tem-se que, devido ao dano sofrido pelo concreto, o período de descarregamento descreve no gráfico uma reta (tracejada) com inclinação inferior à do início do ciclo de carga. A nova inclinação representa a rigidez degradada do concreto, ou seja, a rigidez inicial que o material irá apresentar caso sofra um segundo ciclo de carga.

Conforme a documentação do ABAQUS, a lei que descreve o dano no concreto submetido à compressão e à tração é governada por duas variáveis: d_c (dano à compressão uniaxial) e d_t (dano à tração uniaxial). As variáveis assumem o valor de zero, para material não danificado, até o valor unitário, para material totalmente danificado. Onde:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \quad (3.18)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ctm}} \quad (3.19)$$

Por meio das equações apresentadas anteriormente foram definidas as curvas de dano à tração e compressão a serem inseridas no programa, apresentadas nas figuras 3.17 e 3.18.

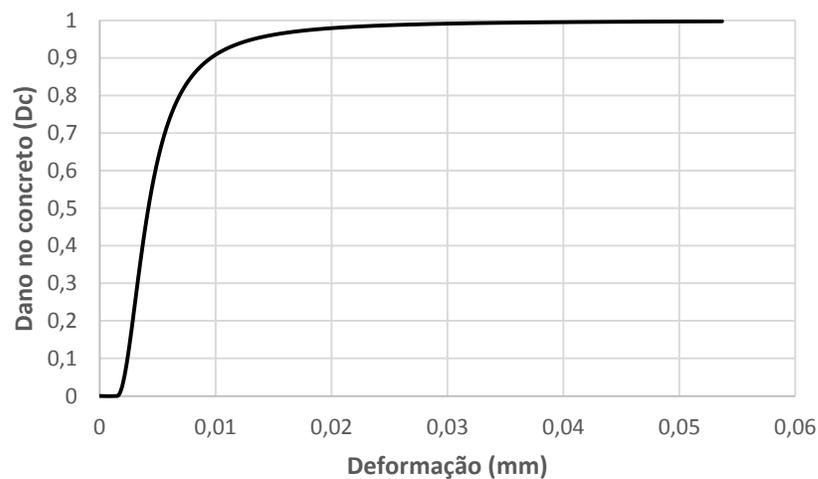


Figura 3.17 - Curva de dano do concreto à compressão.

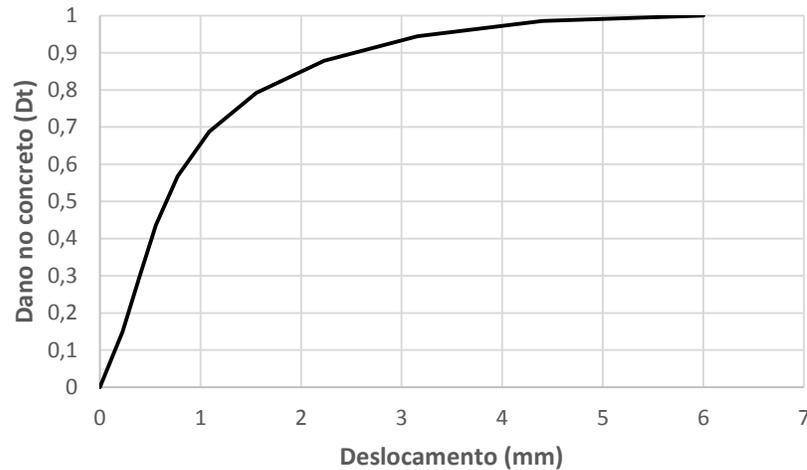


Figura 3.18 - Curva de dano do concreto à tração.

3.5.1.5 Parâmetros do modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity

Para descrever o modelo CPD, além dos parâmetros que descrevem o comportamento do concreto à compressão e tração, tem-se os parâmetros responsáveis por governar a expansão das equações de comportamento material do estado uniaxial para o estado multiaxial. Abaixo segue a descrição desses materiais.

Tabela 3.1 - Parâmetros numéricos do CDP.

Variáveis	
Simbologia	Descrição
ψ	Ângulo de dilatância
$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	Razão entre as resistências à compressão no estado biaxial e uniaxial
K	Razão entre o segundo invariante de tensão do meridiano de tração e o segundo invariante de tensão no meridiano de compressão
μ_{vis}	Viscosidade
ϵ	Excentricidade

Para os parâmetros ϵ , K e $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$, foram utilizados os valores recomendados na documentação do programa: $\epsilon = 0,1$, $K = \frac{2}{3}$ e $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} = 1,16$.

Kmiecik e Kaminski (2011) define o ângulo de dilatância (ψ) como o ângulo de atrito interno do concreto. Trabalhos como Kmiecik e Kaminski (2011), Cardoso (2014), Aguiar (2015), Santos (2017) e Prates (2017) adotaram para esse parâmetro valores de $\psi = 36^\circ$ ou $\psi = 40^\circ$. Nesse sentido, para o presente trabalho o valor que possibilitou melhor convergência foi o de $\psi = 36^\circ$.

O parâmetro de viscosidade (μ_{vis}) é definido pela documentação do ABAQUS como o tempo de relaxamento do sistema viscoplástico e possui como função contornar problemas relacionados à convergência de modelos com degradação de rigidez. O valor *default* do programa é igual a zero, enquanto que Aguiar (2015) e Cardoso (2014) definiram esse valor como 0,1. Prates (2017) e Santos (2017) optaram pelo valor de 0,00005. Assim, para esse trabalho o valor que apresentou melhor convergência foi o de $\mu_{vis} = 0,00005$.

3.5.2 Aço

Para descrever o comportamento do aço do tubo e dos parafusos foi necessário apenas fornecer a relação tensão *versus* deformação do material. Assim como no concreto, as deformações elásticas e plásticas são tratadas separadamente no programa ($\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$).

Para traçar a curva tensão *versus* deformação foram utilizados os valores de módulo de elasticidade (E_a), resistência ao escoamento (f_y) e resistência à ruptura (f_u). Foram tomadas como base as relações constitutivas utilizadas por Almeida (2012), Cardoso (2014) e Santos (2017), admitindo um comportamento elastoplástico com encruamento. Os gráficos utilizados, bem como os pontos tomados, seguem identificados abaixo.

Tabela 3.2 - Relações constitutivas utilizadas para o tubo de aço e parafusos.

Ponto	Aço tubo		Parafuso	
	σ	ϵ	σ	ϵ
A	0	0	0	0
B	f_y	ϵ_y	f_y	ϵ_y
C	$1,01f_y$	$10\epsilon_y$	$1,01f_y$	$10\epsilon_y$
D	f_u	$100\epsilon_y$	f_u	$25\epsilon_y$

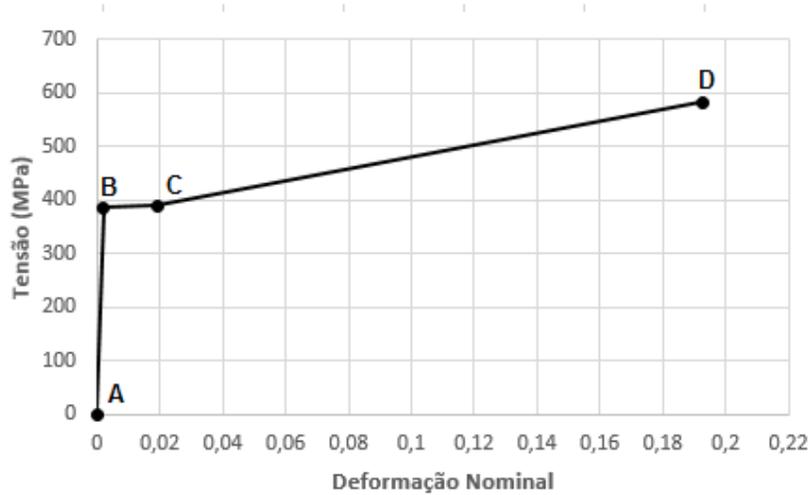


Figura 3.19 - Curva tensão versus deformação para o aço do tubo.

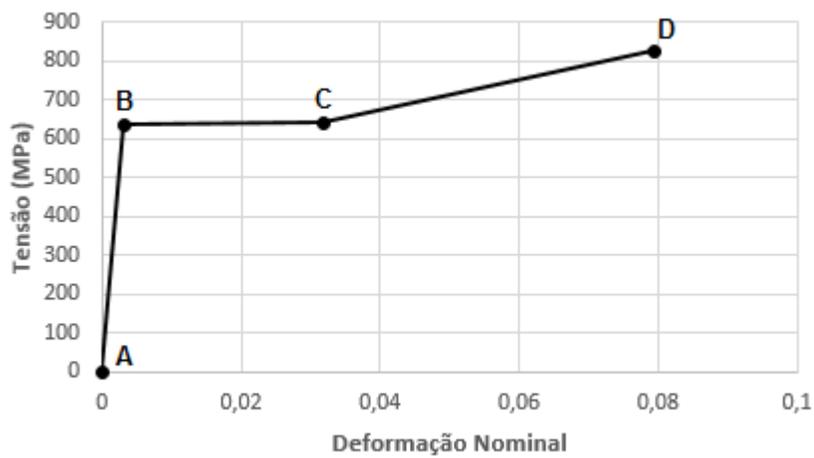


Figura 3.20 - Curva tensão versus deformação para o aço dos parafusos.

Para a entrada das relações tensão *versus* deformação dos materiais no programa ABAQUS foi necessário transformar as tensões e deformações de engenharia ou nominais em tensões verdadeiras, obtidas por meio das expressões que seguem.

$$\sigma_{ver} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{ver} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{ln}^{pl} = \varepsilon_{ver} - \frac{\sigma_{ver}}{E_{ver}} \quad (3.22)$$

Onde:

σ_{ver} é a tensão verdadeira;

σ_{nom} é a tensão nominal;

ε_{ver} é a deformação verdadeira;

ε_{nom} é a deformação nominal;

ε_{ln}^{pl} é a deformação logarítmica verdadeira;

E_{ver} é o módulo de elasticidade verdadeiro, obtido pela razão entre o primeiro valor não nulo de tensão verdadeira e o primeiro valor não nulo de deformação verdadeira.

3.6 Contatos

Na modelagem numérica, uma vez criadas as partes que constituem um modelo, foi necessário definir como ocorre a interação entre elas. No programa ABAQUS isso pode ser feito no módulo *Interactions* e a busca pelas superfícies dos elementos pode ser realizada de forma automática pelo algoritmo *Find Contact Pairs*.

Para definir os coeficientes de atrito estático (μ) foi avaliado na literatura os valores utilizados em pesquisas semelhantes. Os tópicos presentes na Tabela 3.3 apresentam as principais considerações para o valor de μ para a superfície de contato entre o concreto e o tubo.

Tabela 3.3 - Referência de atritos utilizados.

Fonte	Atritos utilizados		
	Tubo-Concreto	Conector-Concreto	Conector-Tubo
ABNT NBR 8800:2008	-	0,5	-
EN 1994-1-1:2004	-	0,5	-
Santos (2013)	-	nulo	-
Aguiar (2015)	nulo	0,5	nulo
Cardoso (2014)	nulo	0,1	nulo
Prates (2017)	nulo	nulo	nulo
Santos (2017)	0,17	0,7	nulo

Cardoso (2014) observou que apesar do tratamento interno realizado nos modelos experimentais, com pintura dos tubos e aplicação de cera desmoldante, a transferência de carga por atrito se apresentou bastante significativa. Para a interface tubo-concreto, apesar de utilizado desmoldante nos protótipos experimentais, foram avaliados os valores de coeficiente de atrito estático (μ) iguais a 0,17, 0,18, 0,20 e 0,25, sendo que o valor que garantiu melhor convergência foi o de $\mu = 0,2$.

Para considerar o atrito entre o fuste do parafuso e o núcleo de concreto foi utilizado um coeficiente de atrito estático $\mu = 0,62$. Tal valor é resultante de uma média ponderada entre o comprimento do fuste liso e o fuste rosqueado, considerando como pesos os valores de atrito. Para a parte lisa foi tomado $\mu = 0,50$ considerando a especificação da norma ABNT NBR 8800:2008 para conectores de cisalhamento e para a parte rosqueada considerou o atrito de $\mu = 1$.

O atrito estático (μ) utilizado para a interface parafuso-tubo foi nulo, visto que a consideração de valores para essa variável não garantiu aproximação numérica e experimental (Figura 3.21).

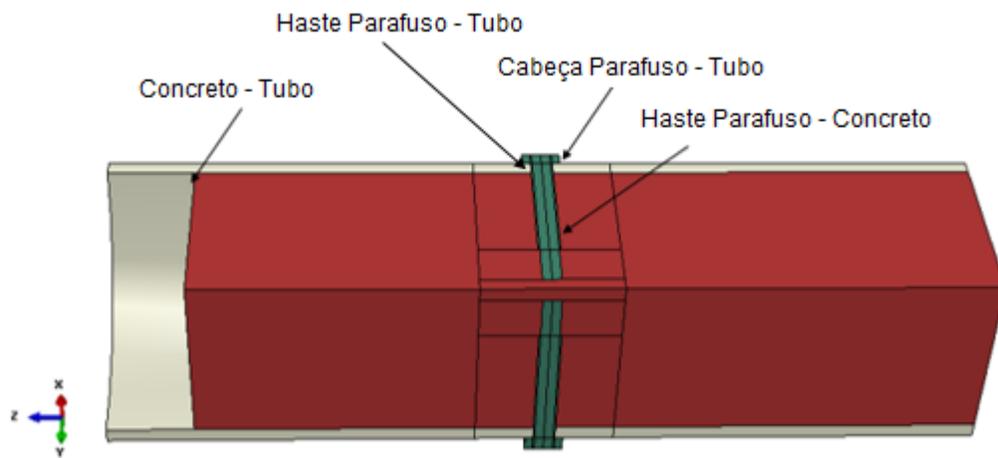


Figura 3.21 - Identificação dos tipos de contatos existentes.

4 RESULTADOS E ESTUDO NUMÉRICO

Neste capítulo será realizada a análise dos resultados obtidos, comparando o comportamento numérico com o experimental. Além disso, será apresentado os parâmetros utilizados para variar a esbeltez do tubo de aço.

4.1 Comparação dos resultados

Os modelos experimentais utilizados como referência para calibração numérica foram nomeados com a siglas C25A e C25B, seguido dos identificadores da espessura do tubo (8,2 mm), quantidade de conectores (4P), diâmetro do conector(1/2”), comprimento do conector (4”) e resistência do concreto (19,7 MPa), respectivamente. O resultado numérico obtido é apresentado na Figura 4.1.

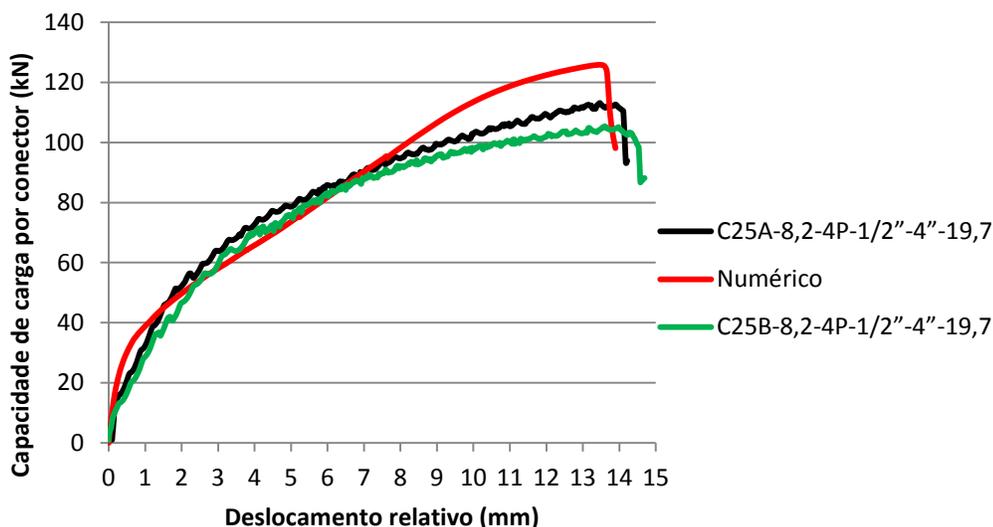


Figura 4.1 - Comparação modelo numérico e modelos experimentais.

Pode-se notar que para a região de deslocamento entre 2 mm e 8 mm a representação numérica foi próxima à experimental, ocorrendo um aumento de rigidez para o comportamento restante até atingir a queda de resistência. Além disso, verifica-se

que os conectores são classificados como dúcteis, já que atingiram deslocamento superior a 6 mm, conforme descreve a norma EN 1994-1-1:2004 (Figura 4.2).

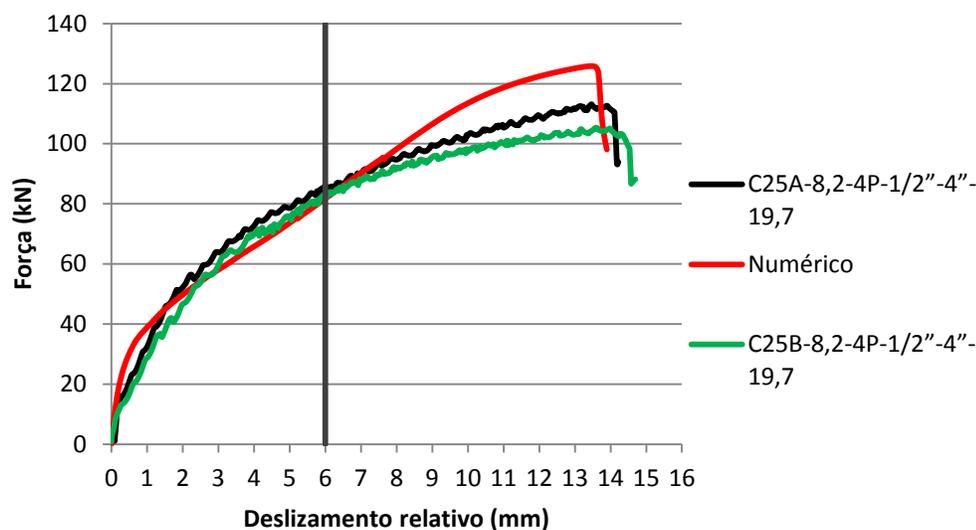


Figura 4.2 - Identificação do deslocamento de 6mm.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de força máxima do modelo numérico e o experimental, bem como a razão entre elas.

Tabela 4.1 - Relação entre força máxima experimental ($P_{máx,exp}$) e numérica (P_{num}).

$P_{máx,exp}$ (kN)	P_{num} (kN)	$P_{num}/P_{máx,exp}$
113,12	125,84	1,11

Pela razão entre as forças nota-se boa aproximação entre o modelo numérico e o experimental.

A Figura 4.3 apresenta a deformação gerada na estrutura ao final da análise. Nota-se que o modelo numérico apresentou perda de rigidez total à compressão no núcleo de concreto em torno dos parafusos. Foi observado que, à medida que os conectores foram acionados os parafusos começaram a girar, promovendo o esmagamento do concreto.

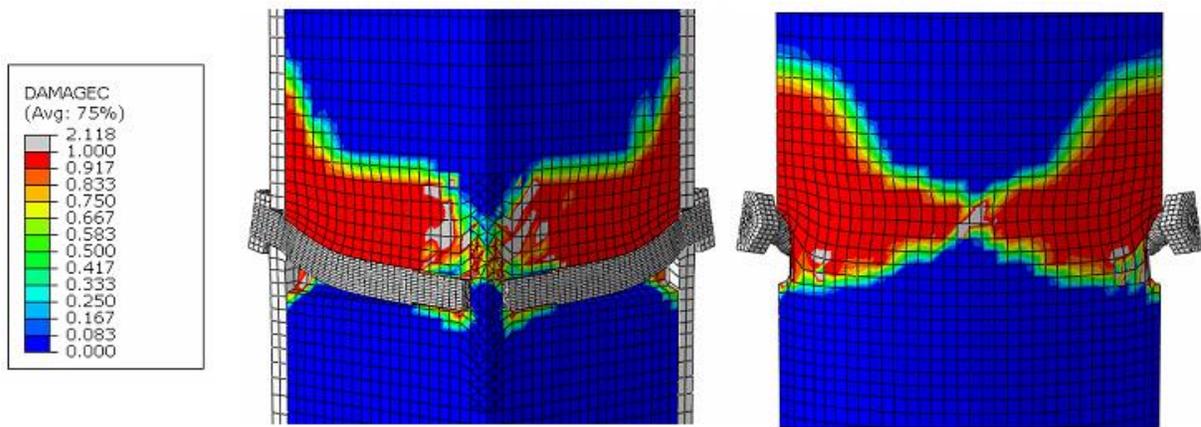


Figura 4.3 – Dano à compressão gerado após a análise.

A Figura 4.4 representa o modelo numérico com um corte na altura de 250 mm, exatamente ao meio do protótipo, e ilustra o dano a compressão gerado no núcleo de concreto. Nota-se que o esmagamento do concreto foi mais acentuado nas regiões próximas aos conectores.

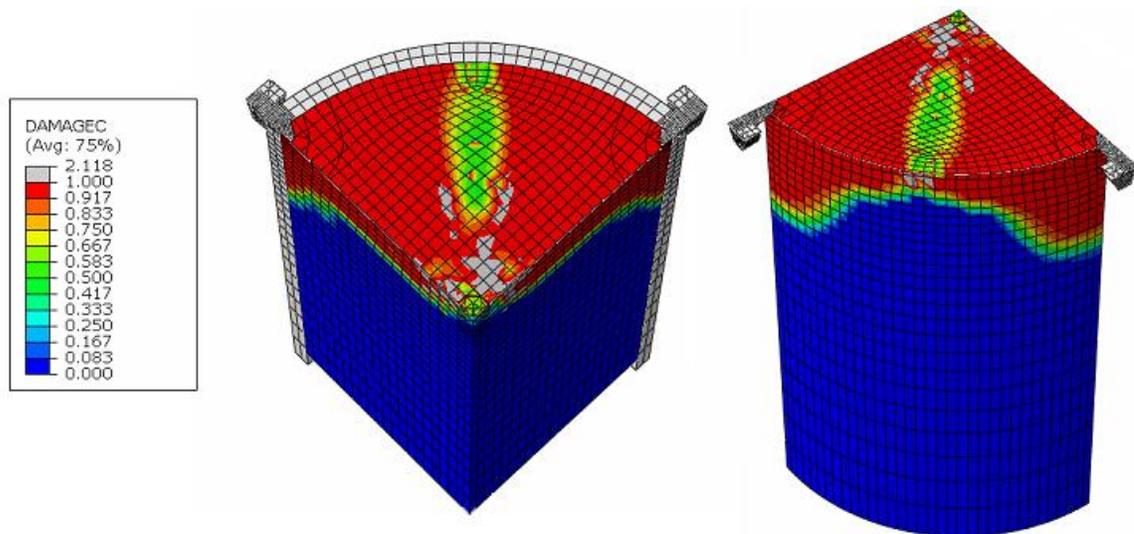


Figura 4.4 - Dano à compressão para a altura de 250 mm.

A Figura 4.5 apresenta a variação das tensões de *von Mises* para o parafuso. A distribuição de tensões foi limitada ao valor da resistência ao escoamento do parafuso. Nas regiões em cinza o parafuso atingiu tensões equivalentes superiores ao valor da

resistência ao escoamento (f_y). Nota-se que em duas regiões foi atingido o valor de tensão superior ao escoamento, na região do fuste próximo à cabeça do conector e em uma pequena região na parte superior da cabeça do parafuso. Tais regiões podem ter apresentado maior valor de tensão devido ao maior contato com o tubo de aço ao longo das solicitações.

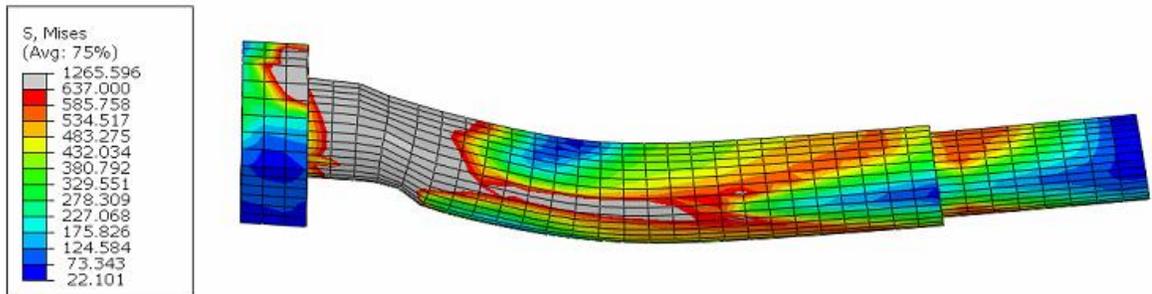


Figura 4.5 - Variação das tensões de *von Mises* limitadas ao valor da tensão de escoamento do parafuso.

Assim como o conector, para a análise de tensões no tubo também foi limitada a distribuição de tensões ao valor da sua resistência de escoamento. Dessa forma, é possível notar que nas regiões próximas aos conectores houve o alcance de tensões acima à de escoamento do tubo (Figura 4.6).

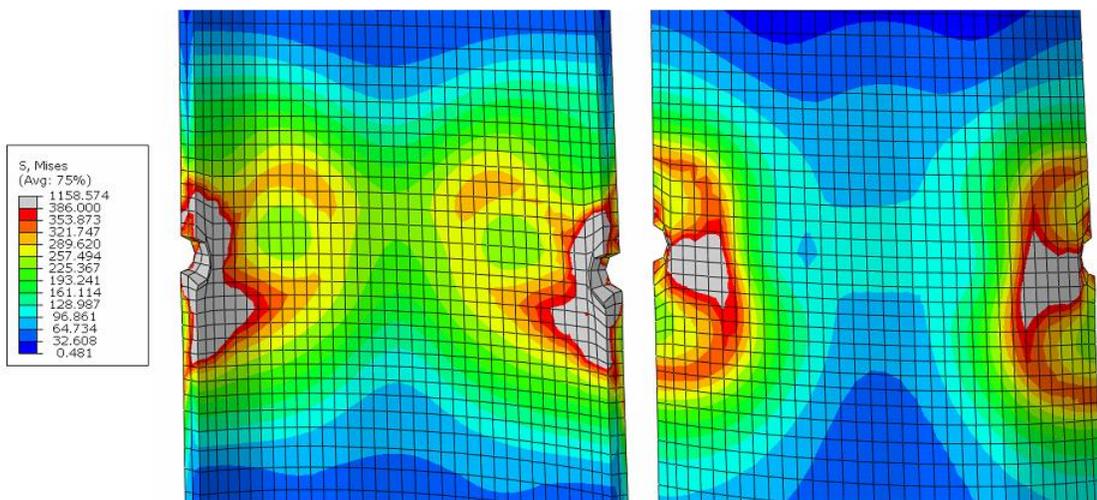


Figura 4.6 - Variação das tensões de *Von Mises* limitadas ao valor da tensão de escoamento do tubo.

Com respeito ao modo de falha, a Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos das prescrições analíticas da norma ABNT NBR 16239:2013, de modo que o menor valor determina o modo de falha dominante para o protótipo.

Tabela 4.2 - Avaliação teórica da resistência do conector de cisalhamento.

Verificação do concreto (kN)		Cisalhamento do parafuso (kN)	Esmagamento da parede do tubo (kN)	$V_{Rd,teo}$ (kN)
$l_b d_b \sigma_{c,Rd}$	$5d_b^2 \sigma_{c,Rd}$	$0,4\pi \frac{d_b^2 f_{ub}}{4 \gamma_{a2}}$	$2,4d_b t \frac{f_u}{\gamma_{a2}}$	
23,91	16,38	42,46	146,60	16,38

Avaliando o menor valor resultante tem-se que o estado limite dominante para o protótipo é governado pelo esmagamento do concreto na região de contato com o parafuso, assim como verificado numericamente. Vale ressaltar que a avaliação teórica sugerida pela norma não leva em conta o confinamento do concreto.

4.2 Variação da esbeltez da seção do tubo

A partir do modelo numérico descrito anteriormente, foram tomados dois valores distintos para a espessura do tubo (t), um inferior à utilizada experimentalmente e outro valor superior. A Tabela 4.3 descreve os parâmetros utilizados em cada modelo.

Tabela 4.3 - Modelos numéricos analisados a partir da variação de t.

Modelos	D (mm)	t (mm)	d_b (mm)	f_{cm} (MPa)
M1-5.2	219	5,2	12,8	19,7
M2-8.2	219	8,2	12,8	19,7
M3-11.2	219	11,2	12,8	19,7

Onde:

D é o diâmetro do tubo;

d_b é o diâmetro do parafuso;

f_{cm} é a resistência média do concreto.

A Figura 4.7 ilustra a variação da espessura do tudo de aço utilizada para realizar a verificação do comportamento do conector.

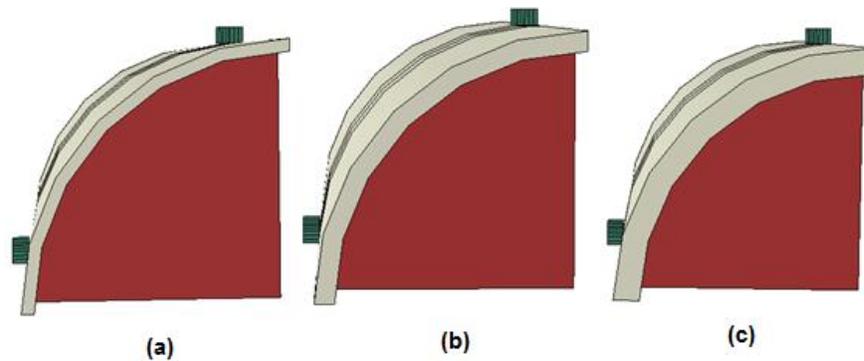


Figura 4.7 - (a) modelo com espessura de 5,2 mm; (b) modelo numérico representando o protótipo experimental; (c) modelo com espessura de 11,2 mm.

Após realizadas as análises foram obtidas as relações que seguem na Figura 4.8.

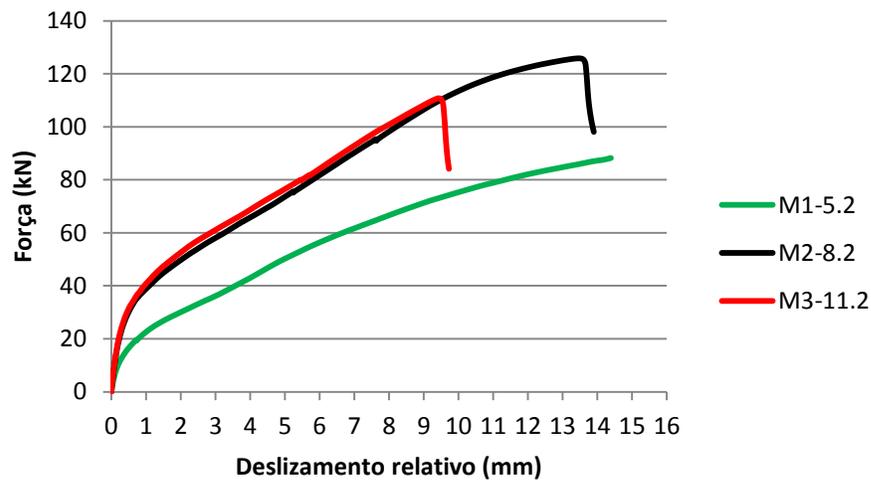


Figura 4.8 – Resultados obtidos por meio da avaliação das espessuras.

Pela figura é possível notar que à medida em que se aumenta a espessura do tubo, a força por conector tende a aumentar. Tal comportamento pode apresentar como hipótese o ganho de resistência do concreto devido ao aumento do confinamento.

Nota-se que para o modelo M3-11.2, de maior espessura, a queda da resistência ocorreu com deslocamento inferior quando comparado ao modelo M2-8.2. Durante a avaliação numérica notou-se que, com o aumento da espessura, houve maior resistência à deformação do tubo quando solicitado pelo parafuso. Como consequência, houve maior deformação do concreto devido ao aumento da rigidez do conjunto tubo-parafuso, levando a um deslocamento de 10 mm com posterior esmagamento. Tem-se que esse mecanismo pode ter sido intensificado devido à extensão do comprimento do conector, já que quanto maior sua extensão, maior a rigidez do conjunto. Tomando essa formulação para o modelo M1-5.2 tem-se que a capacidade resistente da conexão diminui em relação aos outros modelos, assim como ocorreu numericamente.

Com respeito às forças máximas apresentadas pelos modelos, a Tabela 4.4 fornece os valores obtidos numericamente (P_{num}), bem como a comparação com o valor teórico obtido pela norma ABNT NBR 16239:2013 ($V_{Rd,teo}$).

Tabela 4.4 - Resistência máxima apresentada após análise.

Modelos	t (mm)	P_{num} (kN)	$P_{num}/V_{Rd,teo}$ (kN)
M1-5.2	5,2	88,22	5,38
M2-8.2	8,2	125,84	7,68
M3-11.2	11,2	110,80	6,76

Avaliando os resultados da comparação dos valores obtidos numericamente com o valor teórico sugerido pela ABNT NBR 16239:2013, nota-se que os valores numéricos apresentam uma variação de 5,38 a 7,68 vezes maior que o teórico.

5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados numéricos para a representação dos protótipos experimentais mostra que o modelo atingiu boa aproximação, tornando válida a sua utilização. Apesar de não representar o comportamento experimental com o ganho de rigidez após 8 mm de deslocamento, o modelo numérico ainda é aplicável tendo em vista que na prática da engenharia não é comum que estruturas mistas alcancem deslocamentos superiores a 8 mm sem entrarem em situação de colapso.

As deformações apresentadas ao fim das análises confirmaram que o modo de falha da estrutura é representado pelo esmagamento do concreto, bem como as regiões de maior deformação e maior concentração de tensões estão localizadas próximas aos conectores de cisalhamento.

Pode-se observar que os resultados de resistência obtidos do modelo experimental, bem como dos modelos numéricos foram acima dos valores obtidos pelas expressões de resistência apresentadas na ABNT NBR 16239:2013. Dessa forma, verifica-se que as equações estão a favor da segurança e podem ser ajustadas de modo a fornecer um valor de resistência mais próximo do experimental e numérico.

A variação da esbeltez do perfil tubular influenciou na resistência da conexão do protótipo. Verificou-se que com o aumento da espessura do tubo os conectores de cisalhamento aumentaram sua capacidade resistente, considerando o aumento de 5,2 para 8,2 mm na espessura. Entretanto, para o modelo de 11,2 mm, apesar do ganho de resistência, superior quando comparado ao modelo de 8,2 mm até os 10 mm de deslocamento, sua capacidade resistente final foi inferior a 125, 84 kN. Assim, tem-se que o aumento da espessura do tubo produziu maior rigidez na conexão, antecipando o mecanismo de esmagamento do concreto e a ocorrência do modo de falha do protótipo. Dessa forma, vê-se que na prática há a necessidade de compatibilização do conjunto de forma que um mecanismo de falha não se sobressaia aos demais e isso diminua a resistência do PMPC. A partir disso, constata-se a necessidade do desenvolvimento de maiores estudos e análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, O. P. **Estudo do Comportamento de Conectores Crestbond em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2015.

ALMEIDA, P. H. F. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Transferência de Cargas em Pilares Mistos Tubulares Preenchidos com Concreto**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012.

ARAUJO, C. M. S. **Estudo da Transferência de Forças na Ligação entre Pilares Mistos Preenchidos e Vigas**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16239:2013, Projeto de Estrutura de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edificações com Perfis Tubulares**. Rio de Janeiro, 85p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8800:2008, Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 237p.

CBCA. Centro Brasileiro da Construção em Aço. **Manual de Construção em Aço: Estruturas Mistas – Vol. 1. 2. ed.** Rio de Janeiro, 2012. 68 p. Disponível em: <<http://www.cbcaacobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php>> Acesso em: 15 fev. 2016.

CALDAS, Rodrigo Barreto; **Análise Numérica de Pilares Mistos Aço-Concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 218p. 2004.

CARDOSO, H. S. **Estudo Teórico-Experimental de Parafusos utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Tubulares Preenchidos com Concreto**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

DE NARDIN, S. **Estudo Teórico-Experimental de Pilares Mistos Compostos por Tubos de Aço Preenchidos com Concreto de Alta Resistência**. 1999. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1999.

DE NARDIN, S.; SOUZA, A. S. C.; PEREIRA, M. F.; SERAFIM, J. A. **Análise Comparativa de Soluções de Pilares para Galpões: Pilares de Aço, Pré-Moldados e Mistos de Aço e Concreto**. In: CONSTRUMETAL, 5., 2012, São Paulo.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de Aço: Conceitos, Técnicas e Linguagem**. 7ª Edição. São Paulo: Editora Ziguarte, Julho de 2009.

EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: **Design of Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings**. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004.

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.

FAKURY, R. H.; REQUENA, J. A. V.; BATISTA, E. M.; FREITAS, A. M. S.; PIMENTA, R. J. P.; ARAÚJO, A. H. M. **Sobre a Recente Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto com Perfis Tubulares.** In: CONSTRUMETAL, 5., 2012, São Paulo.

GENIKOMSOU, Aikaterini S.; POLAK, Maria Anna. **Finite Element and Analysis of Punching Shear of Concrete Slabs using Damaged Plasticity in ABAQUS.** Engineering Structures (2015) 238-48. 11p. 2014.

KIM, S. E.; NGUYEN, H. T. **Finite Element Modeling and analysis of a hybrid steel-PSC beam connection.** Engineering Structures 32 (2010).

NETO, J. G. R. **Análise Teórico-Experimental do Uso de Parafuso Estrutural como Conector de Cisalhamento em Pilar Misto Composto de Perfil Tubular Preenchido com Concreto.** Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

OLIVEIRA, W. L. A. (2008). **Análise Teórico-Experimental de Pilares Mistos Preenchidos de Seção Circular.** Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

P. KMIECIK, M. KAMINSKI. **Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration.** Archives Of Civil And Mechanical Engineering. 14p. 2011.

PRATES, J. A. **Conectores Parafusos Instalados com Rebite para Transferência de Carga em Pilares Mistos com Perfis Formados a Frio Preenchidos com Concreto.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

RICHART, F. E.; BRANDTZAEG, A.; BROWN, R. L. **A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses**. 1928. Bulletin No. 185, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Illinois, USA, November, 104 p.

SANTOS, L. R. **Análise Numérica de Conectores Parafusos em Pilares Mistos Circulares Preenchidos com Concreto**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SARGIN, M.; HANDA, V. **A General Formulation for the Stress-Strain Properties of Concrete**. Report Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, (1969).

SILVA, R. D. **Estudo da Aderência Aço-concreto em Pilares Mistos Preenchidos**. 2006.154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

SIMÕES, Renato (2008). **Efeito do confinamento em pilares mistos curtos de aço e concreto**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas - São Paulo. 2008.

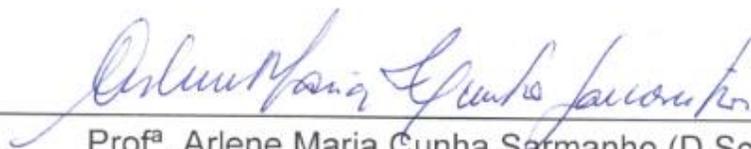
SIMULIA (2014). **Software Abaqus 6.14**. Dassault Systèmes, USA.

STAROSSEK, U.; FALAH, N. **The Interaction of Steel Tube and Concrete Core in Concrete Filled Steel Tube Columns**. 12th International Symposium on Tubular Structures, 84; p.75-84, Shanghai, China, 2009.

VAN GYSEL, A.; TAERWE, L. **Analytical Formulation of the Complete Stress-Strain Curve for High Strength Concrete**. Material and Structures, Vol. 29, November 1996. 5p. 1996.

XAVIER, E. M. **Análise Teórico-Experimental do Uso de Parafuso Estrutural como Conector de Cisalhamento em Pilar Misto Composto de Perfil Tubular Retangular Preenchido com Concreto.** Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

Certifico que o aluno(a): **André de Oliveira Faria**, autor(a) do trabalho de conclusão de curso intitulado **“Análise Numérica de Conectores de Cisalhamento tipo Parafuso em Pilares Mistos de Seção Circular Preenchida com Concreto”**, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Prof^a. Arlene Maria Cunha Sarmanho (D.Sc.) – UFOP

Orientador(a)

Ouro Preto, 28 de Janeiro de 2019.