



ANÁLISE NUMÉRICA DE PILARES MISTOS DE AÇO E CONCRETO TUBULARES CIRCULARES COM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO PURA

Harley D. Gomes

João Victor F. Dias

Adenilcia Fernanda G. Calenzani

harley.gomes@gmail.com

joaovfdias@gmail.com

afcalenzani@gmail.com

Centro Tecnológico – UFES, Departamento de Engenharia Civil

Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, CEP 29075-910, Vitória – ES

Resumo. Pilares mistos de aço e concreto são muito utilizados em países da Europa, América e Ásia, mas no Brasil ainda possuem uso restrito. As normas NBR 8800:2008 e NBR 16239:2013 trazem prescrições para o dimensionamento desses pilares, reportando-se à NBR 6118 em sua última revisão quanto a questões relativas à resistência do concreto estrutural. A versão de 2014 da NBR 6118 incorporou o uso de concretos de alto desempenho sendo assim, estudos são necessários para avaliar se as prescrições normativas permanecem válidas para pilares mistos preenchidos com concretos de maior resistência. Este trabalho estuda o comportamento estrutural de pilares mistos tubulares circulares preenchidos com concreto de alto desempenho submetidos à compressão pura. Para isso, análises numéricas foram realizadas por meio do método dos elementos finitos visando à obtenção do esforço resistente à compressão destes pilares e o modelo numérico foi devidamente aferido com resultados experimentais da literatura. A influência de parâmetros tais como a resistência do concreto, dimensões da seção transversal e a esbeltez global do pilar foi avaliada e os resultados obtidos nas simulações computacionais foram então confrontados com os previstos pelas normas brasileira, americana e europeia. Conclusões a respeito da aplicabilidade das normas de dimensionamento foram discutidas.

Palavras-chave: Pilares Mistos de Aço e Concreto Tubulares Circulares, Análise Numérica, Concreto de Alto Desempenho, Esforço Resistente à Compressão.

1 INTRODUÇÃO

O uso de estruturas mistas, devido a diversas vantagens como proteção contra corrosão e incêndio, aumento da capacidade resistente e rapidez de execução, tem crescido consideravelmente nos últimos anos. Os pilares mistos de aço e concreto, formados pelo revestimento ou pelo preenchimento de uma seção de aço por concreto, têm sido extensamente utilizados em edifícios comerciais, residenciais, industriais, entre outras aplicações, especialmente nos continentes europeu, americano e asiático. O avanço tecnológico na área de materiais proporcionou o desenvolvimento de concretos de maior resistência mecânica à compressão, conhecidos como concreto de alto desempenho. Desta forma, a construção de pilares mistos com concreto de alto desempenho no lugar do concreto de resistência convencional tornou-se uma solução estrutural promissora.

Pilares mistos de aço e concreto fabricados com concretos de resistência convencional, isto é, com resistência característica à compressão de 20 a 50 MPa, são tratados pelas principais normas de dimensionamento entretanto, os pilares mistos de aço e concreto que utilizam concretos de maior resistência (até 90 MPa) não são abordados nas prescrições normativas de dimensionamento. Portanto, esse trabalho visa verificar se as formulações propostas para pilares mistos de aço e concreto das normas EN 1994-1-1:2004, ANSI/AISC 360-05:2010 e NBR 8800:2008 se mantêm válidas para pilares mistos com concreto de alto desempenho, uma vez que as propriedades mecânicas do concreto são sensivelmente influenciadas pelo aumento da sua resistência.

Giakomelis e Lam (2004) estudaram o comportamento de pilares mistos compostos por tubos de aço circulares preenchidos com concretos de diferentes classes de resistências submetidos a carregamento axial, tendo examinado a influência da espessura da parede do tubo, da aderência entre o concreto e o tubo de aço e do confinamento do concreto. Após experimentos em 15 protótipos preenchidos com concretos de f_{ck} iguais a 30, 60 e 100 MPa, com tubos que possuíam relação D/t entre 22,9 a 30,5, sendo que, todos os pilares possuíam 114 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, os pesquisadores fizeram comparações entre os resultados obtidos e os resultados previstos pelas normas EN 1994-1-1:2004, ACI 318-95, AS3600 e AS4100. Chegando à conclusão de que todas as três normas preveem valores menores que os medidos nos ensaios. Porém, o EN 1994-1-1:2004 possui a melhor estimativa tanto para os pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de resistência normal quanto para os preenchidos com concreto de alto desempenho.

Oliveira (2008) estudou o comportamento dos pilares mistos preenchidos de seção circular. Levando em conta a influência da resistência à compressão do concreto (f_{ck}), da esbeltez do pilar (L/D), da espessura do tubo de aço (t) e da forma de introdução do carregamento, se no núcleo de concreto ou na seção mista do pilar. Foi feita uma análise experimental em 64 pilares mistos preenchidos submetidos à força de compressão centrada e uma comparação entre os resultados experimentais da resistência à compressão com os obtidos por procedimentos normativos, tais como o da EN 1994-1-1:2004, ANSI/AISC:2005, CAN/CSA:2001 e o Projeto de Revisão da Norma Brasileira NBR 8800:2008. Também realizou-se análise numérica com o auxílio do software Diana 9.2.

Após comparação entre os valores experimentais e os resultados previstos pelas equações de dimensionamento normativas, Oliveira (2008) constatou que os valores previstos pela EN 1994-1-1:2004 e pela CAN/CSA S16-01:2001 só se apresentam mais próximos dos experimentais quando a esbeltez é maior, $L/D = 10$. De maneira geral, a EN 1994-1-1:2004 e a CAN/CSA S16-01:2001 superestimam a capacidade resistente à compressão dos pilares;

isto pode decorrer do fato das formulações levarem em conta o efeito de confinamento do concreto, superestimando este fenômeno. Caso seja levado em consideração o dimensionamento pela EN 1994-1-1:2004 sem as parcelas devidas ao confinamento (η_c e η_a), os valores ficavam a favor da segurança e mais próximos, em média, dos experimentais. Quanto às previsões da NBR 8800:2008 e do ANSI/AISC:2005, estas normas apresentaram os resultados mais conservativos, também foi possível notar uma aproximação entre os valores previstos por essas normas e os valores experimentais, à medida que se aumenta a relação L/D .

A maioria das pesquisas trata de pilares mistos curtos com concreto de alto desempenho, de maneira que um estudo mais aprofundado deve ser realizado levando em consideração pilares esbeltos. Portolés *et al.* (2011) ensaiaram 37 pilares tubulares circulares com comprimentos de 2,135 a 3,135 metros submetidos à flexo-compressão e constataram que, para valores altos de excentricidade, o aumento da resistência do concreto não conduz a um aumento significativo da resistência última da seção mista (comparando concretos de 70 e 90 MPa). Mesmo assim, o seu uso se justifica, uma vez que o comportamento dúctil pode ser alcançado. Observou-se que as previsões da EN 1994-1-1:2004 eram bastante realistas, mas parte dos resultados se mostrou contra a segurança, mesmo a diferença sendo pequena.

Dundu (2012) realizou ensaios em 24 pilares mistos tubulares circulares sujeitos à compressão pura, separados em duas séries, na primeira (série 1) utilizou concretos com resistência característica à compressão de 40,3 MPa e aço com tensão de escoamento entre 345 e 361 MPa, já na segunda (série 2), foram utilizados concretos com 30,9 MPa de resistência característica à compressão e aços com 392 e 488 MPa de tensão de escoamento. Nestes experimentos variou-se os diâmetros e comprimentos dos protótipos. Dundu (2012) observou que os pilares mistos tubulares da série 1 apresentaram falha mais pronunciada por flambagem global do que por flambagem local, este primeiro modo de falha ocorreu devido a elevada esbelteza global. Já os pilares curtos da série 2 falharam devido ao esmagamento do núcleo de concreto seguido de escoamento do tubo de aço.

Dundu (2012) também comparou os resultados experimentais com os previstos por duas normas de dimensionamento, sendo estas a SANS 10162-1 (norma sul-africana) e EN 1994-1-1:2004. Na média, os resultados dos pilares da série 1 previstos pela SANS 10162-1 foi de 8,4% e os previstos pelo EN 1994-1-1:2004 foram 13,6% mais conservadores do que os experimentais. Já os resultados previstos pela SANS 10162-1 e EN 1994-1-1:2004 foram 10,1% e 20,2% respectivamente mais conservadores do que os experimentais da série 2.

No presente estudo, modelos numéricos foram elaborados para a simulação de pilares mistos tubulares circulares de aço preenchidos com concretos de resistência normal e de alto desempenho. Realizou-se uma extensa análise paramétrica a fim de avaliar a influência de parâmetros geométricos e de material no esforço resistente à compressão desses pilares. Foram analisados pilares submetidos à compressão pura e os resultados numéricos foram confrontados com os resultados prescritos pelas normas europeia, americana e brasileira.

2 MODELAGEM NUMÉRICA

Os modelos numéricos do presente estudo foram elaborados no programa computacional Ansys 14 por meio da linguagem de programação paramétrica Ansys Parametric Design Language (APDL). Após a implementação dos modelos, estes foram validados com base em ensaio experimental extraído da literatura.

2.1 Elementos utilizados

Para representar o perfil de aço tubular foi utilizado o elemento de casca Shell181, que é adequado para a análise de estruturas de cascas de espessuras finas a moderadas, possui quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó: translações e rotações nas direções x , y , e z . Para representar o material concreto foi utilizado o elemento Solid65, pois este é usado para modelagem de sólidos em três dimensões podendo ser utilizado barras de armadura, conforme é empregado no concreto armado. Este elemento é tridimensional formado por oito nós com três graus de liberdade em cada nó: translações nodais nas direções dos eixos coordenados x , y , e z . Destaca-se pela capacidade de simular tanto a fissuração do concreto em regiões tracionadas, quanto o esmagamento em áreas comprimidas. O aspecto mais importante deste elemento é o tratamento não linear das propriedades dos materiais, pois considera a fissuração (em até três direções ortogonais), o esmagamento, a plasticidade e a fluência do concreto.

Na modelagem no Ansys 14.0 (2011), criaram-se duas malhas em elementos finitos: uma sólida com elementos de concreto para formar o núcleo do pilar misto e outra na forma de casca com elementos de aço do perfil tubular externo, figura 1. O Ansys 14.0 (2011) possui duas alternativas para a geração da malha de elementos finitos, livre ou mapeada. A malha livre é gerada automaticamente pelo programa enquanto a malha mapeada é definida pelo usuário, que estabelece a forma e o tamanho dos elementos. Optou-se pela geração mapeada da malha de elementos finitos.

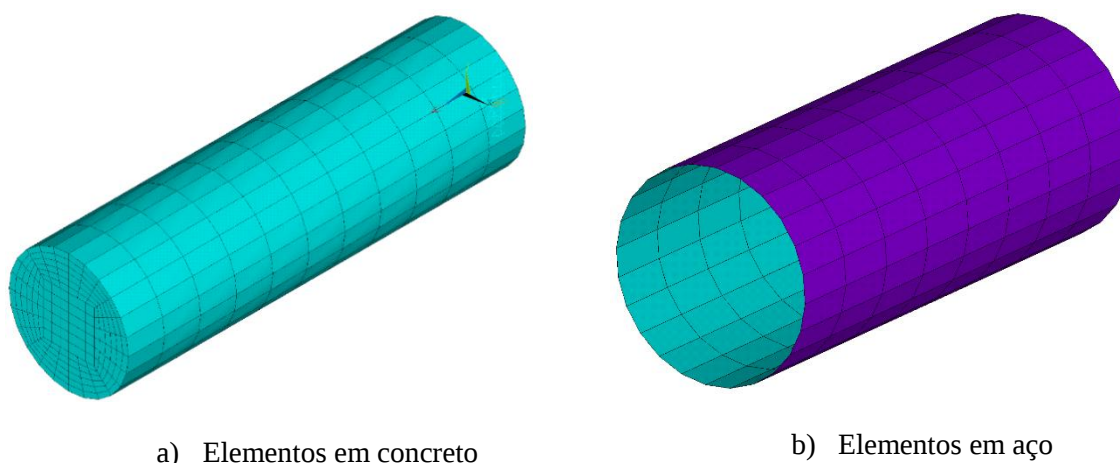


Figura 1- Malha de elementos finitos gerada

2.2 Modelos constitutivos dos materiais

2.2.1 Aço

O comportamento uniaxial do aço do perfil tubular foi descrito pela curva tensão-deformação proposta por Maggi (2004), figura 2. A plasticidade do aço foi definida pelo critério de von Mises com regra de encruamento isotrópico, tipo MISO (Multilinear ISOtrópico). O coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do aço foram tomados iguais a 0,3 e 200 GPa, respectivamente.

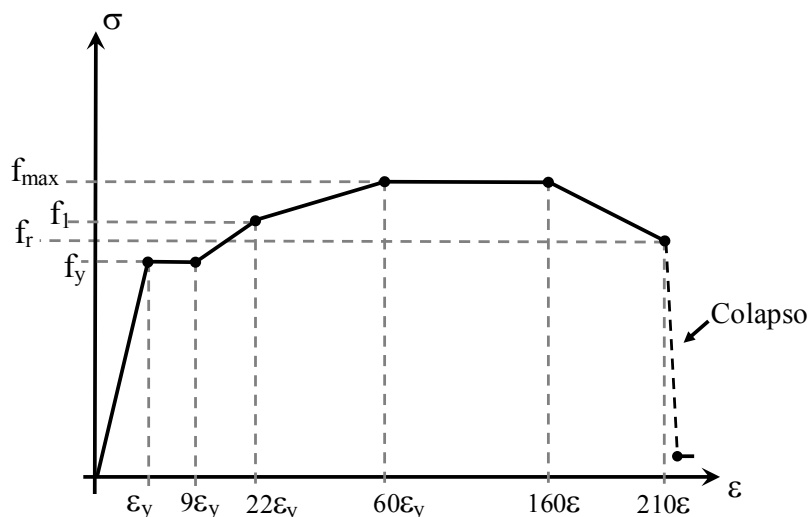


Figura 2 - Modelo constitutivo do aço (MAGGI, 2004)

2.2.2 Concreto

O comportamento uniaxial do concreto foi descrito pela curva tensão-deformação da NBR 6118:2014, figura 3, e o valor do módulo de elasticidade foi calculado pelas expressões da referida norma.

O critério de falha de Willam-Warnke, “*default*” do elemento Solid65, foi adotado para o concreto, considerado neste trabalho como um material do tipo MELAS (Multilinear ELÁStico). Os coeficientes de transferência de cisalhamento para fissuras abertas e fechadas foram ajustados e tomados iguais, respectivamente, a 0,6 e 0,9, conforme sugerido por Contamine *et al.* (2011). De maneira análoga a Queiroz (2003), o esmagamento foi desabilitado para facilitar a convergência da solução. A resistência à tração foi considerada como 10% da resistência à compressão.

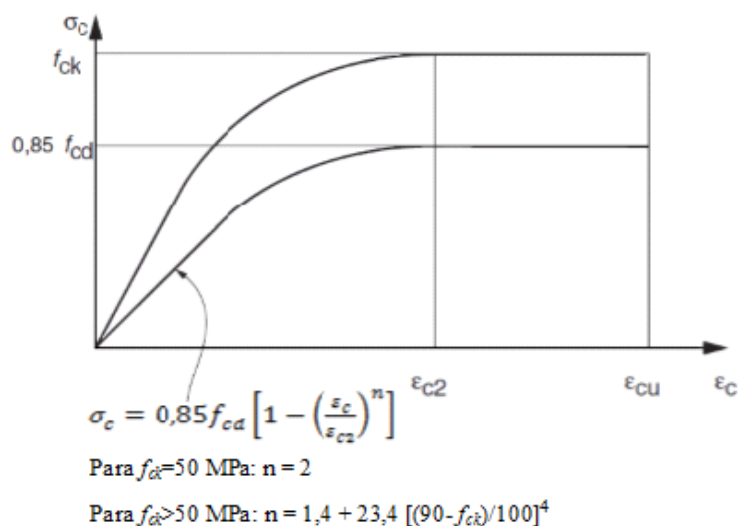


Figura 3 - Modelo constitutivo do concreto (NBR 6118:2014)

2.3 Estudo da malha de elementos finitos

A precisão dos resultados obtidos em estudos que utilizam o método dos elementos finitos está diretamente relacionada com a qualidade da malha gerada no modelo. Portanto é importante garantir que os elementos tenham forma e dimensões apropriadas para a obtenção de bons resultados. No presente estudo, a malha foi gerada de maneira que os elementos de volume tivessem forma prismática com seis faces e os elementos de área tivessem forma retangular.

As dimensões ideais dos elementos foram avaliadas por meio de um estudo de sensibilidade da malha. Em teoria, quanto maior a densidade da malha, melhores serão os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos. Porém, a medida que aumenta-se a densidade, também aumenta-se o custo computacional, sendo assim se faz necessária a determinação de quão densa deverá ser a malha para obtenção de bons resultados com um custo computacional apropriado.

Para fazer este estudo, variou-se um parâmetro que define a quantidade de subdivisões em cada linha da seção transversal do modelo. A quantidade de subdivisões ao longo do comprimento foi definida como 15 vezes o número de divisões por linha da seção transversal de forma que os elementos não tivessem uma dimensão muito maior que a outra.

Foi utilizado um modelo simplificado, onde não foram consideradas as não-linearidades dos materiais para se simplificar o processo. Para cada número de divisões transversais, foram verificados o número de elementos, a carga crítica de flambagem, o encurtamento máximo do pilar e a variação percentual entre os resultados obtidos na divisão atual e na anterior. Os valores obtidos estão apresentados nas figuras 4 e 5.

Observando-se estes resultados optou-se por utilizar seis divisões em cada linha da seção transversal (gerando um total de 19.008 elementos).

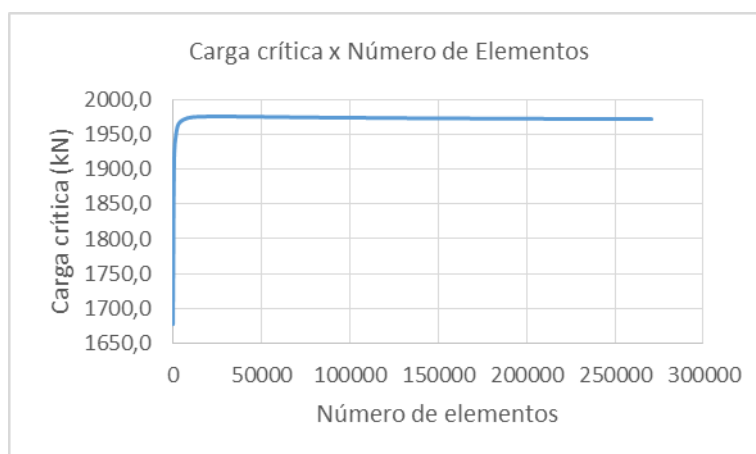


Figura 4 - Variação da carga crítica de flambagem em função do número de elementos do modelo numérico.

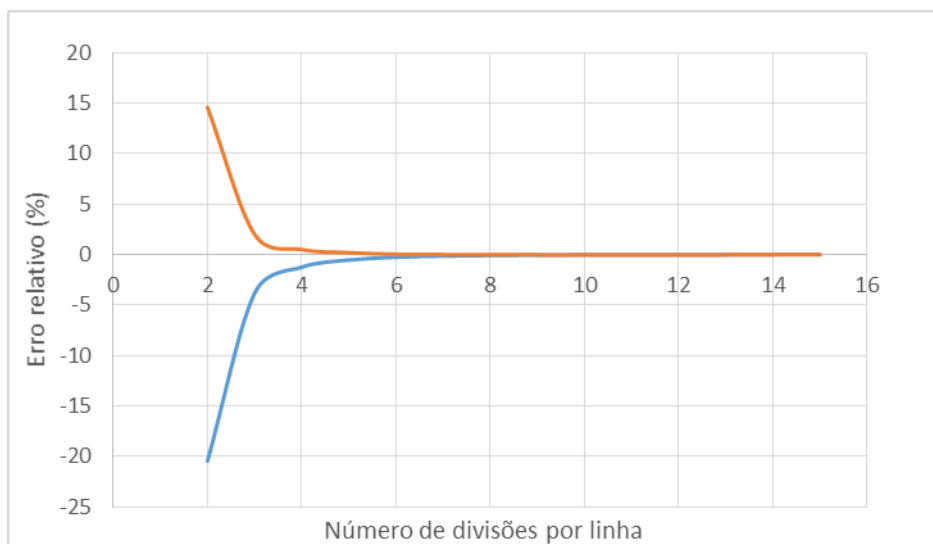


Figura 5 - Erro relativo em função do número de divisões por linha do modelo numérico.

2.4 Modelo numérico

A figura 6 mostra o modelo numérico completo com os eixos globais de referência do Ansys 14 (2014). Além do pilar misto, formado pelo núcleo de concreto e o tubo de aço, foi necessário modelar uma placa quadrada espessa de aço, utilizando o elemento Shell181, para que a transmissão da força aplicada fosse uniforme e distribuída entre os materiais componentes do pilar. Esta placa teve espessura igual a 100 mm e dimensões em planta iguais a seis vezes o raio interno do tubo de aço.

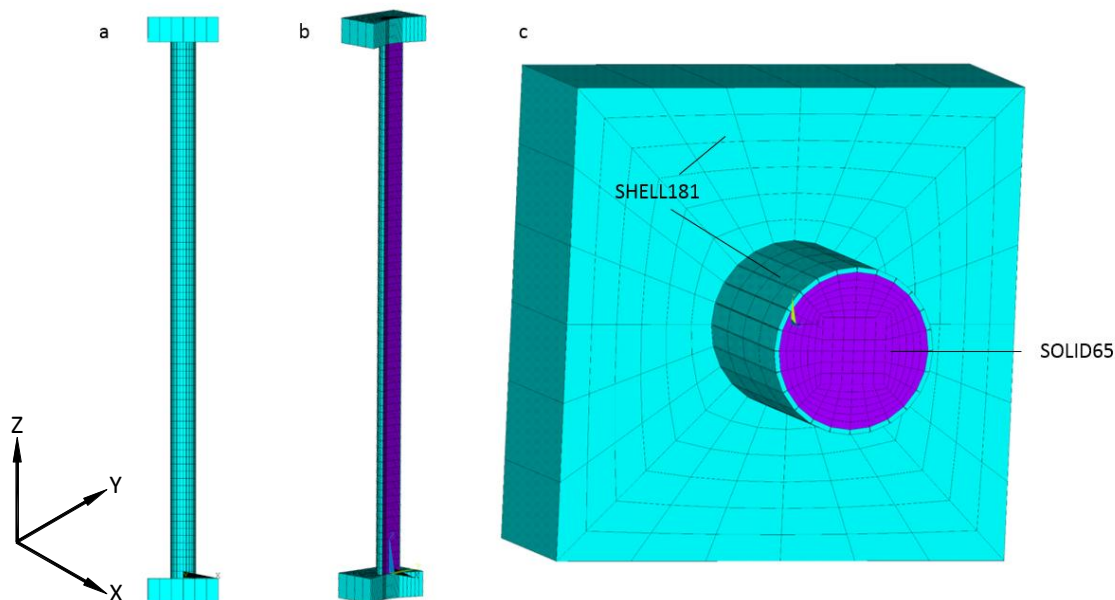


Figura 6 - Exemplo de modelo numérico (a) vista lateral do pilar; (b) seção longitudinal do pilar; (c) seção transversal do modelo com representação dos elementos do Ansys utilizados.

2.5 Condições de contorno e carregamento

Os nós selecionados para aplicação da força foram os do eixo central da placa de aço superior. Nestes mesmos nós, as translações em X e Y e a rotação em torno do eixo Z foram

impedidas. Na placa inferior ao pilar, os nós do eixo central tiveram as translações em todas as direções e a rotação em torno de Z impedidas. Dessa forma, o pilar foi simulado como birrotulado. A figura 7 mostra as condições de contorno do modelo numérico, bem como o sistema de eixos adotado.

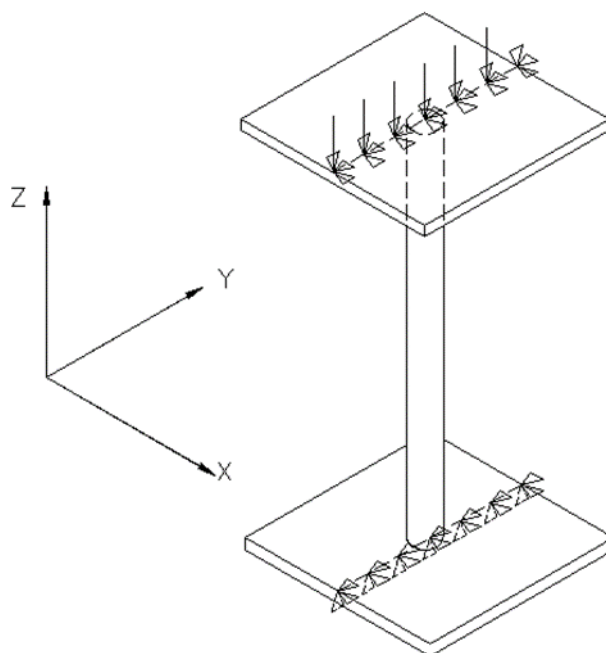


Figura 7 - Condições de contorno dos modelos numéricos.

2.6 Formulação da análise numérica e método de solução

A análise numérica implementada levou em consideração a teoria dos grandes deslocamentos e dois tipos de não-linearidades, a saber: não-linearidade geométrica e a não-linearidade de material. Esta última considerada devido ao material concreto, cujos valores de resistência à compressão e à tração são diferentes e, também para atender o modelo constitutivo adotado para o material aço.

O procedimento incremental-iterativo utilizado na resolução das equações diferenciais de equilíbrio foi o de Newton Raphson total (*Full Newton-Raphson Procedure*). O número máximo de iterações para o modelo foi tomado igual a 10. Também foi utilizado neste trabalho algumas técnicas de aceleração de convergência disponíveis no Ansys 14.0 (2011), tais como Predição (*Prediction*) e *line search*.

A imperfeição geométrica inicial foi considerada igual a $L/500$, onde L é o comprimento do pilar misto analisado. Este valor foi adotado com base na literatura científica e em análises numéricas com os modelos aqui desenvolvidos com vistas ao ajuste desse valor aos resultados experimentais utilizados na validação. Além disso, cabe mencionar que não foram consideradas as imperfeições iniciais de material, ou seja, as tensões residuais do tubo de aço não foram modeladas.

2.7 Validação dos modelos

Modelos numéricos simulando os protótipos de pilares comprimidos S1-2, S1-3 e S1-4 ensaiados por Dundu (2012) e os protótipos de pilares flexo-comprimidos C100-3-2-30-20-1 e C100-3-2-70-20-1 ensaiados por Portolés *et al.* (2011) foram confeccionados a fim de validar

os resultados computacionais. Os protótipos ensaiados por Portolés (2011) eram pilares birrotulados enquanto os ensaiados por Dundu (2012) eram pilares biengastados. Para os modelos numéricos com extremidades rotuladas, condições de contorno similares às apresentadas no item 2.5 foram aplicadas, porém os nós restringidos estão a uma distância do eixo do pilar igual ao valor de excentricidade, e , Figura 8a. Para os modelos numéricos com extremidades engastadas, todos os nós das chapa superior foram restringidos nas direções X e Y e os nós da chapa inferior receberam restrição adicional na direção Z , Figura 8b. Os dados dos modelos de validação e as cargas últimas numérica e experimental estão apresentados na Tabela 1. Em virtude das pequenas diferenças percentuais entre os resultados numéricos e experimentais, os modelos numéricos foram considerados validados.

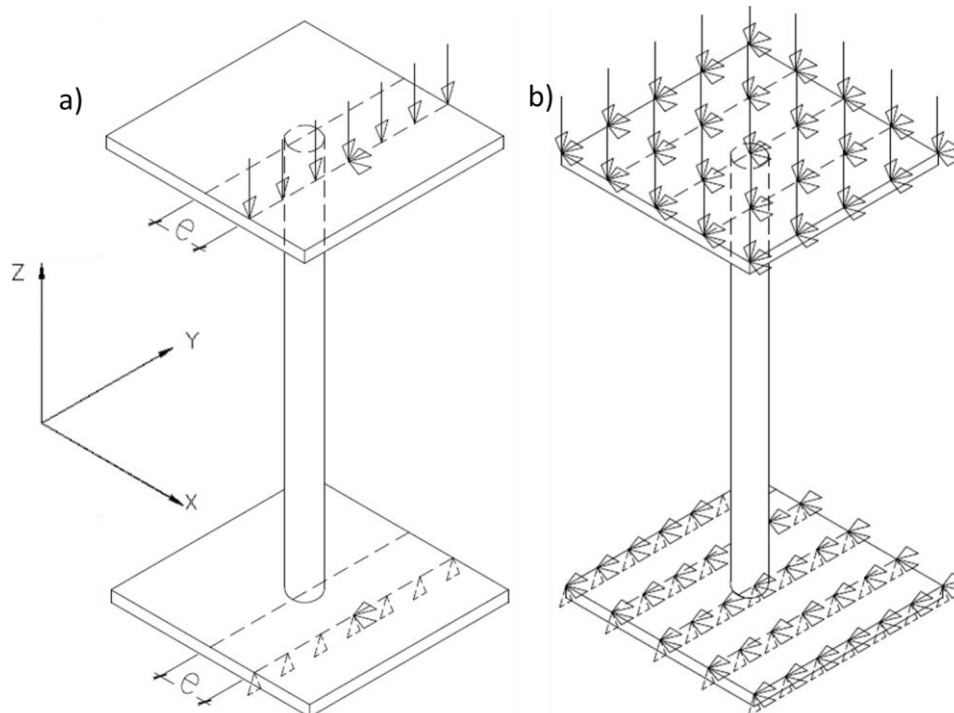


Figura 8 - Condições de Contorno dos Modelos da Validação. (a) Flexo-compressão (b) Compressão Centrada.

Tabela 1 - Dados dos modelos da validação.

Protótipo	D (mm)	L (m)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)	$e^{(1)}$ (mm)	$P_{num}^{(2)}$ (kN)	$P_{exp}^{(3)}$ (kN)	Diferença (%)
S1-2	114,85	1,5	354,05	40,3	0	705,3	688,2	-2,4
S1-3	114,85	2,0	354,05	40,3	0	688,0	632,2	-8,1
S1-4	114,85	2,5	354,05	40,3	0	525,0	566,1	7,8
C100-3-2-30-20-1	100,00	2,135	322,0	32,7	20	198,0	181,56	-8,3
C100-3-2-70-20-1	100,00	2,135	322,0	34,5	20	258,0	248,58	3,7

⁽¹⁾ Excentricidade do carregamento aplicado;

⁽²⁾ ⁽³⁾ Cargas numérica e experimental, respectivamente.

As figuras 9(a) e 9(b) mostram as deformadas do modelo numérico e a do protótipo ensaiado por Dundu (2012). Como pode-se notar, ambas as figuras apresentam o modo de falha caracterizado por flambagem global por flexão.

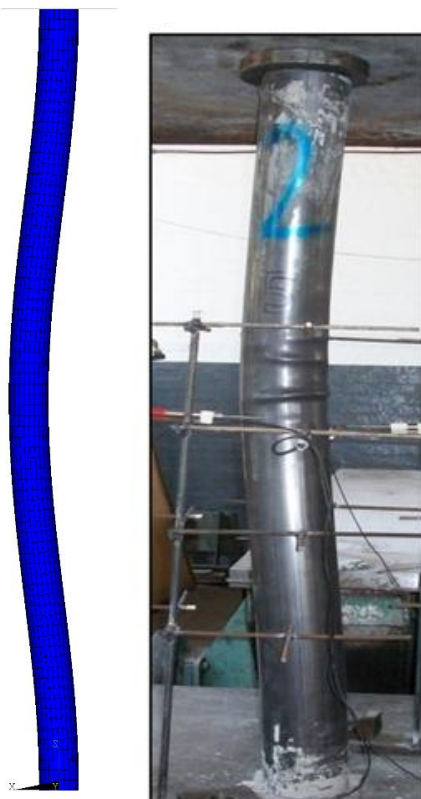


Figura 9 - Comparação de deformação (a) numérica (Autor) (b) experimental (DUNDU, 2012)

3 ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PILARES MISTOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO PURA

Foram implementados cento e trinta e nove modelos numéricos de pilares mistos tubulares circulares sujeitos à compressão pura. O objetivo foi avaliar a influência de parâmetros, a saber, resistência característica à compressão do concreto, f_{ck} , espessura da parede e diâmetro do tubo de aço, t e D , respectivamente no valor do esforço resistente à compressão do pilar misto. Dos modelos implementados, cento e nove tiveram a resistência à compressão do concreto variada para comprimentos de pilares distintos, mantendo-se os demais parâmetros geométricos e físicos inalterados, exceto o diâmetro do tubo, onde foram adotados dois diâmetros comerciais para esse estudo. Dezoito pilares foram modelados variando apenas a espessura (t) da parede do tubo de aço e doze modelos incluíram o estudo da variação do diâmetro (D) do tubo com as demais propriedades inalteradas.

Limitou-se o estudo a pilares em que a flambagem local não ocorreria, assim, o critério de escolha da relação D/t considerou as equações (1) e (2) prescritas, respectivamente, pelas normas NBR 8800:2008 (similar a ANSI/AISC 360-05:2010 nesse requisito) e EN 1994-1-1:2004.

$$D/t \leq 0,15 E / f_y \quad (1)$$

$$D/t \leq 90 \frac{235}{f_y} \quad (2)$$

3.1 Influência da resistência à compressão do concreto

Os modelos numéricos possuíam resistência à compressão do concreto variando de 30 a 90 MPa, espessura da parede do tubo de aço igual a 8,8 mm e diâmetros de 141,3 e 219,1 mm. Os comprimentos estudados variaram segundo a classe de resistência do concreto e o diâmetro, de tal forma que fosse obtido um valor máximo para a esbelteza reduzida λ_{0m} próximo de 2,0 (valor limite das prescrições normativas para pilares mistos de aço e concreto), e sempre menor que 3,0 (valor limite para pilares de aço segundo a NBR 8800:2008 e a EN 1993-1-1:2003). Por isso, há uma diferença no intervalo de comprimento dos pilares mistos com diâmetro de 141,3 mm para os com 219,1 mm de diâmetro.

Conforme é mostrado nas figuras 10 a 12, todas as curvas numéricas de variação do fator de redução associado à resistência à compressão χ em função da esbelteza reduzida λ_{0m} apresentam-se similares às curvas dos valores característicos normativos para todos os modelos analisados.

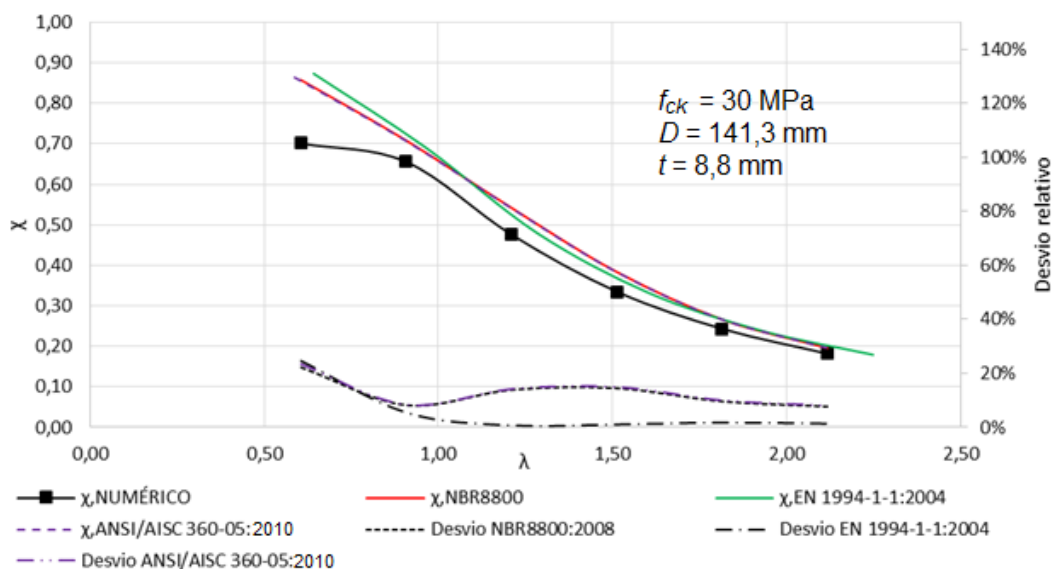


Figura 10 - Variação do fator de redução associado à resistência à compressão χ em função da esbelteza reduzida λ_{0m} para f_{ck} de 30 MPa.

Se considerado apenas os modelos numéricos com $D = 141,3$ mm, figuras 10 a 12, pode-se destacar que o desvio relativo entre os resultados numéricos e normativos ficou entre 0,2%, e 29,5 %, sendo observado um valor médio de 10,4%. Cabe comentar que os maiores desvios percentuais foram registrados em relação às normas NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-05:2010 para os pilares mais esbeltos, pois estas apresentam formulações similares, caso os resultados numéricos sejam confrontados apenas com a norma EN 1994-1-1:2004 esta variação é de 0,2% e 24,6% com valor médio de 5,8%. Também deve-se salientar que a variação percentual a princípio alta na fase elástica, é devido ao fator χ ser muito pequeno em valor absoluto, fazendo com que qualquer alteração de ordem de grandeza decimal altere consideravelmente o desvio percentual, além disso, a média dos desvios foi 10,4% e 5,8%, o que pode ser considerado razoável.

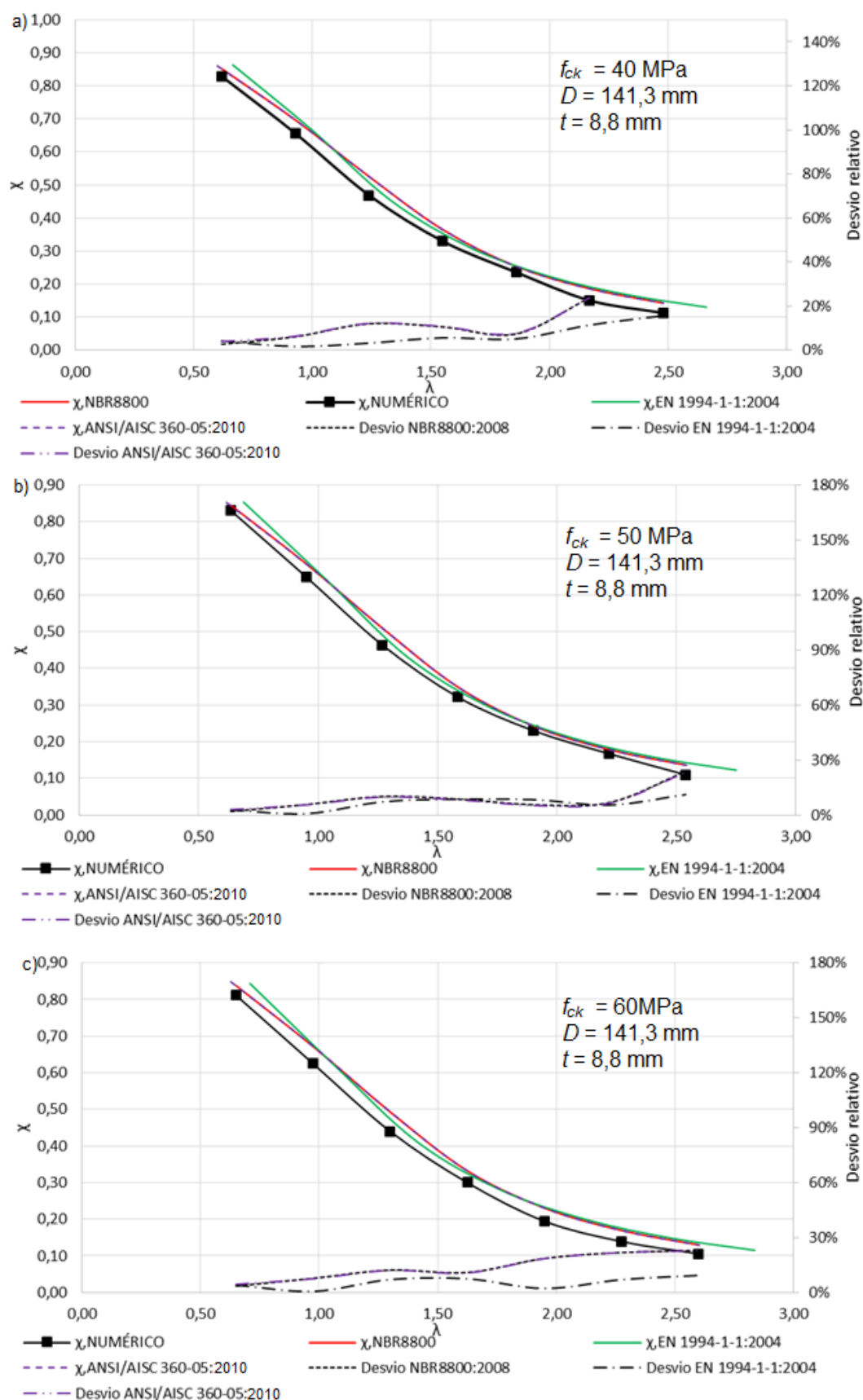


Figura 11 - Variação do fator de redução associado à resistência à compressão χ em função da esbelteza reduzida λ_{0m} para f_{ck} de 40 a 60 MPa.

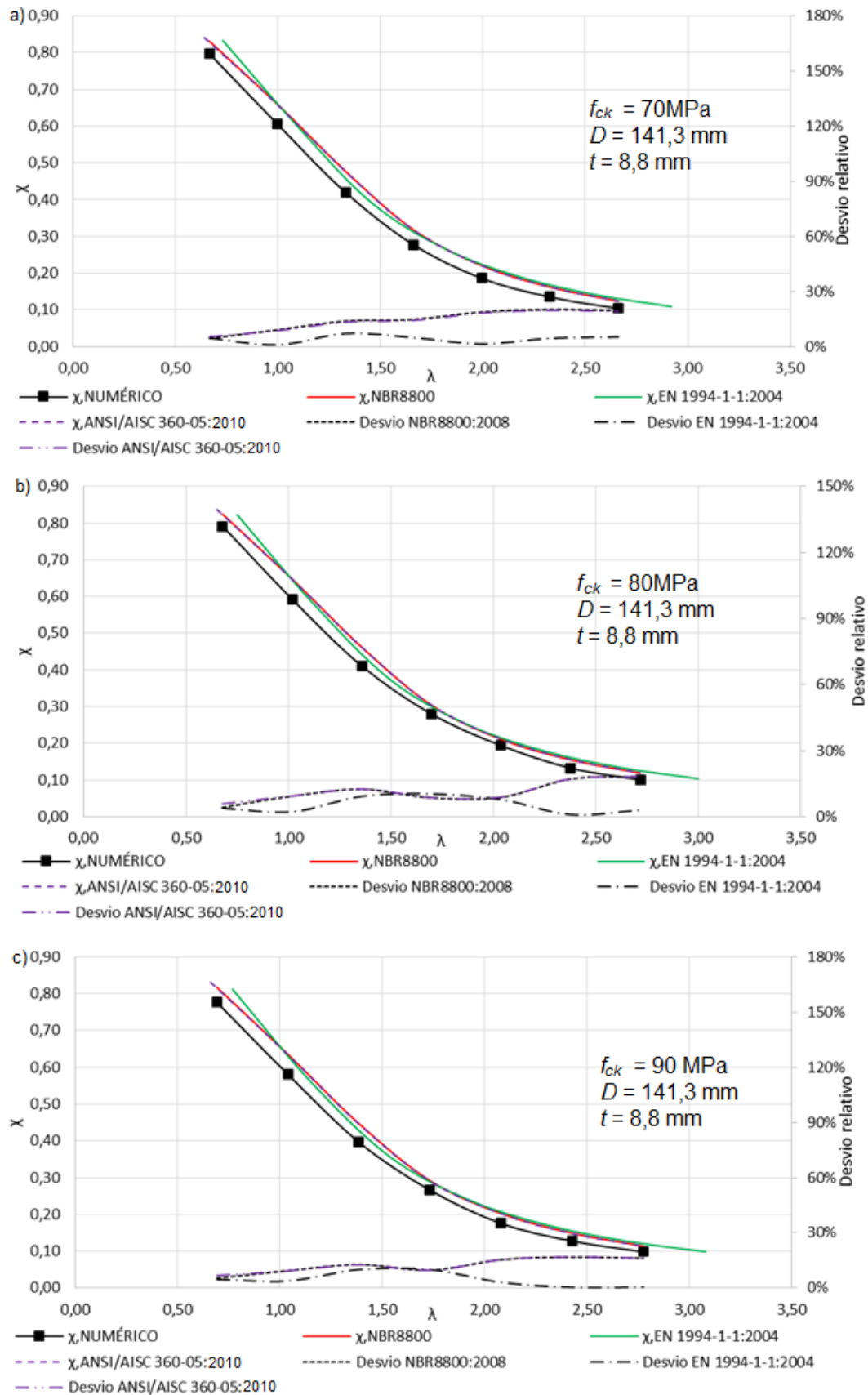


Figura 12 – Variação do fator de redução associado à resistência à compressão χ em função da esbelteza reduzida λ_{0m} para f_{ck} de 70 a 90 MPa.

As figuras 13 e 14 mostram a variação da carga última à compressão pura em função do comprimento dos modelos, para pilares de diâmetros iguais a 141,3 e 219,1 mm, respectivamente. A espessura da parede do tubo foi de 8,8 mm. Observa-se que quanto maior a resistência à compressão do concreto, maior é a resistência à compressão pura do pilar misto na fase inelástica, isto é, em pilares de comprimento intermediário. Por exemplo, no pilar misto de diâmetro igual a 141,3 mm e comprimento de 3 m, notou-se um acréscimo de 26% na sua resistência à compressão pura quando a resistência à compressão do concreto aumentou de 30 para 90 MPa. Para pilares mistos de maior esbelteza, a resistência à compressão pura não é tão influenciada pelo aumento da resistência à compressão do concreto, como por exemplo, em um pilar misto com o mesmo diâmetro e 6 m de comprimento, onde se observou um ganho de resistência de apenas 2,56%. No presente trabalho, optou-se por estudar pilares mistos com comprimento mínimo de 2 m, a fim de procurar retratar com fidedignidade a prática construtiva.

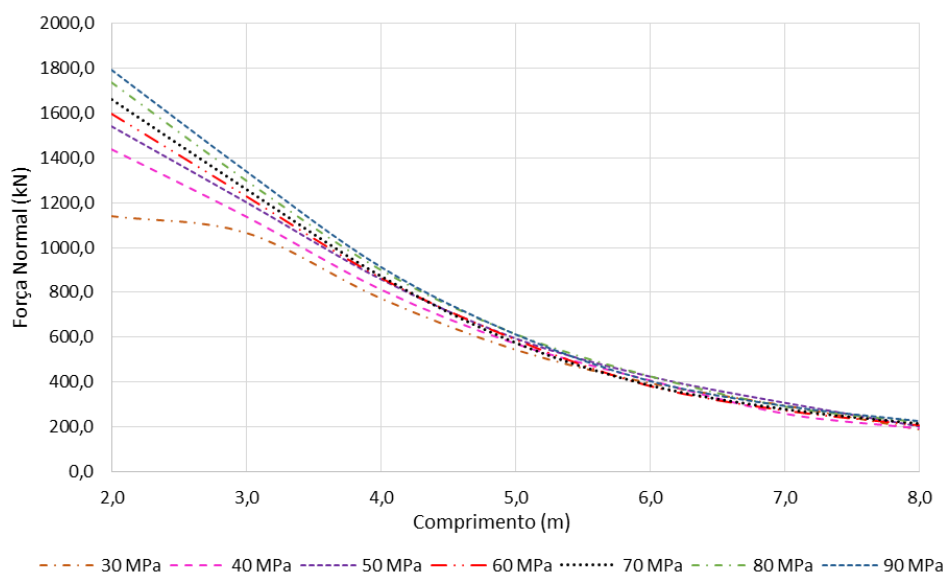


Figura 13 - Variação da resistência à compressão em função do f_{ck} - $D = 141,3$ mm e $t = 8,8$ mm.

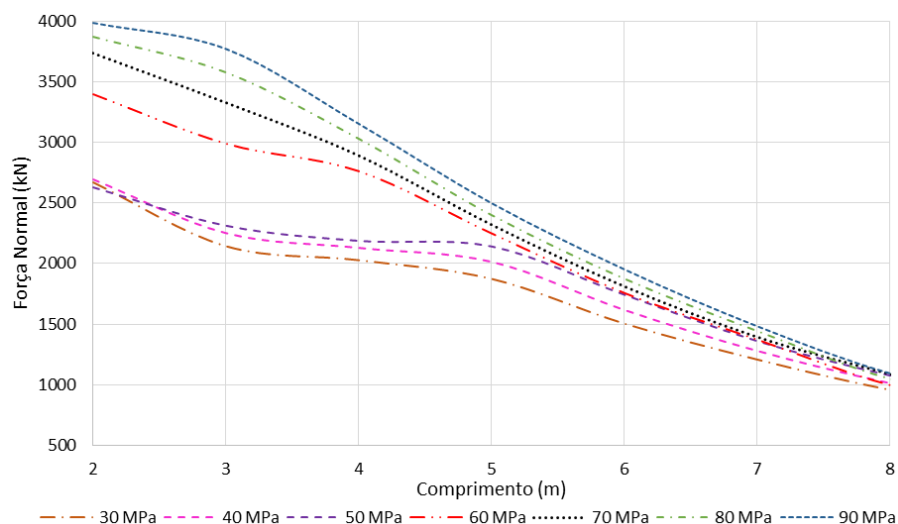


Figura 14 - Variação da resistência à compressão em função do f_{ck} - $D = 219,1$ mm e $t = 8,8$ mm.

3.2 Influência da espessura do tubo de aço

Dezoito modelos numéricos com três classes de resistências de concreto diferentes: 30, 50 e 90 MPa foram implementados. Estas classes de resistência foram escolhidas de forma a incluir um concreto de resistência normal, 30 MPa, um concreto de alto desempenho, 90 MPa e um concreto de 50 MPa, limite destas duas classificações segundo a NBR 6118:2014. Foram simulados pilares mistos com espessuras da parede do tubo iguais a 5; 6,4; 8,8; 10,0; 12,5 e 16 mm. O diâmetro do tubo utilizado foi de 141,3 mm e o comprimento igual a 5 m. Dessa forma, todos os pilares mistos aço e concreto possuíam λ_{0m} maior do que 1,5.

A figura 15 mostra a evolução da força de compressão última numérica do pilar misto com a variação da espessura do tubo, nota-se que a força de compressão dos pilares mistos elevou com o aumento da espessura dos tubos. Como por exemplo, ao variar a espessura do tubo de aço de 5,0 para 16,0 mm, a área de aço do perfil é aumentada em 66,0% enquanto que a força de compressão última do pilar misto é elevada em 47,6% para concreto de f_{ck} igual a 30 MPa, 41,9% para concreto de f_{ck} de 50 MPa e 41,4% para concreto de f_{ck} de 90 MPa, ou seja, um acréscimo médio de 43,6% na força de compressão última do pilar misto. Para a mesma variação de espessura, as previsões das normas NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-05:2010 e da EN 1994-1-1:2004 para o esforço resistente, apresentam um aumento percentual médio de 50,5%, 45,1% e 59,2% respectivamente. Conclui-se que a variação percentual apresentada pelo modelo numérico foi similar a determinada pelas formulações de dimensionamento.

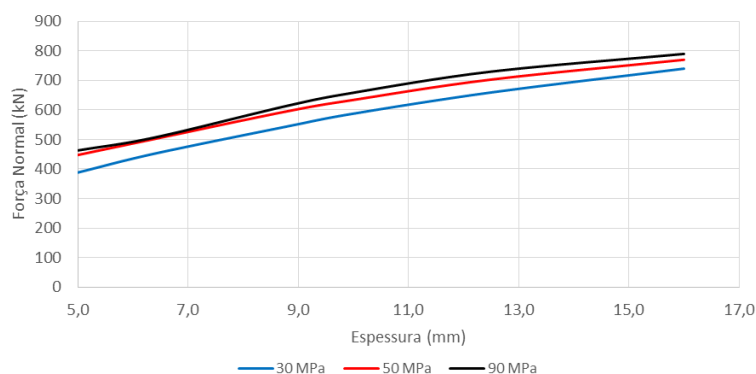


Figura 15 - Variação da resistência à compressão em função da espessura do tubo de aço.

As figuras 16(a), 16(b) e 16(c) comparam os resultados numéricos do esforço resistente à compressão com as previsões normativas da NBR 8800:2008, EN 1994-1-1:2004 e ANSI/AISC 360-05:2010. Nestas ilustrações, é demonstrado que os resultados da NBR 8800:2008 são, na sua grande maioria, superiores aos resultados numéricos, porém a diferença não é muito significativa, variando de 5,5% a 15,6% para concretos com f_{ck} igual a 90 MPa e 1,8% a 16,6% para concretos com f_{ck} igual a 50 MPa. As curvas obtidas mostram que os valores numéricos da carga última de compressão foram maiores que os resultados estimados pela EN 1994-1-1:2004 para espessuras da parede do tubo menores, ou seja, em espessuras aproximadamente menores que 9, 11,5 e 12,5 mm, considerando resistências características à compressão do concreto iguais a 30, 50 e 90 MPa, respectivamente. Com o aumento da espessura os resultados da EN 1994-1-1:2004 superaram os numéricos. A variação entre a carga última de compressão numérica e o esforço resistente de compressão previsto pela EN 1994-1-1:2004 foi de 0,004% a 12,3% para pilares com concreto de f_{ck} igual a 30 MPa e 0,3% a 23,1% para pilares com concreto da classe 90. Com relação à norma ANSI/AISC 360-05:2010, as curvas do esforço resistente de compressão em função da variação da espessura do tubo de aço comportaram de maneira similar as curvas da NBR

8800:2008, apresentado variação de 10,5% a 18,7% para concretos com f_{ck} igual a 30 MPa e 4,8% a 16,5% para concretos com f_{ck} igual a 50 MPa.

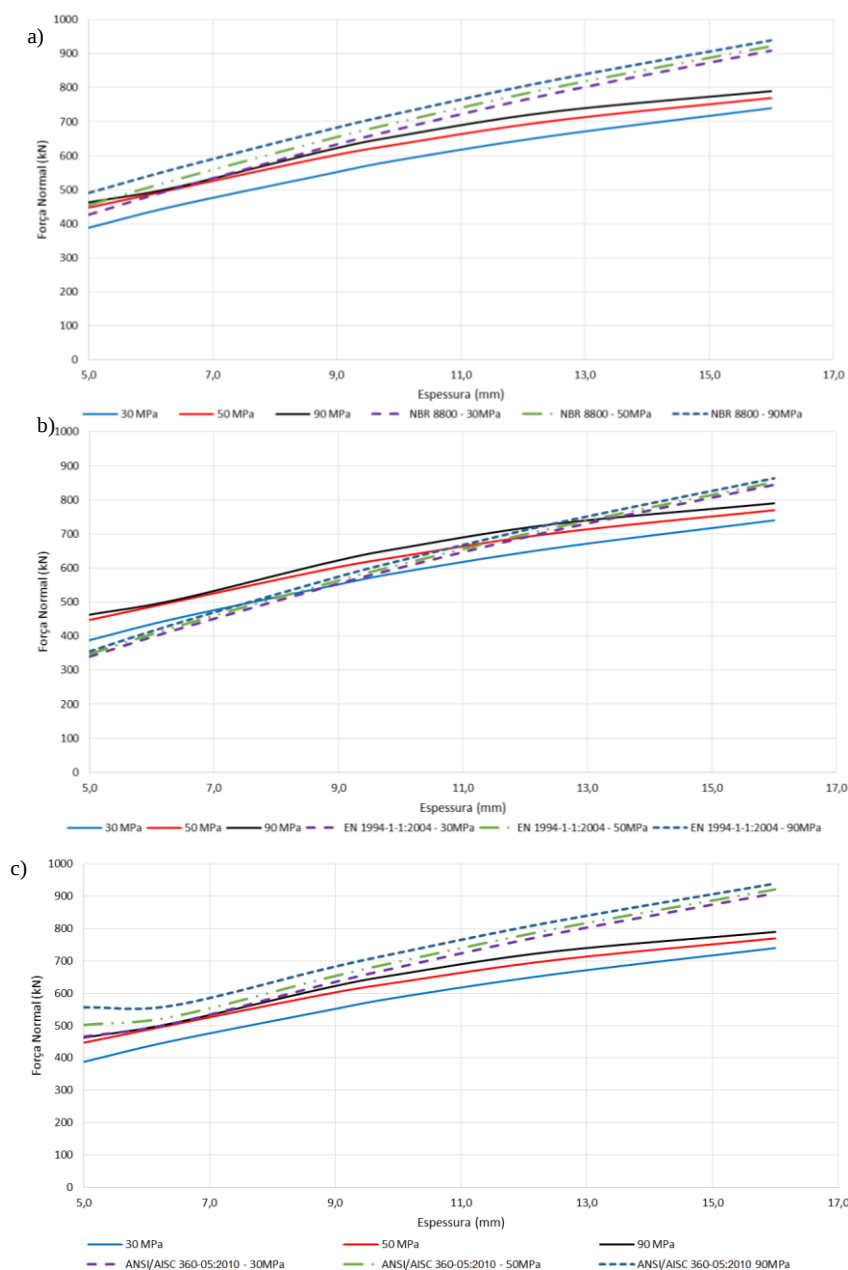


Figura 16 - Comparação dos resultados numéricos de resistência à compressão em função da variação da espessura (a) NBR 8800:2008 (b) EN 1994-1-1:2004 (c) ANSI/AISC 360-05:2010.

3.3 Influência do diâmetro do tubo de aço

Doze modelos numéricos com as mesmas três classes de resistências de concreto, 30, 50 e 90 MPa foram implementados. O comprimento dos pilares analisados foi de 5 m, a espessura da parede do tubo de aço foi igual a 8,8 mm, e quatro diâmetros a saber, 114,3; 141,3; 219,1 e 250 mm foram analisados. Dessa forma, a esbeltez reduzida λ_{0m} variou de 0,93 a 1,95, valores condizentes com os limites apresentados pelas normas de dimensionamento.

A figura 17 mostra a evolução da força de compressão numérica do pilar misto em função da variação do diâmetro do tubo de aço. Esta figura também compara os resultados

normativos com os valores numéricos. As curvas de resistência numéricas se comportaram de maneira muito semelhante as curvas normativas. Os desvios percentuais médios entre os resultados normativo e os numérico para as três classes de concreto estudadas estão representados na tabela 2.

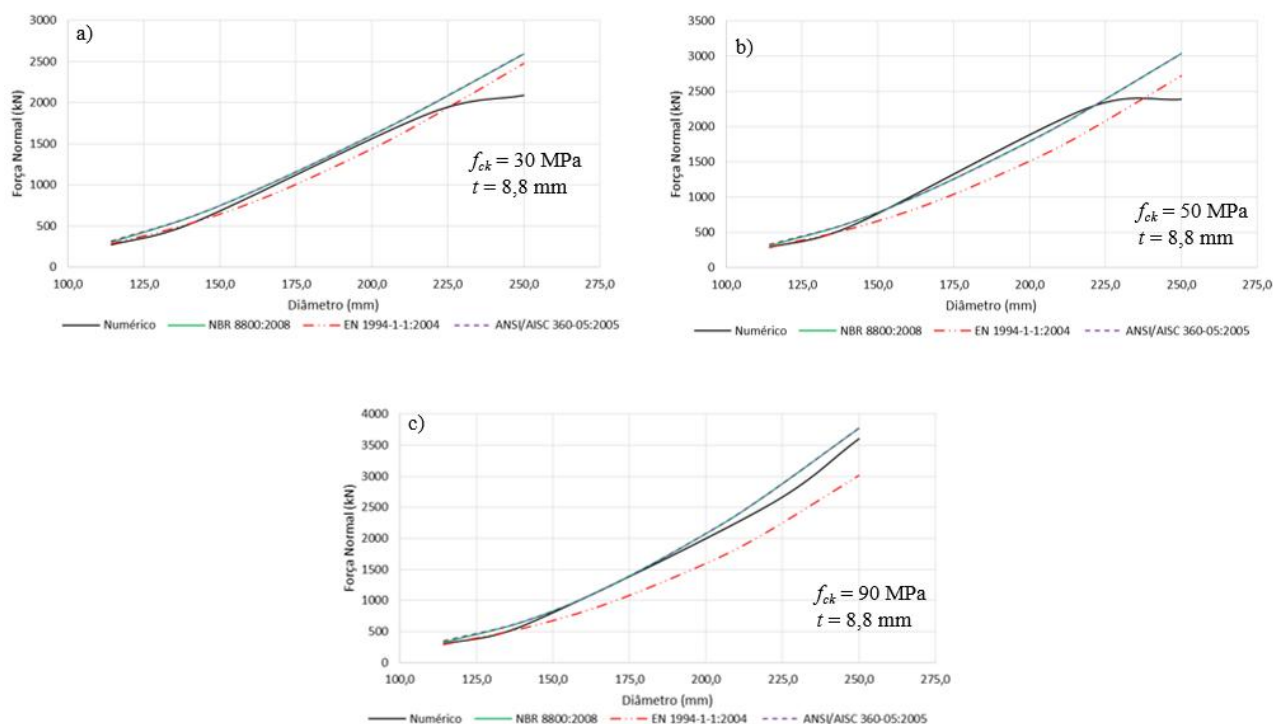


Figura 17 - Variação da resistência à compressão em função do diâmetro (a) $f_{ck} = 30$ MPa e $t = 8,8$ mm, (b) $f_{ck} = 50$ MPa e $t = 8,8$ mm e (c) $f_{ck} = 90$ MPa e $t = 8,8$ mm

Tabela 2 - Desvios percentuais médios entre os resultados numérico e normativo

f_{ck} (MPa)	$1 - (N_{NBR}/N_{Num})$ (%)	$1 - (N_{AISC}/N_{Num})$ (%)	$1 - (N_{EN}/N_{Num})$ (%)
30	-13,9	-15,3	-5,0
50	-10,8	-11,8	2,2
90	-7,6	-9,4	10,9

Como já esperado, com o aumento do diâmetro do tubo de aço, ocorreu também o aumento da resistência à compressão dos pilares mistos. Quando o diâmetro do tubo de aço passa de 114,3 mm para 250,0 mm ocorre um aumento de 82,1% na área de concreto e a resistência do pilar misto eleva-se em média, considerando as três classes de concreto analisadas, em 88,8%. Se considerado apenas os pilares preenchidos com concreto de 30 MPa, a resistência aumenta em 86,9%, já os com f_{ck} de 50 MPa experimentaram um acréscimo de 87,8% e os pilares de 90 MPa uma elevação de 91,7%. Caso seja aumentado o diâmetro do tubo de 114,3 mm para 219,1 mm há um acréscimo na área de concreto de 77%, já a resistência do pilar aumenta em média em 86,8%, sendo apresentado um aumento de 85,4% para os pilares com concreto de f_{ck} de 30 MPa, 87,1% para os pilares com f_{ck} de 50 MPa e 88,0% para pilares de 90 MPa.

A tabela 2 mostra o aumento percentual na carga última de compressão numérica do pilar misto com a alteração do f_{ck} do concreto de preenchimento. Nota-se que ao combinar o aumento do diâmetro com a elevação do f_{ck} do concreto a diferença percentual também elevou. Uma alteração no f_{ck} do concreto de preenchimento de um pilar misto com diâmetro de 219,1 mm de 30 MPa para 50 MPa faz com que a carga última de compressão numérica aumente em 17,4% e, alterando-se o f_{ck} para 90 MPa, esse aumento é de 9,2%.

Tabela 3 - Crescimento percentual do esforço resistente dos pilares mistos devido ao aumento do f_{ck}

D (mm)	$N_{máx}^{(1)}$ (kN) $f_{ck} = 30$ MPa	$N_{máx}^{(2)}$ (kN) $f_{ck} = 50$ MPa	$N_{máx}^{(3)}$ (kN) $f_{ck} = 90$ MPa	$N_{máx}^{(1)}/N_{máx}^{(2)}$ (%)	$N_{máx}^{(2)}/N_{máx}^{(3)}$ (%)
114,3	274,2	291,4	300,0	5,9	2,9
141,3	544,3	595,5	614,1	8,6	3,0
219,1	1872,5	2266,1	2495,1	17,4	9,2
250,00	2090,1	2391,0	3603,4	12,6	33,6

3.4 Razão de contribuição do concreto (RCC)

Portolés *et al.* (2011) definem a variável contribuição do concreto (RCC) como sendo a razão entre a força máxima experimental e o esforço resistente do perfil tubular sem preenchimento de concreto, equação (3).

$$RCC = \frac{N_{máx,exp}}{N_{máx,tubo}} \quad (3)$$

onde:

$N_{máx,exp}$ é a força de compressão -máxima experimental;

$N_{máx,tubo}$ é o esforço axial resistente do perfil de aço tubular.

As figuras 18 (a) e 18 (b) relacionam a razão RCC com a resistência do concreto dos modelos com diâmetros de, respectivamente, 141,3 e 219,1 mm e espessura da parede do tubo igual a 8,8 mm. Nessas figuras, os modelos foram identificados com a designação $PM-L-D-t-e-f_{ck}$. Por exemplo, o modelo PM-2-0.2191-0.0088-0-30 possui comprimento do pilar (L) igual a 2 m, diâmetro externo do tubo (D) igual a 219,1 mm, espessura da parede do tubo de aço (t) igual a 8,8 mm, excentricidade do carregamento (e) igual a zero e resistência característica do concreto (f_{ck}) igual a 30 MPa. As resistências ao escoamento (f_y) e à ruptura (f_u) do aço foram iguais a 350 MPa e 485 MPa, respectivamente.

Pode-se observar nas figuras 18(a) e 18(b) que com o aumento da resistência à compressão do concreto f_{ck} , a RCC também aumenta, porém esta melhoria é mais pronunciada para pilares com menores comprimentos, como exemplo, cita-se um acréscimo de 20,6% na RCC do pilar misto da figura 18(a) de comprimento igual a 3m, ao variar o f_{ck} de 30 MPa para 90 MPa, em detrimento de um aumento de apenas 2,5% para o pilar de comprimento igual a 6m, para a mesma variação de resistência à compressão do concreto, em concordância com as observações já feitas sobre a figura 13.

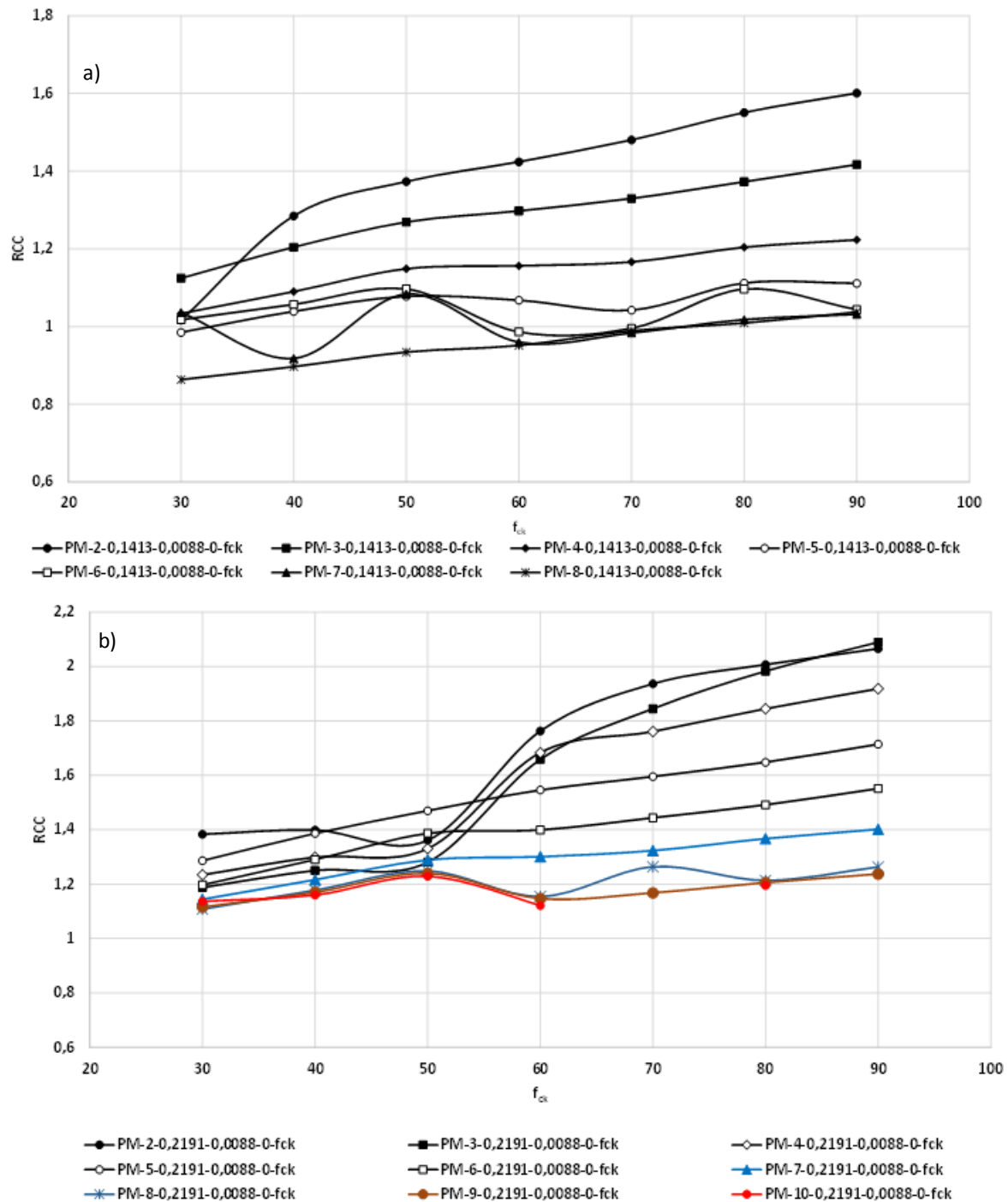


Figura 18 - Variação da RCC em função do f_{ck} (a) $D = 141,3\text{mm}$ e (b) $D = 219,1\text{ mm}$

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma extensa análise numérica a respeito de pilares mistos tubulares circulares sujeitos à compressão pura. Com o intuito de investigar o comportamento estrutural destes pilares, cento e trinta e nove modelos foram simulados no software Ansys 14.0 (2011). Foram estudadas a influência da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} , da espessura da parede e do diâmetro do tubo de aço, t e D respectivamente. Limitou-se o estudo a pilares mistos onde não ocorreria a flambagem local segundo as

prescrições das normas NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-05:2010 e EN 1994-1-1:2004, bem como, optou-se por estudar pilares mistos com comprimento mínimo de 2 m, a fim de procurar retratar com mais fidedignidade a prática construtiva.

Os resultados numéricos foram comparados com os resultados característicos determinados pelas formulações de dimensionamento das normas NBR 8800:2008, ANSI/AISC 360-05:2010 e EN 1994-1-1:2004, sendo comprovado que é viável o uso destas formulações para pilares mistos com concreto de alto desempenho submetidos à compressão pura. Além disso, notou-se que o aumento da resistência característica do concreto leva a um aumento considerável no esforço resistente axial do pilar misto na fase inelástica, ou seja, para valores intermediários de esbeltez. Também comprovou-se, que o aumento do diâmetro ou da espessura do tubo de aço traduz em ganho substancial de resistência para estes pilares.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil dessa universidade e às instituições brasileiras de apoio à pesquisa CAPES, CNPq e FAPES.

6 BIBLIOGRAFIA

American Institute of Steel Construction. *ANSI/AISC 360-05. Specification for structural steel buildings*. Chicago, 2010.

ANSYS, *Finite element program user's manuals, Versão 14.0*, ANSYS, Inc.,Crononsburg, Estados Unidos, 2011.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 16239. *Design of steel and composite structures for buildings using hollow sections*. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6118. *Design of concrete structures - Procedure*. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 8800. *Design of steel and composite structures for buildings*. Rio de Janeiro, 2008.

Contamine, R.; Si-Larbi, A.; Than, N.Q.; Hamelin, P. Numerical Modeling of Reinforced Concrete Beams Under Shear Stress With and Without External Textile-Reinforced Concrete Reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol 30 (15), p. 1293-1303, 2011.

Dundu, M. Compressive Strength of Circular Concrete Filled Steel Tube Columns. *Thin-Walled Structures*, Vol 56, p. 62-70, 2012.

European Committee of Standardization. *EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings*. Bruxelas, 2004.

Giakomelis, G.; Lam, D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, V. 60, p. 1049-1068, 2004.

Maggi, Yuri Ivan. *Análise do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Pilar com Chapa de Topo Estendida*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

Oliveira, Walter Luiz Andrade. *Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

Portolés, J. M.; Romero, M. L.; Bonet, J. L.; Filippou, F. C. Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 67 (4), p. 623-633, 2011.

Queiroz, F. D. *Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2003.

Sakino, Kenji ; Nakahara, Hiroyuki ; Morino, Shosuke ; NISHIYAMA, Isao. Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns. *Journal of Structural Engineering* ASCE, Vol.130, p.180-188, 2004.