

**INSTITUTO FEDERAL**  
**GOIANO**  
Câmpus Rio Verde

**ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DA UTILIZAÇÃO DE  
PILARES MISTOS CIRCULARES PREENCHIDOS DE  
CONCRETO E AÇO**

**ALEXANDRE MARTINS OLIVEIRA**

**Rio Verde, GO**

**2021**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE  
ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DA UTILIZAÇÃO DE PILARES  
MISTOS CIRCULARES PREENCHIDOS DE CONCRETO E AÇO**

**ALEXANDRE MARTINS OLIVEIRA**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – *Campus* Rio Verde, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves

Rio Verde – GO

Maio, 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

Oliveira, Alexandre Martins  
OOI48a Análise de custo-benefício da utilização de pilares  
mistos circulares preenchidos de concreto e aço /  
Alexandre Martins Oliveira; orientador Michell  
Macedo Alves. -- Rio Verde, 2021.  
39 p.

TCC (Graduação em Engenharia Civil) -- Instituto  
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Pilar misto preenchido. 2. Confinamento do  
concreto. 3. Viabilidade. 4. Método dos elementos  
finitos. 5. Ansys. I. Alves, Michell Macedo, orient.  
II. Título.

**ALEXANDRE MARTINS OLIVEIRA**

**ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO DA UTILIZAÇÃO DE PILARES  
MISTOS CIRCULARES PREENCHIDOS DE CONCRETO E AÇO**

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 05 de maio de 2021, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof.ª Ma. Rosane Olivo Menegon  
Universidade de Rio Verde –  
Campus Rio Verde



Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales  
Instituto Federal Goiano –  
Campus Rio Verde

MICHELL MACEDO  
ALVES:040503316  
83

Assinado de forma digital  
por MICHELL MACEDO  
ALVES:04050331683  
Dados: 2021.05.25 12:52:52  
-03'00'

Prof. Dr. Michell Macedo Alves  
Instituto Federal Goiano –  
Campus Rio Verde

Rio Verde – GO  
Maio, 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por guiar meu caminho, pela saúde que me concedeu e permitiu que esse trabalho fosse realizado.

Aos meus pais, pelo apoio excepcional em toda a minha vida, sem dúvidas eles não mediram esforços para me proporcionar todas as condições possíveis para que chegasse esse momento. Tenho muito orgulho em ser filho deles.

Aos meus irmãos, pelo apoio e pela força sempre, tiveram um papel muito importante durante este período.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Michell Macedo Alves, pela paciência e pelas instruções para produção deste trabalho.

Aos membros dessa banca, Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales e Prof<sup>a</sup>. Ma. Rosane Olivo Menegon, por aceitarem fazer parte deste momento.

Aos meus professores, que tiveram papel fundamental para que eu chegasse até aqui, muito obrigado pelos ensinamentos, todos contribuíram para meu crescimento.

Aos meus amigos que estão presentes e fazem parte desse momento.

À todas as pessoas que de alguma forma fizeram ou fazem parte da minha vida.

## RESUMO

OLIVEIRA, Alexandre Martins. **Análise de custo-benefício da utilização de pilares mistos circulares preenchidos de concreto e aço.** 2021. 39p. Monografia (Curso de Bacharelado de Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Campus* Rio Verde, Rio Verde, GO, 2021.

A utilização de estruturas mistas aço-concreto pode proporcionar muitas vantagens estruturais e econômicas para uma obra. Dentre estas, destaca-se a utilização do pilar misto preenchido que é uma alternativa muito viável em obras de grande porte devido o confinamento do concreto dentro da estrutura metálica (que serve como fôrma) gerar um acréscimo de resistência nestes pilares. Para implementação deste modelo construtivo faz-se necessário realizar um estudo de viabilidade, ou seja, buscar a melhor relação entre a resistência mecânica do pilar e o seu custo. Desta maneira, este trabalho trata da análise de custo-benefício da utilização de pilares mistos circulares preenchidos de concreto e aço. Para a análise estrutural utilizou-se o método dos elementos finitos através do software educacional Ansys. É obtida uma relação entre custo do pilar e sua carga última, variando-se três parâmetros: espessura do perfil tubular metálico, resistência à compressão do concreto e a tensão de escoamento do aço. Dentre os pilares analisados, o que apresentou melhor custo-benefício foi o C58-A343-T2,65, ou seja, um pilar com 58,68 MPa de resistência a compressão, 342,95 MPa de tensão de escoamento e espessura do tubo metálico de 2,65 mm, com o valor de R\$0,135/kN. A análise econômica indicou um custo-benefício maior quando se utiliza concreto com maior resistência e ocupando a maior área possível da seção transversal em relação ao aço.

Palavras-chave: pilar misto preenchido, confinamento do concreto, viabilidade, método dos elementos finitos, Ansys.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	6
<b>1.1 Objetivo Geral</b> .....	7
<b>1.2 Objetivos Específicos</b> .....	7
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	7
<b>2.1 Estudo De De Nardin (1999)</b> .....	7
<b>2.2 Estudo De Oliveira (2008)</b> .....	8
<b>2.3 Estudo De Simões (2008)</b> .....	10
<b>2.4 Estudo De Silva (2012)</b> .....	11
<b>2.5 Estudo De Gomes (2015)</b> .....	11
<b>2.6 Estudo De Hafiz (2016)</b> .....	12
<b>2.7 Estudo De Kurian, Paulose, Mohan (2016)</b> .....	13
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	13
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	19
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	27
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	28
<b>APÊNDICES</b> .....	31
<b>Apêndice A</b> .....	31

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas mistas são elementos constituídos de aço e concreto (simples ou armado), atuando em conjunto. O concreto é o elemento construtivo mais consumido no mundo, tem como principal característica estrutural a elevada resistência à compressão, porém é um material com ruptura, na maioria das vezes, frágil, isto é, não sofre grandes deformações antes de sofrer ruptura. O aço vem ganhando cada vez mais espaço na construção, por inúmeras vantagens, dentre elas tem-se a propriedade de ductilidade, que é o oposto de frágil, podendo sofrer grandes deformações antes da ruptura. O intuito das seções mistas é aproveitar as principais características de cada material.

A utilização de estruturas mistas amplia as soluções de projeto e construção, visto que é possível utilizar diferentes disposições construtivas, tipos de perfil e aço estrutural. Além de vantagens arquitetônicas e econômicas, tem-se vantagens, comparado ao concreto armado, como: redução do prazo de entrega da obra, redução do peso próprio e volume da estrutura e possibilidade de dispensa de escoramento e fôrma. Comparando-se com a construção em aço, a estrutura mista destaca-se em: aumento da rigidez, da proteção contra incêndio e corrosão e redução do consumo de aço.

Dentre os vários tipos de estruturas mistas, destaca-se os pilares mistos. Estes são classificados em revestido, parcialmente revestido e preenchido. São mais utilizados e viáveis em grandes estruturas, como edifícios de múltiplos andares, hospitais, shopping centers, entre outros. Em edifícios de pequeno e médio porte, o perfil de aço atende às necessidades estruturais. Dentre os tipos de pilares mistos, destaca-se ainda os pilares mistos preenchidos, que tiveram seu emprego impulsionado devido a possibilidade de obter concretos com resistências cada vez mais altas. O comportamento frágil do concreto é minimizado em razão da restrição de expansão (MELO, 2018).

A missão da engenharia, no âmbito da construção civil, é aperfeiçoar cada vez mais os métodos construtivos e o uso eficaz dos materiais disponíveis, conciliando economia com otimização. O crescimento do uso de estrutura mista nos últimos anos é nítido, principalmente no Brasil, porém percebe-se que não são muitos os profissionais que dominam essa área e comparada às pesquisas sobre concreto armado, as pesquisas sobre estruturas mistas são poucas.

Partindo desse pressuposto e do desenvolvimento, cada vez mais verticalizado, das cidades, percebe-se a necessidade de estudos a respeito do comportamento estrutural de grandes estruturas, sobretudo de estruturas mistas, que correspondem a economia e eficiência nesta situação. Estas são complexas devido à diversos fatores, como a aderência e o comportamento conjunto dos materiais.

### 1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise de custo-benefício da utilização de pilares mistos circulares preenchidos submetidos à compressão axial, de modo a se adquirir uma relação ótima entre maior carga última e menor custo.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Validar o modelo numérico comparando-se os valores de carga última com os resultados atingidos experimentalmente por Oliveira (2008).
- Analisar a influência da espessura do perfil tubular metálico.
- Analisar a influência da resistência à compressão do concreto.
- Analisar a influência da tensão de escoamento do aço.
- Analisar a relação entre custo e carga última dos elementos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

As pesquisas listadas no desenvolvimento da revisão de literatura tratam sobre os pilares mistos preenchidos. Dividiu-se as mesmas em ordem cronológica, abordando e referenciando o desenvolvimento de cada uma, a fim de demonstrar a evolução dos estudos. Ressaltando-se que o objetivo do presente trabalho é analisar o comportamento do pilar misto como um elemento isolado e não analisar ligações com outros elementos estruturais.

### 2.1 Estudo De De Nardin (1999)

De Nardin (1999) desenvolveu um estudo teórico-experimental sobre os pilares mistos com concreto de alta resistência submetidos à compressão axial. Os elementos analisados são mostrados na tabela a seguir (Tabela 2.1), todos com altura de 120cm.

**Tabela 2.1 – Característica gerais dos elementos analisados por De Nardin (1999)**

Elemento	Seção	Tipo de aço	Espessura (mm)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )
R 1_1	150x150	---	---	225	---
CFT 1_1	150x150	SAE 1020	3,0	207,28	17,64
CFT 1_2	150x150	SAE 1020	6,3	188,45	36,21
CFT 2_1	127	USI-SAC 41	3,20	114,23	12,45
CFT 2_2	127	USI-SAC 41	4,85	108,06	18,61
CFT 3_1	100x200	SAE 1020	3,0	182,28	17,64
CFT 3_2	100x200	SAE 1020	6,3	163,45	36,22

**Fonte: De Nardin (1999)**

Os parâmetros analisados foram a espessura do perfil tubular e a forma da seção transversal. Foi utilizado o software Ansys para simulação computacional e utilizado os dados experimentais para validação do modelo numérico. A tabela abaixo (Tabela 2.2) apresenta a caracterização das propriedades gerais dos elementos analisados.

**Tabela 2.2 – Propriedades gerais dos elementos analisados por De Nardin (1999)**

Elemento	t (mm)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$f_c$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{t,D}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$E_s$ (MPa)
R 1_1	-	225	-	48,20	43,4	4,10	-	32260	-
CFT 1_1	3,0	207,28	17,64	48,20	43,4	4,10	357,5	32260	183890
CFT 1_2	6,3	188,45	36,21	53,43	48,1	2,67	262,1	32260	197350
CFT 2_1	3,2	114,23	12,45	53,04	47,7	2,97	355,0	32260	187500
CFT 2_2	4,85	108,06	18,61	65,93	59,3	4,46	329,1	32260	199000
CFT 3_1	3,0	182,28	17,64	50,95	45,8	3,65	251,2	32260	180600
CFT 3_2	6,3	163,45	36,22	57,34	51,6	3,46	247,1	32260	201510

**Fonte: De Nardin (1999)**

Os resultados obtidos indicaram comportamento elasto-plástico perfeito aos pilares circulares, enquanto aqueles de seções quadradas e retangulares apresentam variação de comportamento devido à espessura do perfil tubular. As deformações alcançadas demonstraram que o concreto e o aço trabalham junto até que se atinja a força última. Após ultrapassar a capacidade, o esmagamento do concreto e o início da flambagem local atuam auxiliando na separação dos materiais. Pôde-se concluir que a área de aço na seção é diretamente proporcional ao índice de ductilidade do elemento misto.

## 2.2 Estudo De Oliveira (2008)

Em sua pesquisa, Oliveira (2008) abordou estudo teórico-experimental a respeito de pilares mistos preenchidos de seção circular, avaliando a influência da resistência à compressão do concreto, esbeltez do pilar, espessura do tubo de aço e forma de introdução da carga aplicada. Realizou-se modelagem numérica através do software Diana e fez-se a comparação com os resultados experimentais. Os elementos analisados numericamente são mostrados abaixo (Tabela 2.3).

**Tabela 2.3 – Elementos analisados numericamente por Oliveira (2008)**

Modelo	L/D	t (mm)	Aplicação da força	$f_y$ (MPa)	$f_c$ (MPa)
P1-30-10D-E	10	3,35	Seção Mista	287,33	32,68
P1-60-10D-E	10	3,35	Seção Mista	287,33	58,68
P1-80-10D-E	10	3,35	Seção Mista	287,33	88,78
P1-100-10D-E	10	3,35	Seção Mista	287,33	105,45
P2-30-10D-E	10	6,00	Seção Mista	342,95	32,68
P2-60-10D-E	10	6,00	Seção Mista	342,95	58,68
P2-80-10D-E	10	6,00	Seção Mista	342,95	88,78
P2-100-10D-E	10	6,00	Seção Mista	342,95	105,45

Fonte: Oliveira (2008)

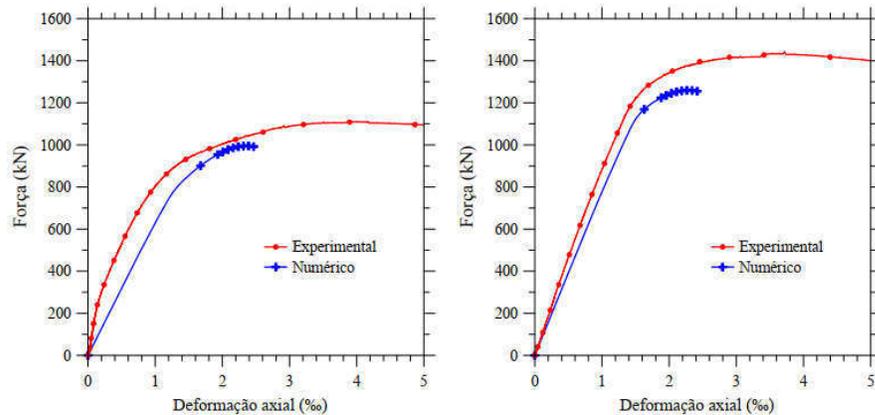
Para as forças de pico, obteve-se os resultados a seguir (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4 – Valores de força de pico obtidos por Oliveira (2008)**

Pilar	$F_{exp}$	$F_{num}$	$F_{exp}/F_{num}$
P1-30-10D-E	599,28	583,19	1,028
P1-60-10D-E	809,19	778,91	1,039
P1-80-10D-E	1111,60	995,53	1,117
P1-100-10D-E	1319,90	1113,59	1,185
P2-30-10D-E	872,22	895,42	0,974
P2-60-10D-E	1120,60	1070,95	1,046
P2-80-10D-E	1442,40	1259,30	1,145
P2-100-10D-E	1574,30	1361,16	1,157
<b>Média</b>			<b>1,086</b>
<b>Desvio padrão</b>			<b>0,075</b>

Fonte: Oliveira (2008)

Constatou-se através da análise experimental que o modo de falha depende, basicamente, da esbeltez global e local dos pilares. A modelagem numérica apresentou resultados 7,5% abaixo dos valores experimentais para força última (Figura 2.1).

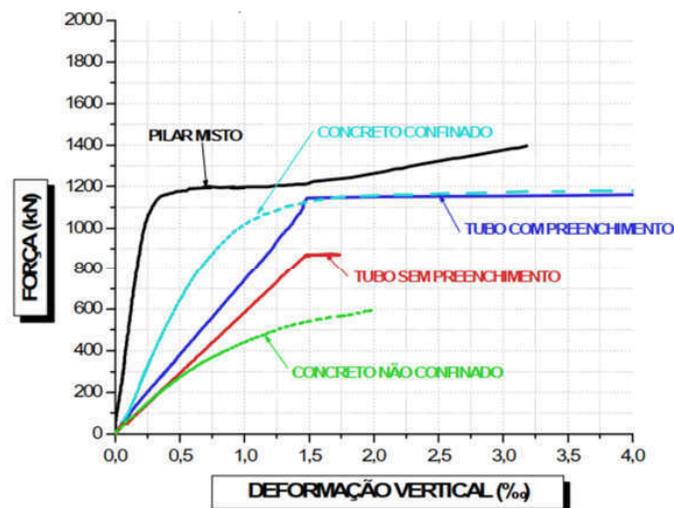


**Figura 2.1 – Diagramas Força x Deformação Axial experimental e numérico de pilares preenchidos com concreto C60 de Oliveira (2008)**

Fonte: Oliveira (2008)

### 2.3 Estudo De Simões (2008)

Simões (2008) abordou o efeito do confinamento em pilares mistos curtos de aço e concreto em seu estudo teórico-experimental, observando o acréscimo da capacidade resistente. Utilizou-se concreto com resistência de 25MPa e tubo de aço de seção circular. O gráfico abaixo ilustra os resultados (Figura 2.2).



**Figura 2.2 – Comparativo entre os gráficos de Força x Deformação dos elementos da série 3 analisados por Simões (2008)**

Fonte: Simões (2008)

Concluiu-se que a resistência do concreto foi maior em todos os casos quando confinado, sendo capaz de absorver esforços para deformações acima de 2%.

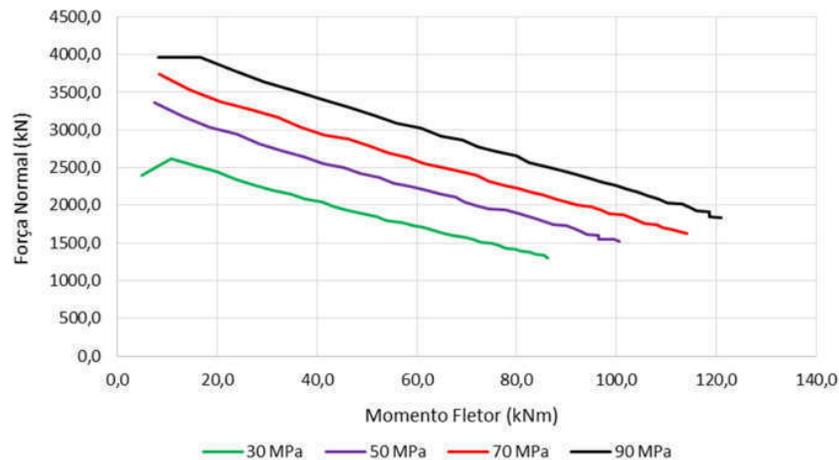
#### 2.4 Estudo De Silva (2012)

Silva (2012) apresentou em seu estudo o dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto, com o intuito de analisar o comportamento dos elementos variando-se as seções transversais. O comparativo entre os resultados obtidos através das normas e dos experimentos, sem introdução de segurança, para seções tubulares preenchidas, indicaram que maioria dos resultados advindos das normas estão a favor da segurança e próximos dos experimentais.

#### 2.5 Estudo De Gomes (2015)

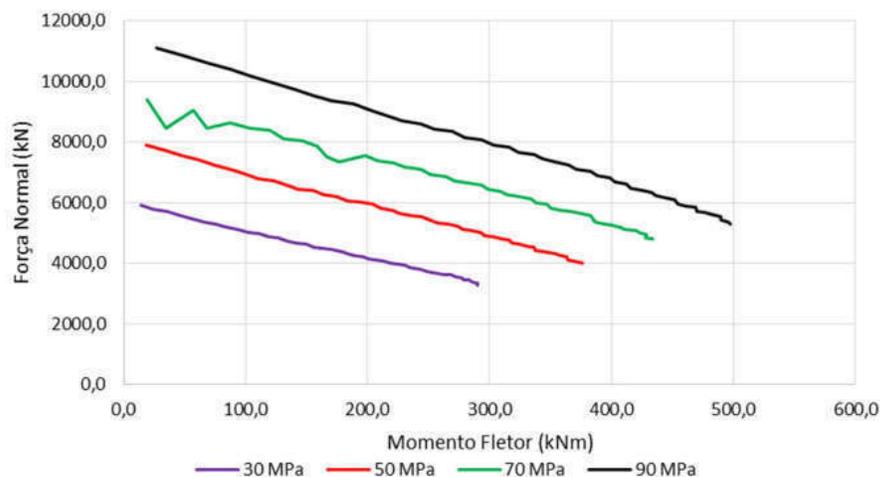
Gomes (2015) realizou pesquisa abordando a análise numérica de pilares mistos de aço e concreto tubulares circulares com concreto de alto desempenho, com o intuito de avaliar o comportamento estrutural da estrutura submetida à compressão simples ou à flexo-compressão, limitando-se a análise para pilares onde não ocorreria flambagem local e com altura mínima de 2m.

Observou-se que o aumento da resistência do concreto, do diâmetro ou da espessura do tubo de aço resultam em aumento da capacidade resistente na fase inelástica do elemento misto (Figura 2.3 e Figura 2.4).



**Figura 2.3 – Comparativo de diferentes resistências à compressão do concreto para  $D = 219,1\text{mm}$  e  $t = 8,8\text{mm}$  dos elementos de Gomes (2015)**

**Fonte: Gomes (2015)**



**Figura 2.4 – Comparativo de diferentes resistências à compressão do concreto para  $D = 355,6\text{mm}$  e  $t = 8,8\text{mm}$  dos elementos de Gomes (2015)**

**Fonte: Gomes (2015)**

Os resultados numéricos foram validados comparando-se com resultados experimentais de outras pesquisas e comprovaram a viabilidade do uso das formulações normativas para dimensionamento de pilares mistos utilizando concreto de alto desempenho submetidos à compressão simples. Para flexo-compressão, notou-se divergência entre as normas de referência.

## 2.6 Estudo De Hafiz (2016)

Hafiz (2016) realizou estudo analítico e numérico abordando o comportamento de colunas de aço cheias de concreto submetidas à compressão axial. Utilizou-se modelagem numérica e validou-se os resultados comparando-se com os experimentais, obtendo-se variação de mais ou menos 5% (Tabela 2.5).

**Tabela 2.5 – Comparação de resultados analíticos e numéricos de Hafiz (2016)**

Specimen label	Tested by	Test load (Mpa)	Eurocode-4		CECS 28:90		ABAQUS	
			Pu (Mpa)	% error	Pu (Mpa)	% error	Pu (Mpa)	% error
7a	Gardner	1966	1501	-23.65	1760	-10.48	1923	-2.19
7b		1970	1501	-23.80	1760	-10.66	1937	-2.38
8a	Cheng 1988	1984	1397	-29.58	1601	-19.30	1951	-1.66
1-3Y6		1647	1426	-13.42	1817	+9.35	1607	-2.40
2-3Y4		1033	856	-17.13	1054	+2.00	998	-3.39
3-3Y3		602	505	-16.11	619	+2.74	623	+3.37
4-3Y2		334	261	-21.85	312	-6.58	318	-4.79
5-3Y1.5	273	236	-13.55	273	0.00	284	+3.87	
S3LA	Sakino 1985	628	600	-4.46	617	-1.75	603	-3.98
S3HA		660	731	+9.71	843	+21.71	638	-3.33
S6LA		954	923	-3.24	886	-7.13	911	-4.51
S6HA		971	1039	+6.54	1120	+13.30	924	-4.84

**Fonte: Hafiz (2016)**

Concluiu-se que o efeito do confinamento aumenta com o aumento da tensão de escoamento do aço. Observou-se que a alteração do comprimento efetivo das colunas não afetou o desempenho estrutural.

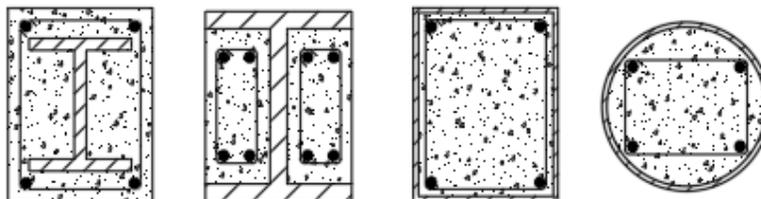
### 2.7 Estudo De Kurian, Paulose, Mohan (2016)

Kurian, Paulose e Mohan (2016) realizaram estudo a respeito de tubos de aço preenchidos com concreto sob carga axial, de seção circular e quadrada, com diferentes resistências para o concreto.

Concluiu-se que a deformação na seção circular é menor devido à um melhor confinamento em relação a seção quadrada. Com o incremento de resistência do concreto, a deformação reduz. O valor de tensão equivalente torna-se constante após atingir força máxima e a respeito da concentração de tensões, para seção circular ocorre de maneira uniforme, enquanto para seção quadrada concentra-se nas extremidades.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se os tipos de pilares mistos, sendo o tipo preenchido o escolhido para realização deste trabalho (Figura 3.1). As normas utilizadas para dimensionamento do elemento misto feito por Oliveira (2008) foram as seguintes: NBR8800:2008, Eurocode 4:2004, ANSI/AISC:2005 e CAN/CSA:2001. Utilizou-se o software Ansys 2020, versão educacional, para realização do presente trabalho.



**Figura 3.1 – Tipos de pilares com seções mistas de aço e concreto**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

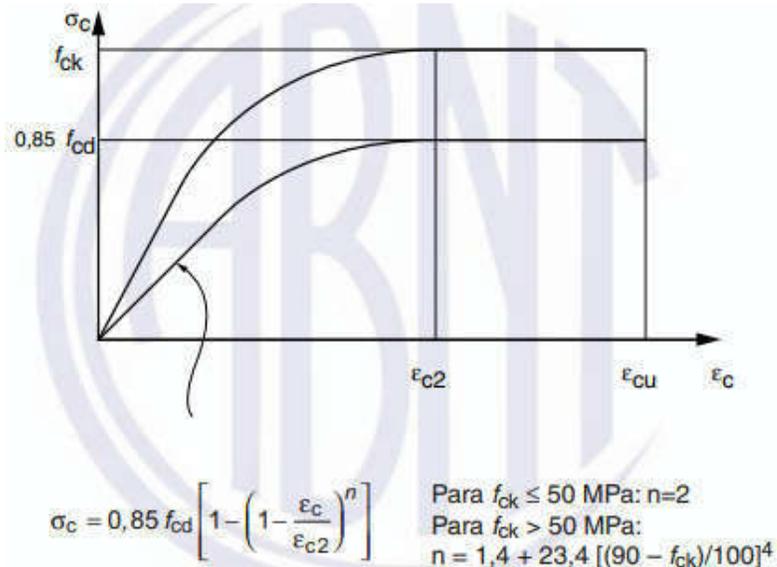
Na etapa de validação utilizou-se os dados experimentais obtidos por Oliveira (2008), para o pilar P1-30-10D-E e P1-60-10D-E. As propriedades do concreto informadas para a validação do modelo numérico são mostradas a seguir (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1– Dados informados para o concreto na etapa de validação**

Densidade	2.500 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	16.300; 23.300 MPa
Coefficiente de Poisson	0,2
Resistência à compressão	32,68; 58,68 MPa

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Para a curva tensão-deformação do concreto, utilizou-se a curva apresentada na NBR 6118:2014 (Figura 3.2). É possível observar duas curvas, uma utilizando-se o valor de  $f_{ck}$  e a outra utilizando-se valor de  $0,85 f_{cd}$ . Para o mesmo concreto, as deformações são as mesmas para ambas as curvas.



**Figura 3.2 – Diagrama tensão-deformação idealizado do concreto**

**Fonte: NBR 6118:2014**

Utilizou-se o valor da resistência à compressão no eixo y. No eixo x utilizou-se os valores de 0,002 e 0,0035 para o pilar P1-30-10D-E, conforme pede-se na NBR 6118:2014 para concreto de classe até C50, e os valores de 0,002267 e 0,002937 para o pilar P1-60-10D-E, conforme equação da NBR 6118:2014 para concreto de classe C55 até C90.

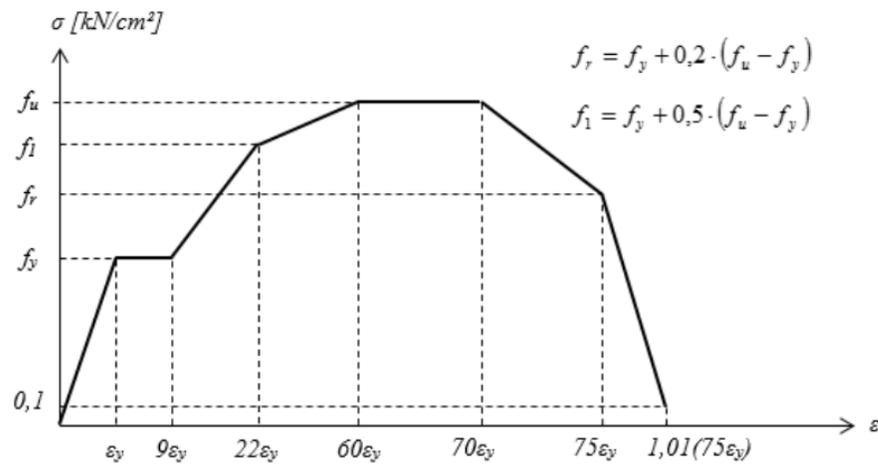
As propriedades informadas para o aço, na etapa de validação, são mostradas abaixo (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2 – Dados informados para o aço na etapa de validação**

Densidade	7.850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	205.000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,3
Tensão de escoamento	287,33; 342,95 MPa
Tensão de ruptura	324,6; 452,40 MPa

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Para o diagrama tensão-deformação do aço, utilizou-se como referência o diagrama de Tineo (2016), apresentado a seguir (Figura 3.3).



**Figura 3.3 – Diagrama tensão-deformação do aço adotado por Tineo (2016)**

**Fonte: Tineo (2016)**

O primeiro valor para o eixo x foi obtido através da relação entre a tensão de escoamento do aço e do módulo de Young, os demais foram obtidos pelo produto do valor inicial com os respectivos coeficientes. No eixo y utilizou-se as tensões de escoamento, ruptura e intermediárias (para montagem do gráfico). O software Ansys, versão estudantil de 2020, da forma como foi feita a modelagem numérica, dispõe apenas de modelos constitutivos *hardening* para análise plástica, ou seja, não se considera a estricção do material (parte descendente do gráfico após o pico).

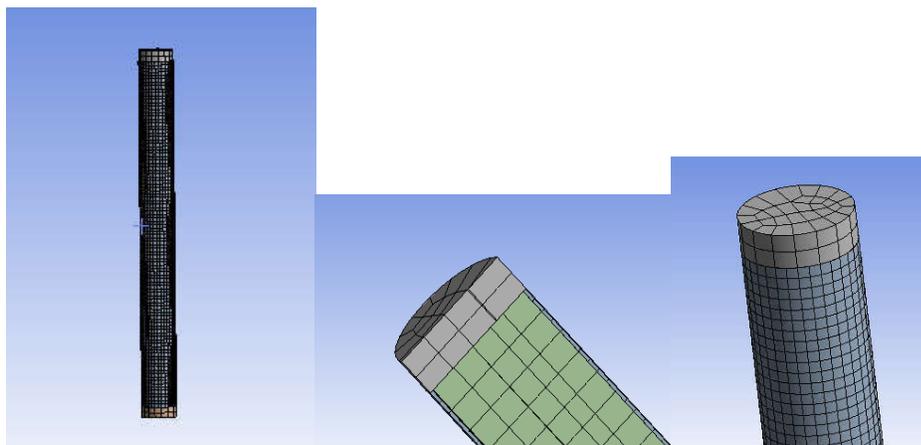
Após a inserção de dados, seguiu-se para a modelagem geométrica do elemento. Nessa etapa informou-se as dimensões da seção transversal e altura. A tabela abaixo (Tabela 3.3) apresenta as dimensões utilizadas.

**Tabela 3.3 – Dados da seção transversal e altura do elemento para validação**

Circular	D = 114,3 mm; t = 3,35mm; L = 1143mm
----------	--------------------------------------

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Para evitar concentração de tensão no ponto de aplicação da força e na base do pilar analisado, adotou-se um apoio rígido ( $E = 1000$  GPa) em cada extremidade, com altura de 35 mm cada. O coeficiente de flambagem “K” adotado foi de 0,8, sendo engastado na extremidade inferior e rotulado (deslocamento apenas no eixo axial) na extremidade superior. A geometria e a malha utilizadas no modelo numérico são apresentadas a seguir (Figura 3.4).



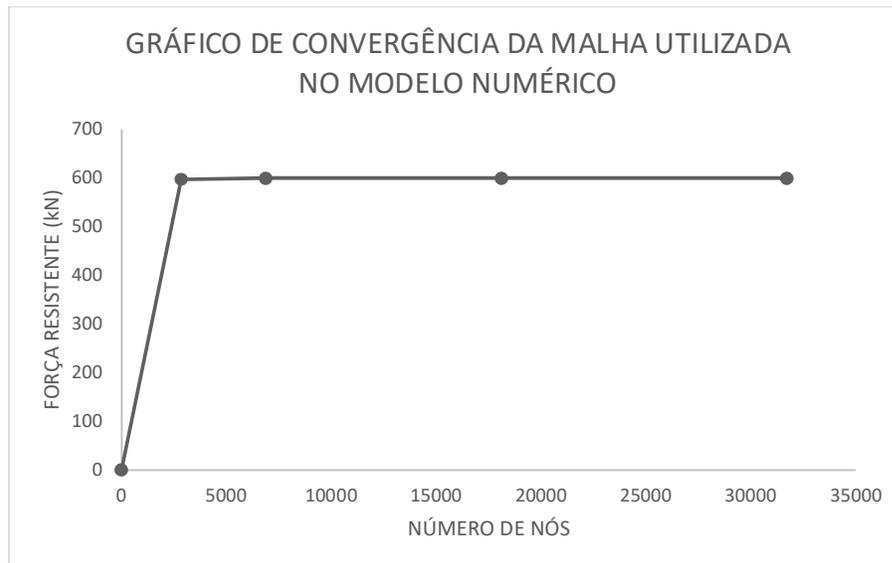
**Figura 3.4 – Geometria e malha do modelo numérico**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

O elemento finito utilizado para os apoios, concreto e aço foi o “SOLID186”. O elemento de contato utilizado foi o “CONTA174”. Ambos são padrões da versão do software utilizado. O tamanho dos elementos da malha utilizada foi de 5 cm, totalizando 6555 nós e 1234 elementos.

Assim como Oliveira (2008), adotou-se excentricidade acidental de 4mm para a simulação computacional, visando a melhor representatividade dos resultados. Configurou-se a análise para 5 etapas, com mínimo de 15 sub etapas e máximo de 40 sub etapas. O próprio software já cria os contatos com base na geometria desenhada, para a interface aço-concreto utilizou-se contato por atrito e coeficiente de 0,45, dentro do intervalo proposto por Leonhardt e Mönnig (1977). Para o modelo de validação, obteve-se resultado de força de pico de 599 kN para o pilar P1-30-10D-E, valor 0,047% menor e 817,50 kN para o pilar P1-60-10D-E, valor 1,03% maior, ambos comparados com os valores obtidos experimentalmente por Oliveira (2008). Os valores encontrados estão dentro do esperado, visto que o modelo constitutivo utilizado não foi o mesmo.

Ainda na etapa de validação, fez-se uma análise simples de convergência para a malha utilizada no modelo numérico para o pilar P1-30-10D-E, os resultados obtidos são mostrados a seguir (Figura 3.5). A versão estudantil limita-se a 32.000 elementos/nós para processamento.



**Figura 3.5 – Gráfico de convergência da malha utilizada no modelo numérico**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Após a validação do modelo, seguiu-se para as análises propostas no trabalho utilizando os dados apresentados abaixo (Tabela 3.4). As espessuras dos tubos foram atribuídas conforme catálogo da empresa Tubos Oliveira, da cidade de Guarulhos – São Paulo.

**Tabela 3.4 – Dados dos elementos a serem utilizados na análise**

Aço	E = 200.000 MPa
	$f_y = 287,33 / 342,95$ MPa
	$f_u = 324,6 / 452,4$ MPa
Concreto	E = 16.300 / 23.300 MPa
	$f_{ck} = 32,68 / 58,68$ MPa
Elemento misto	L = 1143 mm; D = 114,3 mm
	t = 2,65 / 3,00 / 3,75 / 4,25 mm

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Organizou-se os elementos analisados como mostrado na tabela abaixo (Tabela 3.5). Atribuiu-se um código para cada elemento (primeira coluna da esquerda para a direita) e cada elemento possui uma resistência à compressão para o concreto, uma tensão de escoamento para o aço e uma espessura para o perfil tubular metálico, totalizando 16 (dezesesseis) elementos.

**Tabela 3.5 – Ordenação dos elementos analisados**

<b>ELEMENTO</b>	<b>CONCRETO (MPa)</b>	<b>AÇO (MPa)</b>	<b>ESPESSURA (mm)</b>
C32-A287-T2,65	32,68	287,33	2,65
C32-A287-T3,00	32,68	287,33	3,00
C32-A287-T3,75	32,68	287,33	3,75
C32-A287-T4,25	32,68	287,33	4,25
C32-A343-T2,65	32,68	342,95	2,65
C32-A343-T3,00	32,68	342,95	3,00
C32-A343-T3,75	32,68	342,95	3,75
C32-A343-T4,25	32,68	342,95	4,25
C58-A287-T2,65	58,68	287,33	2,65
C58-A287-T3,00	58,68	287,33	3,00
C58-A287-T3,75	58,68	287,33	3,75
C58-A287-T4,25	58,68	287,33	4,25
C58-A343-T2,65	58,68	342,95	2,65
C58-A343-T3,00	58,68	342,95	3,00
C58-A343-T3,75	58,68	342,95	3,75
C58-A343-T4,25	58,68	342,95	4,25

**Fonte: Elaborada pelo autor**

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados obtidos para carga última dos elementos analisados são mostrados abaixo (Tabela 4.1). Organizou-se a tabela com o código de cada elemento e os respectivos valores para cada parâmetro analisado e por fim (última coluna da esquerda para a direita) a carga última.

Tabela 4.1 – Carga última dos elementos analisados

ELEMENTO	CONCRETO (MPa)	AÇO (MPa)	ESPESSURA (mm)	CARGA ÚLTIMA (kN)
C32-A287-T2,65	32,68	287,33	2,65	508,2
C32-A287-T3,00	32,68	287,33	3	552,6
C32-A287-T3,75	32,68	287,33	3,75	612,6
C32-A287-T4,25	32,68	287,33	4,25	662,2
C32-A343-T2,65	32,68	342,95	2,65	597,9
C32-A343-T3,00	32,68	342,95	3	661,6
C32-A343-T3,75	32,68	342,95	3,75	749,9
C32-A343-T4,25	32,68	342,95	4,25	817,5
C58-A287-T2,65	58,68	287,33	2,65	732,3
C58-A287-T3,00	58,68	287,33	3	774
C58-A287-T3,75	58,68	287,33	3,75	830,5
C58-A287-T4,25	58,68	287,33	4,25	874,3
C58-A343-T2,65	58,68	342,95	2,65	826,1
C58-A343-T3,00	58,68	342,95	3	887,2
C58-A343-T3,75	58,68	342,95	3,75	970,5
C58-A343-T4,25	58,68	342,95	4,25	1036,1

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Tabela 4.1, para melhor análise dos resultados, fez-se 4 (quatro) gráficos. No primeiro gráfico (Figura 4.1), fixou-se o concreto em 32,68 MPa e variou-se a tensão de escoamento do aço, obtendo-se a curva C32-A287 e a curva C32-A343.

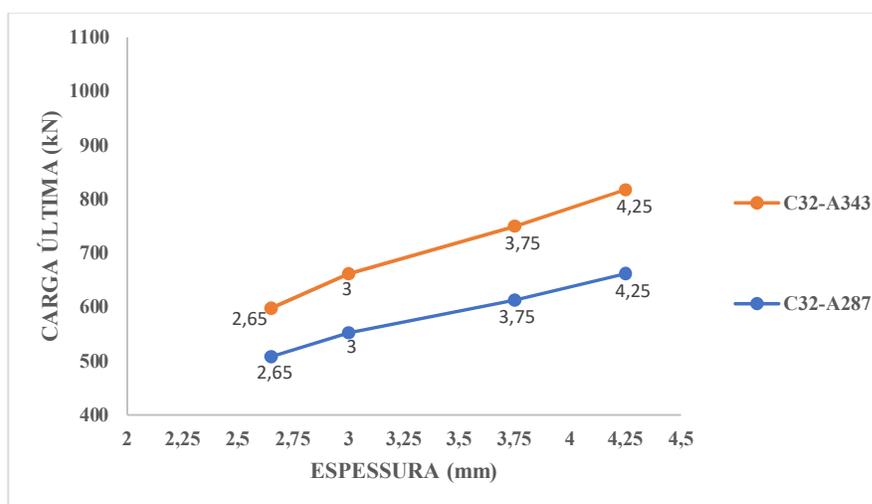
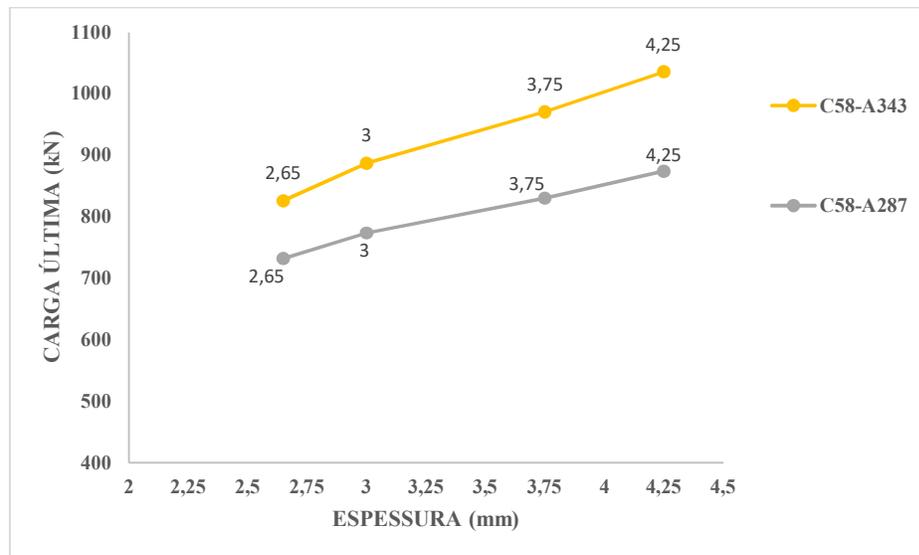


Figura 4.1 – Curvas C32-A287 e C32-A343

Fonte: Elaborada pelo autor

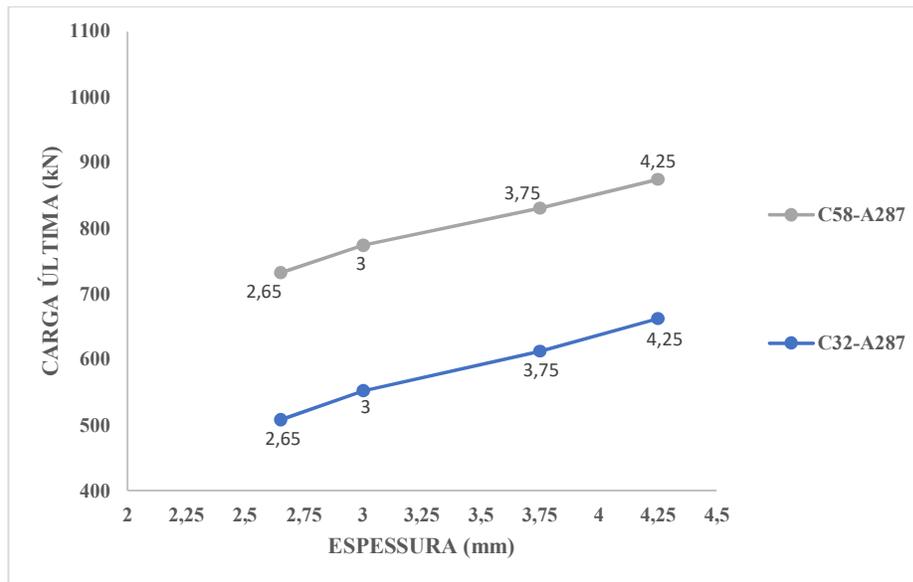
Analisando-se a Figura 4.1, obteve-se um acréscimo médio de 21% na carga última dos elementos analisados. No segundo gráfico (Figura 4.2), fixou-se o concreto em 58,68 MPa e variou-se a tensão de escoamento do aço, obtendo-se as curvas C58-A287 e C58-A343.



**Figura 4.2 – Curvas C58-A287 e C58-A343**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

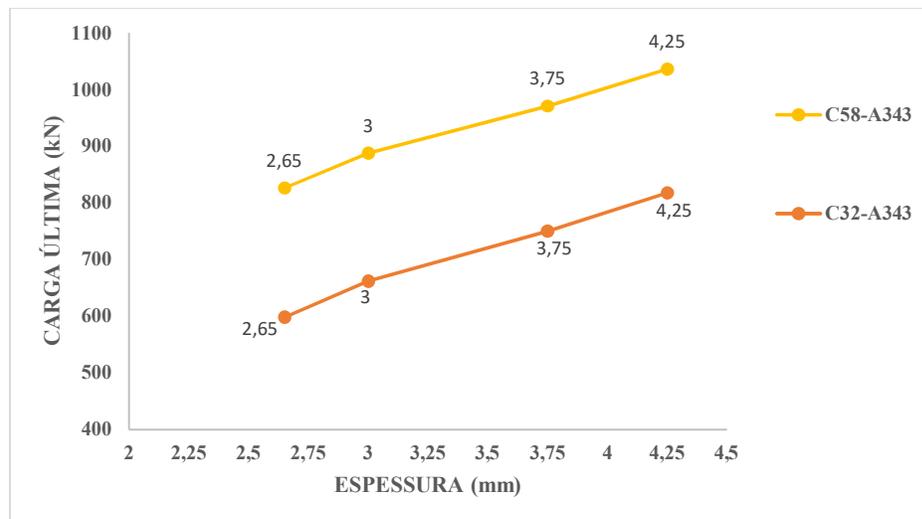
Para a Figura 4.2, obteve-se um acréscimo médio de 16% na carga última dos elementos analisados. Na figura abaixo (Figura 4.3), fixou-se o aço em 287,33 MPa e variou-se a resistência à compressão do concreto, obtendo-se as curvas C32-A287 e C58-A287.



**Figura 4.3 – Curvas C32-A287 e C58-A287**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

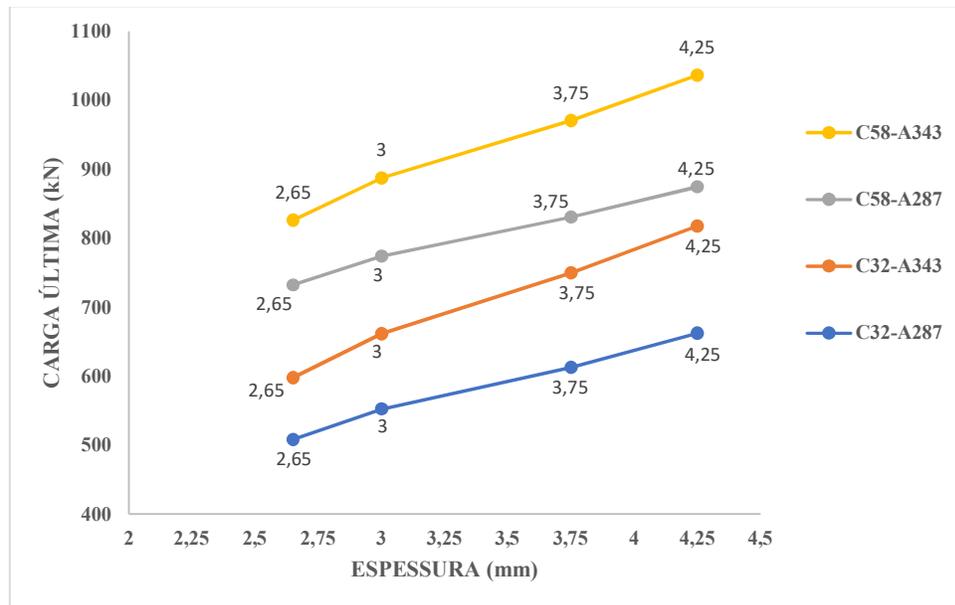
Para a Figura 4.3, obteve-se um acréscimo médio de 38% na carga última dos corpos de prova. Por fim, na Figura 4.4, fixou-se o aço em 342,95 MPa e variou-se a resistência à compressão do concreto, obtendo-se as curvas C32-A343 e C58-A343.



**Figura 4.4 – Curvas C32-A343 e C58-A343**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Para a Figura 4.4, obteve-se um acréscimo médio de 32% na carga última dos corpos de prova. Além de fazer cada gráfico separado, fez-se um gráfico abrangendo toda a análise (Figura 4.5), para avaliar outras questões, contendo as curvas C32-A287, C32-A343, C58-A287 e C58-A343.



**Figura 4.5 – Resultados obtidos numericamente para carga última**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

Na Figura 4.5, é possível observar que as curvas C32-A343 e C58-A287 tendem a ficarem próximas, o que pode ser explicado pela alternância da variação dos parâmetros, isto é, utilizar o aço mais resistente e o concreto menos resistente em um elemento e utilizar o concreto mais resistente e o aço menos resistente no outro elemento. Um material pode compensar o outro na resistência, gerando essa aproximação das curvas.

Foi feita uma análise de custo dos elementos analisados, as tabelas abaixo apresentam os dados (Tabela 4.2 e Tabela 4.3). Os valores para o aço e para o concreto (exceto o C60) foram pesquisados na tabela desonerada de custo referencial de materiais da Goinfra (Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes), com data base 01/11/2020. Para o concreto, utilizou-se R\$314,41/m<sup>3</sup> para o concreto C30 (código 2667 da tabela, corresponde ao concreto com resistência à compressão de 32,68 MPa do trabalho) e R\$390,00/m<sup>3</sup> para o concreto C60 (valor consultado na empresa Concrecon, da cidade de Goiânia, estado de Goiás, visto que na tabela

referência não foi encontrado concreto com essa resistência). Para o aço, utilizou-se R\$12,20/kg para o aço ASTM A36 (código 1326 da tabela, corresponde ao aço de tensão de escoamento 287 MPa do trabalho) e R\$12,84/kg para o aço SAC-300 (código 2495 da tabela, corresponde ao aço de tensão de escoamento 343 MPa do trabalho). A Tabela 4.2 apresenta o código de cada elemento analisado, a massa em kg do aço, o volume do concreto em m<sup>3</sup>, o valor do aço em reais e o valor do concreto em reais.

**Tabela 4.2 – Cálculo do peso do aço, volume do concreto e seus respectivos valores em reais**

<b>ELEMENTO</b>	<b>MASSA AÇO (kg)</b>	<b>VOLUME CONCRETO (m<sup>3</sup>)</b>	<b>VALOR AÇO (R\$)</b>	<b>VALOR CONCRETO (R\$)</b>
C32-A287-T2,65	8,3401	0,0107	R\$ 101,75	R\$ 3,35
C32-A287-T3,00	9,4120	0,0105	R\$ 114,83	R\$ 3,31
C32-A287-T3,75	11,6857	0,0102	R\$ 142,57	R\$ 3,22
C32-A287-T4,25	13,1839	0,0100	R\$ 160,84	R\$ 3,16
C32-A343-T2,65	8,3401	0,0107	R\$ 107,09	R\$ 3,35
C32-A343-T3,00	9,4120	0,0105	R\$ 120,85	R\$ 3,31
C32-A343-T3,75	11,6857	0,0102	R\$ 150,04	R\$ 3,22
C32-A343-T4,25	13,1839	0,0100	R\$ 169,28	R\$ 3,16
C58-A287-T2,65	8,3401	0,0107	R\$ 101,75	R\$ 4,16
C58-A287-T3,00	9,4120	0,0105	R\$ 114,83	R\$ 4,11
C58-A287-T3,75	11,6857	0,0102	R\$ 142,57	R\$ 3,99
C58-A287-T4,25	13,1839	0,0100	R\$ 160,84	R\$ 3,92
C58-A343-T2,65	8,3401	0,0107	R\$ 107,09	R\$ 4,16
C58-A343-T3,00	9,4120	0,0105	R\$ 120,85	R\$ 4,11
C58-A343-T3,75	11,6857	0,0102	R\$ 150,04	R\$ 3,99
C58-A343-T4,25	13,1839	0,0100	R\$ 169,28	R\$ 3,92

**Fonte: Elaborada pelo autor**

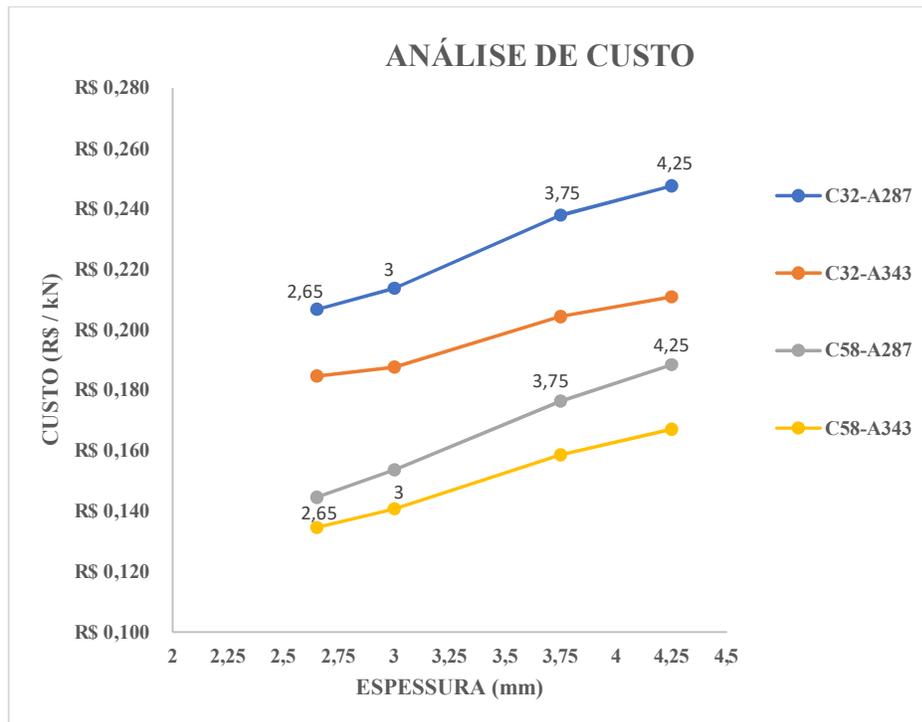
A Tabela 4.3 foi organizada com o código de cada elemento, valor total, carga última e o custo (R\$/kN). Dividiu-se o valor total de cada elemento por sua respectiva carga última a fim de obter a relação entre o custo por unidade de resistência mecânica do elemento.

Tabela 4.3 – Cálculo do custo por carga última

ELEMENTO	VALOR TOTAL (R\$)	CARGA ÚLTIMA (kN)	CUSTO (R\$/kN)
C32-A287-T2,65	R\$ 105,10	508,2	R\$ 0,207
C32-A287-T3,00	R\$ 118,14	552,6	R\$ 0,214
C32-A287-T3,75	R\$ 145,79	612,6	R\$ 0,238
C32-A287-T4,25	R\$ 164,00	662,2	R\$ 0,248
C32-A343-T2,65	R\$ 110,44	597,9	R\$ 0,185
C32-A343-T3,00	R\$ 124,16	661,6	R\$ 0,188
C32-A343-T3,75	R\$ 153,26	749,9	R\$ 0,204
C32-A343-T4,25	R\$ 172,44	817,5	R\$ 0,211
C58-A287-T2,65	R\$ 105,91	732,3	R\$ 0,145
C58-A287-T3,00	R\$ 118,93	774	R\$ 0,154
C58-A287-T3,75	R\$ 146,56	830,5	R\$ 0,176
C58-A287-T4,25	R\$ 164,76	874,3	R\$ 0,188
C58-A343-T2,65	R\$ 111,25	826,1	R\$ 0,135
C58-A343-T3,00	R\$ 124,96	887,2	R\$ 0,141
C58-A343-T3,75	R\$ 154,04	970,5	R\$ 0,159
C58-A343-T4,25	R\$ 173,20	1036,1	R\$ 0,167

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que o corpo de prova com o melhor custo-benefício foi o C58-A343-T2,65, com um valor de R\$0,135/kN. Utilizando-se a Tabela 4.3, fez-se o gráfico apresentado abaixo (Figura 4.6), obtendo-se as curvas C32-A287, C32-A343, C58-A287 e C58-A343.



**Figura 4.6 – Análise de custo por carga última**

**Fonte: Elaborada pelo autor**

As curvas, em ordem crescente, representam do mais econômico para o menos econômico, sendo as curvas C58-A287 e C58-A343 as mais econômicas, comprovando-se que o concreto é quem resiste às cargas de compressão aplicadas, pois utilizando-se concreto mais resistente, a carga última do elemento aumenta significativamente (comparando-se com o aço), resultando em uma relação de custo (R\$/kN) menor, isto é, mais econômica.

## 5 CONCLUSÕES

Através das análises, percebe-se que a variação da resistência do concreto é mais influente do que a variação da resistência do aço, pois utilizando-se um concreto mais resistente obteve-se um acréscimo médio de 35% na carga última, sendo que para o aço o acréscimo foi de 18% na carga última. A combinação da variação de parâmetros, alternando em concreto mais resistente e aço menos resistente em um elemento e concreto menos resistente e aço mais resistente em outro elemento, pode resultar em curvas que tendem a se aproximar para a carga última.

Os elementos C58-A343-T2,65, C58-A343-T3,00, C58-A287-T2,65 e C58-A287-T3,00 foram os mais econômicos e os elementos C32-A287-T3,75 e C32-A287-T4,25 foram os menos econômicos. Observa-se que para os mais econômicos, o aço tem as menores espessuras (consequentemente as menores áreas da seção transversal) e o concreto é o mais resistente dentre os analisados, pois é o material que tem como característica resistir aos esforços de compressão. O aço não exerce seu papel essencial na estrutura, que é de resistir aos esforços de tração, resultando em área mínima do material, isto é, aumentar a área do aço não resulta em um acréscimo significativo de força última, mas altera significativamente o preço total do elemento, visto que é o material mais caro.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- 1) Utilização de outra versão do Ansys ou outro software de simulação computacional;
- 2) Análise com outras espessuras e tensões de escoamento para o aço e outras resistências à compressão para o concreto;
- 3) Comparação dos resultados obtidos numericamente com os resultados obtidos através das normas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA GOIANA DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - GOINFRA. **Custo Referencial de Materiais: Tabela 142 – Custos de Obras Civis – Novembro/2020 – Desonerada**. Goiás, 2020.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC-LRFD**: Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. Chicago, 1999.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-05**: Specification for structural steel buildings, Chicago, 2005.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-16**: Specification for structural steel buildings, Chicago, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 289p., Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 237p., Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 238p., Rio de Janeiro, 2014.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CAN/CSA S16-01**: Limit states design of steel structures, Canada, 2001.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico-experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1**: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings, 118p., Bruxelas, 2004.

GOMES, H. D. **Análise numérica de pilares mistos de aço e concreto tubulares circulares com concreto de alto desempenho**. 2015. 158p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

HAFIZ, F. Analytical and Numerical Study on Behavior of Concrete Filled Steel Tabular Columns Subjected To Axial Compression Loads. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 7, n. 9, 2016.

KURIAN, S. S.; PAULOSE, D.; MOHAN, S. Study On Concrete Filled Steel Tube, **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 3, ed. especial (ICETEM), p. 25-33, 2016.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. v.1. Rio de Janeiro, Interciência, 1977.

OLIVEIRA, W.L.A. **Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular**. 2008. 251p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MELO, R.A. **Análise numérica de pilares mistos de seção quadrada preenchidos com concreto e submetidos à flexo-compressão**. 2018. 107p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

MELO, R.A.; SOUZA, A. S. C.; DE NARDIN, S. Capacidade resistente de pilares mistos preenchidos sob flexo-compressão. **Revista da Estrutura de Aço (REA)**, v. 8, n. 2, p. 274-293, 2018.

QUEIROZ, F. D. **Modelos para análise de pilares mistos pelo método dos elementos finitos**. 2003. 189p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

SILVA, P. H. L. **Dimensionamento de pilares mistos de aço e concreto**. 2012. 314p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SILVA, R. D. **Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos**. 2006. 137p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SIMÕES, R. **Efeito do confinamento em pilares mistos curtos de aço e concreto**. 2008. 161p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

TINEO, R. P. **Ligação mista viga-pilar preenchido com chapa passante: modelagem numérica e análise paramétrica**. 2016. 154p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

TUBOS OLIVEIRA. **Catálogo de produtos**. Guarulhos, 13p. Disponível em: <<https://www.tubosoliveira.com.br/wp-content/uploads/2020/06/catalogo.pdf>>. Acesso em: 19 de março de 2021.

## APÊNDICES

### Apêndice A

A seguir são apresentados, em tabelas (Tabela A.1, Tabela A.2, Tabela A.3 e Tabela A.4), os aspectos normativos utilizados no presente trabalho, destacando-se os principais conceitos relacionados à estrutura mista e, em seguida, o método de dimensionamento utilizado por cada uma das normas, com ênfase na norma brasileira NBR 8800:2008. Observando-se que será utilizada a simbologia presente em cada norma, podendo variar a simbologia de uma para a outra, mas com mesmo efeito no dimensionamento.

**Tabela A.1 – Limites de aplicabilidade com base na resistência dos materiais**

NORMA	CONCRETO (MPa)	AÇO (MPa)
EUROCODE 4:2004	$20 \leq f_{ck} \leq 60$	$f_y \leq 460$
NBR 8800:2008	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	$f_y \leq 450$
ANSI/AISC 360:2016	$21 \leq f_{ck} \leq 69$	$f_y \leq 525$

**Fonte: Elaborada pelo autor**

**Tabela A.2 – Cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto ( $E_{ci}$ )**

NORMA	RECOMENDAÇÃO	OBSERVAÇÕES
EUROCODE 4:2004	$E_{cm} = 22000 * \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}$	Unidades em MPa
NBR 8800:2008	$E_{cs} = 4760\sqrt{f_{ck}}$	Unidades em MPa
ANSI/AISC 360:2016	$E_c = 0,043w_c^{1,5}\sqrt{f_{ck}}$	$w_c$ em $\text{kg/m}^3$ e $E_c$ e $f_{ck}$ em MPa; $1500 \leq w_c \leq 2500$

**Fonte: Elaborada pelo autor**

**Tabela A.3 – Cálculo da espessura mínima “t” do tubo de aço para evitar a instabilidade local**

<b>NORMA</b>	<b>RECOMENDAÇÃO</b>
EUROCODE 4:2004	$t \geq \frac{h}{52 \sqrt{\frac{E}{f_y}}}$ (seção retangular)
	$t \geq \frac{D^* f_y}{90E}$ (seção circular)
NBR 8800:2008	$t \geq \frac{b_i}{2,26 \sqrt{\frac{E}{f_y}}}$ (seção retangular)
	$t \geq \frac{D^* f_y}{0,15E}$ (seção circular)
ANSI/AISC 360:2016	$t \geq \frac{b_i}{2,26 \sqrt{\frac{E}{f_y}}}$ (seção retangular)
	$t \geq \frac{D^* f_y}{0,15E}$ (seção circular)

**Fonte: Elaborada pelo autor**

**Tabela A.4 – Limites de esbeltez global**

<b>NORMA</b>	<b>RECOMENDAÇÃO</b>
EUROCODE 4:2004	$\lambda \leq 2$
NBR 8800:2008	$\lambda_0 \leq 2$
ANSI/AISC 360:2016	$\frac{L_c}{r} < 200; r = \sqrt{\frac{I}{A}}$

**Fonte: Elaborada pelo autor**

O Eurocode 4 rege o projeto de estruturas compostas de aço e concreto. Determina-se que a força axial de compressão resistente à plastificação é dada por (Equação A.1 e Equação A.2):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_a f_{yk}}{\gamma_a} + \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} + \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} \text{ (seção tubular retangular)} \quad \text{(Equação A.1)}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{\eta_a A_a f_{yk}}{\gamma_a} + \frac{A_c f_{ck}}{\gamma_c} \left(1 + \eta_c \frac{t f_{yk}}{d f_{ck}}\right) + \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_s} \text{ (seção tubular circular)} \quad \text{(Equação A.2)}$$

Onde:

- $N_{pl,Rd}$  é a força axial de compressão resistente à plastificação, em N;
- $A_a$  é a área do perfil tubular de aço, em m<sup>2</sup>;
- $f_{yk}$  é a resistência característica ao escoamento do aço, em MPa;
- $\gamma_a$  é o coeficiente de segurança para a resistência do aço, igual a 1,10;

- $A_c$  é a área de concreto, em  $m^2$ ;
- $f_{ck}$  é a resistência característica do concreto, em MPa;
- $\gamma_c$  é o coeficiente de segurança para a resistência do concreto, igual a 1,50;
- $A_s$  é a área de aço da armadura do concreto, em  $m^2$ ;
- $f_{sk}$  é a resistência característica ao escoamento do aço da armadura, em MPa;
- $\gamma_s$  é o coeficiente de segurança para a resistência do aço da armadura, igual a 1,15;
- $t$  é a espessura do tubo de aço, em m;
- $d$  é o diâmetro externo do tubo de aço, em m;

Para elementos com excentricidade “e” igual a 0, temos  $\eta_a = \eta_{a0}$  e  $\eta_c = \eta_{c0}$ , dados por (Equação A.3 e Equação A.4):

$$\eta_{a0} = 0,25(3 + 2\lambda) \leq 1 \quad (\text{Equação A.3})$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\lambda + 17\lambda^2 \geq 0 \quad (\text{Equação A.4})$$

Onde:

- $\lambda$  é a esbeltez relativa, dada por (Equação A.5):

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pL,Rk}}{N_{cr}}} \quad (\text{Equação A.5})$$

Sendo que  $N_{pL,Rk}$  é a força axial de compressão resistente à plastificação sem utilizar os coeficientes de segurança nos cálculos (em N) e  $N_{cr}$  é a força axial de flambagem elástica (em N). O valor de  $N_{cr}$  é determinado como apresentado na norma brasileira (Equação A.16).

Para elementos sujeitos à compressão e momento fletor, com excentricidade menor ou igual a 10% do diâmetro externo do tubo, obtém-se os valores de  $\eta_a$  e  $\eta_c$  da seguinte forma (Equação A.6 e Equação A.7):

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \left( \frac{10e}{d} \right) \quad (\text{Equação A.6})$$

$$\eta_c = \eta_{c0} + \left( 1 - \frac{10e}{d} \right) \quad (\text{Equação A.7})$$

Onde:

- $e$  é a excentricidade da carga aplicada, em m.

Para excentricidade maior que 10% do diâmetro, considera-se  $\eta_a = 1$  e  $\eta_c = 0$ . A fórmula para seção circular diferencia-se da retangular por considerar um aumento na resistência em função do confinamento do concreto. O efeito de confinamento é considerado quando a esbeltez relativa  $\lambda$  é menor que 0,5 e a excentricidade da carga aplicada não excede 10% do diâmetro externo do tubo de aço.

A força axial resistente é determinada de acordo com a equação abaixo (Equação A.8):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi * N_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (\text{Equação A.8})$$

Onde:

- $N_{Ed}$  é a força axial de compressão resistente, em N;
- $N_{pl,Rd}$  é a força axial de compressão resistente à plastificação total, em N (Equação A.1 ou Equação A.2);
- $\chi$  é o fator de redução, em função da esbeltez relativa  $\lambda$  conforme apresentado na NBR 8800:2008.

A NBR 8800 rege o projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. A norma fornece o método simplificado de dimensionamento para os pilares mistos preenchidos com concreto, submetidos à compressão axial ou à flexo-compressão, sendo que:

- I. O concreto deve possuir densidade normal;
- II. Para pilares preenchidos com concreto, o perfil de aço tubular deve ser retangular ou circular.

O método simplificado consiste nas seguintes hipóteses:

- I. Interação completa entre aço e concreto;
- II. A flambagem local para força axial e momento fletor não pode ser um estado-limite último predominante.

Possui os seguintes limites de aplicabilidade:

- I. Os pilares devem ter dupla simetria;
- II. O fator de contribuição do aço  $\delta$  (Equação A.9) deve ser maior que 0,2 (abaixo do valor dimensiona-se o pilar como um pilar de concreto) e menor que 0,9 (acima do valor dimensiona-se o pilar como um pilar de aço):

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (\text{Equação A.9})$$

Onde:

- $\delta$  é o fator de contribuição do aço;
- $A_a$  é a área de aço em m<sup>2</sup>;
- $f_{yd}$  é a tensão de escoamento do aço, igual a  $f_{yk}/1,10$ , em MPa;
- $N_{pl,Rd}$  é a força axial de compressão resistente à plastificação total (Equação A.10), em N, sendo que:

$$N_{pl,Rd} = N_{pl,a,Rd} + N_{pl,c,Rd} + N_{pl,s,Rd} \quad (\text{Equação A.10})$$

Onde:

- $N_{pl,a,Rd}$  é a capacidade resistente do perfil de aço, igual a  $f_{yd} * A_a$ , em N;
- $N_{pl,c,Rd}$  é a capacidade resistente do concreto, igual a  $f_{cd1} * A_c$ , em N, sendo que  $f_{cd1} = \alpha * f_{cd}$ ,  $\alpha = 0,95$  para seções tubulares circulares preenchidas com concreto e  $\alpha = 0.85$  para outras seções;
- $N_{pl,s,Rd}$  é a capacidade resistente da armadura longitudinal, igual a  $f_{sd} * A_s$ , em N.

- III. A esbeltez relativa  $\lambda_{rel}$  não deve ser superior a 2;
- IV. Para seção retangular, a relação entre a largura e a altura deve estar entre 0,2 e 5;
- V. Seções preenchidas com concreto podem ser fabricadas sem a utilização de armadura, exceto em algumas situações de incêndio;
- VI. As resistências dos materiais devem ser atingidas sem que ocorra flambagem local dos elementos componentes do perfil de aço da seção transversal, obedecendo as relações (Equação A.11 e Equação A.12):

$$\frac{b_i}{t} \leq 2,26 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \text{ (seção tubular retangular)} \quad \text{(Equação A.11)}$$

$$\frac{D}{t} \leq 0,15 \frac{E}{f_y} \text{ (seção tubular circular)} \quad \text{(Equação A.12)}$$

Onde:

- $b_i$  é a altura do perfil de aço em m;
- $t$  é a espessura do perfil tubular em m;
- $D$  é o diâmetro externo do tubo em m;
- $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal, em MPa;
- $f_y$  é a tensão de escoamento do aço, em MPa.

Utiliza-se coeficientes de segurança  $\gamma$  com o intuito de minorar as resistências dos materiais, para o aço  $\gamma_a = 1,10$ , para o concreto  $\gamma_c = 1,40$  e para a armadura  $\gamma_s = 1,15$ .

Sempre que as tensões na interface aço-concreto excederem a tensão de cisalhamento resistente  $\tau_{Rd}$  (Tabela A.5), deve-se usar conectores nos trechos entre regiões de introdução de cargas para garantir o fluxo de cisalhamento longitudinal. Em seções preenchidas não é necessária a utilização de conectores quando a relação entre a força axial de compressão solicitante e a força axial de compressão resistente da seção transversal à plastificação total for superior a 0,3.

Tabela A.5 – Tensão de cisalhamento resistente de cálculo

SEÇÃO TRANSVERSAL DO PILAR	$\tau_{Rd}$ (MPa)
TOTALMENTE REVESTIDA	0,30
TUBULAR CIRCULAR PREENCHIDA	0,55
TUBULAR RETANGULAR PREENCHIDA	0,40
MESA PARCIALMENTE REVESTIDA	0,20
ALMA PARCIALMENTE REVESTIDA	0

Fonte: Elaborada pelo autor

A força axial resistente de pilares mistos é determinada de acordo com a equação abaixo (Equação A.13):

$$N_{Rd} = \chi * N_{pl,Rd} \quad (\text{Equação A.13})$$

Onde:

- $N_{Rd}$  é a força axial de compressão resistente, em N;
- $N_{pl,Rd}$  é a força axial de compressão resistente à plastificação total, em N (Equação A.10);
- $\chi$  é o fator de redução, em função do índice de esbeltez reduzido  $\lambda_{0,m}$  conforme apresentado abaixo (Figura A.1). Para seções transversais tubulares, com instabilidade em relação a qualquer eixo, sem costura utiliza-se a curva “a”, com costura utiliza-se a curva “c”.

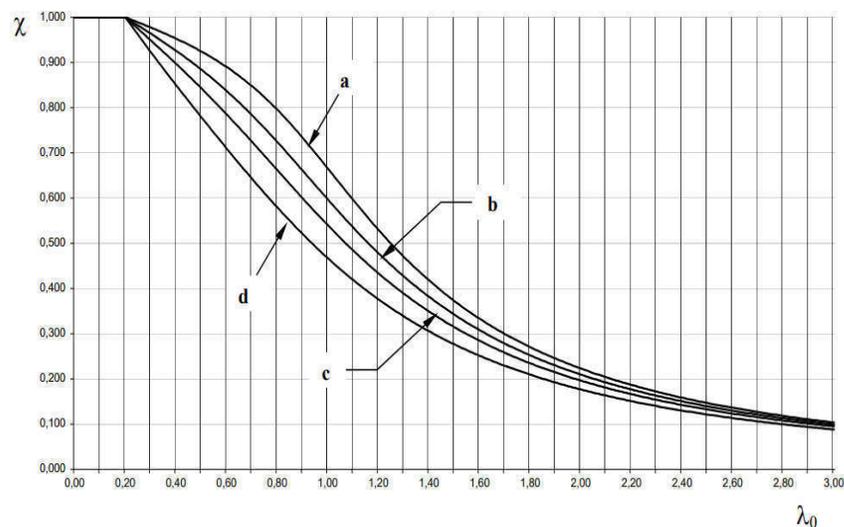


Figura A.1 – Curvas de dimensionamento à compressão

Fonte: NBR 8800 (2008)

O índice de esbeltez reduzido  $\lambda_{0,m}$  é igual a (Equação A.14):

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (\text{Equação A.14})$$

Onde:

-  $N_{pl,R}$  é o valor de  $N_{pl,Rd}$ , em N, sem a utilização dos coeficientes de segurança para a resistência dos materiais (Equação A.15):

$$N_{pl,R} = f_{yk} * A_a + \alpha * f_{ck} * A_c + f_{sk} * A_s \quad (\text{Equação A.15})$$

-  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica, dada por (Equação A.16):

$$N_e = \frac{\pi^2 * (EI)_e}{(KL)^2} \quad (\text{Equação A.16})$$

Onde:

-  $KL$  é o comprimento de flambagem do pilar, em m;

-  $(EI)_e$  é a rigidez efetiva à flexão da seção transversal, dada por (Equação A.17):

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,6 E_c I_c + E_s I_s \quad (\text{Equação A.17})$$

Onde:

-  $E_a$  é o módulo de elasticidade do aço estrutural, em MPa;

-  $I_a$  é a inércia do perfil de aço, em  $m^4$

-  $E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto, em MPa (para seções de outro tipo, que não sejam tubulares preenchidas, adota-se módulo reduzido, conferir equação para outros casos na norma);

-  $I_c$  é a inércia da seção de concreto, em  $m^4$ ;

-  $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço da armadura, em MPa;

-  $I_s$  é a inércia da seção de armadura do concreto, em  $m^4$ .

A ANSI/AISC 360-16 é responsável pela especificação para edifícios de aço estrutural.

A resistência à compressão, para seção compacta, é dada por (Equação A.18):

$$P_{no} = P_p \quad (\text{Equação A.18})$$

Onde:

-  $P_{no}$  é a resistência à compressão axial, em N;

-  $P_p$  é força solicitante, em N, dada por (Equação A.19):

$$P_p = F_y A_s + C_2 f'_c \left( A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (\text{Equação A.19})$$

Onde:

-  $F_y$  é a tensão de escoamento do aço, em MPa;

- $A_s$  é a área do perfil tubular de aço, em  $m^2$ ;
- $C_2$  é igual a 0,85 para seção retangular e 0,95 para seção circular;
- $f'_c$  é a resistência à compressão do concreto, em MPa;
- $A_c$  é a área do concreto, em  $m^2$ ;
- $A_{sr}$  é a área da armadura de aço, em  $m^2$ ;
- $E_s$  é o módulo de elasticidade do aço, em MPa;
- $E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto, em MPa.

Para seção não-compacta tem-se outra equação (verificar norma) e para seção esbelta, a resistência à compressão é obtida através de (Equação A.20):

$$P_{no} = F_{cr}A_s + 0,7f'_c \left( A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (\text{Equação A.20})$$

Onde:

- $F_{cr}$  é a tensão de flambagem, em MPa, dada por (Equação A.21 ou Equação A.22):

$$F_{cr} = \frac{9E_s}{\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (\text{seção tubular retangular}) \quad (\text{Equação A.21})$$

$$F_{cr} = \frac{0,72F_y}{\left[\left(\frac{D}{t}\right)\frac{F_y}{E_s}\right]^{0,2}} \quad (\text{seção tubular circular}) \quad (\text{Equação A.22})$$

Onde:

- $b$  é a base do perfil tubular, em m;
- $t$  é a espessura do perfil tubular, em m;
- $D$  é o diâmetro do perfil tubular, em m.

A rigidez efetiva, para toda seção mista, é dada por (Equação A.23):

$$EI_{eff} = E_s I_s + E_{sr} I_{sr} + C_3 E_c I_c \quad (\text{Equação A.23})$$

Onde:

- $EI_{eff}$  é a rigidez efetiva da seção mista;
- $I_s$  é a inércia do perfil tubular de aço, em  $m^4$ ;
- $E_{sr}$  é o módulo de elasticidade da armadura de aço, em MPa;
- $I_{sr}$  é a inércia da armadura de aço, em  $m^4$ ;
- $I_c$  é a inércia da seção de concreto, em  $m^4$ ;
- $C_3$  é o coeficiente dado por (Equação A.24):

$$C_3 = 0,45 + 3 \left( \frac{A_s + A_{sr}}{A_c + A_s + A_{sr}} \right) \leq 0,9 \quad (\text{Equação A.24})$$

Para este trabalho, não se utilizou armadura no concreto, sendo assim desconsiderada a porção das equações que contém variáveis relacionadas a este elemento.