

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA FLÁVIA CANALES

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE AÇO
TUBULARES E PILARES MISTOS DE PERFIS TUBULARES
PREENCHIDOS COM CONCRETO DE ACORDO COM A ABNT NBR
16239:2013**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2014

ANA FLÁVIA CANALES

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE AÇO
TUBULARES E PILARES MISTOS DE PERFIS TUBULARES
PREENCHIDOS COM CONCRETO DE ACORDO COM A ABNT NBR
16239:2013**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof Dr. Ronaldo Rigobello.

CAMPO MOURÃO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Nº 55

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES DE AÇO TUBULARES E PILARES
MISTOS DE PERFIS TUBULARES PREENCHIDOS COM CONCRETO DE ACORDO COM
A ABNT NBR 16239:2013**

por

Ana Flávia Canales

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h50min do dia 06 de agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Angelo Giovanni Corelhano
(UTFPR)

Prof. Dr. Leandro Waidemam
(UTFPR)

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil: **Prof. Dr. Marcelo Guelbert**

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, e é a Ele minha maior gratidão. Vem dEle tudo o que sou, o que tenho e o que espero.

Ao meu pai Mauricio, minha mãe Cácia, e meu irmão Mauricio. A vocês não tenho e nunca teria palavras o suficiente para agradecer tudo que fizeram e fazem por mim, pela simplicidade, amizade, por acreditarem em mim principalmente quando nem eu mais acreditava. Obrigada pela paciência, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho. Sem vocês nada disso seria possível. Vocês são a minha vida, amo vocês.

Quem tem amigos, nunca está só. E por isso agradeço aos meus amigos que conquistei durante esses anos de faculdade, Aline, André, Marcos, Fernando, Caroline e Paulo. Obrigada por tudo, pela amizade, pelo companheirismo e principalmente agradeço por fazerem parte das melhores memórias e histórias de todos esses anos. Vocês foram essenciais nessa caminhada, e sempre levarei todos com muito carinho em meu coração.

Agradeço com muito carinho as minhas melhores amigas Dayane e Herily, que mesmo com tantos quilômetros nos separando fisicamente, de alguma forma se mostraram sempre presentes. Com vocês pude dividir os momentos de tristezas, angústias, alegrias e principalmente vitórias. Obrigada por fazerem parte da minha vida.

Ao meu orientador Prof Dr. Ronaldo Rigobello por aceitar esse desafio. Agradeço toda a atenção, paciência e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Departamento Acadêmico de Construção Civil pela atenção e todo o ensinamento transmitido.

A todas as pessoas que de alguma forma estiveram ao meu lado em algum momento desta caminhada.

A todos vocês meu sincero muito obrigada!

RESUMO

CANALES, Ana F. **Estudo do dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos de perfis tubulares preenchidos com concreto de acordo com a ABNT NBR 16239:2013**. 2014. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

A utilização de perfis de aço de seções tubulares para pilares sejam elas simples ou mistas de aço e concreto, são uma solução interessante para a construção civil. Este tipo de perfil, devido a sua forma geométrica, apresenta grande resistência aos esforços solicitantes maneira geral. O dimensionamento para este tipo de elemento estrutural é coberto pela ANT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Porém, tendo em vista as particularidades dos perfis tubulares, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou recentemente a ABNT NBR 16239:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, uma norma específica, com o intuito de apresentar cálculos mais precisos para esses tipos de seção. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi estudar os avanços introduzidos pela ABNT NBR 16239:2013 nos procedimentos de cálculo em relação à ABNT NBR 8800:2008. Para isso, planilhas eletrônicas foram estruturadas para a realização do dimensionamento dos pilares. A partir dos resultados obtidos foi possível constatar a importância das alterações apresentadas pela nova norma, especialmente por apresentarem interferência direta nos resultados das normais resistentes de cálculo.

Palavras-chave: Pilares de aço. Pilares mistos de aço e concreto. Perfil tubular.

ABSTRACT

CANALES, Ana F. **Study of the design of tubular steel columns and concrete filled steel tubular sections according to ABNT NBR 16239:2013**. 2014. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

The use of steel hollow sections as well concrete filled steel hollow sections for columns are an interesting solution for the civil construction. Due to its geometric shape they have high resistance to internal forces and stresses. The design for this type of structural element is covered by the ABNT NBR 8800:2008 - Design of steel and composite structures for buildings. Therefore, to account the hollow sections particularities the Brazilian Technical Standards Association recently published the ABNT NBR 16239:2013 - Design of steel and composite structures for buildings using hollow sections, which provides specific rules for steel hollow section for a more accurate design. The aim of this work was to study the advances introduced by the ABNT NBR 16239:2013 design procedures in relation to ABNT NBR 8800:2008. Spreadsheets were structured to perform the design of columns. From the results it was verified the importance of the new rules and procedures presented by de new standard, affecting specially the results for the axial force resistance.

Keywords: Steel columns. Steel Hollow sections. Concrete filled steel hollow sections.

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Planilha pilar de aço Aço_Retang NBR 8800_08.....	66
Imagem 2 - Planilha pilar de aço Aço_Circular NBR 8800_08	67
Imagem 3 - Planilha pilar de aço Aço_Retang NBR 16239_13.....	68
Imagem 4 - Planilha pilar de aço Aço_Circular NBR 16239_13.....	69
Imagem 5 - Planilha pilar misto Misto_Retang NBR 8800_08.....	70
Imagem 6 - Planilha pilar misto Misto_Circular NBR 8800_08.....	71
Imagem 7 - Planilha pilar misto Misto_Retang NBR 16239_13.....	72
Imagem 8 - Planilha pilar misto Misto_Circular NBR 16239_13.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos – base

Letras romanas minúsculas

b	largura
d	diâmetro; altura total da seção transversal
e	excentricidade
f_{cd}	resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	resistência característica do concreto à compressão
f_y	resistência ao escoamento do aço
f_{yd}	resistência de cálculo ao escoamento do aço
f_{ys}	resistência ao escoamento do aço da armadura
f_{sd}	resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura
h	altura
r	raio de giração; raio
t	espessura
t_w	espessura da alma
x	coordenada
y	coordenada; distância

Letras romanas maiúsculas

A	área
A_g	área bruta da seção transversal
C_b	fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
C_w	constante de empenamento da seção transversal
D	diâmetro externo da seção tubular circular
E, E_a	módulo de elasticidade do aço
E_c	módulo de elasticidade secante do concreto
$E_{c,red}$	módulo de elasticidade reduzido do concreto devido aos efeitos de retração e fluência
E_s	módulo de elasticidade do aço da armadura do concreto
G	módulo de elasticidade transversal do aço
I	momento de inércia
J	constante de torção
K	coeficiente de flambagem de barras comprimidas
L	comprimento
M	momento fletor
N	força axial
Q	fator de redução total associado à flambagem local
Q_a	fator de redução que leva em conta a flambagem local dos elementos AA
V	força cortante

W	módulo de resistência elástico
Z	módulo de resistência plástico

Letras gregas minúsculas

α	coeficiente relacionado à curva de dimensionamento à compressão
δ	fator de contribuição do aço
γ	coeficiente de ponderação da resistência
λ	índice de esbeltez; parâmetro de esbeltez
λ_0	índice de esbeltez reduzido
λ_p	parâmetro de esbeltez limite para seções compactas
λ_r	parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas
ν	coeficiente de Poisson
χ	fator de redução associado à resistência à compressão
σ	tensão normal
τ	tensão de cisalhamento

Símbolos subscritos

Letras romanas minúsculas

a	aço
c	concreto; compressão
e	elástico
ef	efetivo
p/	plastificação
s	armadura
x	relativo ao eixo x
y	escoamento; relativo ao eixo y

Letras romanas maiúsculas

G	ação permanente
Rd	resistente de cálculo
Sd	solicitante de cálculo

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para o cálculo do momento fletor	29
Tabela 2 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 1 – ABNT NBR 8800:2008.....	50
Tabela 3 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 2 – ABNT NBR 8800:2008.....	50
Tabela 4 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 1 – ABNT NBR 16239:2013.....	50
Tabela 5 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 2 – ABNT NBR 16239:2013.....	51
Tabela 6 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 1 – ABNT NBR 8800:2008.....	51
Tabela 7 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 2 – ABNT NBR 8800:2008.....	52
Tabela 8 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 1 – ABNT NBR 16239:2013.....	52
Tabela 9 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 2 – ABNT NBR 16239:2013.....	52
Tabela 10 – Resultados para seção tubular retangular – Momento fletor resistente de plastificação de cálculo - ABNT NBR 8800:2008.....	53
Tabela 11 – Resultados para seção tubular retangular – Normal resistente de cálculo - ABNT NBR 8800:2008	54
Tabela 12 – Resultados para seção tubular circular – Momento fletor resistente de plastificação de cálculo - ABNT NBR 8800:2008.....	55
Tabela 13 – Resultados para seção tubular circular – Normal resistente de cálculo - ABNT NBR 8800:2008.....	55
Tabela 14 – Comparativo dos redutores de resistência χ e das normais resistentes de cálculo.....	58
Tabela 15 – Comparativo da rigidez efetiva a flexão, força axial de flambagem, reductor de resistência e das normais resistentes de cálculo.....	60
Tabela 16 – Comparativo entre resultados dos modelos de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 JUSTIFICATIVA	14
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4.1 Pilares de aço com perfis tubulares	15
4.1.1 Histórico	15
4.1.2 Principais características dos pilares de aço tubulares	15
4.1.3 Vantagens e desvantagens do uso de pilares de aço com perfis tubulares	16
4.1.4 Pesquisas na área	17
4.2 Pilares Mistos Aço-concreto	17
4.2.1 Histórico	17
4.2.2 Estruturas formadas por elementos mistos	18
4.2.3 Classificação de Pilares Mistos de Aço e Concreto	19
4.2.3.1 Pilares mistos revestidos	19
4.2.3.2 Pilares mistos preenchidos	20
4.2.4 Principais características dos pilares mistos preenchidos	21
4.2.4.1 Efeito do confinamento do concreto	21
4.2.5 Vantagens e desvantagens do uso de pilares mistos de perfis tubulares preenchidos	22
4.2.6 Pesquisas na área	23
5 METODOLOGIA	24
5.1 ABNT NBR 8800:2008 – PILARES DE AÇO	24
5.1.1 Pilares submetidos à compressão axial	24
5.1.1.1 Fator de redução χ	25
5.1.1.2 Fator de redução total associado à flambagem local	26
5.1.1.3 Limitação do índice de esbeltez	28
5.1.2 Pilares submetidos a momento fletor e força cortante	28
5.1.2.1 Momento fletor resistente de cálculo	28
5.1.3 Pilares submetidos à flexo-compressão	30
5.1.2.2 Força cortante resistente de cálculo	30
5.2 ABNT NBR 16239:2013 – PILARES DE AÇO	32
5.2.1 Determinação do fator de redução de barras comprimidas	32
5.3 ABNT NBR 8800:2008 – PILARES MISTOS	33
5.3.1 Pilares submetidos à compressão axial	34
5.3.2 Pilares submetidos à flexo-compressão	37
5.3.2.1 Modelo de cálculo I	37
5.3.2.2 Modelo de cálculo II	37
5.3.4 Momentos fletores de plastificação de cálculo	39
5.4 ABNT NBR 16239:2013 – PILARES MISTOS	42
5.4.1 Rigidez efetiva à flexão	42
5.4.2 Modelo de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão	43

5.4.3 Determinação da força cortante resistente de cálculo do pilar misto	44
5.5 Planilhas desenvolvidas	44
5.5.1 Pilares tubulares de aço	45
5.5.1.1 Verificação a compressão	46
5.5.1.2 Verificação à força cortante	46
5.5.1.3 Verificação à flexo-compressão	47
5.5.2 Pilares tubulares mistos	47
5.5.2.1 Verificação a compressão	48
5.5.2.2 Força cortante Resistente de Cálculo.....	48
5.5.2.3 Verificação à flexo-compressão	48
5.6 Validação das planilhas elaboradas	49
5.6.1 Exemplos de pilares de aço tubulares.....	49
5.6.1.1 Pilar de aço de seção tubular retangular	49
5.6.1.2 Pilar de aço de seção tubular circular.....	51
5.6.2 Exemplos de pilares mistos de perfis tubulares preenchido com concreto	53
5.6.2.1 Pilar misto de perfil tubular retangular preenchido com concreto.....	53
5.6.2.2 Pilar misto de perfil tubular circular preenchido com concreto	54
6 RESULTADOS	56
6.1 Pilares de aço com perfis tubulares	56
6.2 Pilares mistos de perfil tubular preenchido com concreto	59
7 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A – PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR TUBULAR RETANGULAR DE AÇO DE ACORDO COM A NBR 8800:2008	66
APÊNDICE B - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR TUBULAR CIRCULAR DE AÇO DE ACORDO COM A NBR 8800:2008.....	67
APÊNDICE C - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR TUBULAR RETANGULAR DE AÇO DE ACORDO COM A NBR 16239:2013	68
APÊNDICE D - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR TUBULAR CIRCULAR DE AÇO DE ACORDO COM A NBR 16239:2013.....	69
APÊNDICE E - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR MISTO DE PERFIL TUBULAR RETANGULAR PREENCHIDO COM CONCRETO DE ACORDO COM A NBR 8800:2008	70
APÊNDICE F - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR MISTO DE PERFIL TUBULAR CIRCULAR PREENCHIDO COM CONCRETO DE ACORDO COM A NBR 8800:2008	71
APÊNDICE G - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR MISTO DE PERFIL TUBULAR RETANGULAR PREENCHIDO COM CONCRETO DE ACORDO COM A NBR 16239:2013	72
APÊNDICE H - PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR MISTO DE PERFIL TUBULAR RETANGULAR PREENCHIDO COM CONCRETO DE ACORDO COM A NBR 16239:2013	73

1 INTRODUÇÃO

Os perfis tubulares de aço sempre foram muito utilizados na construção civil por apresentarem boa resistência a esforços solicitantes de compressão, tração, torção, flexo-torção e flexo-compressão. Os pilares constituídos desse tipo de perfil apresentam como característica sua esbeltez reduzida, se comparado aos pilares convencionais de concreto armado. Quando preenchidos com concreto, passam a ser chamados de pilares mistos constituídos de perfis tubulares preenchidos com concreto.

Os pilares mistos de perfis tubulares preenchidos com concreto são compostos por uma peça de aço que trabalha em conjunto com o concreto, unindo a capacidade de resistência do aço e a robustez do concreto. Essa combinação entre as propriedades dos dois materiais resulta em seções transversais reduzidas, o que torna possível estruturas mais leves e a economia de materiais.

Tendo em vista que, tanto o sistema estrutural com perfis tubulares de aço quanto o de pilares mistos preenchidos com concreto, apresentam vantagens para a construção civil, recentemente a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou uma norma apenas para perfis tubulares, que anteriormente eram contemplados pela ABNT NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

A ABNT NBR 16239:2013 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares, foi criada com o intuito de apresentar cálculos mais precisos para este tipo de perfil, levando em consideração todas as suas particularidades.

Portanto, este trabalho tem como objetivo estudar, a partir de planilhas estruturadas para a realização do dimensionamento, os avanços introduzidos pela ABNT NBR 16239:2013 nos procedimentos de cálculo em relação à ABNT NBR 8800:2008.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os procedimentos apresentados pelas normas brasileiras ABNT NBR 16239:2013 e ABNT NBR 8800:2008 para o dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos constituídos de perfis tubulares preenchidos com concreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos constituídos de perfis tubulares preenchidos com concreto de acordo com as normas ABNT NBR 16239:2013 e a ABNT NBR 8800:2008;
- Desenvolver planilhas no programa Excel para dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos constituídos de perfis tubulares preenchidos com concreto;
- Comparar os esforços resistentes de cálculo obtidos com os procedimentos de cálculo da ABNT NBR 16239:2013 e da ABNT NBR 8800:2008.

3 JUSTIFICATIVA

A utilização de perfis tubulares de aço é uma solução interessante para diversas obras, tanto do ponto de vista técnico como arquitetônico, favorecendo o planejamento, o orçamento, e possibilitando maior qualidade no processo construtivo. Tais perfis apresentam boa resistência aos esforços solicitantes devido a sua forma geométrica. Quando analisados em relação à manutenção, os perfis tubulares de aço, por terem menor área de superfície, são mais econômicos na pintura e proteção contra fogo, e ainda permite que a espessura do tubo seja alterada internamente, sem precisar alterar as dimensões externas da seção.

Os pilares mistos preenchidos, mesmo pouco utilizados no Brasil, trazem vantagens significativas às construções. Quando comparado com os elementos estruturais convencionais, a combinação entre as propriedades do aço com as do concreto propiciam seções transversais reduzidas, resultando em economia de materiais, sem perder a capacidade de resistência à compressão. Esse tipo de estrutura ainda fornece vantagens estruturais, construtivas e econômicas.

Diante disso, é de interesse a realização de estudo nessa área, principalmente em relação aos métodos de cálculo do dimensionamento de tais estruturas.

O estudo comparativo entre os resultados dos procedimentos de cálculo apresentados pelas normas é justificado, tendo em vista a recente publicação da ABNT NBR 16239:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. De acordo com a ABNT NBR 16239:2013, ainda são válidas todas as prescrições da ABNT NBR 8800:2008. Porém, é importante estudar e destacar as diferenças e os avanços introduzidos pela ABNT NBR 16239:2013.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PILARES DE AÇO COM PERFIS TUBULARES

4.1.1 Histórico

Desde o século XII têm sido utilizadas as estruturas metálicas, na forma de tirantes e pendurais de ferro fundido. Segundo Costa (2004), a coluna de ferro fundido foi o primeiro material de construção civil, desenvolvido após a Revolução Industrial, por métodos industriais. A utilização de perfis tubulares na construção civil sempre esteve presente na construção de edifícios e passarelas. Os perfis tubulares circulares foram muito utilizados na Inglaterra, como colunas, nos edifícios industriais, devido à alta resistência à compressão. E os perfis tubulares retangulares e quadrados foram criados depois, com os avanços técnicos.

Segundo Gerken (2003), o domínio da tecnologia da produção do ferro contribuiu para o crescimento nas construções de fábricas, estações e pontes para a expansão da rede ferroviária, aumentando assim, as pesquisas de materiais e processos construtivos que ajudassem a atender a necessidade de vencer grandes vãos, racionalizar o tempo e os custos das construções.

De acordo com Pereira (2002) a utilização do aço em pequenas, médias e grandes construções, fez com que o seu uso crescesse cada vez mais, possibilitando aos profissionais diferentes opções de concepção estrutural e arquitetônica.

4.1.2 Principais características dos pilares de aço tubulares

A indústria brasileira comercializa pilares de aço com seção tubular, que possuem diferentes características. De acordo com Araújo (2011), eles podem ser divididos basicamente em dois grupos: os tubos laminados a quente e os tubos com costura.

Segundo o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), as seções dos pilares de aço apresentam maior esbeltez quando comparados aos pilares de concreto, resultando em maior aproveitamento do espaço interno e aumento da área útil, o que é um fator de grande importância quando se trata de garagens.

De acordo com Arquitetura & Aço (2010), o aço apresenta grande durabilidade e é extremamente adaptável, tornando possível eventuais modificações e rearranjos de edifícios construídos em aço.

4.1.3 Vantagens e desvantagens do uso de pilares de aço com perfis tubulares

De acordo com Meyer (2002), os perfis tubulares apresentam uma série de vantagens, dentre elas estão a grande resistência à torção, flexão e flambagem; se preenchidos com concreto apresentam vantagens quanto à resistência mecânica e contra o fogo; por não possuir entranhas, quinas e pontos de obstrução, apresenta também uma resistência favorável as correntes de vento e de água.

Gerken (2003) apresenta como vantagens construtivas desse tipo de perfil, a eficiência quando submetidos a situações de incêndio, por ter menor fator de massividade, o que resulta em menor gasto com proteção passiva, além de possuírem menor área exposta. Outra vantagem apresentada é a redução do consumo de aço estrutural. As seções tubulares fechadas apresentam boa resistência a esforços de compressão, tração, torção, flexo-torção e flexo-compressão e que quando preenchidos com concreto passam a ser utilizados como estruturas mistas.

Apesar de ser um sistema com vantagens, como já foi citado, há também desvantagens, e algumas delas são apresentadas por Pinheiro (2005), como a limitação de execução em fábrica, em função do transporte até o local da obra para a montagem final; necessidade de tratamento contra oxidação da superfície em contato com o ar atmosférico; demanda mão de obra especializada para a fabricação e montagem no local; e limitação de fornecimento de perfis estruturais.

Segundo Pereira (2002) a falta de conhecimento dos engenheiros e arquitetos com relação às inúmeras possibilidades construtivas das estruturas metálicas em geral, e em particular, das aplicações dos perfis tubulares, é o principal fator responsável pela defasagem do uso de tal processo construtivo no país.

4.1.4 Pesquisas na área

A construção de edifícios utilizando estrutura em aço como material principal, com finalidades diversas, vem crescendo cada vez mais no meio construtivo. Devido esse crescimento, estudos foram e ainda estão sendo realizados para melhor compreender e conhecer esse tipo de estrutura.

Santos (2003) avaliou o comportamento de ligações em barras tubulares de estruturas metálicas planas por meio da análise das metodologias de cálculo apresentadas pelas especificações de normas nacionais e internacionais. Visando a racionalização do sistema de cálculo, desenvolveu-se um programa para automatizar o dimensionamento e a verificação das ligações estudadas.

Possato (2004) realizou um estudo teórico-experimental para a determinação da resistência de placas de bases de colunas formadas por tubos metálicos circulares e então fez uma comparação com normas internacionais e nacional. A partir do estudo ele chegou a conclusão de que a maioria dos autores propõem formulações muito conservadoras, e então propôs uma alternativa de cálculo.

Em Lima et al (2005) através do método dos elementos finitos foi apresentada análise numérica de ligações soldadas entre perfis tubulares quadrados. E com os resultados, concluiu-se que alguns limites considerados pelo Eurocode (2003) podem levar a resultados contra a segurança.

4.2 PILARES MISTOS AÇO-CONCRETO

4.2.1 Histórico

De acordo com Queiroz (2003), foram duas as construções que marcaram o início da utilização do sistema estrutural misto no mundo, em 1894, ambas nos Estados Unidos: uma ponte em Iowa e a edificação Methodist Building, em Pittsburg. Os elementos estruturais mistos só começaram a ser estudados mais

especificamente, em 1914, na Inglaterra. Mas somente na década de 50 tal sistema começou a ser introduzido no Brasil.

Segundo Braga (2011), nos edifícios de múltiplos andares, primeiramente o concreto foi utilizado com a finalidade de proteger os perfis de aço da corrosão e contra incêndio, sem saber do aumento de resistência que essa associação traria a estrutura, inicialmente calculada como metálica. Posteriormente, esse aumento de resistência devido a associação dos materiais, foi verificado.

De acordo com De Nardin (2003), a ideia de associar perfis tubulares de aço com o concreto começou no século XIX. Os pilares mistos preenchidos começaram a ser usados na composição de sistemas estruturais, e então a partir dessa época estudos tem sido realizados para o aperfeiçoamento do dimensionamento destes elementos.

Os estudos na área de pilares começaram com os pilares de perfil de aço revestido de concreto, e posteriormente surgiram os de perfis tubulares preenchidos com concreto.

4.2.2 Estruturas formadas por elementos mistos

De acordo com De Nardin (1999) os pilares mistos preenchidos fazem parte de um sistema estrutural que pode ser denominado de sistema estrutural formado por elementos mistos.

Queiroz & Pimenta (2001), apresentam algumas vantagens dos elementos mistos em relação ao concreto armado, como a redução do peso próprio e do volume da estrutura, a possibilidade da não utilização de fôrmas e dimensões mais precisas na construção. Em relação às construções em aço, existe a redução no consumo de aço estrutural e também a redução nas proteções contra incêndio e corrosão.

Alguns exemplos de construções que apresentam elementos mistos em seu sistema estrutural, segundo Figueiredo (1998):

Edifício Garagem América (1957): está localizado na cidade de São Paulo, é formado por 16 pavimentos, o que totaliza uma área de 15.214m², não foi aplicada proteção especial ao fogo, consumo de 948 t de aço ASTM A-7. O projeto estrutural foi desenvolvido pelo Engenheiro Paulo R. Fragoso.

Edifício Avenida Central (1959-1961): está localizado no Rio de Janeiro, e possui altura de 112m dividido em 36 pavimentos. Foi utilizado revestimento de concreto nas vigas de aço para proteção ao fogo. O projeto foi desenvolvido pelo Eng. Paulo R. Fragoso.

Escritório Central da CSN (1962-1963): é formado por 18 pavimentos, e está localizado em Volta Redonda. O projeto consumiu o total de 2.600 t de aço ASTM A-7. O projeto estrutural é do Eng. José Villas Boas.

4.2.3 Classificação de Pilares Mistos de Aço e Concreto

Segundo Oliveira (2008), pilares mistos de aço e concreto, de modo geral, são elementos estruturais, onde sua parte de aço é formada por um ou mais perfis em aço estrutural, e estão predominantemente sujeitos a forças de compressão. Os pilares podem ainda ser classificados em revestidos (total ou parcialmente) por concreto, ou preenchidos com concreto (com perfil de seção tubular retangular ou circular), de acordo com a posição que o concreto ocupa na seção.

4.2.3.1 Pilares mistos revestidos

Os pilares mistos revestidos totalmente são aqueles que possuem o perfil de aço completamente envolvido pelo concreto (Figura 1-a), enquanto o parcialmente revestido possui apenas uma parte do seu perfil coberto pelo concreto (Figura 1-b). A figura 1 mostra os tipos de seções transversais de pilares mistos.

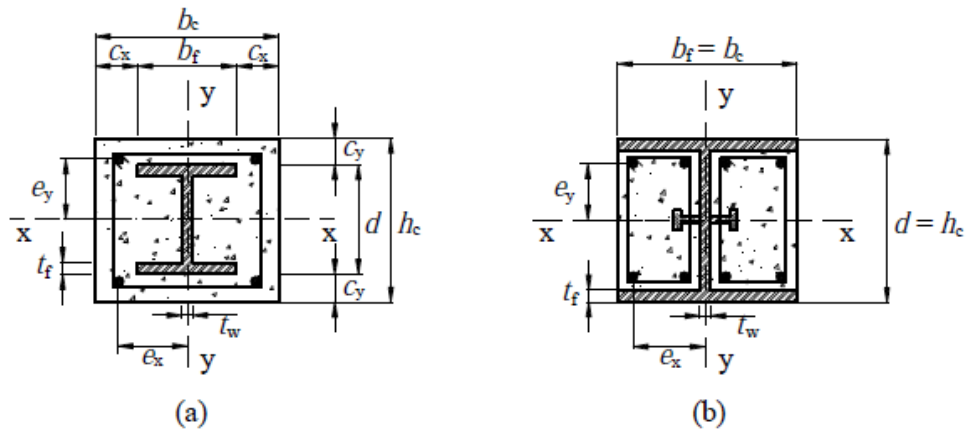


Figura 1 – Tipos de seções transversais de pilares mistos revestidos;
Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

4.2.3.2 Pilares mistos preenchidos

Os pilares mistos preenchidos podem ser definidos como elementos estruturais formados por um perfil tubular e preenchidos com concreto estrutural. A seção desse tipo de pilar pode ser retangular (Figura 2-c) ou circular (Figura 2-d).

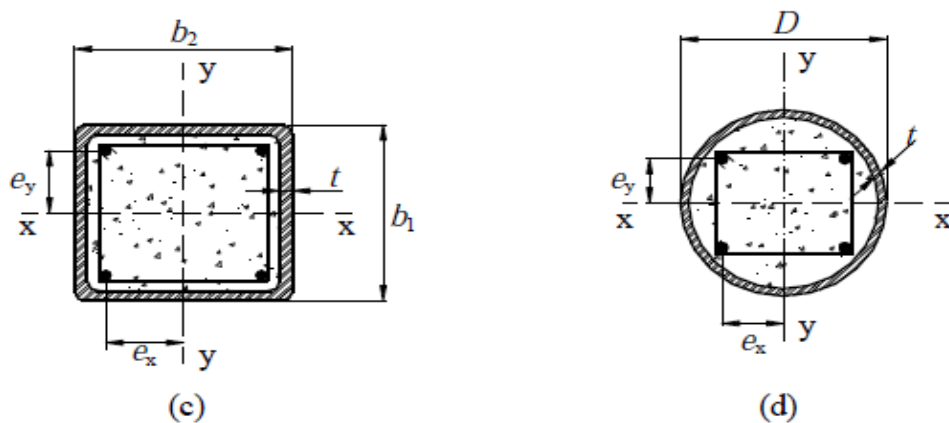


Figura 2 – Tipos de seções transversais de pilares mistos preenchidos
Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

4.2.4 Principais características dos pilares mistos preenchidos

De acordo com Silva (2012) os pilares mistos herdam as características dos pilares de aço com sua capacidade de resistência, e a dos pilares de concreto com sua robustez.

Brauns (1999) apud De Nardin (1999) destaca que o preenchimento do perfil tubular de aço com o concreto aumenta a rigidez e a resistência do perfil, e isso sem precisar alterar as dimensões externas do mesmo.

Segundo Cardoso (2013), em pilares mistos de perfil tubular de aço preenchido com concreto, ocorre um ganho de resistência no concreto devido ao confinamento do mesmo pelo tubo de aço. E em relação ao perfil de aço, o concreto do núcleo previne a instabilidade local do tubo e também apresenta resistência maior ao fogo.

Algumas características desse tipo de pilar são mostradas por Campolina (2008), como:

- Rapidez de execução utilizando a estrutura de aço isolada somente suportando as cargas de montagem enquanto o concreto é lançado e curado;
- Resistência à corrosão do aço e abalos sísmicos;
- Possui menores seções quando comparados às estruturas só de aço ou só de concreto, para a mesma resistência à compressão;
- Menor desperdício, industrialização e racionalização no canteiro de obras.

4.2.4.1 Efeito do confinamento do concreto

O efeito de confinamento do concreto é previsto por normas como o ANSI AISC-360-10 e o EN 1994-1-1:2004 apenas para os perfis circulares preenchidos. As normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 16239:2009, no entanto, não mencionam a possibilidade de se considerar esse efeito.

Segundo Fabrizzi (2007), em um determinado nível de compressão o coeficiente de Poisson do concreto é maior que o do aço e assim o concreto tende a deformar transversalmente mais que o aço, entretanto este restringe essa

deformação, levando a criação de uma distribuição de tensões tridimensional que provoca o aumento da resistência do concreto.

Ainda de acordo com Fabrizzi (2007) existem fatores que podem diminuir esse efeito de confinamento do concreto, e destaca como principais: a aplicação de momento fletor diminuindo assim a compressão axial e conseqüentemente a expansão lateral do mesmo; e a esbeltez do pilar, já que os efeitos de segunda ordem fazem com que os momentos fletores aplicados aumentem, diminuindo a compressão axial da peça.

4.2.5 Vantagens e desvantagens do uso de pilares mistos de perfis tubulares preenchidos

De acordo com Alva (2000), a combinação entre aço e concreto em pilares pode trazer como vantagens o aumento da resistência e na proteção ao fogo, e também o aumento de rigidez aos carregamentos horizontais devido à ação do vento. Quando comparados aos pilares de concreto armado, os pilares mistos apresentam maior ductilidade. E ainda traz como principal vantagem dos pilares mistos preenchidos o fato de dispensar o uso fôrmas e armadura, o que possibilita a redução de custos com materiais, mão de obra e agilidade na hora da execução.

Bridge e Webb (1992) apud Figueiredo (1998) mostram como vantagens construtivas das estruturas com pilares mistos preenchidos o fato dos tubos serem mais leves do que os soldados e laminados, o que faz com que possa ser dispensada a utilização de equipamentos especiais para a montagem.

Segundo Griffis (1994) apud Figueiredo (1998), os pilares mistos preenchidos podem ser usados em quadras esportivas cobertas, galpões de armazenagem, terminais rodoviários, pavilhões, etc. Outras utilizações desse tipo de pilar como em obras de arte como viadutos e pontes, em cais de porto e estruturas de apoio em plataformas marítimas, são citadas por De Nardin (1999).

Quanto às desvantagens, Figueiredo (1998) apresenta duas para esse tipo de pilar. A primeira é a de que o concreto apesar de ajudar na resistência do pilar de aço sob ação de fogo, não o protege totalmente, fazendo-se necessário o uso de uma

forma de proteção alternativa. E a segunda é a dificuldade para se colocar os conectores de cisalhamento quando são necessários.

Prion & Boehme (1994) apud De Nardin (1999) mostram como limitação e desvantagem para a utilização desse tipo de pilar misto, o custo das ligações viga-pilar e a falta de procedimentos construtivos eficientes, tanto das ligações quanto da estrutura como um todo.

4.2.6 Pesquisas na área

Alguns estudos foram realizados com o decorrer da evolução da utilização dos elementos mistos na construção civil a fim de conhecer, compreender e equacionar o comportamento da associação desses materiais e com isso oferecer normas seguras, confiáveis e de fácil aplicação.

Alva (2000) realizou uma abordagem dos aspectos construtivos, comportamento estrutural e procedimentos para o dimensionamento recomendado pelas principais normas aplicáveis, enfatizando a norma norte-americana do AISC e o EUROCODE 4, considerando o comportamento e dimensionamento de elementos mistos em situações de incêndio.

Araujo (2008) também analisou os pilares mistos submetidos ao efeito de altas temperaturas e, além disso, foi analisado o comportamento da temperatura na superfície externa do tubo de aço, na interface entre o aço e o concreto e no núcleo do concreto.

Braga & Ferreira (2011) avaliaram a viabilidade da utilização de pilares mistos para uma racionalização na construção civil. Além disso, são realizados também estudos comparativos de custo entre os pilares mistos aço-concreto, pilares de concreto armado e pilares de aço.

5 METODOLOGIA

O estudo do dimensionamento de pilares de seção tubular de aço e mistos teve início a partir do entendimento das normas ABNT NBR 16239:2013 e ABNT NBR 8800:2008, cujos procedimentos para dimensionamento serão descritos a seguir.

Com base nos procedimentos estudados, foram elaboradas planilhas com o auxílio do programa Excel, que contemplam pilares tubulares de aço e pilares mistos tubulares preenchidos com concreto, circulares e retangulares, e subdivididas de acordo com o procedimento normativo a ser adotado.

As planilhas foram elaboradas visando a facilidade de entendimento no momento de sua utilização, sendo assim, são compostas por campos para entrada de dados simples.

Após serem realizados os processos descritos pelas normas, foram aplicados exemplos para a validação das planilhas. Em seguida são apresentados os resultados obtidos através do estudo, apresentando se ocorreram alterações significativas ou não devido as mudanças apresentadas pela nova norma específica para perfis tubulares.

5.1 ABNT NBR 8800:2008 – PILARES DE AÇO

5.1.1 Pilares submetidos à compressão axial

Para o dimensionamento de pilares de aço, deve ser atendida a seguinte condição:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd}$$

Com, $N_{c,sd}$ sendo a força axial de compressão solicitante de cálculo, e $N_{c,Rd}$ a força axial de compressão resistente de cálculo, que é determinada através da equação (1).

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (1)$$

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão, e será calculado em 5.1.1.1.

Q é o fator de redução total associado à flambagem local, dado em 5.1.1.2.

A_g é a área bruta da seção transversal do pilar.

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência.

5.1.1.1 Fator de redução χ

a) Para $\lambda_0 \leq 1,5$: $\chi = 0,658^{\lambda_0^2}$ (2)

b) Para $\lambda_0 > 1,5$: $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$ (3)

onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido, que é dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (4)$$

com N_e sendo a força axial de flambagem elástica.

A força axial de flambagem deve ser calculada em relação ao eixo central de inércia x, y e ao eixo longitudinal z da seção transversal.

a) Para o eixo central de inércia x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (5)$$

b) Para o eixo central de inércia y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (6)$$

c) Para eixo longitudinal z:

$$N_{ez} = \frac{1}{(r_0)^2} \left[\frac{\pi^2 EC_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (7)$$

onde:

$K_x L_x, K_y L_y$: é o comprimento de flambagem por flexão em relação ao eixo x e y, respectivamente;

I_x, I_y é o momento de inércia com relação ao eixo x e y, respectivamente.

E é o módulo de elasticidade do aço;

$K_z L_z$ é o comprimento de flambagem por torção;

r_0 é o raio de giração;

C_w é a constante de empenamento da seção transversal;

J é a constante de torção;

G é o módulo de elasticidade transversal do aço.

5.1.1.2 Fator de redução total associado à flambagem local

O fator de redução para flambagem local para perfis tubulares circulares é encontrado através das condições a seguir:

$$a) Q = 1,00 \text{ para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y}$$

$$b) Q = \frac{0,038 E}{D/t f_y} + \frac{2}{3} \quad \text{para} \quad 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}$$

onde:

D é o diâmetro da seção tubular circular;

t é a espessura da parede;

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

E é o módulo de elasticidade do aço.

Para os perfis tubulares retangulares são classificados em AA (duas bordas longitudinais vinculadas), sendo assim, $Q = Q_a$.

Se a relação entre largura e espessura da seção transversal (b/t) não ultrapassam os valores de $(b/t)_{lim}$, o fator de redução Q é adotado igual a 1,00.

O valor de $(b/t)_{lim}$ para seções tubulares retangulares será dado por:

$$(b/t)_{lim} = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (8)$$

Caso o valor ultrapasse o limite, o valor de Q será obtido através da relação entre a área efetiva da seção transversal bruta (A_{ef}) e a área bruta (A_g):

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g} \quad (9)$$

Onde:

$$A_{ef} = A_g - \sum (b - b_{ef})t \quad (10)$$

com b_{ef} sendo a largura efetiva do elemento comprimido, que é obtido por:

$$b_{ef} = 1,92t \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \left[1 - \frac{0,38}{b/t} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right] \leq b \quad (11)$$

onde:

t é a espessura da parede;

E é o módulo de elasticidade do aço;

σ é a tensão que pode atuar no elemento analisado;

b é a largura da parede;

f_y é a resistência ao escoamento do aço.

5.1.1.3 Limitação do índice de esbeltez

A limitação do índice de esbeltez não deve ser superior a 200, e será a maior relação entre o produto KL e o raio de giração r. Onde K é o coeficiente de flambagem, e L é o comprimento destravado.

5.1.2 Pilares submetidos a momento fletor e força cortante

Para o dimensionamento devem ser atendidas as seguintes condições:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

Onde, M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo, M_{Rd} é o momento fletor resistente de cálculo (dado em 5.1.2.1), V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo e V_{Rd} é a força cortante resistente de cálculo (dada em 5.1.2.2).

5.1.2.1 Momento fletor resistente de cálculo

O momento fletor para seções tubulares retangulares, para o estado limite FLT (flambagem lateral com torção) é determinado através de:

$$a) \quad M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p \leq \lambda_r \quad (12)$$

$$b) \quad M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (13)$$

$$c) M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (14)$$

Onde os parâmetros necessários se encontram na tabela 1.

Para os estados limites FLM (flambagem local da mesa comprimida) e FLA (flambagem local da alma) o momento fletor para seções tubulares retangulares será calculado da mesma forma, alterando apenas o valor de c_b na equação (13) para 1,00.

Tabela 1 – Parâmetros para o cálculo do momento fletor
Fonte: ABNT NBR 8800:2008.

	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
FLT	$(f_y - \sigma_r)W$	$\frac{2c_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13E}{M_{pl}} \sqrt{JA}$	$\frac{2E}{M_r} \sqrt{JA}$
FLM	$f_y W_{ef}$	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$	b/t	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,4 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
FLA	$f_y W$		$\frac{h}{t_w}$	$2,42 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Para as seções tubulares circulares, o estado limite de flambagem local da parede do tubo, para uma relação de D/t que não ultrapasse $0,45E/f_y$, é dado por:

$$a) M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}, \text{ para } \lambda_p \leq \lambda_r \quad (15)$$

$$b) M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,021E}{D/t} + f_y \right) W, \text{ para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \quad (16)$$

$$c) M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,33E}{D/t} W, \text{ para } \lambda > \lambda_r \quad (17)$$

com:

$$\lambda = \frac{D}{t} \quad (18)$$

$$\lambda_p = \frac{0,07E}{f_y} \quad (19)$$

$$\lambda_r = \frac{0,31E}{f_y} \quad (20)$$

5.1.3 Pilares submetidos à flexo-compressão

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, para a atuação simultânea da força axial de tração ou de compressão e de momentos fletores, deve ser obedecida a limitação fornecida pelas seguintes expressões de interação:

$$\text{a) Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \geq 0,2 : \quad \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (21)$$

$$\text{b) Para } \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} < 0,2 : \quad \frac{N_{Sd}}{2N_{Rd}} + \left(\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (22)$$

onde:

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo;

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo.

5.1.2.2 Força cortante resistente de cálculo

Para seções tubulares retangulares:

$$\text{a) Para } \lambda \leq \lambda_p : \quad V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

$$\text{b) Para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r : \quad V_{Rd} = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (24)$$

$$c) \text{ Para } \lambda > \lambda_r: V_{Rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (25)$$

com:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (26)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{5,0E}{f_y}} \quad (27)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{5,0E}{f_y}} \quad (28)$$

A força cortante correspondente a plastificação da alma por cisalhamento é dada por:

$$V_{pl} = 0,60 d t_w f_y \quad (29)$$

As seções tubulares circulares seguem o procedimento de:

$$V_{Rd} = \frac{0,5 \tau_{cr} A_g}{\gamma_{a1}} \quad (30)$$

com τ_{cr} igual ao maior dos seguintes valores:

$$\tau_{cr} = \frac{1,60E}{\sqrt{\frac{L_v}{D} \left(\frac{D}{t_d} \right)^{5/4}}} \leq 0,60 f_y \quad (31)$$

$$\tau_{cr} = \frac{0,78E}{\left(\frac{D}{t_d} \right)^{3/2}} \leq 0,60 f_y \quad (32)$$

onde:

A_g é a área bruta da seção transversal;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação da resistência;

D é o diâmetro externo da seção transversal;

t_d é a espessura de cálculo da parede da seção transversal, igual a 0,93 vez a espessura nominal para tubos com costura e igual à espessura nominal para tubos sem costura;

L_v é a distância entre as seções de forças cortantes, máxima e nula.

5.2 ABNT NBR 16239:2013 – PILARES DE AÇO

O processo de dimensionamento a ser seguido é o mesmo apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 para o cálculo de pilares de aço, com alterações apresentadas pela ABNT NBR 16239:2013 para a determinação do fator de redução de barras comprimidas.

5.2.1 Determinação do fator de redução de barras comprimidas

O fator de redução que está associado a barras sujeitas à força axial de compressão resistente, é determinado por:

$$\chi = \frac{1}{\left(1 + \lambda_0^{4,48}\right)^{1/2,24}} \quad (33)$$

Onde o índice de esbeltez reduzido será dado por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{QA_g f_y}{N_e}} \quad (34)$$

com:

A_g área bruta da seção transversal;

N_e força axial de flambagem elástica;

Q fator de redução total associado à flambagem local;
 f_y é a resistência ao escoamento do aço.

5.3 ABNT NBR 8800:2008 – PILARES MISTOS

O anexo P da ABNT NBR 8800:2008 trata do dimensionamento por método simplificado de pilares mistos. Para aplicação desse método algumas hipóteses básicas foram estabelecidas. São elas: considerar interação completa entre o aço e o concreto no colapso; as imperfeições iniciais devem ser consistentes com aquelas adotadas para a determinação da resistência de barras de aço axialmente comprimidas; a flambagem local para força axial e momento fletor não pode ser um estado-limite último predominante.

Além disso, existem alguns limites de aplicabilidade que devem ser respeitados para o método apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 que são: os pilares mistos devem ter dupla simetria e seção transversal constante; o concreto utilizado deve ter densidade normal; o índice de esbeltez reduzido ($\lambda_{0,m}$) dada pela equação (41) deve ser menor que 2,0; a relação altura largura das seções transversais deve estar entre 0,2 e 5. Além disso deve ser verificado se o fator de contribuição do aço δ do elemento misto atende os limites apresentados junto à equação (35), apresentada a seguir.

$$0,2 < \delta = \frac{f_{yd} \cdot A_a}{N_{pl,Rd}} < 0,9 \quad (35)$$

Se $\delta \leq 0,2$ deverá ser dimensionado como pilar de concreto, conforme ABNT NBR 6118. Se $\delta \geq 0,9$ deverá ser dimensionado como pilar de aço. No cálculo da equação (35) f_{yd} é a tensão de escoamento do tubo metálico; A_a área da seção transversal do tubo metálico e $N_{pl,Rd}$ é a força axial resistente de cálculo à plastificação total da seção transversal do pilar misto dada pela equação (36).

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd} \quad (36)$$

com:

$$N_{pl,a,Rd} = f_{yd} \cdot A_a \quad (37)$$

$$N_{pl,c,Rd} = f_{cd1} \cdot A_c \quad (38)$$

$$N_{pl,s,Rd} = f_{sd} \cdot A_s \quad (39)$$

onde:

A_a é a área da seção transversal do perfil de aço;

A_c é a área da seção transversal do concreto;

A_s é a área da seção transversal da armadura longitudinal;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;

f_{sd} a resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura;

f_{cd1} é igual ao produto αf_{cd} ;

α é um coeficiente que será utilizado igual a 0,95, por se tratar de seções tubulares preenchidas.

Para garantir a hipótese de que as resistências de todos os materiais sejam atingidas sem que ocorra flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal, não podem ser ultrapassadas as seguintes relações:

a) seções tubulares circulares preenchidas com concreto: $D / t \leq 0,15 E / f_y$

b) seções tubulares retangulares preenchidas com concreto: $b_i / t \leq 2,26 \sqrt{E / f_y}$

onde b_i é a maior dimensão paralela a um eixo a um eixo de simetria da seção tubular retangular

5.3.1 Pilares submetidos à compressão axial

O cálculo para a determinação da força axial resistente de cálculo de pilares mistos axialmente comprimidos sujeitos à instabilidade por flexão é realizado por meio da equação:

$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd} \quad (40)$$

onde:

$N_{pl,Rd}$, é a força axial de compressão resistente de cálculo da seção transversal à plastificação de acordo com a equação (35);

χ é um fator de redução e será calculado de acordo com a seção 5.1.1.1, em função do índice de esbeltez reduzido ($\lambda_{0,m}$).

Para o plano de flexão considerado, o índice de esbeltez reduzido ($\lambda_{0,m}$) é dado por:

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (41)$$

com:

$$N_{pl,R} = f_y A_a + \alpha f_{ck} A_c + f_{ys} A_s \quad (42)$$

onde:

f_y , f_{ys} : limite de escoamento dos aços do perfil e da armadura, respectivamente;

f_{ck} resistência característica do concreto a compressão;

A_a , A_c , A_s : área da seção transversal do perfil de aço, do concreto e da armadura longitudinal, respectivamente;

α é um coeficiente que será utilizado igual a 0,95, por se tratar de seções tubulares preenchidas.

Ainda considerando a equação (41), N_e é a força axial de flambagem elástica dada por:

$$N_e = \frac{\pi^2 (EI)_e}{(KL)^2} \quad (43)$$

- KL é o comprimento de flambagem do pilar;

- $(EI)_e$ é a rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista.

A rigidez efetiva à flexão e a rigidez axial efetiva à compressão são calculadas respectivamente pelas equações:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,6 E_{c,red} I_c + E_s I_s \quad (44)$$

$$(EA)_e = E_a A_a + E_{c,red} A_c + E_s A_s \quad (45)$$

onde:

I_a , I_c , I_s : momento de inércia da seção transversal do perfil de aço, do concreto e da armadura longitudinal, respectivamente;

A_a , A_c , A_s : área da seção transversal do perfil de aço, do concreto e da armadura longitudinal, respectivamente;

E_a , E_s : módulo de elasticidade do aço estrutural e do aço da armadura, respectivamente;

$E_{c,red}$ é o módulo de elasticidade reduzido do concreto;

O cálculo do módulo de elasticidade reduzido do concreto é dado por:

$$E_{c,red} = \frac{E_c}{1 + \varphi \left(\frac{N_{G,Sd}}{N_{Sd}} \right)} \quad (46)$$

onde:

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

φ é o coeficiente de fluência do concreto. Simplificadamente a norma admite que este coeficiente seja igual a zero, para seções tubulares preenchidas com concreto.

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo;

$N_{G,Sd}$ é a parcela da força axial solicitante de cálculo devida à ação permanente e à ação decorrente do uso de atuação quase permanente.

5.3.2 Pilares submetidos à flexo-compressão

Para verificação dos efeitos combinados da força axial de compressão e dos momentos fletores, a ABNT NBR 8800:2008 disponibiliza dois modelos de cálculo: um modelo mais simplificado, denominado de modelo de cálculo I, e um modelo de cálculo mais rigoroso, denominado modelo de cálculo modelo de cálculo II.

5.3.2.1 Modelo de cálculo I

O modelo de cálculo I é o mesmo modelo aplicado a verificação de pilares de aço submetidos aos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores, apresentado em 5.1.3, observando que:

N_{Rd} é a força axial resistente de cálculo, de acordo com 5.3.1;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo em relação aos eixos x e y, respectivamente, da seção mista, dados por $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$ e calculados de acordo com 5.3.4.

5.3.2.2 Modelo de cálculo II

Considerando o modelo de cálculo II, a verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores por meio das seguintes expressões:

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} \quad (47)$$

$$\frac{M_{x,tot,Sd}}{\mu_x M_{c,x}} + \frac{M_{y,tot,Sd}}{\mu_y M_{c,y}} \leq 1,0 \quad (48)$$

onde:

$$\mu_x = \begin{cases} 1 - \frac{N_{Sd} - N_{pl,c,Rd}}{N_{pl,Rd} - N_{pl,c,Rd}} \text{ se } N_{Sd} \geq N_{pl,c,Rd} \\ \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} - 1\right) + \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}} \text{ se } \frac{N_c}{2} < N_{Sd} < N_{pl,c,Rd} \\ 1 + \frac{2 \cdot N_{Sd}}{N_{pl,c,Rd}} \cdot \left(1 - \frac{M_{d,x}}{M_{c,x}}\right) \text{ se } 0 < N_{Sd} < \frac{N_{pl,c,Rd}}{2} \end{cases}$$

μ_y é um coeficiente calculado da mesma forma que μ_x , trocando-se as grandezas referentes a x por y;

$N_{pl,c,Rd}$ e $N_{pl,Rd}$ conforme definido anteriormente;

N_{Sd} é a força axial solicitante de cálculo;

$M_{c,x}$ e $M_{c,y}$ são dados por $M_{c,x} = 0,9M_{pl,x,Rd}$ e $M_{c,y} = 0,9M_{pl,y,Rd}$, onde os momentos fletores resistentes de plastificação de cálculo em relação aos eixos x e y (respectivamente, $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$) são obtidos segundo 5.3.4;

$M_{d,x}$ e $M_{d,y}$ são dados $M_{d,x} = 0,8M_{max,pl,x,Rd}$ e $M_{d,y} = 0,8M_{max,pl,y,Rd}$, onde os momentos fletores máximos resistentes de plastificação de cálculo em relação aos eixos x e y (respectivamente, $M_{max,pl,x,Rd}$ e $M_{max,pl,y,Rd}$) são obtidos segundo 5.3.4. Caso $M_{d,x} < M_{c,x}$, então $M_{d,x}$ deve ser tomado igual a $M_{c,x}$. O mesmo deve ser feito em relação ao eixo y;

Os momentos fletores solicitantes de cálculo totais, caso não seja feita análise mais rigorosa, são iguais a:

$$M_{x,tot,Sd} = M_{x,Sd} + M_{x,i,Sd} \quad (49)$$

$$M_{y,tot,Sd} = M_{y,Sd} + M_{y,i,Sd} \quad (50)$$

onde $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo e $M_{x,i,Sd}$ e $M_{y,i,Sd}$ são os momentos devidos às imperfeições ao longo do pilar, respectivamente em relação aos eixos x e y, dados por:

$$M_{x,i,Sd} = \frac{N_{Sd} L_x}{200 \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e2,x}} \right)} \quad (51)$$

$$M_{y,i,Sd} = \frac{N_{Sd} L_y}{200 \left(1 - \frac{N_{Sd}}{N_{e2,y}} \right)} \quad (52)$$

sendo L o comprimento destravado do pilar entre contenções laterais, $N_{e2,x} = \pi^2(EI)_{e,x}/L_x^2$ e $N_{e2,y} = \pi^2(EI)_{e,y}/L_y^2$, onde os subscritos x e y referem-se à flexão em relação aos eixos x e y.

Ao se entrar com os valores de $M_{x,tot,Sd}$ e $M_{y,tot,Sd}$ na equação de interação (equação (48)), deve-se considerar o momento devido às imperfeições ao longo do pilar em relação apenas a um dos eixos, o que levar ao resultado mais desfavorável. Isso implica que se $M_{x,i,Sd}$ for considerado com seu valor diferente de zero, $M_{y,i,Sd}$ deve ser tomado igual a zero, e vice-versa.

5.3.4 Momentos fletores de plastificação de cálculo

O momento fletor resistente de cálculo em relação ao eixo x da seção mista, é dado por $M_{pl,x,Rd}$, que deve ser calculado por:

$$M_{pl,Rd} = f_{yd} (Z_a - Z_{an}) + 0,5f_{cd1} (Z_c - Z_{cn}) + f_{sd} (Z_s - Z_{sn}) \quad (53)$$

onde:

Z_a , Z_c , Z_s : módulo de resistência plástica da seção do perfil de aço, do concreto e da armadura longitudinal, respectivamente;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;

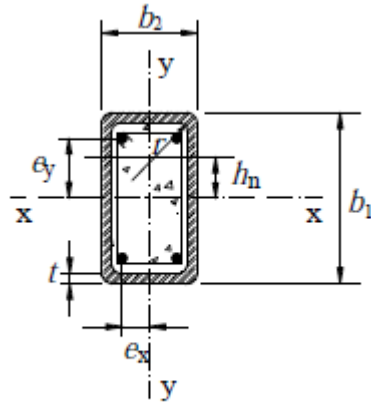
f_{sd} a resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura;

f_{cd1} é igual ao produto αf_{cd} ;

α é um coeficiente que será utilizado igual a 0,95, por se tratar de seções tubulares preenchidas.

Z_{an} , Z_{cn} , Z_{sn} são módulos de resistência plásticos, e serão definidos por:

a) Para seção tubular retangular:



a) Retangular

a.1) eixo x:

Inicialmente deve ser calculado Z_c :

$$Z_c = \frac{(b_2 - 2t)(b_1 - 2t)^2}{4} - \frac{2}{3}r^3 - r^2(4 - \pi)\left(\frac{b_1}{2} - t - r\right) - Z_s \quad (54)$$

com:

$$Z_s = \sum_{i=1}^n |A_{si} e_i| \quad (55)$$

onde:

e_i é a distância do eixo da barra da armadura de área A_{si} ao eixo de simetria relevante da seção.

Em seguida são encontrados os valores de h_n , Z_{cn} , Z_{an} :

$$h_n = \frac{A_c f_{cd1} - A_{sn}(2f_{sd} - f_{cd1})}{2b_2 f_{cd1} + 4t(2f_{yd} - f_{cd1})} \quad (56)$$

$$Z_{cn} = (b_2 - 2t)h_n^2 - Z_{sn} \quad (57)$$

$$Z_{an} = b_2 h_n^2 - Z_{cn} - Z_{sn} \quad (58)$$

com Z_{sn} calculado a partir da seguinte equação:

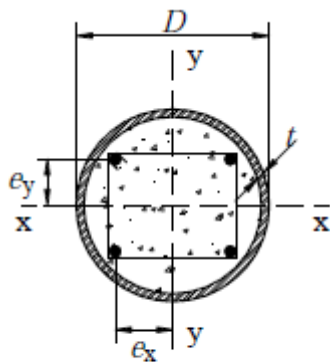
$$Z_{sn} = \sum_{i=1}^n |A_{sni} e_{yi}| \quad (59)$$

Onde, e_{yi} é a distância do eixo da barra da armadura ao eixo x e A_{sni} é a área de cada barra da armadura na região de altura $2 h_n$.

a.2) eixo y:

Para o cálculo com relação ao eixo y, devem ser utilizadas as mesmas equações relativas ao eixo x, substituindo adequadamente entre si as dimensões b_1 e b_2 , bem como os índices subscritos x e y.

a) Para seção tubular circular:



b) Circular

O procedimento realizado para as seções tubulares circulares deve ser com as mesmas equações relativas às seções tubulares retangulares, fazendo apenas as seguintes substituições:

b.1) b_1 e b_2 por D ;

b.2) r por $(D/2 - t)$.

O momento fletor máximo resistente de plastificação de cálculo, $M_{max,pl,Rd}$, em relação ao eixo x ou ao eixo y (respectivamente, $M_{max,pl,Rd}$ e $M_{max,pl,Rd}$) de seções mistas duplamente simétricas pode ser calculado por:

$$M_{max,pl,Rd} = f_{yd} Z_a + 0,5 f_{cd} Z_c + f_{sd} Z_s \quad (60)$$

5.4 ABNT NBR 16239:2013 – PILARES MISTOS

Para o dimensionamento de acordo com esta norma, são válidas as prescrições apresentadas no procedimento da ABNT NBR 8800:2008, mas complementarmente são apresentados procedimentos específicos com maior precisão sobre o comportamento dos perfis tubulares.

São apresentadas alternativas como:

- a) modificação para o cálculo da rigidez efetiva à flexão, utilizada para a determinação da força resistente de cálculo à compressão axial (5.4.1);
- b) um modelo de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão (5.4.2);
- c) opções para a determinação da força cortante resistente de cálculo do pilar misto (5.4.3).

5.4.1 Rigidez efetiva à flexão

A rigidez efetiva a flexão que a norma traz é obtida através da equação a seguir:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,7 E_c I_c + E_s I_s \quad (58)$$

onde:

I_a é o momento de inércia da seção transversal do perfil de aço;

E_a é o módulo de elasticidade do aço estrutural;

I_c é o momento de inércia da seção transversal do concreto não fissurado;

E_c é o módulo de elasticidade secante do concreto;

I_s é o momento de inércia da seção transversal da armadura do concreto;

E_s é o módulo de elasticidade do aço da armadura do concreto.

5.4.2 Modelo de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão

A verificação dos efeitos da força axial de compressão e dos momentos fletores é feita por meio das seguintes expressões:

a) Para $N_{Sd} \leq N_{c,Rd}$:

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (59)$$

b) Para $N_{Sd} > N_{c,Rd}$:

$$\frac{N_{Sd} - N_{c,Rd}}{N_{Rd} - N_{c,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0 \quad (60)$$

onde:

N_{Sd} é a força axial de compressão solicitante de cálculo;

$N_{c,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo referente a parcela de concreto, que é calculada pelo produto $\chi N_{pl,c,Rd}$, de acordo com a ABNT NBR 8800, adotando a modificação apresentada em 5.4.1 para o cálculo da rigidez efetiva à flexão;

$M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ são os momentos fletores solicitantes de cálculo;

$M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ são os momentos fletores resistentes de cálculo, e são dados por $0,9 M_{pl,x,Rd}$ e $0,9 M_{pl,y,Rd}$, respectivamente.

O cálculo de $M_{pl,x,Rd}$ e $M_{pl,y,Rd}$, momentos fletores de plastificação de cálculo, é o mesmo apresentado na ABNT NBR 8800.

5.4.3 Determinação da força cortante resistente de cálculo do pilar misto

A determinação é feita de acordo com as opções apresentadas pela norma, sendo elas:

- a força cortante resistente de cálculo do pilar de aço, de acordo com a ABNT NBR 8800;
- a força cortante resistente de cálculo do concreto armado, de acordo com a ABNT NBR 6118;
- a soma das forças cortantes resistentes de cálculo, do aço e do concreto, sem a consideração da força cortante resistida por mecanismos complementares ao de treliça.

O presente trabalho optou por utilizar o método de cálculo para pilares de aço, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

5.5 PLANILHAS DESENVOLVIDAS

Para o desenvolvimento do trabalho foram elaborados dois arquivos com o auxílio do programa Excel. O primeiro deles contempla os procedimentos de cálculo para pilares tubulares de aço, e no segundo são apresentados os procedimentos de cálculo para os pilares tubulares mistos preenchidos.

Cada um dos arquivos possui quatro planilhas, que foram nomeadas de acordo com a forma geométrica do perfil e a norma adotada para cálculo.

Todas as planilhas apresentam um padrão de apresentação. O título principal de cada uma delas é apresentado em destaque com a cor vermelha, e os subtítulos se encontram na cor azul.

Todas as células para verificações limites possuem formatação padronizada, onde os casos que não atendem as limitações normativas apresentam fundo amarelo com a escrita em vermelho.

As verificações a compressão, força cortante e flexo-compressão, são feitas em campos separados, porém, possuem o mesmo padrão de apresentação para os resultados. Caso o perfil atenda ao esforço solicitante em análise, a célula aparecerá

com o aviso de “Ok!!!” e com o fundo verde, caso contrário, a célula muda para a cor amarela com o aviso de “Não Ok!!!” escrito em vermelho.

As planilhas foram organizadas em campos para a entrada de dados. O primeiro campo a ser preenchido pelo usuário está nomeado como ‘Esforços Solicitantes de Cálculo’, onde nele encontram-se células para inserir os valores solicitantes de cálculo dos momentos fletores em kN.cm, da força normal em kN e da força cortante em kN. Estes valores devem ser obtidos previamente pelo usuário por meio de análise estrutural.

Em seguida encontra-se o campo ‘Perfil’. Neste campo o usuário deverá inserir as informações do perfil de aço, para que através destes sejam obtidas as propriedades geométricas do perfil. É também neste campo que ocorre a primeira verificação: se a relação largura/espessura está de acordo com o que é estabelecido pelas normas.

O próximo campo está nomeado ‘Aço’, e nele encontram-se as informações do tipo de aço utilizado para o perfil.

Para as planilhas de pilares tubulares mistos existem dois campos extras, que são intitulados de ‘Seção de Concreto’ e ‘Armadura Longitudinal’. No primeiro o usuário deve informar a resistência característica do concreto em MPa, e então a partir deste serão calculadas as propriedades do material. No segundo, devem ser informadas a quantidade de barras e a bitola das barras utilizadas, o módulo de elasticidade em MPa, a tensão de escoamento em MPa e a distância equivalente da armadura ao centro de gravidade do perfil, para então serem calculadas as propriedades necessárias.

Os próximos campos são referentes a determinação da força normal resistente de cálculo, do momento fletor resistente de cálculo e da força cortante resistente de cálculo. Esses campos possuem suas particularidades de acordo com o tipo de pilar a ser analisado.

5.5.1 Pilares tubulares de aço

A primeira planilha para o dimensionamento de pilares tubulares de aço foi nomeada como Aço_Retang NBR 8800_08, onde são apresentadas as verificações

de pilares de aço de seção tubular retangular de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 e pode ser vista no Apêndice A. A segunda planilha, apresentada no Apêndice B, está nomeada como Aço_Circular NBR 8800_08, e nela são apresentadas as verificações de pilares de aço de seção tubular circular de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. Na sequência é apresentada a planilha para verificação dos pilares de aço de seção tubular retangular de acordo com a ABNT NBR 16239:2013, apresentada no Apêndice C, e foi nomeada de Aço_Retang NBR 16239_13. Por fim, a última planilha é nomeada como Aço_Circular NBR 16239_13 e apresentada no Apêndice D, e nela serão executadas as verificações de pilares de aço de seção tubular retangular de acordo com a ABNT NBR 16239:2013.

5.5.1.1 Verificação a compressão

É neste campo que é realizada a verificação do perfil à compressão. Para os pilares de aço de seção tubular retangular, a primeira verificação é quanto ao valor do índice de esbeltez, que segundo as normas não deve ser superior a duzentos. Caso o valor ultrapasse o limite, o usuário é alertado e a célula passa a ter fundo amarelo com escrita em vermelho. É também apresentado o aproveitamento do perfil.

A próxima verificação é quanto ao valor da normal resistente de cálculo encontrada, que caso esteja dentro do limite das condições previstas pelas normas, apresenta a célula com fundo verde e escrita em preto. Caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com escrita em vermelho.

5.5.1.2 Verificação à força cortante

Neste campo são apresentados os valores de força cortante resistente de cálculo encontrada para cada eixo analisado.

Caso os valores se encontrem de acordo com o estabelecido pela norma, o perfil resiste aos esforços cortantes solicitantes e a célula de verificação emite o aviso

de “Ok!!!” com fundo verde, caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com o aviso de “Não Ok!!!” com escrita em vermelho.

5.5.1.3 Verificação à flexo-compressão

É neste campo que ocorre a verificação do perfil a flexo-compressão e são apresentados os valores de momento fletor resistente de cálculo, encontrados no campo denominado de “Momento Resistente de Cálculo” para os eixos de análise. Nele também se encontra o valor da interação que o modelo de cálculo resulta.

Caso os valores se encontrem de acordo com o estabelecido pela norma, o perfil resiste aos esforços solicitantes e a célula de verificação emite o aviso de “Ok!!!” com fundo verde, caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com o aviso de “Não Ok!!!” com escrita em vermelho.

5.5.2 Pilares tubulares mistos

A primeira planilha para o dimensionamento de pilares tubulares mistos foi nomeada como Misto_Retang NBR 8800_08 e pode ser vista no Apêndice E, onde são apresentadas as verificações de pilares mistos de seção tubular retangular de acordo com a NBR 8800:2008. A segunda planilha, apresentada no Apêndice F, está nomeada como Misto_Circular NBR 8800_08, e nela são apresentadas as verificações de pilares mistos de seção tubular circular de acordo com a ABNT NBR 8800:2008. Na sequência é apresentada a planilha para verificação dos pilares mistos de seção tubular retangular de acordo com a ABNT NBR 16239:2013, apresentada no Apêndice G e foi nomeada de Misto_Retang NBR 16239_13. Por fim, a última planilha é nomeada como Misto_Circular NBR 16239_13 e apresentada no Apêndice H nela serão executadas as verificações de pilares mistos de seção tubular retangular de acordo com a ABNT NBR 16239:2013.

5.5.2.1 Verificação a compressão

É neste campo que é realizada a verificação do perfil à compressão.

As primeiras verificações são quanto aos limites do fator de contribuição do aço, que deve estar entre 0,2 e 0,9, a relação entre largura/espessura limite, e para os perfis retangulares a relação altura/largura. Caso o valor ultrapasse o limite, o usuário é alertado e a célula passa a ter fundo amarelo com escrita em vermelho. É também apresentado o aproveitamento do perfil. Por fim, é feita a verificação quanto ao valor da normal resistente de cálculo encontrada, que caso esteja dentro do limite das condições previstas pelas normas, apresenta a célula com fundo verde e escrita em preto. Caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com escrita em vermelho.

5.5.2.2 Força cortante Resistente de Cálculo

Neste campo são apresentados os valores de força cortante resistente de cálculo encontrada para cada eixo analisado.

Caso os valores se encontrem de acordo com o estabelecido pela norma, o perfil resiste aos esforços cortantes solicitantes e a célula de verificação emite o aviso de “Ok!!!” com fundo verde, caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com o aviso de “Não Ok!!!” com escrita em vermelho.

5.5.2.3 Verificação à flexo-compressão

É neste campo que ocorre a verificação do perfil a flexo-compressão e são apresentados os valores de momento fletor resistente de cálculo encontrados no campo denominado de “Momento Resistente de Cálculo” para os eixos de análise. Nele também se encontra o valor da interação que o modelo de cálculo resulta. Para as verificações de acordo com a ABNT NBR 8800:2008, são apresentados dois modelos de cálculo diferentes.

Caso os valores se encontrem de acordo com o estabelecido pela norma, o perfil resiste aos esforços solicitantes e a célula de verificação emite o aviso de “Ok!!!” com fundo verde, caso contrário, a célula passa a ter fundo amarelo com o aviso de “Não Ok!!!” com escrita em vermelho.

5.6 VALIDAÇÃO DAS PLANILHAS ELABORADAS

Para fins de validação das planilhas, foram utilizados exemplos resolvidos para o dimensionamento de pilares de aço tubulares e pilares mistos de aço preenchido com concreto, tanto para seção circular quanto para retangulares, de acordo com os dois procedimentos normativos estudados e seus resultados foram comparados com os resultados obtidos nas planilhas.

5.6.1 Exemplos de pilares de aço tubulares

5.6.1.1 Pilar de aço de seção tubular retangular

Para a validação da planilha de cálculo, foram utilizados para comparação de resultados dois exemplos resolvidos manualmente do cálculo de esforços resistentes de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 e a ABNT NBR 16239:2013. Os parâmetros escolhidos para comparação foram o momento fletor resistente de cálculo para o eixo x, o momento fletor resistente de cálculo para o eixo y, a força normal resistente de cálculo e a força cortante resistente de cálculo para os dois eixos, x e y. O comprimento considerado para o elemento estrutural foi igual a 400 cm e aço com $f_y = 345$ MPa.

5.6.1.1.1 De acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Conforme ABNT NBR 8800:2008, os valores obtidos para o exemplo 1 são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 1 – ABNT NBR 8800:2008

Seção 400 x 200 x 12,2 mm					
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	$M_{Rd,y}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,x}$ (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	54290,80	32352,33	1377,81	1612,58	694,26
Manual	54290,79	32352,33	1371,06	1612,58	694,25

Para o exemplo 2, os resultados obtidos são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 2 – ABNT NBR 8800:2008

Seção 360 x 210 x 12,5 mm					
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	$M_{Rd,y}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,x}$ (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	48366,19	33287,84	1546,00	1458,40	752,72
Manual	48366,17	33287,79	1534,46	1458,40	752,72

Pela análise das tabelas 2 e 3, pode-se concluir que as planilhas apresentam resultados praticamente idênticos aos resultados manuais, o que mostra a eficiência das planilhas elaboradas.

5.6.1.1.2 De acordo com a ABNT NBR 16239:2013

Conforme a ABNT NBR 16239:2013, os valores obtidos para o primeiro exemplo são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 1 – ABNT NBR 16239:2013

Seção 400 x 200 x 12,2 mm					
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	$M_{Rd,y}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,x}$ (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	54290,80	32352,33	1502,15	1612,58	694,26
Manual	54290,79	32352,33	1499,60	1612,58	694,25

Para o segundo exemplo os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados para seção tubular retangular – Exemplo 2 – ABNT NBR 16239:2013

Seção 360 x 210 x 12,5 mm					
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	$M_{Rd,y}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,x}$ (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	48366,19	33287,84	1657,91	1458,40	752,72
Manual	48366,17	33287,79	1658,88	1458,40	752,72

Os valores obtidos através da planilha e da resolução manual são muito próximos, o que mostra a eficiência das planilhas elaboradas.

5.6.1.2 Pilar de aço de seção tubular circular

Para a validação da planilha de cálculo para pilares de aço de seção circular, foram utilizados para comparação de resultados dois exemplos resolvidos manualmente do cálculo de esforços resistentes de acordo com a ABNT NBR 8800:2008 e a ABNT NBR 16239:2013. Os parâmetros escolhidos para comparação foram o momento fletor resistente de cálculo para o eixo x, a força normal resistente de cálculo e a força cortante resistente de cálculo para o eixo y. O comprimento considerado para o elemento estrutural foi igual a 400 cm e aço com $f_y = 345$ MPa.

5.6.1.1.1 De acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Para um perfil com dimensões de 310 x 15,8 mm os valores obtidos conforme o procedimento normativo da ABNT NBR 8800:2008 para o exemplo 1 são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 1 – ABNT NBR 8800:2008

Seção 310 x 15,8 mm			
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	42932,50	4111,80	1374,03
Manual	42932,42	4108,28	1374,00

Para o exemplo 2, utilizando um perfil de 273 x 12,5 mm, os resultados obtidos são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 2 – ABNT NBR 8800:2008

Seção 273 x 12,5 mm			
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	26624,72	2795,80	962,53
Manual	26624,59	2794,33	962,55

A validação é realizada pela proximidade dos valores obtidos manualmente e por meio das planilhas elaboradas.

5.6.1.1.2 De acordo com a ABNT NBR 16239:2013

De acordo com o procedimento normativo da NBR 16239:2013, os valores obtidos para o primeiro exemplo são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 1 – ABNT NBR 16239:2013

Seção 310 x 15,8 mm			
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	42932,50	4484,70	1374,03
Manual	42932,42	4483,85	1374,00

Para o segundo exemplo, os resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Resultados para seção tubular circular – Exemplo 2 – ABNT NBR 16239:2013

Seção 273 x 12,5 mm			
	$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	N_{Rd} (kN)	$V_{Rd,y}$ (kN)
Planilha	26624,72	3095,90	962,53
Manual	26624,59	3095,90	962,55

Os valores obtidos através das planilhas e da resolução manual são muito próximos, o que mostra a eficiência das planilhas elaboradas.

5.6.2 Exemplos de pilares mistos de perfis tubulares preenchido com concreto

5.6.2.1 Pilar misto de perfil tubular retangular preenchido com concreto

Para a validação da planilha para pilares mistos de perfil tubular retangular preenchido com concreto, foram utilizados resultado apresentados em Queiroz et al (2012). Tendo em vista a falta de exemplos na literatura com resultados obtidos de acordo com a ABNT NBR 16239:2013, são comparados apenas os resultados das planilhas construídas com base na ABNT NBR 8800:2008.

Os parâmetros utilizados para validação da planilha foram o momento fletor resistente de plastificação de cálculo para os dois eixos de simetria, e as normais resistentes de cálculo para três diferentes comprimentos destravados do pilar. Considerando um pilar de quatro metros de comprimento, sem influência de armadura, com $f_y = 250\text{MPa}$ e $f_{ck} = 30\text{MPa}$.

Conforme o procedimento normativo apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 os valores obtidos para o momento fletor resistente de plastificação de cálculo dos dois eixos de simetria e a diferença entre eles em porcentagem são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados para seção tubular retangular – Momento fletor resistente de plastificação de cálculo - ABNT NBR 8800:2008

Seção do Tubo (mm)	$M_{pl.,Rd}$ (kN.cm)		
	Planilha	Queiroz et al (2012)	dif. (%)
200x200x8,2	10872	11134	-2,41
200x200x9,5	12217	12568	-2,87
240x240x8,2	16203	16518	-1,94
240x240x9,5	18263	18685	-2,31
290x290x8,2	24431	24812	-1,56
290x290x9,5	27612	28123	-1,85

Na tabela 11 são apresentados os valores de normais resistentes de cálculo para três diferentes comprimentos destravados do pilar, e a diferença entre os valores está em porcentagem.

Tabela 11 – Resultados para seção tubular retangular – Normal resistente de cálculo - ABNT NBR 8800:2008

Seção do Tubo (mm)	N _{Rd} (kN)								
	Comprimento destravado (mm)								
	3000			4000			5000		
Planilha	Queiroz et al (2012)	dif.(%)	Planilha	Queiroz et al (2012)	dif.(%)	Planilha	Queiroz et al (2012)	dif.(%)	
200x200x8,2	1808	1848	-2,21	1669	1708	-2,34	1506	1545	-2,59
200x200x9,5	1977	2030	-2,68	1827	1879	-2,85	1650	1702	-3,15
240x240x8,2	2416	2456	-1,66	2282	2323	-1,80	2122	2162	-1,89
240x240x9,5	2631	2685	-2,05	2488	2542	-2,17	2316	2369	-2,29
290x290x8,2	3253	3293	-1,23	3125	3166	-1,31	2969	3009	-1,35
290x290x9,5	3525	3579	-1,53	3390	3444	-1,59	3224	3278	-1,67

Os valores obtidos através das planilhas estão próximos daqueles apresentados em Queiroz et al (2012), o que mostra a validação da eficiência das planilhas elaboradas. As diferenças encontradas podem ser atribuídas a adoção de diferentes raios de curvatura no encontro entre as chapas constituintes do perfil. No presente trabalho adotou-se o raio de curvatura externo igual a duas vezes a espessura do perfil.

5.6.2.2 Pilar misto de perfil tubular circular preenchido com concreto

Para a validação da planilha para pilares mistos de perfil tubular circular preenchido com concreto, também foram utilizados resultado apresentados em Queiroz et al (2012). Assim como no caso dos perfis retangulares, tendo em vista a falta de exemplos na literatura, são comparados apenas os resultados das planilhas construídas com base na ABNT NBR 8800:2008.

Os parâmetros utilizados para validação da planilha foram o momento fletor resistente de plastificação de cálculo para os dois eixos de simetria, e as normais resistentes de cálculo para três diferentes comprimentos destravados do pilar.

Considerando um pilar de quatro metros de comprimento, sem influência de armadura, com $f_y = 250 \text{ MPa}$ e $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$.

Conforme ABNT NBR 8800:2008 os valores obtidos para os parâmetros de comparação são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados para seção tubular circular – Momento fletor resistente de platificação de cálculo - ABNT NBR 8800:2008

Seção do Tubo (mm)	$M_{pl,x,Rd}$ (kN.cm)		
	Planilha	Queiroz et al (2012)	Dif. (%)
219,1x8,2	9240	9240	0
273,0x9,3	16515	16515	0
323,8x9,5	24280	24280	0
355,6x9,5	29691	29691	0

Na tabela 13 são apresentados os valores de normais resistentes de cálculo para três diferentes comprimentos destravados do pilar, e a diferença entre os valores está em porcentagem.

Tabela 13 – Resultados para seção tubular circular – Normal resistente de cálculo - ABNT NBR 8800:2008

Seção do Tubo (mm)	N_{Rd} (kN)								
	Comprimento destravado (mm)								
	3000			4000			5000		
Planilha	Queiroz et al (2012)	dif. (%)	Planilha	Queiroz et al (2012)	dif. (%)	Planilha	Queiroz et al (2012)	dif. (%)	
219,1x8,2	1681	1681	0	1533	1533	0	1362	1362	0
273,0x9,3	2578	2578	0	2427	2427	0	2246	2246	0
323,8x9,5	3418	3418	0	3271	3271	0	3091	3091	0
355,6x9,5	3965	3965	0	3820	3820	0	3641	3641	0

Os valores obtidos através das planilhas e aqueles apresentados na literatura são muito próximos, o que mostra a eficiência de cálculo das planilhas elaboradas.

6 RESULTADOS

6.1 PILARES DE AÇO COM PERFIS TUBULARES

De acordo com a ABNT NBR 16239:2013 o processo de dimensionamento para pilares de aço com perfil tubular a ser seguido é semelhante ao apresentado pela ABNT NBR 8800:2008 para o cálculo de pilares de aço, apresentando diferença apenas na determinação do fator de redução associado à força axial de compressão resistente χ , conforme pode ser verificado pela comparação das equações (2) e (3), referentes a ABNT NBR 8800:2008 e a equação (33), referente a ABNT NBR 16239:2013.

O gráfico 1 apresenta duas curvas com os valores do fator de redução associado à resistência à compressão, χ , em função do índice de esbeltez reduzido, λ_0 .

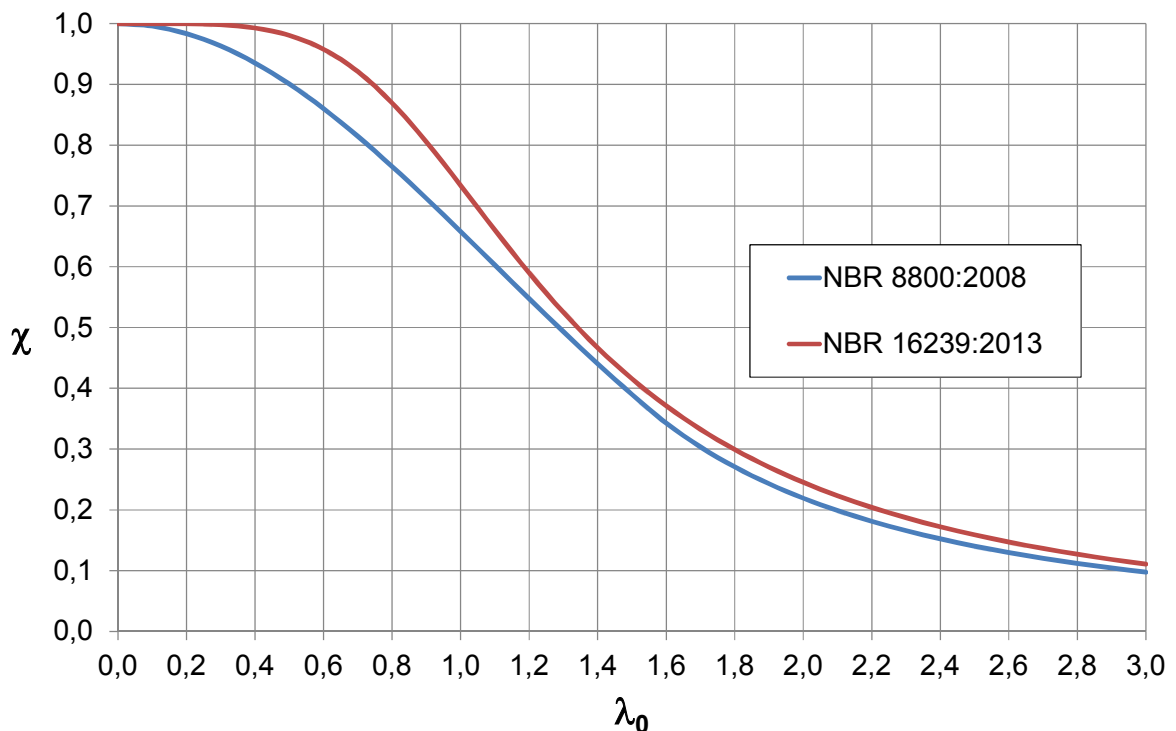


Gráfico 1 – Valor de χ em função do índice de esbeltez λ_0 .

A partir do gráfico 1 é possível notar que a curva que representa o redutor χ da força axial de compressão resistente de cálculo referente a ABNT NBR 16239:2013 fica acima daquele calculado ABNT NBR 8800:2008. Para melhorar visualizar a diferença entre as curvas foram elaborados os gráficos 2 e 3, onde são apresentadas as curvas de diferença absoluta e percentual, respectivamente, entre os valores dos redutores de resistência à compressão χ obtidos de acordo com as normas ABNT NBR 16239:2013 e ABNT NBR 8800:2008.

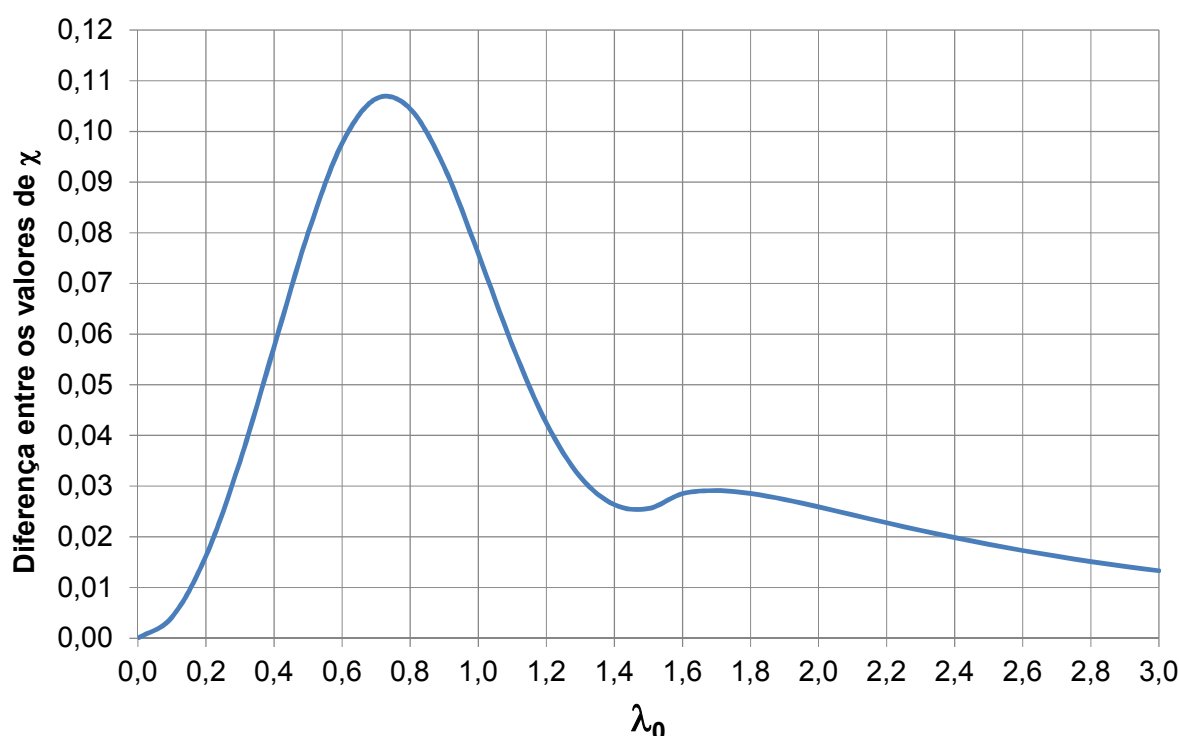


Gráfico 2 – Curva de diferença absoluta entre os valores dos redutores de resistência à compressão χ obtidos de acordo com as normas ABNT NBR 16239:2013 e ABNT NBR 8800:2008.

Por meio do gráfico 2 pode-se perceber que a diferença absoluta para os valores de χ é mais acentuada para o intervalo de λ_0 entre 0,3 e 1,4. No entanto, em termos percentuais, percebe-se por meio da análise do gráfico 3 que as diferenças são consideráveis para quase toda a gama dos valores de λ_0 , exceto para valores de λ_0 próximos de zero. Além disso, verifica-se também que há um aumento significativo na diferença percentual dos valores de χ a partir de λ_0 igual a 1,4, que não é evidente por meio da análise dos gráficos 1 e 2.

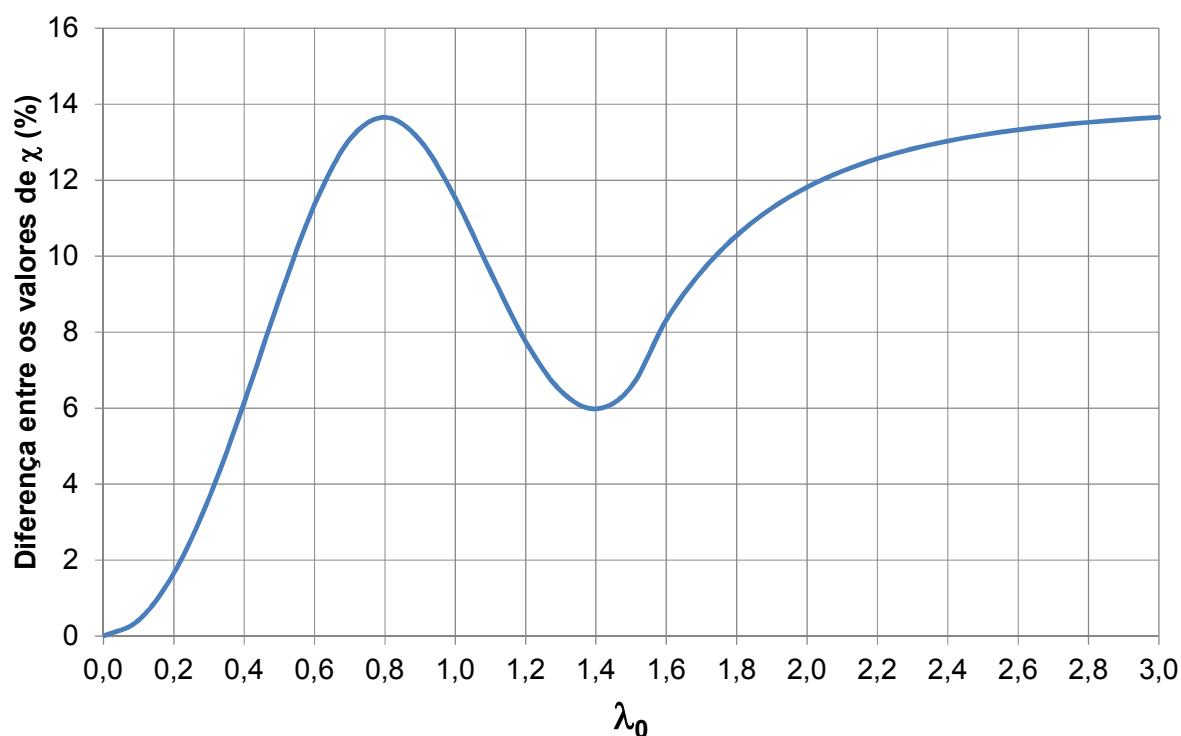


Gráfico 3 – Curva de diferença percentual entre os valores dos redutores de resistência à compressão χ obtidos de acordo com as normas ABNT NBR 16239:2013 e ABNT NBR 8800:2008.

A tabela 14 apresenta os resultados obtidos para o fator de redução por meio das planilhas para as duas normas, a partir de um mesmo valor para o índice de esbeltez.

Tabela 14 – Comparativo dos redutores de resistência χ e das normais resistentes de cálculo

Perfil	Norma (NBR)	λ_0	χ	Diferença (%)	N_{Rd} (kN)	Diferença (%)
400x200x12,2 (Retangular)	8800:2008	1,65	0,322	9,01	1377,81	9,02
	16239:2013	1,65	0,351		1502,15	
101,6x8,0 (Circular)	8800:2008	0,68	0,825	12,73	441,10	12,67
	16239:2013	0,68	0,930		497,00	
310x15,8 (Circular)	8800:2008	0,51	0,898	9,02	4111,80	9,06
	16239:2013	0,51	0,979		4484,70	

O perfil retangular utilizado para comparação apresenta o índice de esbeltez reduzido igual a 1,65. O que levou a ABNT NBR 16239:2013 a um fator de redução igual a 0,351, aproximadamente 9,01% maior que o resultante da ABNT NBR 8800:2008, que foi igual a 0,322.

Para o primeiro perfil circular, o índice de esbeltez reduzido encontra-se no intervalo em que as curvas de χ se distanciam, conforme pode ser observado no gráfico 1. Assim, a ABNT NBR 16239:2013 apresentou um fator de redução igual a 0,930, aproximadamente 12,73% maior em relação ao obtido pela ABNT NBR 8800:2008. Essa diferença interferiu na mesma proporção no resultado da normal resistente de cálculo.

O segundo perfil circular apresentou índice de esbeltez no valor de 0,510, levando a um fator de redução de 0,979 para a ABNT NBR 16239:2013 e 0,898 para a NBR 8800:2008, uma diferença de aproximadamente 9,02%. Assim como o fator de redução, a normal resistente de cálculo obtida pela ABNT NBR 16239:2013 foi cerca de 9,06% maior que a encontrada por meio ABNT NBR 8800:2008.

Por fim, é interessante ressaltar que variação percentual de aproximadamente 9% para os valores de χ obtida tanto para o perfil retangular ($\lambda_0 = 1,65$) quanto para o segundo perfil circular ($\lambda_0 = 0,51$) só pode ser diretamente compreendida com auxílio do gráfico 3.

6.2 PILARES MISTOS DE PERFIL TUBULAR PREENCHIDO COM CONCRETO

A fim de ilustrar as principais diferenças introduzidas pela ABNT NBR 16239:2013 em relação a ABNT NBR 8800:2008 no cálculo de pilares mistos preenchidos, considera-se o exemplo de um pilar de quatro metros de comprimento, considerando os casos de seção quadrada e circular sem influência de armadura, aço com resistência ao escoamento $f_y = 250\text{MPa}$ e concreto com $f_{ck} = 30\text{MPa}$. As solicitações são um momento fletor de cálculo igual de 140 kN.m em torno do eixo x e uma força normal de cálculo igual a 2000 kN.

A primeira alteração apresentada pela ABNT NBR 16239:2013 para o dimensionamento de pilares mistos de perfil tubular preenchido com concreto, além do redutor χ associado a flambagem global, é quanto ao cálculo da rigidez efetiva a flexão $(EI)_e$, onde o valor do coeficiente de correção que multiplica o termo referente ao componente concreto, e leva em conta a fissuração desse material, passou de 0,6 para 0,7.

Na tabela 15 são apresentados os valores encontrados para a rigidez efetiva a flexão e dos itens que apresentam interferência direta com a alteração do coeficiente de correção mencionado no parágrafo anterior, de acordo com o procedimento dos dois modelos de cálculo, tanto para perfil tubular retangular, quanto para perfil tubular circular.

Tabela 15 – Comparativo da rigidez efetiva a flexão, força axial de flambagem, redutor de resistência e das normais resistentes de cálculo

Perfil	Norma (NBR)	Eixo x-x						χ	Dif. (%)	N _{Rd} (kN)	Dif. (%)
		(EI) _{ex} (kN.m ²)	Dif. (%)	N _{ex} (kN)	Dif. (%)	$\lambda_{0, mx}$	Dif. (%)				
Retangular 290x290x9,5	8800:2008	34043,55	3,32	21000	3,31	0,462	-1,73	0,915	0,22	3390	0,29
	16239:2013	35211,79		21720		0,454		0,917		3400	
Circular 323,8x10,3	8800:2008	31441,58	3,33	19395	3,32	0,487	-1,64	0,906	0,33	3419	0,32
	16239:2013	32523,15		20062		0,479		0,909		3430	

Ressalta-se que a tabela 15 apresenta apenas os valores de resultados encontrados para o eixo x-x, tendo em vista que o exemplo utilizado para perfil retangular trata-se de uma seção quadrada, e os valores para os dois eixos são iguais. A mesma consideração vale para a seção circular.

De acordo com a tabela 15, a mudança sugerida pela ABNT NBR 16239:2013 resulta em valores para rigidez efetiva à flexão e força axial de flambagem elástica, aproximadamente 3,3% maiores que os obtidos pela ABNT NBR 8800:2008.

Isso resultou na redução da ordem de 1,7% do valor do índice de esbeltez reduzido, e o aumento da ordem de 0,3% no fator de redução. Também é possível notar que a variação da normal resistente de cálculo foi muito pequena, apenas cerca de 0,3%.

A segunda mudança apresentada pela ABNT NBR 16239:2013 foi a introdução de um novo modelo de cálculo para verificação dos pilares submetidos à flexo-compressão.

A ABNT NBR 8800:2008 apresenta dois modelos de cálculo diferentes. O primeiro deles é um modelo simplificado, denominado modelo I, que possui o mesmo procedimento dos pilares de aço. O segundo é um modelo mais rigoroso, denominado modelo II, que traz em seus cálculos a influência do momento fletor de plastificação de cálculo.

O modelo único da ABNT NBR 16239:2013 é composto de duas equações: uma para o caso em que a força normal solicitante de cálculo é menor ou igual à força axial de compressão resistente de cálculo referente apenas a parcela do concreto, e a outra para o caso em que ocorre o oposto e a força normal solicitante de cálculo é maior.

A tabela 20 mostra os valores encontrados em cada interação e a situação final com a resposta de cada modelo.

Tabela 16 – Comparativo entre resultados dos modelos de cálculo para pilares submetidos à flexo-compressão

Perfil		ABNT NBR 8800:2008		ABNT NBR 16239:2013
		Modelo I	Modelo II	
Retangular 290x290x9,5	Interação	1,04	1,05	0,92
	Situação	Não Ok!!!	Não Ok!!!	Ok!!!
Circular 323,8x10,3	Interação	1,06	0,98	0,92
	Situação	Não Ok!!!	Ok!!!	Ok!!!

A partir da tabela 20 é possível notar que os modelos da ABNT NBR 8800:2008 apresentavam diferenças entre si na resposta dos modelos, conforme era de se esperar. Para o perfil retangular, o modelo I resultou em uma interação com valor de 1% menor em relação ao modelo II, e não interferiu no resultado da verificação, onde os dois modelos apresentaram um valor para equação de interação maior que o recomendado por norma, que é igual a 1.

Já no caso perfil circular, o resultado de interação do modelo I foi aproximadamente 8% maior que o resultado modelo II. Essa diferença interferiu no resultado da verificação do perfil quanto à flexo-compressão, pois o modelo I não atendeu o limite requerido por norma, enquanto o modelo II atendeu.

Em relação aos resultados obtidos pela ABNT NBR 16239:2013, o perfil retangular apresentou um valor aproximadamente 12% menor quando comparado ao modelo I e 13% menor quando comparado ao modelo II da ABNT NBR 8800:2008, atendendo o limite requerido por norma. Para o perfil circular a resposta do modelo de verificação foi cerca de 6% menor em relação ao modelo II da ABNT NBR 8800:2008 e 14% menor em relação ao modelo I. Quanto ao resultado da verificação, o modelo da ABNT NBR 16239:2013 atendeu o limite requerido por norma, da mesma forma que para o caso do perfil retangular.

7 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado pode-se verificar que de forma geral a ABNT NBR 16239:2013 utiliza as prescrições existentes na ABNT NBR 8800:2008. Entretanto, a ABNT NBR 8800:2008 apresenta procedimentos para o cálculo para todos os tipos de pilares de aço e mistos de aço e concreto, não levando em consideração todas as particularidades das estruturas com perfis tubulares. Sendo assim, a recente norma publicada, ABNT NBR 16239:2013, apresenta alterações visando aproveitar melhor as particularidades deste tipo de perfil para a obtenção de resultados menos conservadores.

A comparação entre os valores resistentes de cálculo encontrados segundo as normas ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 16239:2013 mostrou que as alterações apresentadas pela última no cálculo do coeficiente de redução χ para barras comprimidas, na rigidez efetiva e no modelo de interação na verificação à flexo-compressão para os pilares mistos de aço e concreto, contribuíram para que um mesmo perfil apresentasse geralmente resultados maiores para as resistências de cálculo.

Assim, sugere-se que para um aproveitamento mais racional dos perfis tubulares a ABNT NBR 16239:2013 seja utilizada no dimensionamento em vez da ABNT NBR 8800:2008.

REFERÊNCIAS

ALVA, G. M. S. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. 2000. 272f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ARAUJO, A. H. M. Construção metálica tubular. **Revista Construção Metálica**, São Paulo, ed 104, p. 32-36, 2011.

ARAUJO, C.J.R.V. **Estudo experimental do efeito do fogo em pilares mistos curtos de aço e concreto**. Campinas, 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

BRAGA, Augusto C. G.; FERREIRA, Walnório G. Pilares mistos aço-concreto e comparativo de custo com pilares de aço e pilares de concreto armado. **Revista Escola Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 4, out/dez, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56421349004>>. Acesso em: 27 dez. 2013.

BRIDGE, R.; WEBB, J. (1992). Thin walled circular concrete filled steel tubular columns. In: ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE, Potosi, Michigan, 1992. Proceedings. New York, ASCE, p. 634-649.

FABRIZZI, M. A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço – concreto**. 2007. 233f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIGUEIREDO, L. M. B. **Projeto e construção de pilares mistos aço-concreto**. 1998. 142f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LIMA, L. R. O., NEVES, L. F. C., SILVA, J. G. S., VELLASCO, P. C. G. S. **Análise paramétrica de ligações “t” com perfis tubulares em aço através de um modelo de elementos finitos**. CILAMCE 2005. Guarapari, Espírito Santo, 2005.

MEYER, Karl F. **Estruturas metálicas: Construções com tubos**. Belo Horizonte: KM Engenharia, 2002.

MICHILLO, D. G. V. **Estudo de comportamento de ligações de placa de base para estruturas metálicas tubulares**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2003.

NARDIN, S. De. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999. 147f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

OLIVEIRA, W. L. A. **Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular**. 2008. 239f. Tese (doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PINHEIRO, Antonio C. F. B. **Estruturas metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

POSSATO, G. S. N. **Análise teórica experimental de placas de base de colunas metálicas tubulares**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

QUEIROZ, F. D. **Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos**. 2003. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

QUEIROZ, Gilson.; PIMENTA, José R. (2001). **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: O Lutador. 336p.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, José R.; MARTINS, Alexander G. **Manual de construção em aço: estruturas mistas**. v.1. 2 ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.

SANTOS, A. L. E. F. **Ligações de barras tubulares para estruturas metálicas planas**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2003.

Sustentabilidade. **Revista Arquitetura & Aço**. Roma Editora. Rio de Janeiro. Jan. 2010. Edição especial.

**APÊNDICE A – PLANILHA PARA O DIMENSIONAMENTO DE PILAR TUBULAR
RETANGULAR DE AÇO DE ACORDO COM A NBR 8800:2008**

Pilar Aço - Seção Tubular Retangular - NBR 8800:2008												
Esforços Solicitantes de Cálculo												
M_{Sd} (kN.cm)	N_{Sd} (kN)			V_{Sd} (kN)								
$M_{Sd,x}$	$M_{Sd,y}$	$N_{c,Sd}$	$N_{t,Sd}$	$V_{Sd,x}$	$V_{Sd,y}$							
19.000	1.900	800	400	100	30							
Perfil												
k	L (cm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	t (mm)	b_{2i} (mm)	b_{1i}	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	A_s (cm ²)	b/t	b/t lim	
	1	400	400	200	151,2	351,2	27.630	9.353	136,61	32,79	33,71	
Aço												
f_y (MPa)	f_{yd} (kN/cm ²)	$E_{s,00}$ (MPa)										
ASTM A-572 G50	345	31.36	200.000									
Força Normal Resistente de Cálculo												
Q	Q_s	A_{sf} (cm ²)	λ_0	A_3 (cm ²)	N_{ex} (kN)	N_{ey} (kN)	N_{ez} (kN)	N_e (kN)	$N_{s,Rd}$ (kN)			
Cálculo	1.000	0.869	118,75	1,65	0,322	136,61	34,087	11,539	1,728	1,728	1.377,81	
Força Cortante Resistente de Cálculo (Perfil de Aço)												
$A_{w,x}$ (cm ²)	λ_x	$k_{r,x}$	$\lambda_{r,x}$	$V_{Rd,x}$ (kN)								
85,69	28,79	5	59,22	73,76								
$A_{w,y}$ (cm ²)	λ_y	$k_{r,y}$	$\lambda_{r,y}$	$V_{Rd,y}$ (kN)								
36,89	12,39	5	59,22	73,76								
Momento Fletor Resistente de Cálculo												
Para o eixo x				Para o eixo y								
$M_{Rd,x}$ (kN.cm)				$M_{Rd,y}$ (kN.cm)								
FLM	FLA	FLT	FLM	FLA	FLM	FLA	FLT	FLM	FLA	Interação	Ok!!!	
54290,80	54290,80	54290,80	54290,80	32352,33	33468,40	32352,33	33468,40	19.000	1.900	0,58	0,944	
Verificação à Compressão												
N_{Sd} (kN)	N_{Rd} (kN)	aproveitamento										
800	1.377,81	0,58										
Verificação à Flexão Compressão												
$M_{Rd,x}$ (kN.cm)	$M_{Rd,y}$ (kN.cm)	MODELO I										
54290,80	32352,33	MODELO I										
$M_{Sd,x}$ (kN.cm)	$M_{Sd,y}$ (kN.cm)	Interação										
19.000	1.900	0,58										

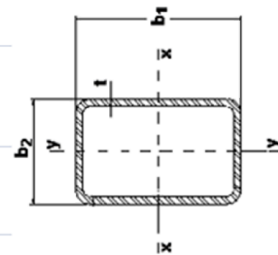


Imagem 1 - Planilha pilar de aço Aço_Retang NBR 8800_08

APÊNDICE B - Planilha para o dimensionamento de pilar tubular circular de aço de acordo com a NBR 8800:2008

Pilar de Aço - Seção Tubular Circular - NBR 8800:2008

Esforços Solicitantes de Cálculo					
M_{sx} (kN cm)	M_{sy} (kN cm)	N_{sx} (kN)	N_{sy} (kN)	V_{sx} (kN)	V_{sy} (kN)
11.000	1.100	3.000	1.000	100	30

Perfil							
k	L (cm)	D (mm)	t (mm)	D_{ex} (mm)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	D/t
1	400	310	15,8	278,4	15.845,13	146,03	19,62

Aço					
f_y (MPa)	f_d (kN/cm ²)	$E_{aço}$ (MPa)			
345	31,36	200.000			

Força Normal Resistente de Cálculo					
Q	A_g (cm ²)	λ_o	N_{ex} (kN)	N_{ey} (kN)	N_u
1	146,03	0,508	19.548,14	19.548,14	1.142.819,13

Momento Resistente de Cálculo					
i_p	i_x	i_y	W (cm ³)	M_{px} (kN cm)	M_{py} (kN cm)
40,58	179,71	19,62	1.968,86	1022,27	47.932,50

Força Cortante Resistente de Cálculo					
t_w	A_w (cm ²)	V_{sd} (kN)			
20,7	146,03	1.374,03			

Verificação à Flexão Compressão					
M_{sx} (kN cm)	M_{sy} (kN cm)	N_{sx}/N_{ex}	MODELO I		
11.000	1.100	1.100	0,73	0,980	Ok!!!

Verificação à Compressão					
λ_c	N_{sd} (kN)	N_{ex} (kN)	aprovelamento	Ok!!!	
7,2	38,40	3.000	4,112	0,73	Ok!!!

Imagem 2 - Planilha pilar de aço Aço_Circular NBR 8800_08

APÊNDICE D - Planilha para o dimensionamento de pilar tubular circular de aço de acordo com a NBR 16239:2013

Pilar de Aço - Seção Tubular Circular - NBR 16239:2013											
Esforços Solicitantes de Cálculo											
M_{Sd} (kN.cm)	N_{Sd} (kN)		V_{Sd} (kN)								
$M_{Sd,x}$	$M_{Sd,y}$	$N_{c,Sd}$	$N_{s,Sd}$	$V_{Sd,x}$	$V_{Sd,y}$						
11.000	1.100	3.000	1.000	100	30						
Perfil											
k	L (cm)	D (mm)	t (mm)	D_{int} (mm)	I_a (cm ⁴)	A_a (cm ²)	D/t	I_a (cm ⁴)			
1	400	310	15,8	278,4	15.845	146,03	19,62	15845,13			
Aço											
f_y (MPa)	f_{yd} (kN/cm ²)	$E_{sço}$ (MPa)									
345	31,36	200.000									
Força Normal Resistente de Cálculo											
Q	A_g (cm ²)	λ_0	λ	N_{ex} (kN)	N_{ey} (kN)	N_{ez} (kN)	N_e (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)			
1	146,03	0,508	0,979	19.548	19.548	19.492	19491,93	4.484,7			
Momento Resistente de Cálculo											
λ_p	λ_r	λ	Z (cm ³)	W (cm ³)	M_{pl} (kN.cm)	M_{Rd} (kN.cm)					
40,58	179,71	19,62	1368,86	1022,27	47225,75	42.932,50					
Força Cortante Resistente de Cálculo											
τ_{cr}	A_g (cm ²)	V_{Rd} (kN)									
20,7	146,03	1.374,03									
Verif. à Flexo Compressão											
$M_{Sd,x}$		$M_{Sd,y}$		N_{Sd}/N_{Rd}							
11.000		1.100		0,67							
Verificação à Compressão											
N_{Sd} (kN)		N_{Rd} (kN)	Aprov.								
3.000		4.485	0,67								
Verif. à Flexo Compressão											
$M_{Sd,x}$		$M_{Sd,y}$		N_{Sd}/N_{Rd}							
11.000		1.100		0,67							
MODELO I											
N_{Sd}/N_{Rd}		Interação		Ok!!!							
0,67		0,919									

Imagem 4 - Planilha pilar de aço Aço_Circular NBR 16239_13

APÊNDICE E - Planilha para o dimensionamento de pilar misto de perfil tubular retangular preenchido com concreto de acordo com a NBR 8800:2008

Pilar Misto - Seção Tubular Retangular Preenchida com Concreto														
Esforços Solicitantes de Cálculo														
M _{sd,x} (kN cm)	M _{sd,y}	N _{sd} (kN)	N _{sd}	N _{sd}	V _{sd,x} (kN)	V _{sd,y} (kN)								
13.200	-	2.000	1.000	100	30									
Perfil														
k	L (cm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	t (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	I _{xx} (cm ⁴)	I _{yy} (cm ⁴)	A _s (cm ²)	b/t	
1	400	290	290	9.5	252	252	13.517	13.517	104.27	30.53	44.809	44.809		
Aço														
f _y (MPa)	f _{yd} (kN/cm ²)	E _{sp} (MPa)	Seção de Concreto		f _{ck} (MPa)	E _c (kN/cm ²)	A _c (cm ²)	E _c (MPa)	φ	E _{c,red} (MPa)	I _{xc} (cm ⁴)	I _{yc} (cm ⁴)		
250	22.73	200.000			30	30	2.14	734	26.072	0	26.072	44.809		
Armadura Longitudinal														
nº de barras	Bitola (mm)	eyeq (cm)	exeq (cm)	E _s (MPa)	f _{yk} (MPa)	A _s (cm ²)	f _{ysd} (kN/cm ²)	I _{xx} (cm ⁴)	I _{yy} (cm ⁴)	Z _x (cm ³)	Z _y (cm ³)			
0	12.5	11	11	205.000	500	500	0.00	43.48	0.00	0.00	0.00			
Força Normal Resistente de Cálculo														
(EI) _{bx} (kN cm ²)	N _{ex} (kN)	λ _{0,mx}	λ _x											
340.435.540	21.000	0.462	0.915											
(EI) _{by} (kN cm ²)	N _{ey} (kN)	λ _{0,my}	λ _y											
340.435.540	21.000	0.462	0.915											
Momento Fleor Resistente de Plastificação de Cálculo														
Z _{bx} (cm ³)	Z _{ox} (cm ³)	M _{px,Rd} (kN cm)	Z _{any} (cm ³)	M _{py,Rd} (kN cm)										
4.92	1.088	46	4.965	657										
Z _{by} (cm ³)	Z _{oy} (cm ³)	M _{py,Rd} (kN cm)	Z _{bx} (cm ³)	M _{px,Rd} (kN cm)										
4.92	1.088	46	4.965	657										
Força Cortante Resistente de Cálculo (Perfil de Aço)														
k _{yx}	λ _{px}	V _{px,Rd} (kN)												
47.88	26.53	69.57												
k _{xy}	λ _{py}	V _{py,Rd} (kN)												
47.88	26.53	69.57												

Verificação à Flexão-Compressão			
M _{sd,x}	13.200	MODELO I	MODELO II
M _{sd,y}	-		
N _{sd} /N _{rd}	0.59	Não Ok!!!	Interação
		OKI	1.008
Verificação à Compressão			
δ	b/t lim	altura/largura	N _{sd}
	0.64	63.92	1.00
			2.000
			3.390
			aproveitamento
			Ok!!!

Verificação à Compressão	
δ	aproveitamento
0.64	0.59

Imagem 5 - Planilha pilar misto Misto_Retang NBR 8800_08

APÊNDICE F - Planilha para o dimensionamento de pilar misto de perfil tubular circular preenchido com concreto de acordo com a NBR 8800:2008

Pilar Misto - Seção Tubular Circular Preenchida com Concreto													
Esforços Solicitantes de Cálculo													
M_{sd} (kN.cm)	N_{sd} (kN)	V_{sd} (kN)											
$M_{sd,x}$	N_{sd}	$N_{g,sa}$	$V_{sd,x}$	$V_{sd,y}$									
13.200	-	2.000	1.000	100									
Perfil													
k	L (cm)	D (mm)	t (mm)	D_{int} (mm)	I_a (cm ⁴)	A_g (cm ²)	Peso (kg/m)	D/t	δ				
1	400	323,8	10,3	303,2	12.476	101,44	79,63	31,44	0,61				
Aço													
ASTM A-36	f_y (MPa)	f_{yd} (kN/cm ²)	E_s (Mpa)	Seção de Concreto		f_{ck} (MPa)	f_{cd} (kN/cm ²)	A_c (cm ²)	E_c (MPa)	ϕ	E_{-crec} (MPa)	I_{cx} (cm ⁴)	I_{cy} (cm ⁴)
	250	22,73	200.000	Concreto		30	2,14	722,02	26.072	0	26.072	41.485	41.485
Armadura Longitudinal													
nº de Barras	Bitola (mm)	eyeq (cm)	eaxeq (cm)	E_s (MPa)	f_{ys} (MPa)	A_s (cm ²)	f_{yad} (kN/cm ²)	I_{sx} (cm ⁴)	I_{sy} (cm ⁴)	Z_x (cm ³)			
0	10	10	10	205.000	500	0,00	43,48	0,00	0,00	0,00			
Força Normal Resistente de Cálculo													
$(EI)_{ex}$ (kN.cm ²)	N_{ex} (kN)	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	$\lambda_{0,ex}$	
314.415.825	19.395	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	0,487	
Momento Fletor Resistente de Plastificação de Cálculo													
Z_{ax} (cm ³)	Z_{ay} (cm ³)	Z_{ex} (cm ³)	Z_{ey} (cm ³)	Z_{onx} (cm ³)	Z_{ony} (cm ³)	$M_{pl,x,Rd}$ (kN.cm)	$M_{pl,y,Rd}$ (kN.cm)						
4.73	1.013	46	4.646	678	26.006	26.006	26.006						
Força Cortante Resistente de Cálculo													
τ_{σ}	A_b (cm ²)	V_{Rd} (kN)											
15	101,44	691,66											
Verificação à Flexo-Compressão													
MODELO I													
$M_{sd,x}$	13.200												
$M_{sd,y}$	-												
N_{sd}/N_{Rd}	0,58	Interação	1,036	N_{sd}/N_{Rd}	0,931								
MODELO II													
Verificação à Compressão													
δ	D/t lim	N_{sd}	2.000	N_{Rd}	3.419								
0,61	120,00	aproveitamento	0,58										

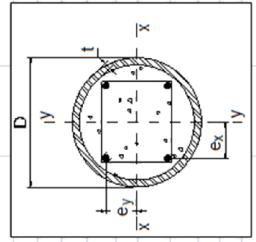


Imagem 6 - Planilha pilar misto Misto_Circular NBR 8800_08

APÊNDICE G - Planilha para o dimensionamento de pilar misto de perfil tubular retangular preenchido com concreto de acordo com a NBR 16239:2013

Pilar Misto - Seção Tubular Retangular Preenchida com Concreto											
Esforços Solicitantes de Cálculo											
$M_{Sd,x}$ (kN.cm)	N_{Sd} (kN)	V_{Sd} (kN)									
$M_{Sd,y}$	$N_{6,Sd}$	$V_{Sd,x}$	$V_{Sd,y}$								
13.200	2.000	1.000	30								
Perfil											
k	L (cm)	b_1 (mm)	b_2 (mm)	t (mm)	b_{1t} (mm)	b_{2t} (mm)	i_{sx} (cm ⁴)	i_{sy} (cm ⁴)	A_s (cm ²)	Peso (kgf/m)	δ
1	400	290	290	9.5	252	252	13.517	13.517	104.27	81.85	30.53
Aço											
f_y (MPa)	f_{cd} (kN/cm ²)	E_s (MPa)	Seção de		f_{sd} (kN/cm ²)	A_s (cm ²)	E_c (MPa)	ρ	$E_{c,red}$ (MPa)	i_{cx} (cm ⁴)	i_{cy} (cm ⁴)
250	22.73	200.000	Concreto		30	2.14	734	0	26.072	44.809	44.809
Armadura Longitudinal											
n° de Barra	Bitola (mm)	e_{xeq} (cm)	e_{yeq} (cm)	E_s (MPa)	f_{ys} (MPa)	A_s (cm ²)	$f_{y,red}$ (kN/cm ²)	i_{sx} (cm ⁴)	i_{sy} (cm ⁴)	Z_s (cm ³)	
0	12.5	11	11	205.000	500	0.00	43.48	0.00	0.00	0.00	
Força Normal Resistente de Cálculo											
$(E)_{ax}$ (kN.cm ²)	$N_{6,x}$ (kN)	$i_{0,mx}$	γ_x	N_{Ed} (kN)							
352.117.872	21.720	0.454	0.917	3.400							
$(E)_{ay}$ (kN.cm ²)	$N_{6,y}$ (kN)	$i_{0,my}$	γ_y								
352.117.872	21.720	0.454	0.917								
Momento Fletor Resistente de Plasticificação de Cálculo											
Z_{sx} (cm ³)	Z_{sy} (cm ³)	Z_{ex} (cm ³)	Z_{ey} (cm ³)	$M_{p,x,Ed}$ (kN.cm)							
4.92	4.92	4.965	657	27.612							
Z_{sx} (cm ³)	Z_{sy} (cm ³)	Z_{ex} (cm ³)	Z_{ey} (cm ³)	$M_{p,y,Ed}$ (kN.cm)							
4.92	4.92	4.965	657	27.612							
Força Cortante Resistente de Cálculo (Perfil de Aço)											
$k_{v,x}$	$i_{p,x}$	$i_{r,x}$	$V_{Rd,x}$ (kN)								
47.88	26.53	5	69.57	86.65							
$k_{v,y}$	$i_{p,y}$	$i_{r,y}$	$V_{Rd,y}$ (kN)								
47.88	26.53	5	69.57	86.65							

Verificação à Flexão-Compressão		
$M_{Sd,x}$	13.200	
$M_{Sd,y}$	-	
Interação		
	0.887	Ok!!!

Verificação à Compressão		
δ	0.64	
b/t lim	63.92	
altura/largura	1.00	
N_{Ed}	2.000	
aproveitamento	3.400	0.59
Ok!!!		

Imagem 7 - Planilha pilar misto Mist_Retang NBR 16239_13

APÊNDICE H - Planilha para o dimensionamento de pilar misto de perfil tubular retangular preenchido com concreto de acordo com a NBR 16239:2013

Pilar Misto - Seção Tubular Circular Preenchida com Concreto											
Esforços Solicitantes de Cálculo											
M _{Sd,x} (kN.cm)	N _{Sd} (kN)	V _{Sd} (kN)									
M _{Sd,y}	N _{Sd}	V _{Sd,x}	V _{Sd,y}								
13.200	2.000	1.000	100								
Perfil											
k	L (cm)	D (mm)	t (mm)	D _{int} (mm)	I _a (cm ⁴)	A _g (cm ²)	Peso (kgf/m)	D/t	δ		
1	400	323.8	10.3	303.2	12.476	101.44	79.63	31.44	0.61		
Aço											
f _y (MPa)	f _{yd} (kN/cm ²)	E _{aço} (MPa)	Seção de		f _{ck} (MPa)	A _o (cm ²)	E _c (MPa)	φ	E _{c,red} (MPa)	I _{ox} (cm ⁴)	I _{oy} (cm ⁴)
250	22,73	200.000	Concreto		30	2,14	26.072	0	26.072	41.485	41.485
ASTM A-36											
Armadura Longitudinal											
nº de Barras	Bitola (mm)	eyeq (cm)	exeq (cm)	E _s (MPa)	f _{ys} (MPa)	A _g (cm ²)	f _{ysd} (kN/cm ²)	I _{sx} (cm ⁴)	I _{sy} (cm ⁴)	Z _s (cm ³)	
0	10	10	10	205.000	500	0,00	43,48	0,00	0,00	0,00	
Força Normal Resistente de Cálculo											
(E)I _{ex} (kN.cm ²)	N _{ex} (kN)	λ _{0,max}	γ _x	N _{Rd} (kN)							
325.231.515	20.062	0.479	0.909	3.430							
N_{pl,R} (kN)											
(E)I _{ey} (kN.cm ²)	N _{ey} (kN)	λ _{0,my}	γ _y								
325.231.515	20.062	0.479	0.909								
Momento Fletor Resistente de Plastificação de Cálculo											
Z _{ax} (cm ³)	Z _{any} (cm ³)	Z _{ox} (cm ³)	Z _{ony} (cm ³)	M _{pl,x,Rd} (kN.cm)							
4.73	1.013	46	4.646	678							
M_{pl,y,Rd} (kN.cm)											
Z _{ay} (cm ³)	Z _{oxy} (cm ³)	Z _{yx} (cm ³)	Z _{oyx} (cm ³)	M _{pl,y,Rd} (kN.cm)							
4.73	1.013	46	4.646	678							
Força Cortante Resistente de Cálculo											
A _g (cm ²)	V _{Rd} (kN)										
15	691.66										
Verificação à Flexo-Compressão											
M _{Sd,x}	MODELO I										
13.200											
Verificação à Compressão											
M _{Sd,y}	N _{Sd}	N _{Rd}	D/t lim	N _{Sd}	N _{Rd}	aproveitame					
-	2.000	2.000	0.61	120.00	3.430	0.58					
Ok!!!											

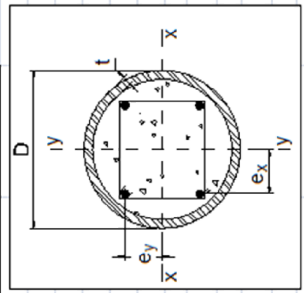


Imagem 8 - Planilha pilar misto Misto_Circular NBR 16239_13