



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE COLUNAS TUBULARES MISTAS

Bruno V. Dias

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

André T. da Silva

Pedro C. G. da S. Vellasco

bruno.vicente.dias@gmail.com, luciano@eng.uerj.br, tenchini@eng.uerj.br,
vellasco@eng.uerj.br

Aluno de IC – Iniciação Científica

Professores Associado, Departamento de Estruturas e Fundações, UERJ, Brasil

Departamento de Estruturas e Fundações, FEN/UERJ

Sebastião A. L. de Andrade

andrade@puc-rio.br

Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil

Resumo. O emprego do aço inoxidável em colunas mistas traz vários benefícios à estrutura, dentre eles, a alta resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, facilidade de manutenção e valor estético. A utilização de sistemas mistos em colunas tem tido um grande avanço em obras portuárias, terminais aeroportuários, pontes e viadutos. Uma vantagem particular das colunas mistas, comparadas com estruturas executadas em concreto armado convencional, é a redução da área da seção transversal, além de poderem ser construídas mais rapidamente eliminando a utilização de formas, possuírem fácil manutenção, reduzindo o custo final da obra. O objetivo deste trabalho é apresentar modelos numéricos de uma coluna mista em perfil tubular de parede dupla, composta por tubos circulares de aço inoxidável e aço carbono concêntricos preenchidos com concreto sem armadura entre eles, através de uma análise não linear a fim de simular e avaliar seu comportamento estrutural, verificando sua estabilidade com diferentes parâmetros e comparando os resultados com os obtidos em ensaios de resistência à compressão, realizados em laboratório. Os resultados mostraram que estas colunas proporcionam um ganho considerável de resistência com redução de material quando comparadas com soluções de colunas mistas tradicionais executadas somente com aço carbono e concreto armado.

Palavras-chaves: Colunas tubulares mistas, Aço inoxidável, Aço carbono, Análise não linear, Resistência à compressão.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido ao aperfeiçoamento das técnicas construtivas, tem-se investido em pesquisas de novos materiais com a intensão de deixar as estruturas mais leves e esbeltas, garantindo a estética.

Com a exposição de elementos estruturais feitos de peças metálicas, surgem diversos problemas como, por exemplo, a oxidação e a perda de resistência em presença de altas temperaturas. A ideia de proteção dos pilares metálicos com o concreto impulsionou o surgimento dos primeiros pilares mistos de aço e concreto. A solução pode-se tornar antieconômica tendo em vista que quanto maior a agressividade ambiental, maior deve ser o recobrimento da camada de concreto.

Tem-se provocado um aumento da utilização do aço inoxidável para problemas de engenharia estrutural. Este tipo de aço apresenta curvas sem patamar de escoamento e região de encruamento bem definida, modificando assim, o comportamento global das estruturas que o utilizam. O emprego do aço inoxidável para revestimento de colunas de concreto trazem vários benefícios à estrutura, dentre eles a alta resistência à corrosão, durabilidade, redução da fragilidade do concreto, resistência ao fogo, facilidade de manutenção e elevado valor estético. Mas ainda há poucos projetos com o emprego deste tipo de aço devido ao alto custo de aquisição, carência de normas técnicas específicas de dimensionamento e também pela falta de conhecimento de utilização pelos fabricantes. A Figura 1 ilustra um exemplo de utilização de colunas tubulares com preenchimento de concreto.



Figura 1. Passarela Hringbraut - Reikjavik, Islândia (Silva, 2013)

Construções mistas, de aço e concreto, têm sido muito empregadas como solução estrutural em diversos projetos industriais e de edificações metálicas, principalmente em vigas e lajes. No entanto, a utilização em colunas tem tido um grande avanço em obras industriais, portuárias, terminais aeroportuários, metrô, pontes e viadutos.

As colunas tubulares mistas podem ser construídas mais rapidamente, possuem fácil manutenção e garantem economia de materiais se comparadas com as estruturas executadas em concreto armado; e as colunas que são preenchidas e não revestidas com concreto, tem a vantagem de eliminar a utilização de formas, reduzindo o custo final da obra.

Colunas mistas compostas por aço inoxidável, aço carbono e concreto, conhecidas como CFDST (*Concrete Filled Double Skin Tubular*), buscam juntar as características dos três materiais com a finalidade de combater a desvantagem de um deles. Estas colunas tubulares mistas podem ter diferentes tipos de seção, podendo ser circulares, retangulares, etc. Elas

apresentam grande capacidade de carga, boa ductilidade e uma melhor absorção de energia. Uma vantagem particular é a redução da área da seção transversal. A Figura 2 apresenta os diferentes tipos de seções e formas que as colunas CFDST podem ter propostas por Han *et al.*, 2010.

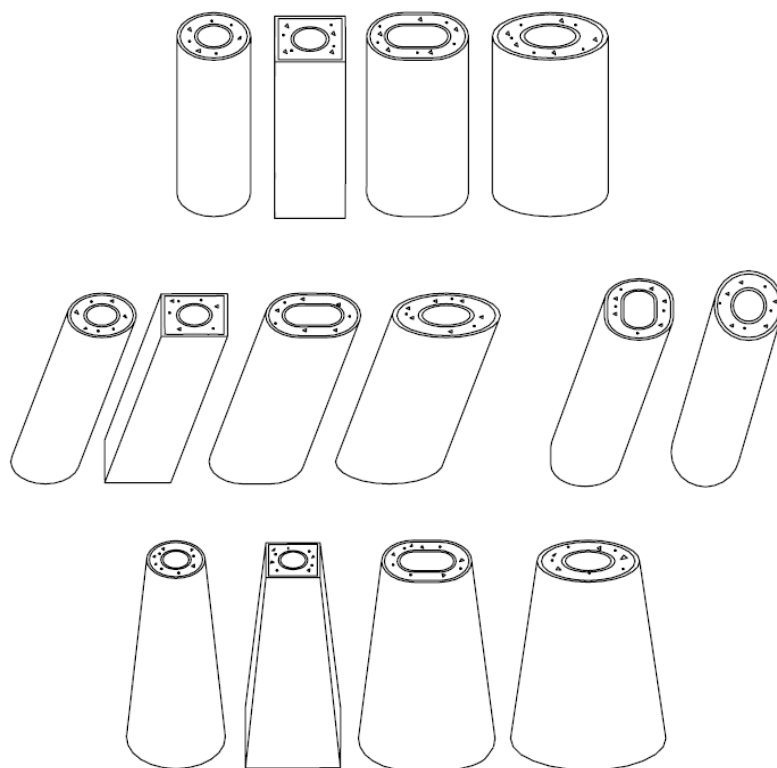


Figura 2. Tipos de colunas CFDST (Han *et al.*, 2010)

Visando o aumento da produtividade e facilidade de montagem, dispensa-se a armadura no concreto introduzindo um segundo tubo, constituído de aço carbono, no interior do tubo principal de aço inoxidável. Esta solução pode ter período de resistência ao fogo razoável, pois o tubo interno (aço carbono) é protegido pelo preenchimento de concreto (Tao *et al.*, 2009); e mesmo tendo resistência ao fogo menor que as estruturas convencionais de concreto, a presença do aço inoxidável (tubo externo) garante grande resistência à corrosão.

2 MODELOS GERADOS

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver modelos numéricos de uma coluna mista em perfil tubular composta por tubos circulares de aço inoxidável e aço carbono concêntricos com preenchimento de concreto entre eles, permitindo, com a colocação de imperfeições geométricas, efetuar uma análise não linear a fim de simular e avaliar seu comportamento estrutural, verificando sua estabilidade com diferentes parâmetros e comparando os resultados com os obtidos em ensaios de resistência à compressão realizados em laboratório.

Inicialmente será verificada a ocorrência de flambagem local nas colunas classificadas como curtas, com a aplicação de uma imperfeição geométrica posicionada aonde apresentou flambagem no modelo experimental. Estes modos de flambagem local podem ser agrupados em dois tipos: modo diamante e modo “pata de elefante”. O primeiro consiste em várias

depressões em forma de losangos na superfície retangular do tubo; e o segundo é a caracterização de uma saliência fazendo com que a parede do tubo, nesta região, mova-se para fora.

Para a realização deste trabalho, foi elaborado através do programa Ansys 12 (2010), um modelo numérico parametrizado a fim de obter os valores de cargas críticas e deslocamentos. Após a calibração dos modelos numéricos com os modelos experimentais foram realizadas análises paramétricas a fim de analisar o comportamento do elemento estrutural variando a espessura do tubo externo de aço inoxidável; o diâmetro do tubo interno de aço carbono; o comprimento das colunas e a influência da resistência do concreto.

2.1 Modelo experimental de calibração

A calibração do modelo numérico foi idealizada baseada nos dados experimentais obtidos através de ensaios realizados para a dissertação de mestrado desenvolvida por Silva (2013).

Para os ensaios foram utilizados quatro protótipos de colunas tubulares. Deste total, dois corpos de prova foram executados sem o preenchimento de concreto, com diâmetros internos diferentes e mais dois com o preenchimento, também possuindo razões entre diâmetros diferentes. Foram adotadas razões entre diâmetro interno e externo próximas de 0,5 e 0,75, respectivamente.

O comprimento do modelo foi definido de forma que a coluna comportasse-se como coluna curta. Sendo assim, utilizou-se o mesmo critério adotado por Han *et al.* (2010), no qual a razão entre o diâmetro externo e o comprimento da coluna é igual a um terço. Adotando esta condição, obtém-se o comprimento da coluna igual a 657,24 mm. De maneira a padronizar os testes, foi adotada altura de 700 milímetros para as colunas. As dimensões das colunas estão descritas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Dimensões dos modelos experimentais

Nº Coluna	Identificação	D x t_{so}	d x t_{si}
1	CH1-1	219,08 x 3,76	165,1 x 4,5
2	CH2-1	219,08 x 3,76	114,3 x 4,25
3	C1-1	219,08 x 3,76	165,1 x 4,5
4	C2-1	219,08 x 3,76	114,3 x 4,25

Onde D é o diâmetro do tubo externo, t_{so} representa a espessura do tubo externo de aço inoxidável, d é o diâmetro do tubo interno e t_{si} é a espessura do tubo interno de aço carbono.

2.1.1 Colunas CH1-1 e CH2-1

As colunas CH1-1 e CH2-1 não possuem preenchimento de concreto e o objetivo destes primeiros ensaios foi gerar dados para efeitos de comparação do comportamento estrutural das colunas quando preenchidas com concreto.

Na coluna CH1-1 observou-se a ocorrência de flambagem local para ambos os tubos, mas de modos diferentes. O tubo externo de aço inoxidável apresentou um modo de falha por flambagem na extremidade inferior da coluna do tipo “pata de elefante”, já no tubo interno de aço carbono, ocorreu uma flambagem local do tipo diamante, próximo ao meio da coluna.

Na coluna CH2-1 observou-se a mesma flambagem, do tipo “pata de elefante”, para o tubo externo, mas no tubo interno é possível perceber a presença de um modo de flambagem global e se nota também, nas extremidades deste tubo, uma flambagem local.

A Figura 3 ilustra as deformações que surgiram nos tubos interno e externo das colunas sem preenchimento com concreto após o ensaio.

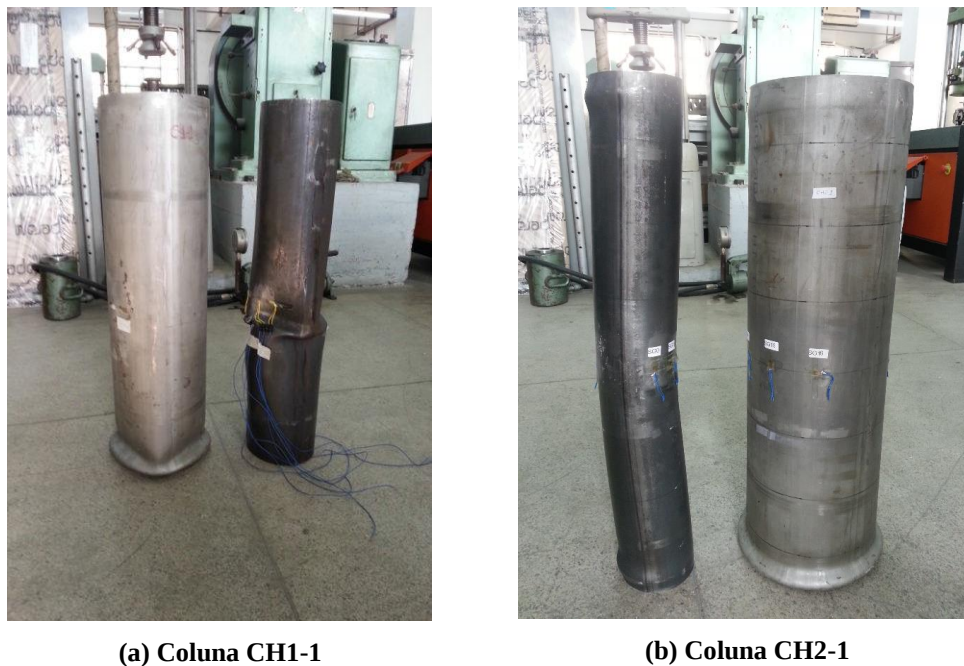


Figura 3. Modos de flambagem dos tubos das colunas sem preenchimento de concreto (Silva, 2013)

Os dados obtidos através de extensômetros mostram que ao atingir a carga de 700kN, na coluna CH1-1, iniciou-se a deformação permanente sendo seu valor de carga última próximo de 1400kN.

Verificou-se também que após a flambagem, o corpo de prova continua a absorver a carga de compressão aumentando ainda mais sua resistência, confirmando que durante o encruamento, este tipo de seção tubular apresenta alta resistência, até atingir a carga de ruptura ou colapso.

2.1.2 Colunas C1-1, C2-1 e C2-2

As colunas C1-1, C2-1 e C2-2 possuem o anel preenchido com concreto até o limite da placa de base de forma a permitir uma transmissão uniforme de esforços entre os três materiais que compõem as colunas conforme apresentado na Figura 4.

A coluna C1-1 possui as mesmas dimensões para os tubos interno e externo da coluna CH1-1; e o concreto preenchido no anel apresentou uma resistência de 37 MPa no dia do ensaio.

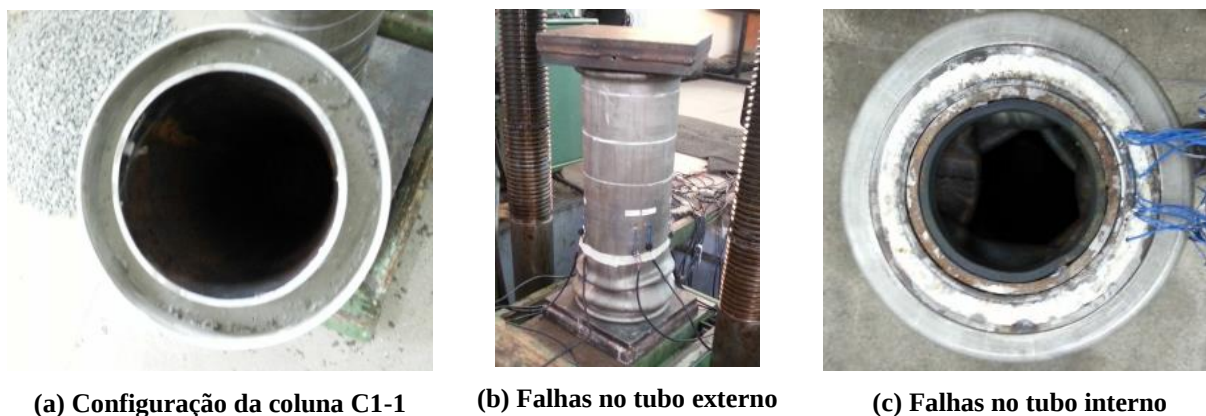


Figura 4. Ensaio da coluna C1-1 (Silva, 2013)

Notou-se que, além da contribuição da resistência do concreto, a presença do tubo interno gera um confinamento ao concreto proporcionando um ganho de resistência para o elemento estrutural. Este estado de confinamento aparenta ser mais significativo na contribuição da capacidade da coluna mista global, do que a parcela que advém somente da resistência à compressão do anel de concreto.

A Figura 5 apresenta as colunas C2-1 e C2-2 que possuem as mesmas dimensões para os tubos interno e externo da coluna CH2-1 e no ensaio destas colunas, o concreto apresentou resistência de 54 MPa. Após a concretagem da coluna C2-1, observou-se uma excentricidade entre os limites superior e inferior na parede do tubo externo. Devido a isto, o resultado gerado sofreu influência dos esforços de flexão, reduzindo a resistência esperada. Ainda assim, a resistência desta coluna foi superior à do ensaio para a coluna C1-1.

Outro ensaio foi realizado com um protótipo de coluna com as mesmas dimensões, caracterizando a coluna C2-2, mas neste ocorreu uma excentricidade, gerando resultado semelhante ao anterior.

Com o aumento do volume de concreto, elevou-se ainda mais a contribuição do concreto na resistência global da coluna mista, conforme esperado.



Figura 5. Ensaio da coluna C2-2 (Silva, 2013)

Ao fim da execução dos ensaios, verificou-se que valores experimentais apresentaram valores próximos ao método simplificado sugerido por Han *et al.* (2010). No que se refere a seções mistas, percebeu-se um desempenho mais favorável nas colunas cuja relação entre os diâmetros interno e externo foram próximos de 0,5. A Tabela 2, abaixo, apresenta os resultados de cargas máximas obtidas nos ensaios.

Tabela 2. Cargas experimentais máximas (Silva, 2013)

Coluna	Cargas (kN)
CH1-1	1390
CH1-2	1200
C1-1	1950
C2-1	2400
C2-2	2290

2.2 Modelos numéricos

O modelo foi desenvolvido através do Método dos Elementos Finitos utilizando o programa de análise estrutural Ansys 12 (2010). As condições de carregamento, para o modelo numérico, tiveram como base os modelos das colunas dos ensaios descritos anteriormente. As dimensões e resistências utilizadas para os tubos no desenvolvimento do modelo numérico estão descritas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Dados para os modelos numéricos das colunas

Tubo	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Resistência (MPa)
Aço Inoxidável	210	3,76	335
Aço Carbono (1)	165	4,5	324
Aço Carbono (2)	114,3	4,25	324

Os modelos numéricos foram elaborados utilizando-se elemento de casca SHELL181 para os tubos e, para caracterização do concreto, foi utilizado o elemento sólido SOLID65, ambos presentes na biblioteca de elementos finitos do programa Ansys 12 (2010).

O elemento SHELL181 é adequado para a análise de estruturas caracterizadas por cascas que apresentam espessuras finas e médias. Este elemento é composto por quatro nós com seis graus de liberdade por nó: translações nas direções X, Y e Z e rotações em relação aos eixos X, Y e Z. As formas de deformação são lineares nas duas direções no plano, para o movimento fora do plano, usa-se uma interpolação mista de componentes de tensores. Este elemento permite efetuar uma análise associada aos esforços de flexão, cisalhamento e do efeito de membrana. Trata-se de um elemento adequado para a modelagem de problemas estruturais que envolvam análise linear e análise não linear, física e geométrica.

O elemento SOLID65 é usado para a modelagem tridimensional de sólidos, com ou sem barras, como os vergalhões. Pode-se também aplicar o elemento para modelar materiais de reforço, como por exemplo, fibras de vidro; e como materiais geológicos, como as rochas, por exemplo. O elemento é definido por oito nós com três graus de liberdade em cada nó com translações nas direções X, Y e Z. O aspecto mais importante deste elemento é o tratamento de propriedades de materiais não lineares. O elemento de concreto é capaz de sofrer fissuras – em três direções ortogonais –, esmagamento, deformação plástica e fluência.

Na Figura 6 abaixo, são mostrados os aspectos dos elementos SHELL181 e SOLID65.

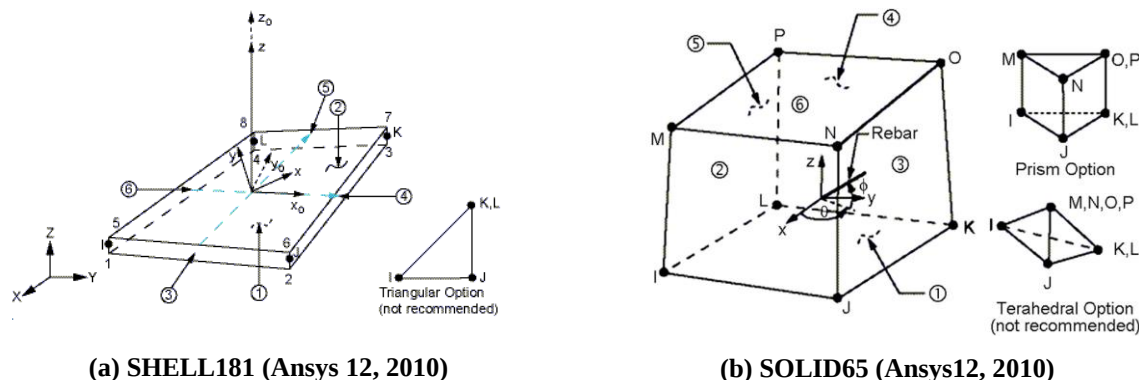


Figura 6. Elementos utilizados no modelo numérico

No total, foram criados quatro modelos, como apresentado na Tabela 4, sendo dois modelos de colunas sem o preenchimento de concreto, com razão entre diâmetros diferentes e dois com o preenchimento, também possuindo razões entre diâmetros diferentes.

Para a definição da altura dos modelos, utilizou-se o critério adotado por Han *et al.* (2010), já explicado anteriormente, no qual a razão entre o diâmetro externo D e o comprimento L da coluna é igual a aproximadamente $1/3$.

Nos modelos numéricos, as colunas sem a presença de concreto serão indicadas com SC, e as colunas preenchidas com o concreto serão indicadas com CC.

Tabela 4. Geometria dos modelos numéricos

Coluna	Diâmetro Externo (mm)	Diâmetro Interno (mm)	Razão D_{int}/D_{ext}	Altura (mm)
1-SC	210	165	0,785	630
2-SC	210	114,3	0,54	630
1-CC	210	165	0,785	630
2-CC	210	114,3	0,54	630

Os modelos que serão apresentados a seguir possuem uma imperfeição geométrica localizada nas regiões aonde houve flambagem nos ensaios. Ou seja, para a coluna 1-SC e 1-CC, a imperfeição foi colocada na base do tubo externo de aço inoxidável e no centro do tubo interno de aço carbono; e para as colunas 2-SC e 2-CC, foi mantida a imperfeição na base do

tubo externo, mas no tubo interno, ela foi inserida nas extremidades do tubo. A imperfeição possui 10 mm de altura e sofre um deslocamento de 1 mm para fora do tubo. A Figura 7 ilustra as dimensões da imperfeição geométrica. Este procedimento teve como objetivo, introduzir imperfeições localizadas e não utilizar as obtidas, por exemplo, através de uma análise de autovalores e autovetores conforme trabalhos anteriores (Loureiro *et al.*, 2014) de forma a comparar os resultados obtidos.

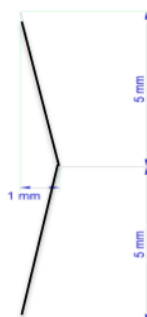


Figura 7. Dimensões da imperfeição geométrica

2.2.1 Modelos sem o preenchimento de concreto

A malha de elementos finitos foi empregada nos modelos numéricos de modo que fosse dividida de maneira uniforme por todo o elemento estrutural. Então, para uma melhor discretização, as áreas foram geradas através de quatro linhas, primeiro para o tubo externo e depois para o tubo interno, garantindo também uma boa ordem de numeração destas áreas. A divisão das malhas de elementos finitos das colunas 1-SC e 2-SC estão representadas na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente.

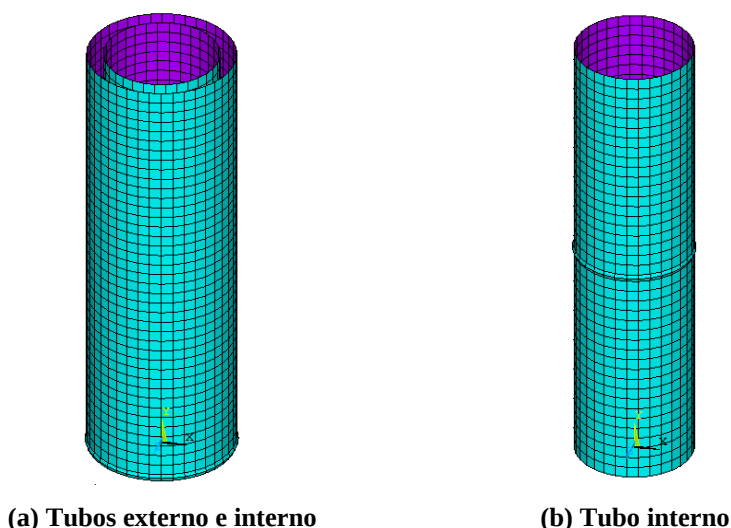


Figura 8. Malha de elementos finitos da coluna 1-SC

Esta preocupação com o número de elementos finitos presentes na malha é justificada não só pelo tempo de processamento computacional envolvido, mas principalmente, em função da capacidade de armazenamento demandada da ordem de Gigabytes (Gb). Ambos os fatores são potencializados ainda mais quando há realização de uma análise não linear, tendo

em vista que, em cada incremento de carga, todas as condições configuradas são reprocessadas e a enorme gama de dados gerados para cada elemento é armazenada a cada novo ciclo de processamento.

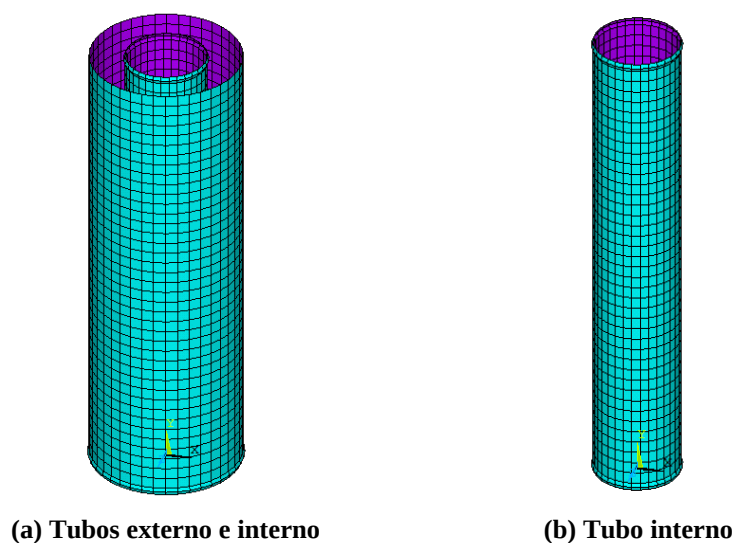


Figura 9. Malha de elementos finitos da coluna 2-SC

Após a conclusão das malhas, os apoios das colunas foram simulados nos modelos numéricos através da restrição dos graus de liberdade apropriados, gerando dois nós no centro da coluna, um no limite inferior e outro no limite superior. As linhas e os nós destes limites foram selecionados criando-se elementos de massa que caracterizam regiões rígidas nas partes inferior e superior da coluna.

O esquema estrutural usado para esta coluna consiste em engaste da base e apoio do tipo “carrinho” para o topo. Como com a criação do elemento de massa, todos os nós ficam totalmente restringidos, eliminou-se a restrição da direção Y no nó superior central, representando assim, adequadamente o modelo. O carregamento foi considerado aplicando-se diretamente, no nó central superior, um deslocamento prescrito no sentido negativo do eixo Y, para realização da análise não linear. As condições de contorno podem ser observadas na Figura 10.

2.2.2 Modelos com o preenchimento de concreto

Para a criação dos tubos destes modelos com concreto, foram utilizados como base, os modelos sem o preenchimento de concreto. E para a garantia de que na geração da malha, os elementos ficassem de forma proporcional na posição das imperfeições, foram criados pontos na mesma altura dos pontos das imperfeições do tubo externo no tubo interno; fazendo o mesmo procedimento para o tubo externo.

O diferencial deste modelo foi a criação dos elementos volumétricos para representação do concreto. Este volume foi gerado a partir de uma área de revolução que garantia o preenchimento do concreto nas imperfeições criadas.

Para o modelo ser processado com maior eficiência, foi necessária a colocação de uma placa que unisse os tubos de aço inoxidável e aço carbono no topo e na base. Este elemento possui 15 mm de espessura e uma resistência de 500 MPa.

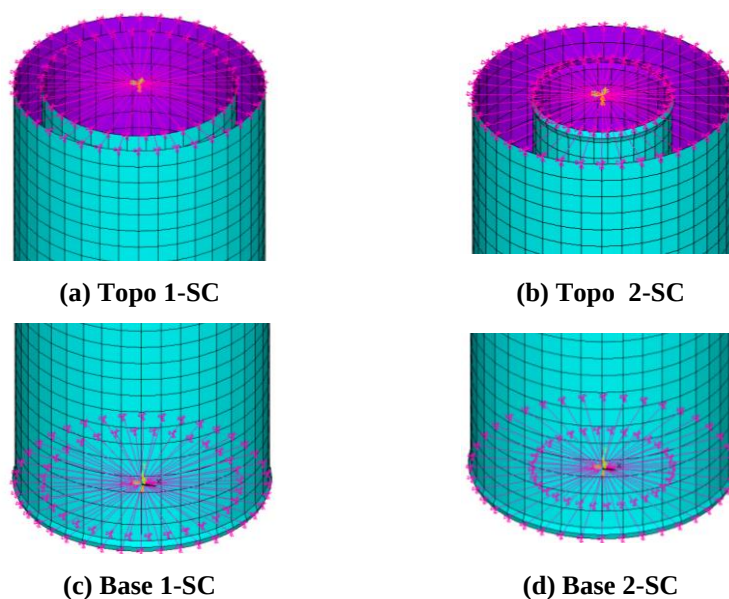


Figura 10. Detalhe das condições de contorno das colunas 1-SC e 2-SC

A Figura 11(a) e (b) ilustra as áreas de revolução para criação dos volumes de concreto das colunas 1-CC e 2-CC. A Figura 11(c) ilustra o modelo da placa que une os tubos de aço inoxidável e aço carbono.

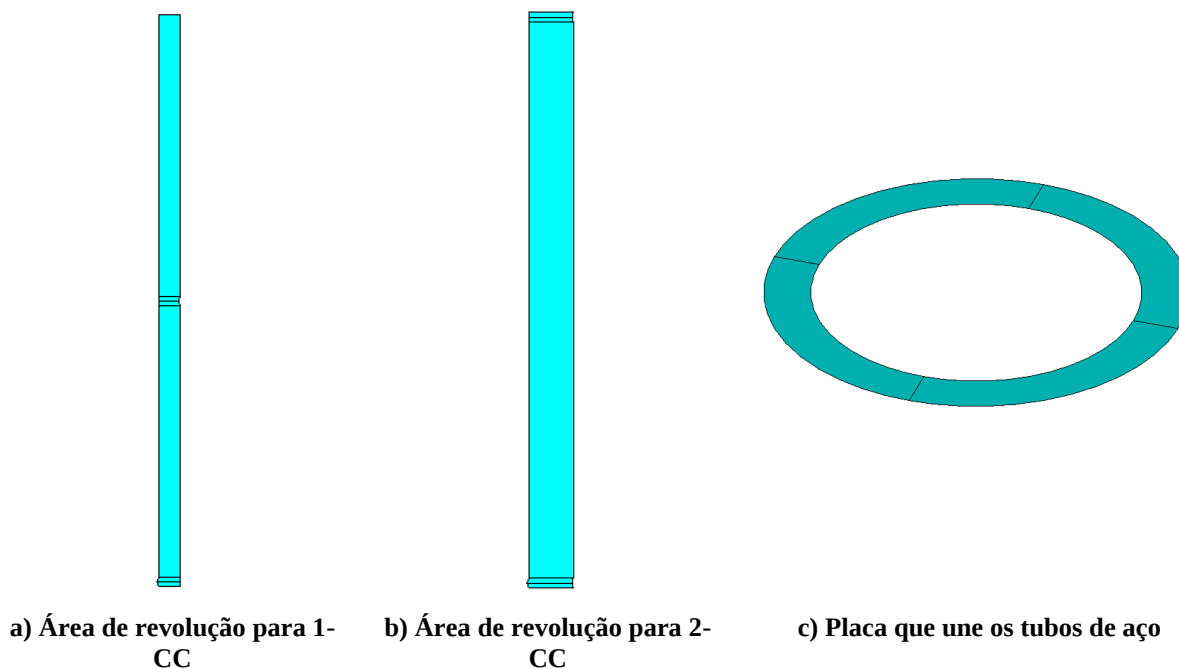


Figura 11. Áreas de revolução do concreto e placa de união dos tubos

A malha de elementos finitos também foi empregada nestes modelos numéricos de forma que fosse dividida de maneira uniforme como já feito nos modelos anteriores. Contudo, a malha dos modelos com o preenchimento de concreto teve que ser menos refinada devido à criação do volume ocupar grande parte do processamento computacional.

A restrição dos graus de liberdade ocorreu da mesma forma que os modelos sem o preenchimento de concreto e outro artifício necessário, para os modelos com o preenchimento de concreto, foi a criação de elementos de contato. Estes elementos caracterizam o contato da superfície do tubo com o volume de concreto, ou seja, o contato entre os elementos SHELL181 e SOLID45.

A Figura 12 ilustra as malhas com as condições de contorno e na Figura 13 é ilustrada a configuração dos elementos de contato.

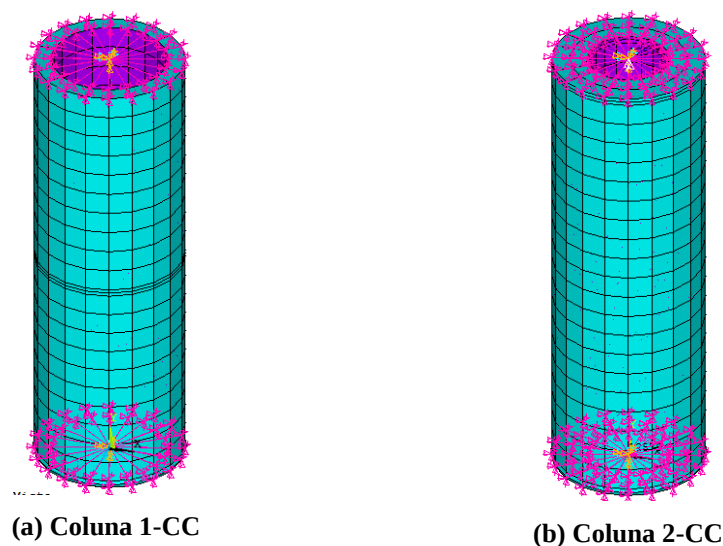


Figura 12. Malha e condições de contorno das colunas 1-CC e 2-CC

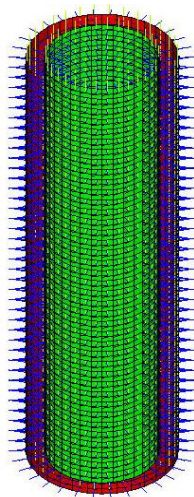


Figura 13. Elementos de contato

Para mensurar a ordem de grandeza do modelo, verificou-se a quantidade total de elementos e nós na malha de elementos finitos de cada coluna, como também o número de keypoints, linhas e áreas descritos na Tabela 5 abaixo.

Após a atribuição de características e propriedades do material, como também, a configuração de toda a geometria, malha de elementos finitos e condições de contorno, deu-se início a calibração do modelo numérico.

Tabela 5. Número de elementos e nós em cada coluna

Coluna	Nº de Keypoints	Nº de Linhas	Nº de Áreas	Nº de Elementos	Nº de Nós
1-SC	79	136	28	3026	3098
2-SC	46	72	32	3090	3162
1-CC	133	255	154	4498	2052
2-CC	114	216	129	5154	2577

3 ANÁLISES E RESULTADOS DOS MODELOS NUMÉRICOS GERADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para as colunas 1-SC, 2-SC, 1-CC e 2-CC, através de análises não lineares desenvolvidas no programa Ansys 12 (2010).

3.1 Coluna 1-SC

Na Figura 14 é apresentada a configuração deformada da coluna 1-SC.

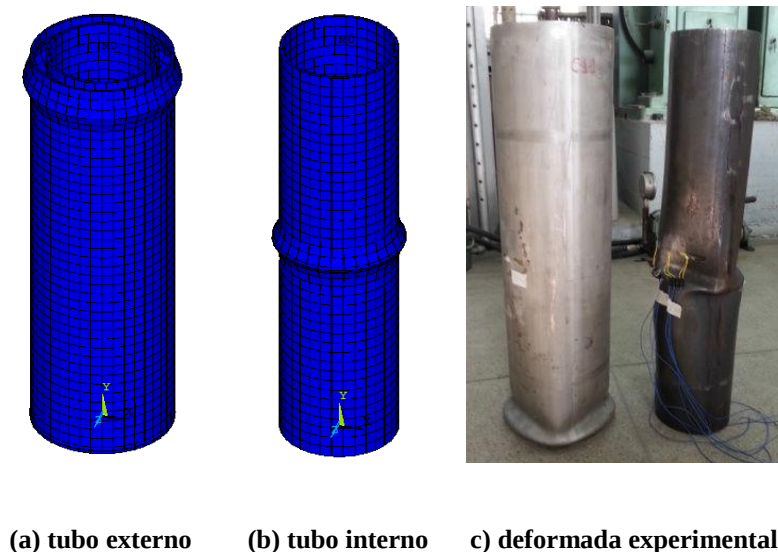


Figura 14. Configuração deformada de 1-SC

Todavia, observa-se que tais resultados não expressam o que ocorreu no modelo experimental desenvolvido por Silva (2013). A coluna externa de aço inoxidável apresentou flambagem local no topo da coluna, enquanto que no modelo físico, a flambagem ocorre na extremidade inferior, ocasionando o fenômeno de “pata de elefante”. Mas no tubo interno de aço carbono a flambagem local é do tipo “diamante” na meia altura da coluna, como no modelo experimental.

Uma nova tentativa foi realizada alterando o valor do raio da imperfeição geométrica inserida. Aumentou-se o deslocamento para fora do tubo em 1 mm, ou seja, agora a

imperfeição do tubo externo possui um avanço de 2 mm para fora do tubo. Não foi alterado para o tubo interno, pois como observado por Silva (2013), espera-se o aparecimento de uma imperfeição global. Então, ao se aumentar muito a imperfeição local, poderia gerar grandes deformações não esperadas para esta região.

Na Figura 15 são apresentadas as tensões de von Mises e a nova configuração deformada da coluna 1-SC. Nota-se que após a alteração da imperfeição, a configuração deformada do modelo apresenta flambagem de maneira semelhante ao modelo experimental.

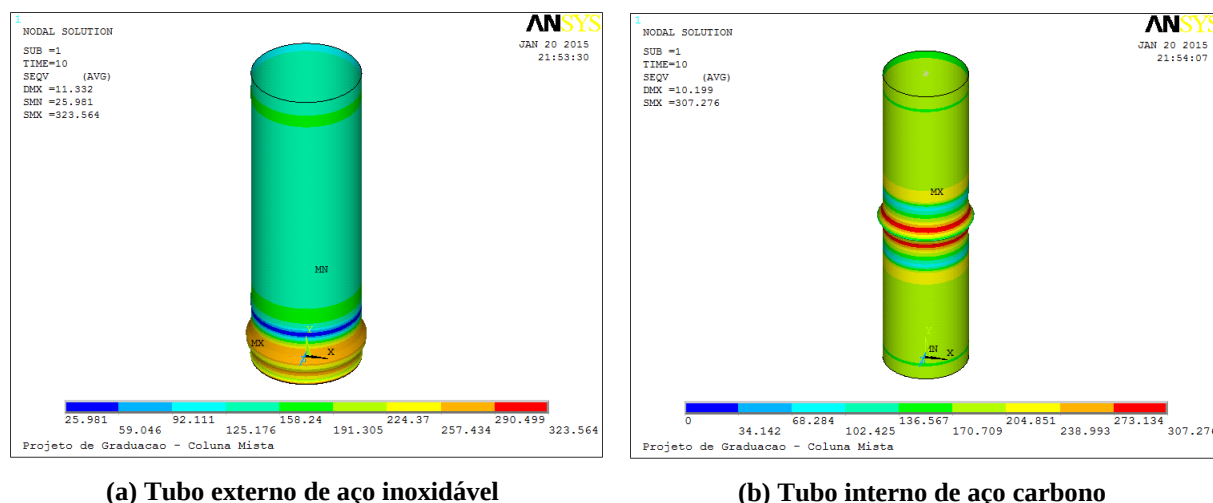


Figura 15. Tensões de Von Mises, em MPa, para a coluna 1-SC

3.2 Coluna 2-SC

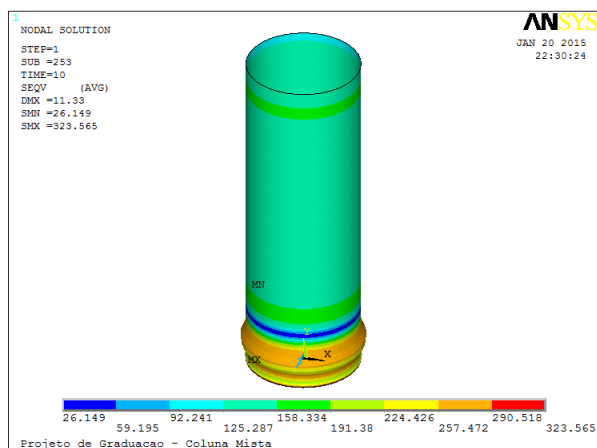
Do mesmo modo que a coluna 1-SC, os resultados obtidos não retratavam a realidade observada no modelo experimental de Silva (2013). Novamente, a imperfeição geométrica do tubo externo foi alterada de 1 mm para 2 mm. No tubo externo, a imperfeição continua localizada na base, mas no tubo interno ao invés de colocar a imperfeição na meia altura, ela foi inserida na base e no topo da coluna.

Constata-se, na Figura 16, que a coluna de aço inoxidável apresenta a flambagem local do tipo “pata de elefante” e as tensões máximas ocorrem na região que ocorre a flambagem. O tubo interno de aço carbono apresenta a flambagem global de maneira discreta. Desta forma, verifica-se que, em ambos os tubos, o comportamento obtido na análise numérica está de acordo com o ensaio realizado em laboratório.

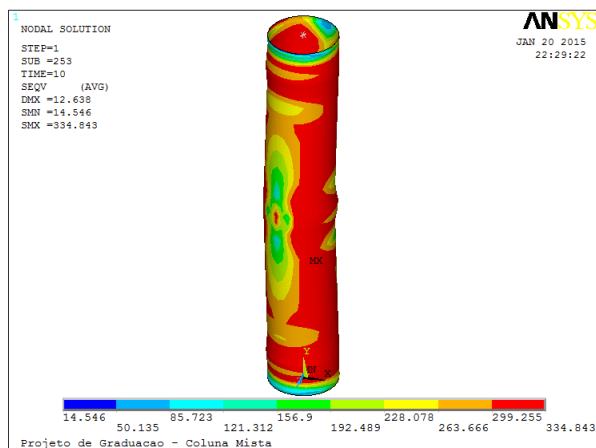
3.3 Coluna 1-CC

Esta coluna foi gerada a partir do modelo da coluna 1-SC, apresentando as mesmas características para as imperfeições.

A Figura 17 apresenta a distribuição das tensões de von Mises obtida na análise numérica desta coluna e na Figura 18, a distribuição de deformações plásticas caracterizando a falha no anel de concreto na região a meia altura da coluna.

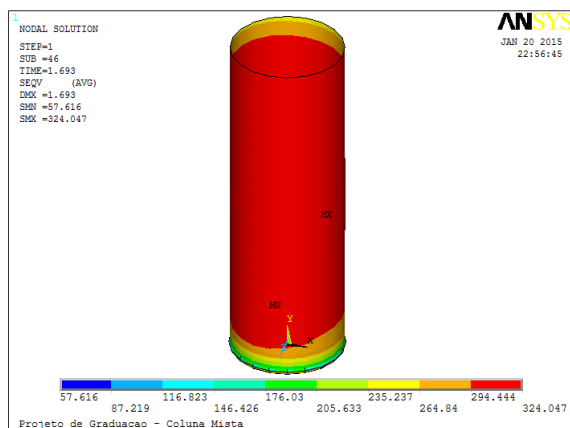


(a) Tubo externo de aço inoxidável

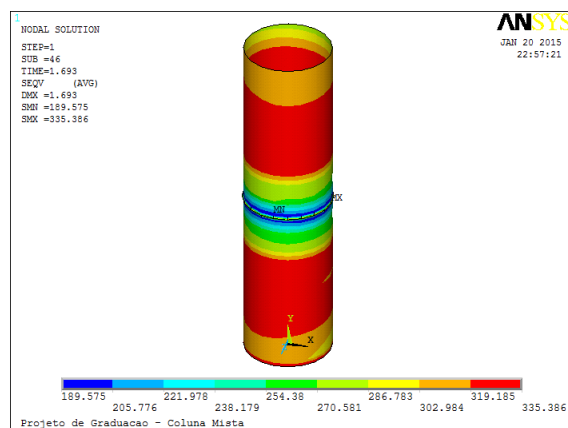


(b) Tubo interno de aço carbono

Figura 16. Tensões de Von Mises, em MPa, para a coluna 2-SC



(a) Tubo externo de aço inoxidável



(b) Tubo interno de aço carbono

Figura 17. Tensões de Von Mises para os tubos de aço, em MPa, para a coluna 1-CC

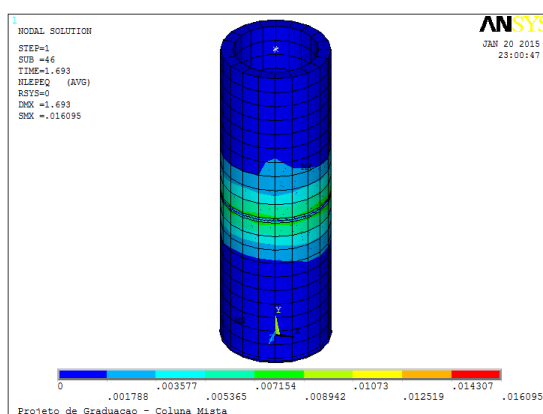


Figura 18. Deformações plásticas para o concreto preenchido em 1-CC

3.4 Coluna 2-CC

Esta coluna foi gerada a partir do modelo de 2-SC, apresentando as mesmas características para as imperfeições geométricas iniciais.

A Figura 19 apresenta a distribuição das tensões de von Mises obtida na análise numérica desta coluna e na Figura 20, a distribuição de deformações plásticas caracterizando a falha no anel de concreto de forma mais distribuída do quando comparada com a coluna 1-CC que possui tubo interno de aço carbono com diâmetro maior.

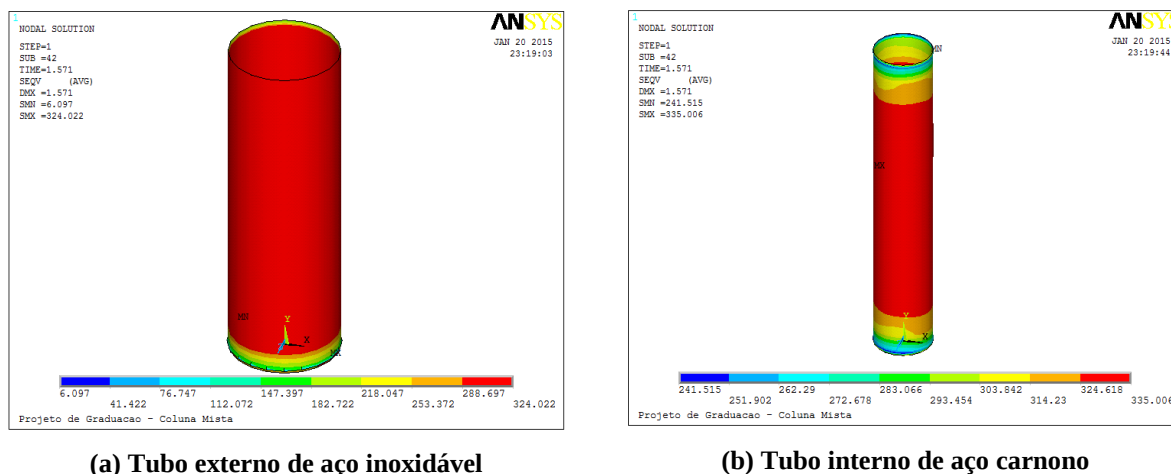


Figura 19. Tensões de von Mises, em MPa, para a coluna 2-CC

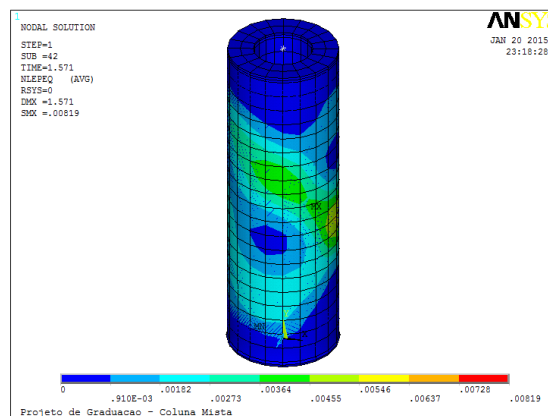


Figura 20. Deformações plásticas para o concreto preenchido em 2-CC

Os resultados obtidos para as colunas 1-CC e 2-CC são satisfatórios e no que diz respeito ao comportamento, os resultados se assemelham. Em ambas observa-se que as tensões mais altas nos tubos de aço concentraram-se no topo e na base da coluna. A maior diferença ocorreu no preenchimento de concreto, isto é, com o aumento do volume de concreto, aumentou ainda mais a contribuição do concreto na resistência global da coluna mista, fato este, já observado no modelo experimental.

3.5 Comparação dos resultados

Na Figura 21 são apresentadas as curvas carga *versus* deslocamento obtidas através dos modelos numéricos e na Tabela 6 são comparados os resultados (em kN), para as cargas máximas, obtidas nos ensaios experimentais com os resultados encontrados nos modelos numéricos desenvolvidos no presente artigo.

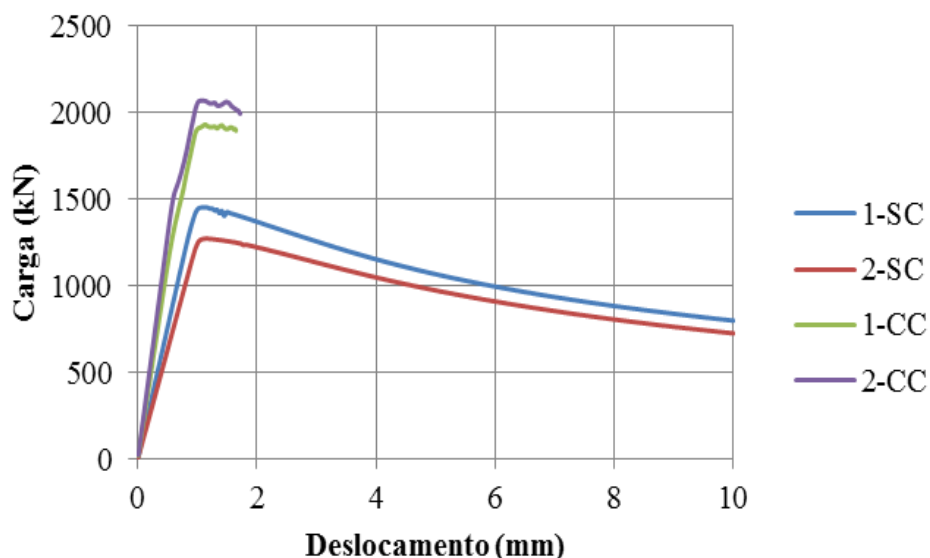


Figura 21. Curvas de carga *versus* deslocamento das colunas analisadas

O valor da carga máxima para o modelo numérico da coluna 2-CC apresentou maior discrepância, provavelmente porque no ensaio experimental, esta coluna apresentou uma excentricidade na aplicação da carga.

Tabela 6. Comparação dos resultados, em kN, entre os ensaios e os modelos numéricos

Coluna	Ensaio Experimental	Modelo Numérico
1-SC	1400	1455,4
2-SC	1200	1274,7
1-CC	1950	1963,6
2-CC	2400 e 2290	2071,0

4 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

Quatro análises paramétricas foram realizadas no presente artigo de forma a avaliar a influência de alguns parâmetros no comportamento global das colunas mistas analisadas, como por exemplo, variação da espessura do tubo de aço inoxidável; variação do diâmetro do tubo de aço carbono; variação do comprimento da coluna; e variação da resistência do concreto.

4.1 Variação da espessura do tubo de aço inoxidável

Para verificação deste parâmetro, foram gerados modelos numéricos com as mesmas características dos modelos 1-SC, 2-SC, 1-CC e 2-CC, ou seja, as alturas, os diâmetros dos tubos e imperfeições geométricas foram mantidos.

Foram escolhidas três espessuras que não diminuíssem o espaço entre os tubos e que não alterassem de forma significativa, o índice de esbelteza da coluna. A Figura 22 ilustra os valores de carga *versus* espessura destes modelos.

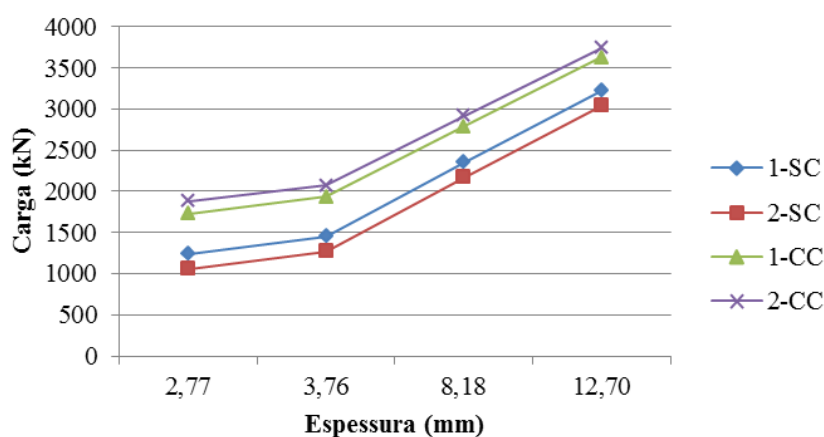


Figura 22. Carga *versus* espessura

Nota-se um comportamento linear conforme a espessura do tubo de aço inoxidável aumenta a partir de uma espessura de 3,76mm, ou seja, o aumento desta espessura é proporcional ao aumento da capacidade de carga das colunas. Observa-se também pouca variação para os valores de carga máxima com as espessuras entre 2,77 mm e 3,76 mm, não havendo necessidade de se optar por diminuir mais a espessura do tubo de aço inoxidável.

A redução do volume de concreto não caracterizou a queda da resistência, logo, o que implicaria na escolha da espessura, seria o custo do tubo de aço inoxidável e a necessidade de uma maior capacidade de carga das colunas.

4.2 Variação do diâmetro do tubo de aço carbono

Para verificação deste parâmetro, foram gerados modelos numéricos com as mesmas características dos modelos 1-SC, 2-SC, 1-CC e 2-CC, ou seja, a altura, o diâmetro do tubo de aço inoxidável e as imperfeições geométricas foram mantidas.

Foram extraídos valores de diâmetros para as espessuras de 4,5 mm e 4,25 mm utilizadas de acordo com a razão entre os diâmetros. Dois valores de diâmetro foram escolhidos para cada valor de espessura; estes valores oscilam entre os parâmetros usados no modelo de calibração e a escolha feita garantiu que a distância entre os tubos não ficasse nem muito grande e nem muito pequena. A Figura 23 ilustra os valores de carga *versus* diâmetro destes tubos.

Fica evidente que nas colunas com o preenchimento de concreto, conforme o diâmetro do tubo interno aumenta, ocorre uma queda da capacidade de carga gerada pela diminuição do volume de concreto. Nas colunas sem este preenchimento, conforme a parede do tubo interno aproxima-se da parede do tubo externo, a capacidade de carga da coluna aumenta.

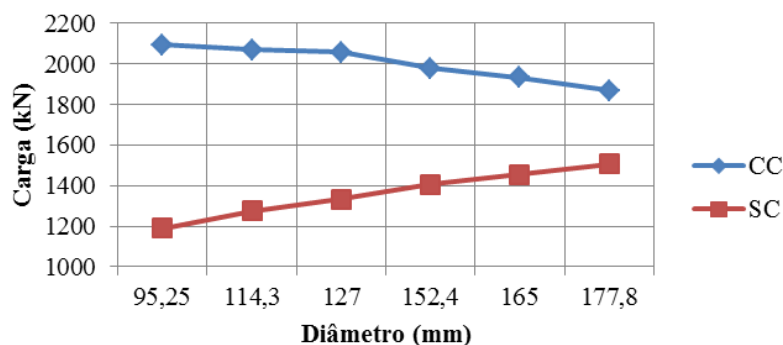


Figura 23. Carga versus diâmetro

Observou-se que para a coluna 1-CC, de diâmetro do tubo interno de 165 mm, enquanto o volume de concreto aumenta em 29,07%, a resistência tem um aumento de 2,27% quando o diâmetro é diminuído para 152,4 mm; e quando se eleva o diâmetro para 177,8 mm, o volume de concreto diminui em 31,86% e a resistência cai em 3,33%. Já para a coluna 2-CC, de diâmetro do tubo interno de 114,3 mm, enquanto o volume de concreto aumenta em 14,33%, a resistência ganha um aumento de 1,1% quando o diâmetro é diminuído para 95,25 mm; e quando se eleva o diâmetro para 127 mm o volume de concreto diminui em 10,92%, a resistência cai em 0,7%. Conclui-se então que não há necessidade de se aumentar o volume de concreto já que a resistência da coluna pouco se modifica.

4.3 Variação do comprimento da coluna

Para avaliar numericamente o comportamento das colunas com a variação da altura, foram modeladas colunas considerando-se apenas, aquelas com preenchimento de concreto. O modelo sofreu algumas mudanças; tanto para a coluna 1-CC, quanto para a coluna 2-CC foram retiradas as imperfeições geométricas já que ao aumentar o comprimento das colunas esperava-se um comportamento de flambagem mais global. Então foram introduzidas as imperfeições iniciais através de uma análise de autovetores e autovalores.

A primeira alteração de altura foi para 1 m. Posteriormente foram gerados mais oito modelos fazendo o aumento das alturas de 2,5 m em 2,5 m até chegar à altura de 20 m. Na Figura 24 é ilustrada a curva de carga versus índice de esbeltez destas colunas.

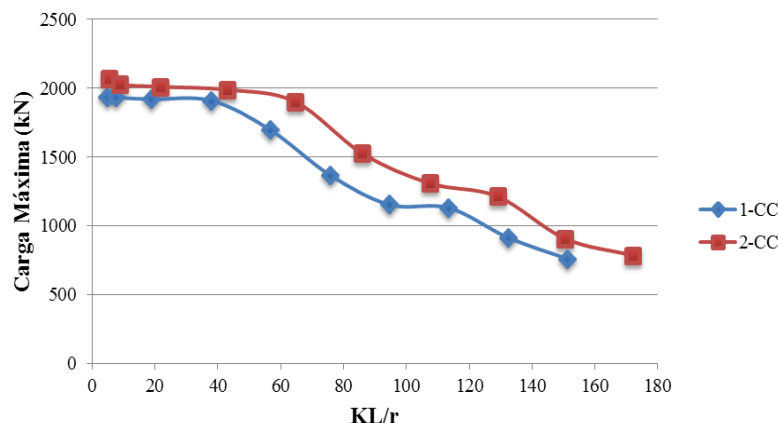


Figura 24. Carga versus comprimento das colunas 1-CC e 2-CC

Nota-se um comportamento em conformidade com a curva de Euler para as colunas mais esbeltas e regiões bem definidas para as colunas curtas e intermediárias, verificando assim, um resultado coerente para o modelo numérico idealizado para a variação do parâmetro da altura destas colunas.

4.4 Variação da resistência do concreto

A variação deste parâmetro teve como objetivo avaliar a capacidade de carga destas colunas com concreto de resistência inferior. Foram considerados concretos de 25 MPa, 35 MPa e 45 MPa nestes modelos. Os modelos numéricos anteriores foram calibrados com um concreto que possuía 54 MPa de resistência à compressão.

Os concretos mais resistentes possuem uma maior capacidade de carga, como esperado. Mas a alteração desse parâmetro fica mais evidenciada para a coluna 2-CC, que possui maior volume de concreto.

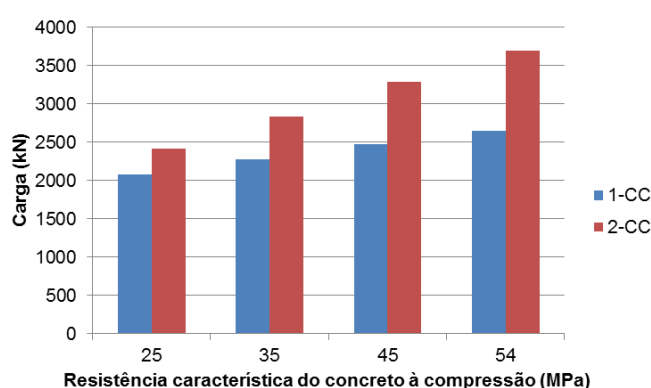


Figura 25. Influência da resistência do concreto

Contudo, observa-se que estes valores são incompatíveis se comparados com as colunas calibradas através do ensaio experimental, já que foram calculados novos valores de carga para as colunas com 54 MPa. Deve-se então fazer um estudo mais criterioso do método de Drucker Prager ou do tipo de curva de deformação para o cálculo da resistência do concreto.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou inicialmente um estudo sobre o comportamento estrutural de colunas mistas de aço inoxidável no tubo externo, aço carbono no tubo interno, podendo ter ou não, o espaço entre os tubos preenchido por concreto. Este primeiro estudo deu-se principalmente em relação à resistência a uma carga axial e aos modos de flambagem da coluna. Foram desenvolvidos modelos numéricos em elementos finitos de modo a comparar os resultados obtidos e verificar se eram compatíveis com os modelos experimentais realizados em ensaios de laboratório. A análise do comportamento das colunas foi feita a partir dos resultados de tensões, deformações e modos de flambagem obtidos nos modelos numéricos e comparados com os modelos experimentais.

O raio da imperfeição geométrica inicial foi o primeiro parâmetro observado e se notou a necessidade de aumentá-lo para que a deformação da coluna apresentasse a flambagem do tipo “pata de elefante”. Posteriormente, foram comparados os valores de carga máxima para as colunas modeladas com os modelos experimentais de calibração. Os resultados foram

compatíveis, mas a coluna 2-CC apresentou uma discrepância maior já que no ensaio do laboratório esta apresentou excentricidade.

Após a realização desse comparativo, foram realizadas análises paramétricas nos modelos numéricos a fim de visualizar o comportamento das colunas mistas estudadas. Os resultados apresentados nas análises paramétricas mostraram que: ao alterar a espessura do tubo externo de aço inoxidável, a resistência à compressão aumenta linearmente; ao alterar o diâmetro do tubo interno, o ganho ou perda de resistência modificava-se muito pouco com a variação do volume de concreto; ao alterar o comprimento das colunas, elas apresentavam um comportamento de flambagem global, como esperado.

Observou-se então que os modelos numéricos com base no Método dos Elementos Finitos são adequados para a modelagem das colunas, mas devem ser melhores estudados, já que ainda apresentam algumas discrepâncias.

REFERÊNCIAS

Anslys 12.0 ®, 2010. ANSYS - Inc. Theory Reference.

Han L. H.; Ren Q. X.; e Li W. Tests on Inclined, Tapered and STS Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2010; 66 (10): 1186–1195.

Loureiro, D. L. F. ; Lima, L.R.O.de ; Vellasco, P. C. G. da S. Numerical Analysis of Stainless Steel, Concrete Encased and Carbon Steel Double-Skin Tubular Stub Columns. In: Eurosteel 2014 - 7th European Conference on Steel and Composite Structures, 2014, Nápoles. *Proceedings of the Eurosteel 2014 - 7th European Conference on Steel and Composite Structures*. Brussels: ECCS European Convention for Constructional Steelwork, 2014. v. 1. p. 1-6.

Silva, G. B. da, Comportamento Estrutural de Colunas de Perfis Tubulares Mistos, Dissertação de Mestrado , PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UERJ, 2013

Tao Z.; Uy B.; Liao F. Y.; e Han L. H. Finite Element Modelling of Concrete-Filled Square Stainless Steel Tubular Stub Columns under Axial Compression. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Steel Structures*. 2009, p. 87 [full paper on CD-Rom]