



Resistência à flexão composta de colunas mistas aço-betão

Diogo Emanuel Matos Encarnação

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Militar

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Júri

Presidente: Professor Doutor Orlando José Barreiros D'Almeida Pereira

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Vogal: Professor Doutor Francisco Batista Esteves Virtuoso

Vogal: Tenente Coronel de Engenharia Pedro José da Silva Gonçalves Matias

Outubro 2023

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com contributos de relevante importância, que, direta ou indiretamente levaram a que todo o esforço, determinação e perseverança imposta na realização do trabalho, possam ter sido superados e os objetivos cumpridos.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, à minha irmã Catarina, à minha madrinha e às minhas avós, agradeço pelo incansável apoio dado durante todo este percurso, por todo o encorajamento e o incentivo a nunca baixar os braços em alturas menos boas. Um bem-haja muito especial pela vossa ajuda e apoio durante toda esta jornada.

À minha namorada, Rita, também um agradecimento muito especial por todo o amor, apoio e compreensão ao longo da realização desta dissertação de mestrado.

Ao meu orientador, Professor Doutor Luís Calado, docente e especialista com larga experiência na área e possuidor de um excelente currículo científico e académico e com reconhecido mérito, agradeço toda a ajuda, disponibilidade, paciência e partilha de conhecimentos que contribuíram para a realização desta dissertação.

Aos meus camaradas da turma Foxtrot da Academia Militar, um agradecimento por toda a ajuda durante estes seis árduos anos de formação na Academia Militar, incluindo os dois anos de formação no Instituto Superior Técnico e ao longo de toda a dissertação de mestrado. Sem vocês e sem todos os momentos bons e menos bons que vivemos, este percurso não seria definitivamente o mesmo.

À Academia Militar, nomeadamente os professores, instrutores, comandantes e todas as pessoas responsáveis, agradeço a todos o esforço e dedicação que implementaram para a formação e transmissão de conhecimentos aos alunos.

Um agradecimento especial aos meus avós, que embora, infelizmente, não estando presentes na conclusão deste mesmo trabalho, sempre me apoiaram e incentivaram e sempre acreditaram nas minhas capacidades para superar as diversas adversidades.

Por fim, um agradecimento a todos aqueles que não estando presentes neste momento, tiveram um contributo igual nas minhas conquistas.

A todos, sem exceção, dedico a minha dissertação.

Resumo

As principais características das estruturas mistas aço-betão, nomeadamente um tempo de construção mais rápido do que as construções tradicionais e ainda o facto de que, para dimensões semelhantes dos elementos estruturais, a solução mista apresenta maior rigidez e capacidade de carga, permitem dotar este tipo de estruturas de uma vasta amplitude e aplicação nos mais variados tipos de construção, o que se comprova com a utilização crescente das mesmas nos últimos anos.

Dentro dos vários elementos das estruturas mistas, as colunas mistas têm uma aplicação também muito vasta, porém são sobretudo usadas em edifícios de média e grande altura, sobretudo pelo facto de geralmente possuírem uma secção transversal menor para resistir a igual esforço axial. Maioritariamente, são usadas colunas com secções transversais bi-simétricas, no entanto, colunas mistas com secções assimétricas podem também ser usadas quando é necessário dimensionar pilares de canto, paredes de canto ou núcleos, para melhor se adaptarem à planta do edifício ou requisitos de excentricidades de carga.

Uma vez que, colunas mistas com este tipo de secção transversal não podem ser estudadas através do método simplificado do Eurocódigo 4, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um programa de cálculo para analisar a resistência à flexão composta de colunas mistas com secção transversal mono-simétrica, através do cálculo das respetivas curvas de interação para cada tipo de secção. Sendo assim, foram analisadas quatro secções diferentes, todas do tipo *concrete filled steel tubes*, nomeadamente duas secções bi-simétricas e duas secções mono-simétricas.

O programa de cálculo foi usado para realizar vários estudos paramétricos, nos quais se variou a resistência dos dois materiais, as propriedades geométricas de cada secção, o eixo segundo o qual o momento é calculado e ainda, uma comparação entre as várias secções transversais diferentes. Observou-se que, no caso, das variações da resistência dos materiais e das propriedades geométricas, o traçado da curva de interação depende do parâmetro δ , ou seja, depende da relação entre a resistência do aço e a resistência total da secção.

Um modelo numérico foi também desenvolvido com o objetivo de realizar uma análise global à coluna mista, usando para isso uma coluna mista com secção transversal circular, no qual se compararam vários pares de esforços N-M de colunas com diferentes alturas com a curva de interação obtida pelo programa de cálculo, com o objetivo de validar o mesmo e estudar a influência e a variação das imperfeições com a altura, no momento total da secção.

Palavras-chave: Colunas mistas aço-betão, Secções bi-simétricas, Secções mono-simétricas, Eurocódigo 4, Curvas de interação, Modelo numérico.

Abstract

The main features of steel-concrete composite structures, particularly a faster construction time compared to traditional buildings and the fact that, for similar dimensions of structural elements, the composite solution offers greater rigidity and load-carrying capacity, enable these types of structures to have a wide range of applications in various construction types. This is evident through their increasing use in recent years.

Among the various elements of composite structures, composite columns have a very wide range of applications, especially in medium to high-rise buildings, primarily due to their smaller cross-section to resist the same axial load. Mostly, columns with bi-symmetric cross-sections are used. However, composite columns with asymmetric cross-sections can also be used when it is necessary to design corner pillars, corner walls, or core walls to better adapt to the building's layout or load eccentricity requirements.

Since composite columns with this type of cross-section cannot be analyzed using the simplified method of Eurocode 4, the main objective of this work is to develop a calculation program to analyze the composite column's resistance to combined bending for mono-symmetric cross-sections, by calculating the respective interaction curves for each cross-section type. Thus, four different sections were analyzed, all of the concrete filled steel tubes type, including two bi-symmetric sections and two mono-symmetric sections.

The calculation program was used to perform various parametric tests, varying the strength of the two materials, the geometric properties of each section, the axis about which the bending moment is calculated, and also a comparison between the various different cross-sections. It was observed that, in the case of variations in material strength and geometric properties within the same section, the shape of the interaction curve depends on the parameter δ , i.e., it depends on the ratio between the strength of steel and the total strength of the section.

A numerical model was also developed to perform a comprehensive analysis of the composite column. In this model a circular cross-section was used, and it compared various combinations of axial and flexural loads (N-M) for columns of different heights with the interaction curve obtained from the calculation program. The primary objectives were to validate the program and investigate the influence and variation of imperfections with height on the total bending moment capacity of the section.

Keywords: Steel-concrete composite columns, Bi-symmetric sections, Mono-symmetric sections, Eurocode 4, Interaction Curves, Numerical model.

Índice

RESUMO	VII
ABSTRACT.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XVIII
LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS.....	XX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado.....	2
2. ENQUADRAMENTO DO TEMA NO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 ESTRUTURAS MISTAS.....	5
2.2 COLUNAS MISTAS.....	7
2.3 COLUNAS MISTAS BI-SIMÉTRICAS.....	10
2.3.1 <i>Análise de Colunas Mistas Bi-simétricas segundo o EC4.....</i>	<i>10</i>
2.4 COLUNAS MISTAS MONO-SIMÉTRICAS.....	19
2.4.1 <i>Análise de Colunas Mistas Mono-simétricas segundo o EC4.....</i>	<i>19</i>
3. ANÁLISE DA SECÇÃO TRANSVERSAL.....	25
3.1 SECÇÕES ALVOS DE ESTUDO.....	25
3.2 CÁLCULO DAS CURVAS DE INTERAÇÃO <i>M-N</i>	26
3.3 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	32
3.4 ESTUDOS PARAMÉTRICOS REALIZADOS.....	34
4. CURVAS DE INTERAÇÃO – ANÁLISE DE RESULTADOS.....	37
4.1 SECÇÃO CIRCULAR.....	38
4.2 SECÇÃO QUADRADA.....	42
4.3 SECÇÃO ELÍPTICA.....	47
4.4 SECÇÃO TRIANGULAR ISÓSCELES.....	53
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE SECÇÕES DIFERENTES.....	59
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	60
4.6.1 <i>Variação da resistência dos materiais.....</i>	<i>61</i>
4.6.2 <i>Variação das propriedades geométricas.....</i>	<i>61</i>
4.6.3 <i>Comparação entre a curva de interação calculada segundo o eixo de maior e menor inércia.....</i>	<i>62</i>
4.6.4 <i>Comparação entre secções diferentes.....</i>	<i>63</i>
5. ANÁLISE GLOBAL DA COLUNA MISTA.....	65
5.1 MODELO NUMÉRICO.....	65
5.2 TESTES NUMÉRICOS REALIZADOS.....	67
5.3 PARES DE ESFORÇOS <i>M-N</i> E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
6. CONCLUSÃO.....	77
6.1 INTRODUÇÃO.....	77
6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
6.3 PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ANEXOS..... |

Índice de figuras

Figura 2.1 - Exemplos de estruturas mistas em Portugal (Torre Oriente, Centro Comercial Colombo, Lisboa).	6
Figura 2.2 - Exemplos de estruturas mistas em Portugal (Torres de São Gabriel e São Rafael, Parque das Nações, Lisboa).	7
Figura 2.3 - Fase construtiva da Torre de São Gabriel, Parque das Nações, Lisboa [1].	7
Figura 2.4 - Exemplos de secções transversais de colunas mistas [1].	8
Figura 2.5 - Commerzbank em Frankfurt, Alemanha (a) e respetiva pormenorização de uma das colunas (b) [6].	9
Figura 2.6 - Highlight Center em Munique, Alemanha e respetiva pormenorização esquemática das colunas [6].	9
Figura 2.7 - Limites máximos para que a encurvadura local possa ser desprezada [4].	11
Figura 2.8 - Recobrimento máximo do perfil de aço totalmente betonado [4].	12
Figura 2.9 - Secções bissimétricas que não podem ser analisadas segundo o método simplificado de cálculo [11].	12
Figura 2.10 - Identificação da largura, b_c , e altura, h_c , da secção mista [11].	12
Figura 2.11 - Distribuição das tensões para determinar o $N_{pl,Rd}$ de uma secção CFST quadrada [11].	13
Figura 2.12 - Efeito do confinamento numa secção tubular circular em aço cheia de betão, em que (a) tubo circular de aço e (b) a secção de betão [11].	14
Figura 2.13 - Curva de interação M-N de uma secção transversal de uma coluna mista [11].	14
Figura 2.14 - Curva de interação simplificada proposta por Roik e Bergmann [11].	15
Figura 2.15 - Distribuição de tensões e respetiva curva de interação simplificada de acordo com o método simplificado do EC4 [2].	15
Figura 2.16 - Zona de altura $2h_n$ [6].	16
Figura 2.17 - Geometria e anotações de secções tubulares retangulares e circulares cheias de betão [1].	17
Figura 2.18 - Tensões na secção transversal de uma coluna mista, no caso em que se verifica interação com o esforço transversal [4].	19
Figura 2.19 - Colunas mistas presentes na estação de comboios de Berlim [6].	19
Figura 2.20 - Exemplos de colunas mistas com secção assimétrica [8].	20
Figura 2.21 - Exemplos de colunas mistas tubulares cheias de betão com núcleos internos maciços [6].	21
Figura 2.22 - Secções CFST especiais. Da esquerda para a direita: triangular, Fan-shaped, D-shaped, 1/4 Circular, Semi-circular [24].	23
Figura 3.23 - Edifício Ruifeng em Hangzhou, China [26].	25
Figura 3.24 - Canton Tower em Guangzhou, China [26], [27].	26
Figura 3.25 - Geometria das secções transversais alvo de estudo. Circular a); Quadrada b); Elíptica c); Triangular d).	26
Figura 3.26 - Posição LN0: Secção toda à compressão	27
Figura 3.27 - Posição LN1. Parâmetros a calcular.	28
Figura 3.28 - Posição LN1: Diagrama de tensões para o cálculo de N	29
Figura 3.29 - Posição LN1: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.	30
Figura 3.30 - Posição LN2. Parâmetros a calcular.	31
Figura 3.31 - Posição LN2: Diagrama de tensões para o cálculo de N.	31
Figura 3.32 - Posição LN2: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.	31
Figura 3.33 - Posição LN3. Parâmetros a calcular.	32
Figura 3.34 - Posição LN3: Diagrama de tensões para o cálculo de N.	32
Figura 3.35 - Posição LN3: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.	32
Figura 3.36 - Aproximação realizada para o cálculo da área de cada faixa.	34
Figura 3.37 - Secção elíptica (esquerda) e triangular isósceles (direita): identificação do eixo de maior e menor inércia.	35
Figura 5.38 - Definição da mesh do modelo numérico da coluna mista com secção circular.	67
Figura 5.39 - Modo de rotura da coluna mista com secção circular (esquerda) e triangular (direita)..	68
Figura 5.40 – Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo	

	da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 500 mm.....	69
Figura 5.41	- Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 1000 mm.....	69
Figura 5.42	- Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 2000 mm.....	70
Figura 5.43	- Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 4000 mm.....	70
Figura 5.44	- Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 5000 mm.....	71
Figura 5.45	- Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 8000 mm.....	71
Figura 5.46	- Distribuição de tensões verticais para a coluna mista de secção circular e altura de 1000 mm.....	72
Figura 5.47	- Parâmetros necessários calcular para obter os pares de esforços N e M.	73

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Características da secção circular usada como referência.....	33
Tabela 3.2 - Valores obtidos para os pontos A, B, C e D.....	33
Tabela 3.3 - Valores obtidos pelo programa de cálculo das curvas e respetivos erros.....	33
Tabela 3.4 - Propriedades de cada secção para o mesmo valor de δ	36
Tabela 5.5 - Características das secções das colunas analisadas.....	65
Tabela 5.6 – Par de esforços M e N para uma coluna mista com uma secção circular e altura de 2000 mm, obtidos com base na posição da LN determinada através do ABAQUS.....	74
Tabela 5.7 - Pares de esforços obtidos para as diferentes alturas da coluna mista.....	74
Tabela 5.8 - Valores do momento fletor para cada altura, devido à imperfeição da coluna.....	75

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 - Curva de Interação completa de uma secção circular com variação do diâmetro	37
Gráficos 4.2 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.....	38
Gráficos 4.3 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.....	38
Gráficos 4.4 - Variação da espessura para um diâmetro de 114.3 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	39
Gráficos 4.5 - Variação da espessura para um diâmetro de 273.0 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	40
Gráficos 4.6 - Variação do diâmetro para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	41
Gráficos 4.7 - Variação do diâmetro para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	42
Gráficos 4.8 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.....	43
Gráficos 4.9 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.....	43
Gráficos 4.10 - Variação da espessura para uma largura de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	44
Gráficos 4.11 - Variação da espessura para uma largura de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	45
Gráficos 4.12 - Variação da largura para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	46
Gráficos 4.13 - Variação da largura para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	47
Gráficos 4.14 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.....	48
Gráficos 4.15 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.....	48
Gráficos 4.16 - Variação da espessura para um diâmetro maior de 114.3 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	49
Gráficos 4.17 - Variação da espessura para um diâmetro maior de 273.0 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	50
Gráficos 4.18 - Variação do diâmetro para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	51
Gráficos 4.19 - Variação do diâmetro para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	52
Gráfico 4.20 - Variação da relação D/d na secção elíptica.....	53
Gráfico 4.21 - Curva de interação da secção elíptica calculada segundo o eixo de maior e menor inércia.....	53
Gráficos 4.22 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.....	54
Gráficos 4.23 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.....	54
Gráficos 4.24 - Variação da espessura para uma base e altura de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	55
Gráficos 4.25 - Variação da espessura para uma base e altura de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	56
Gráficos 4.26 - Variação da base e altura do triângulo para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	57
Gráficos 4.27 - Variação da base e altura do triângulo para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.....	58
Gráfico 4.28 - Curva de interação da secção triangular calculada segundo o eixo de maior e menor inércia.....	59
Gráfico 4.29 - Comparação entre as várias secções com as mesmas propriedades e diâmetro/largura de 150 mm.....	59
Gráfico 4.30 - Comparação entre as várias secções com as mesmas propriedades e diâmetro/largura de 250 mm.....	60
Gráfico 4.31 - Teste entre as várias secções com o mesmo valor de $\delta = 0.70$	60
Gráfico 5.32 - Relação constitutiva usada para o aço.....	66
Gráfico 5.33 - Relação constitutiva usada para o betão.....	67
Gráfico 5.34 - Comparação entre os pares de esforços N-M da secção circular e a curva de	

interação do programa de cálculo.	75
Gráfico 5.35 - Valor do momento devido à imperfeição para cada coluna.....	76
Gráficos A.1 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.	I
Gráficos A.2 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.....	I
Gráficos A.3 - Variação da espessura para um lado de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.	II
Gráficos A.4 - Variação da espessura para um lado de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.	III
Gráficos A.5 - Variação do lado do triângulo para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.	IV
Gráficos A.6 - Variação do lado do triângulo para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.	V

Lista de Acrónimos e Siglas

CFST	Concrete Filled Steel Tubes
EC4	Eurocódigo 4
LN	Linha Neutra
MG	Método Geral
MS	Método Simplificado

Lista de Símbolos

Letras Latinas

Símbolo	Significado	Unidade
A_a	Área da secção transversal de aço estrutural	mm^2
A_c	Área da secção transversal de betão	mm^2
A_s	Área da secção transversal das armaduras longitudinais	mm^2
b	Largura do perfil de aço	mm
b_c	Largura de betão na secção transversal	mm
c_y	Espessura do recobrimento do betão ao longo do eixo y da secção transversal	mm
c_z	Espessura do recobrimento do betão ao longo do eixo z da secção transversal	mm
E	Módulo de elasticidade	GPa
e_0	Imperfeição geométrica equivalente	mm
f_{cd}	Resistência à compressão do betão	MPa
f_{sd}	Tensão de cedência do aço em armaduras	MPa
f_{yd}	Tensão de cedência do aço estrutural	MPa
h	Altura do perfil de aço	mm
h_c	Altura do betão	mm
M	Momento fletor	kNm
M_{Ed}	Momento fletor atuante	kNm
M_{e0}	Momento fletor atuante resultante da imperfeição equivalente	kNm
$M_{pl,N,Rd}$	Valor de cálculo da resistência plástica à flexão tendo em conta a influência do esforço normal N_{Ed}	kNm
$M_{pl,Rd}$	Momento fletor resistente plástico	kNm
$M_{Máx,Rd}$	Momento fletor resistente máximo	kNm
N	Esforço normal	kN
N_{Ed}	Esforço normal atuante	kN

$N_{pl,Rd}$	Esforço normal resistente plástico	kN
$N_{pm,Rd}$	Esforço normal de toda a área de betão	kN
V_{Ed}	Esforço transversal atuante	kN
$V_{pl,Rd}$	Esforço transversal resistente plástico da secção de aço	kN
t	Espessura do perfil de aço	mm
W_{pa}	Módulo de flexão plástico do aço estrutural	mm ³
W_{pc}	Módulo de flexão plástico do betão	mm ³
W_{ps}	Módulo de flexão plástico do aço das armaduras	mm ³

Letras Gregas

Símbolo	Significado	Unidade
α_{cc}	Coefficiente que tem em conta a redução da resistência a longo prazo e os efeitos desfavoráveis resultantes da forma como a carga é aplicada	-
$\sigma_{c,r}$	Tensões radiais de compressão no betão	MPa
$\sigma_{a,\varphi}$	Tensões circunferenciais de tração no aço	MPa
$\bar{\lambda}$	Esbelteza relativa	-
$\bar{\lambda}$	Esbelteza relativa	-
δ	Contribuição da secção de aço	-
ρ	Parâmetro relacionado com a redução da tensão de cedência do aço em perfil para ter em conta a influência do esforço transversal	-
γ_{MO}	Coefficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe	-
ν	Coefficiente de Poisson	-
τ_{Rd}	Valor de cálculo da resistência ao corte	MPa

1. Introdução

1.1 Enquadramento e definição do problema

As estruturas mistas aço-betão, como são conhecidas atualmente, começaram a ser desenvolvidas em meados do século XIX e desde então têm vindo a sofrer um grande desenvolvimento e a ser cada vez mais usadas, nomeadamente em edifícios de grande altura e em pontes.

Estes tipos de estruturas apresentam diversas características que explicam o facto da sua implementação ter vindo a aumentar ao longo dos últimos anos. Ao ter conhecimento das características e do comportamento dos dois materiais é possível utilizá-los de forma racional, de modo que cada material resista a esforços e deformações para os quais tem maior aptidão. Além disso, o tempo de construção, de forma geral, é mais reduzido e graças ao uso racional dos materiais, as soluções com elementos mistos apresentam geralmente, secções transversais com dimensões menores, para a mesma capacidade de carga.

No início do século XX, começaram a ser desenvolvidos diversos estudos que contribuíram para a aceleração do seu desenvolvimento e aplicação. Estes estudos permitiram criar regras que serviram de apoio ao dimensionamento dos vários elementos estruturais mistos. Na Europa, toda a regulamentação adequada ao dimensionamento e à verificação de segurança de estruturas mistas culminou com a elaboração do Eurocódigo 4 (EC4) [1].

No que diz respeito aos vários elementos das estruturas mistas, as colunas mistas aço-betão, dada as suas características, têm tido uma aplicação crescente, sobretudo em edifícios de grande altura. A escolha da secção transversal ideal depende sempre do tipo de construção a realizar, porém as secções com perfis tubulares cheias de betão, ou *concrete filled steel tubes* (CFST), apresentam características muito interessantes, nomeadamente a rápida velocidade de construção, devido ao facto de não necessitarem de cofragem.

O EC4 apresenta dois métodos para a análise de colunas mistas: o método simplificado (MS) e o método geral (MG) [2]. O método simplificado apenas pode ser usado para secções transversais que cumpram determinadas regras e o método geral pode ser usado para todos os restantes casos; no entanto, é um método trabalhoso e demorado, uma vez que implica o uso de programas de modelação numérica.

Surge assim a necessidade de desenvolver curvas de interação *M-N* para analisar secções transversais mono-simétricas. Quando é necessário dimensionar pilares ou paredes de canto ou núcleos, é conveniente usar secções transversais irregulares para melhor se adaptarem à planta do edifício ou a requisitos de excentricidade de carga. Muitas vezes, quando deparados com estas situações, os engenheiros optam muitas vezes por secções mais tradicionais, nomeadamente secções circulares ou quadradas, que podem ser estudadas pelo método simplificado, não sendo, na maioria dos casos a solução mais eficaz, tanto económica como estruturalmente. Sendo assim, este trabalho revela ter um carácter relevante nesta temática.

1.2 Motivação e Objetivos

Esta dissertação de mestrado constitui tanto um desafio pessoal como profissional. A possibilidade de poder realizar e integrar um trabalho e promover algum tipo de avanço científico para esta área é, sem dúvida, uma motivação enorme. Além disso, a construção com recurso a estruturas mistas e o facto de estas serem cada vez mais usadas, atribui um carácter importante e útil a este trabalho, uma vez que constitui uma contribuição para esta área no estudo de secções transversais de colunas mistas aço-betão pouco estudadas.

A inovação na área da construção e da engenharia civil é inevitável. A procura constante pelo desenvolvimento de soluções mais eficazes na construção das mais variadas estruturas necessárias ao funcionamento civilizacional revela ter um carácter muito importante nas mais variadas áreas da sociedade, pelo que é estimulante e desafiante ter a oportunidade de trabalhar em temas que podem contribuir para a inovação nesta área e, eventualmente, abrir portas ao desenvolvimento de trabalhos futuros que, em conjunto, se reflitam em alterações palpáveis e úteis não só para a área da construção, como para a sociedade em si. O desafio a que me proponho transparece totalmente a forma de estar de um futuro engenheiro civil e militar e de um futuro oficial dos quadros permanentes da Guarda Nacional Republicana, que assenta na procura constante pela inovação, aprendizagem e de servir a sociedade.

O objetivo principal deste trabalho consiste, no estudo de quatro secções transversais de colunas mistas aço-betão diferentes, através da elaboração de um programa de cálculo que permite estudar a resistência à flexão composta destas colunas com o cálculo da respetiva curva de interação $M - N$, através da realização de diversos estudos paramétricos nos quais se estudam diversos parâmetros considerados importantes analisar e, ainda, através do desenvolvimento de um modelo numérico usando o *software ABAQUS* para realizar a análise global da coluna e comparar estes resultados com os resultados obtidos pelo programa de cálculo desenvolvido.

1.3 Organização da Dissertação de Mestrado

O presente capítulo serve para fazer uma descrição da organização da dissertação.

Capítulo 1, Introdução: neste capítulo será abordado um enquadramento das estruturas mistas, assim como o caso particular das colunas mistas, alvo desta dissertação. Também serão abordados a motivação e objetivos do trabalho a realizar.

Capítulo 2, Estado da arte: neste capítulo o objetivo é abordar todo o estado da arte relevante acerca de estruturas mistas e colunas mistas. Também se aborda a análise de colunas mistas bi-simétricas e mono-simétricas, segundo o EC4.

Capítulo 3, Análise da secção transversal: neste capítulo é descrito como o programa de cálculo é elaborado, de forma a obter as curvas de interação, como este foi validado com recurso ao método simplificado do EC4 e, além disso, são também referidos todos os estudos paramétricos que se realizam com recurso ao programa.

Capítulo 4, Curvas de interação – Análise de resultados: neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos de cada estudo paramétrico, para cada secção individualmente, e ainda os testes de comparação entre as várias secções diferentes. Realizar-se-á também uma análise aos resultados obtidos em cada teste.

Capítulo 5, Análise global da coluna mista: neste capítulo será descrita a elaboração do modelo numérico no *software ABAQUS*, quais os testes numéricos a realizar, bem como quais os resultados obtidos com a elaboração do modelo, de forma a analisar colunas com diversas alturas e estudar a influência das imperfeições no momento total da secção.

Capítulo 6, Conclusão: neste capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho realizado e propostas de estudos futuros.

2. Enquadramento do Tema no Estado da arte

2.1 Estruturas Mistas

Segundo [1], uma estrutura mista é entendida como uma estrutura em que estão presentes elementos estruturais com secção mista, ou seja, secções resistentes, nas quais dois ou mais materiais estão ligados entre si e trabalham em conjunto, de forma a obter elementos estruturais com comportamento diferente do dos materiais individuais. Neste caso em particular, o alvo de estudo são as estruturas mistas de aço e betão.

As primeiras estruturas mistas, no sentido teórico da palavra, surgiram nas civilizações antigas, em que foram concebidos tijolos de barro reforçados com palha. Mais tarde, os Gregos e Romanos, de forma a melhorar o comportamento, começaram a construir paredes revestidas com um material diferente no seu interior [1].

No entanto, as estruturas mistas como são desenvolvidas atualmente, surgiram em meados do século XIX e desde aí têm vindo a sofrer um grande desenvolvimento. Com o aparecimento do betão, os elementos de ferro forjado começaram a ser envolvidos por este material, com o objetivo de lhe conferir proteção ao fogo, sendo assim considerados como os primeiros elementos mistos de cariz semelhante aos atuais [1].

No início do século XX, surgiram diversos estudos em todo o mundo que contribuíram para a aceleração do desenvolvimento de vigas mistas. Segundo [3], em 1926, nos Estados Unidos da América, Kahn registou uma patente para construção de vigas mistas e, em 1929, Caughey e Scott publicaram um artigo em que foi referido, pela primeira vez, a necessidade de conectores para ligar o aço e o betão, de modo a resistirem a movimentos de separação horizontal e vertical. Nos anos 30, as estruturas mistas já eram conhecidas de forma abrangente em grande parte do mundo. De acordo com [1], nessa mesma década, começou-se a utilizar nas vigas mistas, conectores constituídos por varões dobrados em espiral.

Os estudos realizados ao longo dos anos permitiram criar regras que serviram de apoio ao dimensionamento dos vários elementos estruturais. A regulamentação da construção mista surgiu em 1944 nos Estados Unidos da América, através da American Association of State Highway Officials e, mais tarde, do American Institute of Steel Construction, em 1952. Na Europa, toda a regulamentação adequada ao dimensionamento e à verificação da segurança deste tipo de estruturas culminou com a elaboração do Eurocódigo 4 – Projeto de Estruturas Mistas Aço-Betão [1].

Em [1] enumeram-se também as principais características dos elementos estruturais mistos, que ajudam a compreender o motivo pelo qual a implementação destas estruturas tem vindo a aumentar ao longo do tempo, sendo estas:

- O betão é eficiente à compressão, e o aço, à tração;
- O aço confere ductilidade às estruturas;
- O betão restringe a encurvadura dos elementos de aço;
- Ambos os materiais possuem coeficientes de dilatação térmica linear idênticos;

- O betão protege o aço contra a corrosão e isola-o de temperaturas altas (proteção contra o fogo).

Tendo conhecimento destas características e do comportamento dos dois materiais é possível racionalizar a sua utilização, ou seja, colocar o betão nas zonas de compressão e o aço nas zonas de tração. Desta forma, cada material está a resistir a esforços e deformações para os quais tem maior aptidão [1].

Além disso, este tipo de estruturas apresenta uma enorme vantagem em relação às construções tradicionais, no que diz respeito ao tempo de construção. Além do tempo de construção, outra vantagem das estruturas mistas é o facto de que, para dimensões semelhantes dos elementos estruturais, a solução mista apresenta maior rigidez e capacidade de carga, logo para cargas semelhantes, a solução com elementos mistos apresenta menores dimensões das secções transversais e geralmente, vigas e colunas com um peso próprio menor ou, para a mesma secção transversal, permite a construção de vãos maiores [4].

Por outro lado, em [4] refere-se também que estas estruturas requerem mão-de-obra mais especializada, é necessário realizar a proteção dos perfis de aço contra o fogo e a corrosão e além disso, a pormenorização é mais complicada do que as estruturas mais convencionais.

Em Portugal, as estruturas mistas começaram a ser amplamente mais usadas por volta dos anos 90, principalmente nos grandes centros urbanos. Atualmente é possível encontrar vários exemplos destas estruturas em espaços comerciais, hotéis, edifícios de escritório e habitação e ainda, em alguns viadutos e pontes ao longo das vias de comunicação nacionais [1]. Destacam-se alguns exemplos propriamente ditos, como é o caso da Torre Oriente, no Centro Comercial Colombo, em Lisboa e as Torres de São Gabriel e São Rafael, no Parque das Nações, também em Lisboa. Nas Figuras 2.1 e 2.2 podem ser observados estes dois edifícios, respetivamente, bem como a fase construtiva da Torre de São Gabriel, na Figura 2.3.



Figura 2.1 - Exemplos de estruturas mistas em Portugal (Torre Oriente, Centro Comercial Colombo, Lisboa) [5].



Figura 2.2 - Exemplos de estruturas mistas em Portugal (Torres de São Gabriel e São Rafael, Parque das Nações, Lisboa) [6].



Figura 2.3 - Fase construtiva da Torre de São Gabriel, Parque das Nações, Lisboa [1].

2.2 Colunas Mistas

As colunas mistas são elementos estruturais cuja utilização tem aumentado gradualmente desde os anos 60. O termo coluna mista é designado como um elemento estrutural à compressão no qual o aço estrutural trabalha em conjunto com o betão de forma que ambos possam resistir às forças de compressão [1].

A aplicação deste tipo de colunas é vasta, porém são maioritariamente usadas em edifícios de média e grande altura. Algumas vantagens que apresentam, nomeadamente o facto de possuírem uma menor secção transversal para igual esforço axial, quando comparadas às colunas tradicionais de betão armado, constitui um aspeto muito importante no projeto de edifícios altos. Além deste aspeto, importa também ter em conta que a combinação do aço estrutural com o betão melhora consideravelmente a resistência ao fogo dos perfis em aço, bem como diminui a relevância dos fenómenos de encurvadura local [1].

As colunas mistas podem apresentar diversas formas de secção transversal, apresentando-se na Figura 2.4 alguns exemplos.

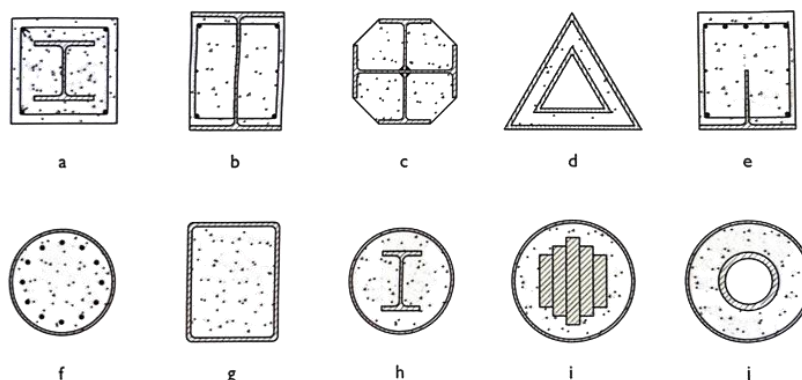


Figura 2.4 - Exemplos de secções transversais de colunas mistas [1].

A escolha da secção transversal ideal está sempre dependente do tipo de construção a executar. Segundo Nethercot [3], os perfis totalmente betonados (alínea (a) da Figura 2.4) não são muito usados, uma vez que necessitam de cofragem. Por outro lado, os perfis parcialmente betonados (alínea (b)), nos quais a betonagem é feita contra os banzos do perfil de aço e a alma está protegida contra o efeito do fogo, devido ao betão, já são mais usuais, tal como as colunas mistas com perfis tubulares em aço cheias de betão (alínea (f) e (g) da Figura 2.4) que, por não necessitarem de cofragem, tornam a velocidade de construção consideravelmente mais rápida, tornando-se uma solução bastante atrativa [1]. Estas colunas são na sua generalidade, desprovidas de armadura no seu interior.

Caso as colunas sejam sujeitas a cargas elevadas é conveniente inserir, no meio do betão, perfis ou secções soldadas, parcialmente ou totalmente betonadas, como é o caso dos exemplos representados nas alíneas (c), (h), (i) e (j) da Figura 2.4.

As colunas referidas anteriormente apresentam todas secções bi-simétricas. No entanto, há casos de edifícios em que foram usadas colunas mistas com secção mono-simétricas. Quando é necessário dimensionar pilares de canto, paredes de canto ou núcleos, há situações em que, muitas vezes, é conveniente usar secções transversais irregulares para melhor se adaptarem à planta do edifício ou a requisitos de excentricidades de carga [7].

Há alguns exemplos de edifícios em que foram usadas algumas colunas mistas deste tipo, como é caso do edifício Commerzbank, em Frankfurt e no Highlight Center, em Munique [8]. Apresentam-se duas figuras com os edifícios referidos, bem como os tipos de colunas usadas (Figuras 2.5 e 2.6).



(a)

(b)

Figura 2.5 - Commerzbank em Frankfurt, Alemanha (a) e respectiva pormenorização de uma das colunas (b) [8].

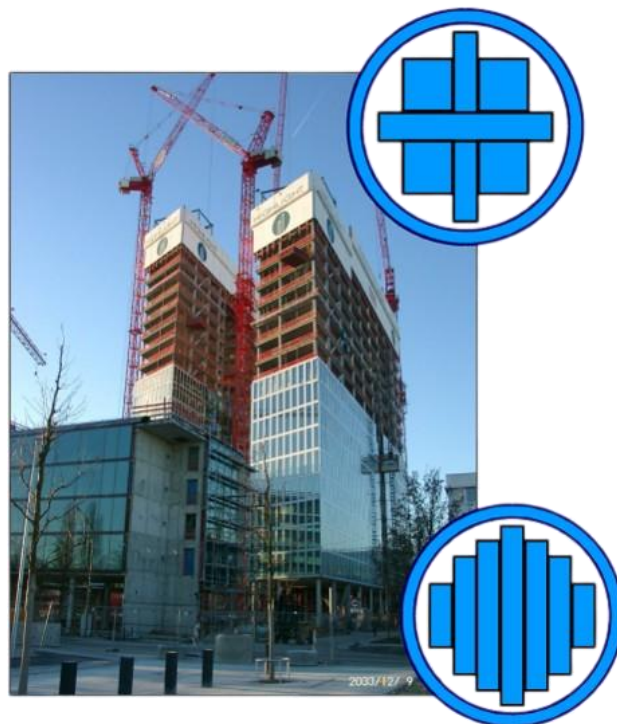


Figura 2.6 - Highlight Center em Munique, Alemanha e respectiva pormenorização esquemática das colunas [8].

2.3 Colunas Mistas Bi-simétricas

2.3.1 Análise de Colunas Mistas Bi-simétricas segundo o EC4

A análise de colunas mistas é abordada no EC4, na secção 6.7. Esta secção só é válida para elementos à compressão com secções de aço das classes compreendidas entre S235 a S460 e com betão de densidade normal das classes de resistência de C20/25 até C50/60 e aplica-se quer a colunas mistas isoladas quer a colunas mistas que façam parte de uma estrutura porticada onde os outros elementos estruturais sejam mistos ou de aço [2].

O Eurocódigo 4 estabelece uma condição para determinar se o elemento deve ser tratado como apenas de aço, de betão ou misto [1]. Esta condição assenta na contribuição da secção de aço, dada por δ , para a resistência da secção transversal. Esta contribuição da secção de aço (δ), é calculada da seguinte forma:

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (2.1)$$

Em que:

- A_a é a área da secção transversal de aço estrutural;
- f_{yd} é o valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural;
- $N_{pl,Rd}$ é o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção mista.

Para que o elemento seja analisado como misto o valor de δ deve estar compreendido entre $0.2 \leq \delta \leq 0.9$. Caso $\delta < 0.2$ então o elemento é tratado como se fosse apenas de betão armado e, por outro lado, caso $\delta > 0.9$ seria considerado um elemento apenas de aço [2].

Sendo o elemento analisado como misto, o Eurocódigo 4 refere então que as verificações de segurança a considerar para as colunas mistas aos estados limites últimos são: a resistência à encurvadura local, a resistência à encurvadura global e a resistência em relação às cargas localizadas [2].

Em relação à encurvadura local para as situações correntes de colunas mistas de edifícios, o risco de encurvadura local da secção é muito baixo, pelo que, segundo a secção 6.7.1 do EC4, para as secções em aço parcialmente betonadas e para as secções tubulares cheias de betão, os fenómenos de encurvadura local podem ser desprezados, caso a esbelteza das chapas que constituem a secção não ultrapasse os valores apresentados na Figura 2.7.

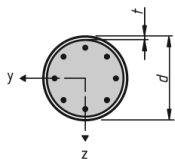
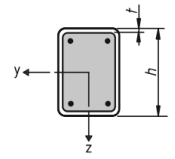
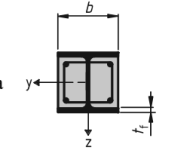
Secção Transversal	Max (d/t), max (h/t) e max (b/t)
Secção circular de aço betonada 	$\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
Secção retangular de aço betonada 	$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Secção em I de aço parcialmente betonada 	$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Figura 2.7 - Limites máximos para que a encurvadura local possa ser desprezada [4].

No que diz respeito à encurvadura global, este efeito também tem de ser tido em conta na resistência da secção de aço. O Eurocódigo 4, indica dois métodos para a verificação de uma coluna mista em relação à encurvadura. São estes:

- O método geral de cálculo (MG), na secção 6.7.2;
- O método simplificado de cálculo (MS), na secção 6.7.3.

O MG de cálculo é um método que exige a utilização de programas numéricos específicos uma vez que permite considerar elementos estruturais mistos com uma secção transversal assimétrica ou não uniforme ao longo do seu comprimento. Este método permite ainda ter em atenção os efeitos de segunda ordem, incluindo as tensões residuais, as imperfeições geométricas, a instabilidade local, a fendilhação do betão, a fluência e retração do betão, bem como o comportamento não linear dos materiais [1], [2]. Este método irá ser abordado mais detalhadamente no capítulo 2.4.

O MS de cálculo é o método que foi desenvolvido na década de 80 na Universidade de Bochum, na Alemanha, por Roik e Bergmann [9], [10]. Segundo Calado e Santos [1] este método foi calibrado com mais de 200 ensaios experimentais e é o método usado para analisar elementos estruturais mistos com secção bi- -simétrica e uniforme ao longo do seu comprimento. No entanto, caso o elemento de aço estrutural seja composto por duas ou mais secções não ligadas entre si, o método simplificado não se aplica (Figura 2.9). Além disso, está também limitado ao valor máximo da esbelteza normalizada, $\bar{\lambda} \leq 2.0$, a quantidade de armadura longitudinal não deve exceder 6% da área de betão e, para uma secção totalmente betonada (exemplo da Figura 2.8), os limites da espessura máxima do recobrimento de betão são os seguintes:

$$\max c_z = 0.3h \text{ e } \max c_y = 0.4b \quad (2.2)$$

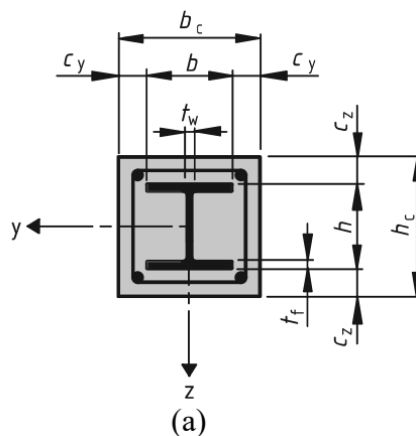


Figura 2.8 - Recobrimento máximo do perfil de aço totalmente betonado [4].

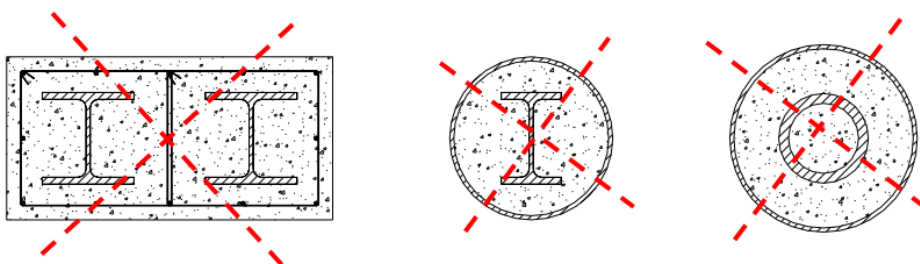


Figura 2.9 - Secções bissimétricas que não podem ser analisadas segundo o método simplificado de cálculo [11].

A imposição destes limites para o recobrimento prende-se com a necessidade de garantir que δ esteja dentro do limite estabelecido (entre 0.2 e 0.9). No entanto, pode haver situações em que poderá ser necessário um recobrimento maior do que o permitido para efeitos de proteção da secção de aço estrutural contra o fogo [1].

Para prevenir a utilização de secções suscetíveis a encurvadura lateral [12], a relação altura-largura deve situar-se entre os seguintes limites:

$$0.2 \leq \frac{h_c}{b_c} \leq 5.0 \quad (2.3)$$

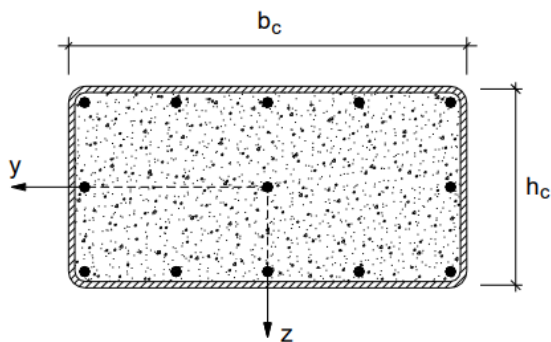


Figura 2.10 - Identificação da largura, b_c , e altura, h_c , da secção mista [11].

O cálculo da resistência de secções mistas compostas por três materiais, sendo estes, o betão, aço estrutural e armaduras é muito mais complexo do que apenas para betão armado [12]. Por esta razão o Eurocódigo 4 introduz algumas simplificações a este cálculo. Sendo assim, a resistência à compressão, para secções de aço total ou parcialmente betonadas, é obtida da seguinte forma:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0.85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (2.4)$$

Sendo:

- A_a a área da secção transversal de aço estrutural;
- A_c a área da secção transversal do betão;
- A_s a área da secção transversal das armaduras longitudinais;
- f_{yd} é o valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural;
- f_{cd} é o valor de cálculo da tensão de cedência do betão à compressão;
- f_{sd} é o valor de cálculo da tensão de cedência do aço em armaduras.

Caso a secção seja tubular e cheia de betão, o coeficiente de 0.85, que se refere à tensão do betão pode ser substituído por 1.0 (na Figura 2.11 pode-se observar a distribuição das tensões de uma coluna CFST de secção quadrada). Este aumento de resistência deve-se ao facto destas secções terem um melhor confinamento do betão e, por sua vez, melhores condições de cura deste [1], [2]. Sendo assim, para secções tubulares cheias de betão, o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de compressão é dado por:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (2.5)$$

Como já foi referido no capítulo 2.2, estas secções podem ser desprovidas de armadura no seu interior (é o caso das colunas alvo de estudo deste trabalho), sendo assim a expressão para o cálculo do valor do esforço normal resistente plástico de compressão passa a ser:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} \quad (2.6)$$

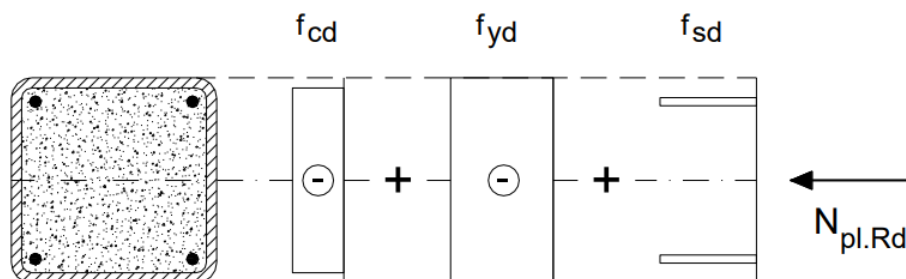


Figura 2.11 - Distribuição das tensões para determinar o $N_{pl,Rd}$ de uma secção CFST quadrada [11].

Dentro das secções tubulares cheias de betão, as secções circulares apresentam ainda uma maior resistência do betão, devido às tensões radiais de compressão no betão, $\sigma_{c,r}$, que provocam um

melhor confinamento, quando comparado às secções quadradas e retangulares [1]. Isto acontece porque o tubo circular ao não se deformar irá provocar um estado de compressão triaxial do betão, enquanto no caso das secções quadradas e retangulares as faces laterais planas do tubo deformam-se quando o betão se dilata transversalmente. No entanto, segundo Azizinamini e Elremaily [13], este efeito do confinamento só acontece se o tubo circular for suficientemente rígido para impedir a dilatação transversal do betão. É de notar também que, enquanto a resistência do betão aumenta, verifica-se uma diminuição da resistência do aço para tensões de compressão paralelas ao eixo da coluna, devido ao aparecimento de tensões circunferenciais de tração no aço, $\sigma_{a,\varphi}$ (Figura 2.12).

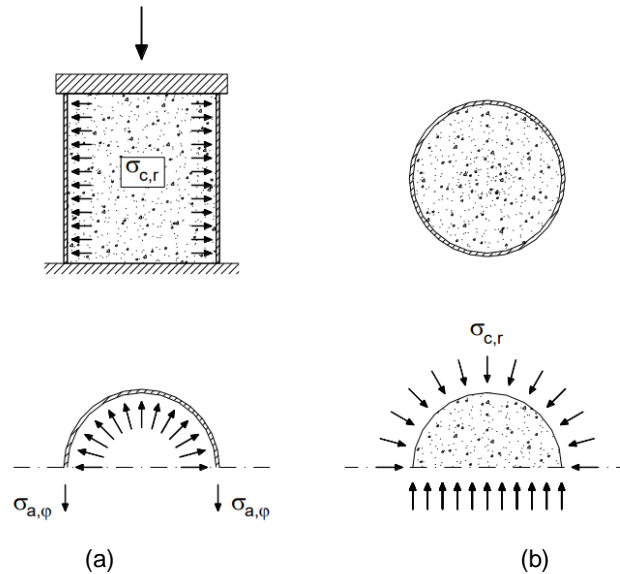


Figura 2.12 - Efeito do confinamento numa secção tubular circular em aço cheia de betão, em que (a) tubo circular de aço e (b) a secção de betão [11].

Quando uma secção ou coluna está sujeita a uma combinação de esforços normais e de flexão, diz-se estar sujeita à flexão composta [4]. Quando uma determinada secção está sujeita a estes esforços é necessário verificar se resiste ao valor atuante dos mesmos. Esta verificação da resistência é feita através do cálculo das curvas de interação $M - N$ (Figura 2.13).

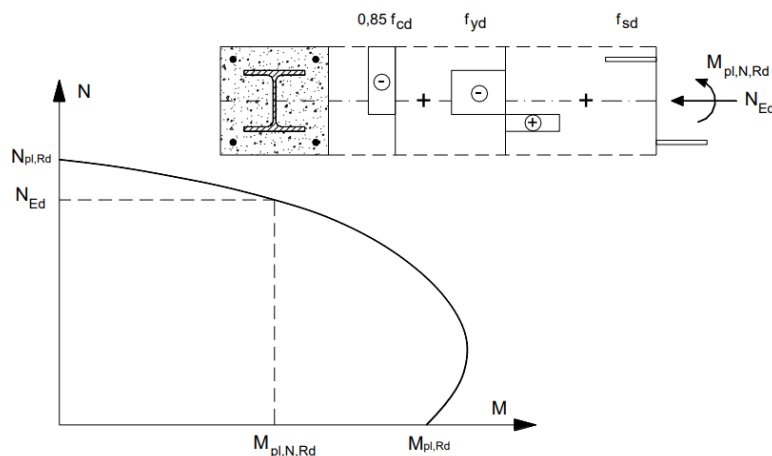


Figura 2.13 - Curva de interação $M-N$ de uma secção transversal de uma coluna mista [11].

As curvas de interação são representadas através de pares de esforços M e N . Para se obter a curva de interação completa é necessário alterar a posição da linha neutra da secção de forma que seja possível obter um conjunto de valores significativo de pontos da curva [1].

A verificação da resistência de uma determinada secção à flexão composta é feita quando um ponto dado por um par de esforços atuantes N_{Ed} e M_{Ed} , estiver dentro da região delimitada pela curva de interação resistente $M - N$ [1].

De acordo com [1], a obtenção dos pares de esforços M e N que servirão para a construção da curva obtêm-se através do método dos blocos retangulares, que consiste em considerar uma distribuição retangular de tensões em cada material da secção e de várias posições da linha neutra plástica à qual correspondem pares de valores $(N_{Ed}, M_{pl,N,Rd})$. No entanto, o EC4 propõe um método simplificado, que irá ser descrito de seguida.

O método simplificado, proposto pelo Eurocódigo 4, em que a sua metodologia está indicada na secção 6.7.3.2, ponto (5), propõe a substituição da curva de interação $M - N$ por um diagrama poligonal ABCD, sendo este baseado no método proposto por Roik e Bergmann [9], [10], cujo diagrama pode ser observado nas Figuras 2.14 e 2.15 [1], [2].

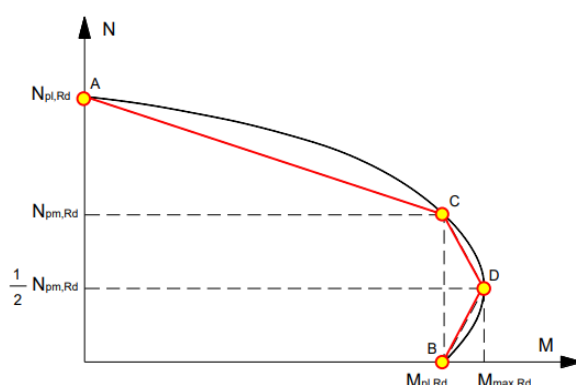


Figura 2.14 - Curva de interação simplificada proposta por Roik e Bergmann [11].

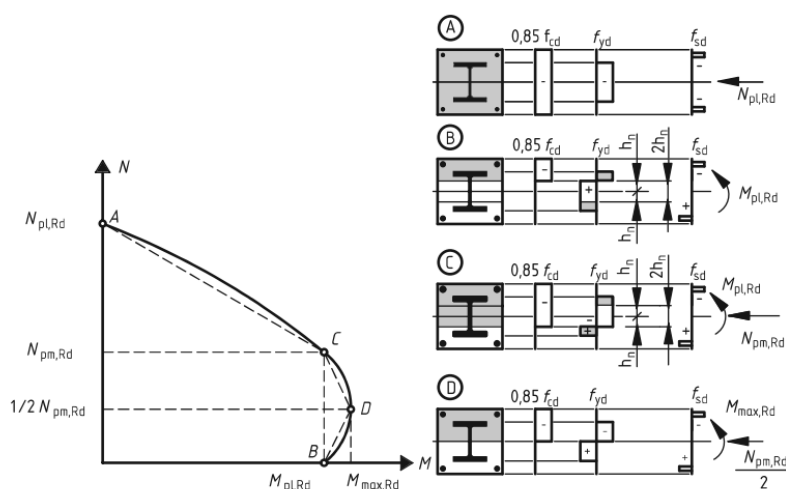


Figura 2.15 - Distribuição de tensões e respetiva curva de interação simplificada de acordo com o método simplificado do EC4 [2].

A secção 6.7.3.2 do EC4 indica que o valor de $N_{pm,Rd}$ (valor do ponto C do diagrama poligonal ABCD) que corresponde ao esforço normal de toda a área de betão, deve ser calculado da seguinte forma [1]:

$$N_{pm,Rd} = A_c \alpha_{cc} f_{cd} \quad (2.7)$$

Em que o valor de α_{cc} varia consoante o tipo de secção:

- $\alpha_{cc} = 0,85$ quando a secção é total ou parcialmente betonada;
- $\alpha_{cc} = 1,0$ quando a secção é tubular cheia de betão.

O valor do momento fletor resistente do ponto D, $M_{max,Rd}$, é dado por:

$$M_{max,Rd} = W_{pa} f_{yd} + W_{ps} f_{sd} + W_{pc} \frac{\alpha_{cc} f_{cd}}{2} \quad (2.8)$$

Em que:

- W_{pa} é o valor do módulo de flexão plástico do aço estrutural;
- W_{ps} é o valor do módulo de flexão plástico das armaduras;
- W_{pc} é o valor do módulo de flexão plástico do betão (sem estar fendilhado).

Por sua vez, o valor do $M_{pl,Rd}$ no ponto B, pode obter-se usando a seguinte expressão:

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} \quad (2.9)$$

Com:

$$M_{n,Rd} = W_{pa,n} f_{yd} + W_{ps,n} f_{sd} + W_{pc,n} \frac{\alpha_{cc} f_{cd}}{2} \quad (2.10)$$

Em que:

- $W_{pa,n}$ é o valor do módulo de flexão plástico do aço estrutural localizado na zona $2h_n$ (Figura 2.16);
- $W_{ps,n}$ é o valor do módulo de flexão plástico das armaduras localizadas na zona $2h_n$;
- $W_{pc,n}$ é o valor do módulo de flexão plástico do betão (sem estar fendilhado), localizado na zona $2h_n$.

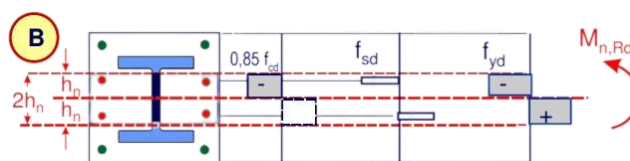


Figura 2.16 - Zona de altura $2h_n$ [8].

Em relação ao ponto A, uma vez que este corresponde apenas a compressão pura, é calculado de acordo com a expressão 2.5.

Neste trabalho, o alvo de análise são as colunas mistas com secções tubulares em aço cheias de betão, cuja geometria está apresentada na Figura 2.17.

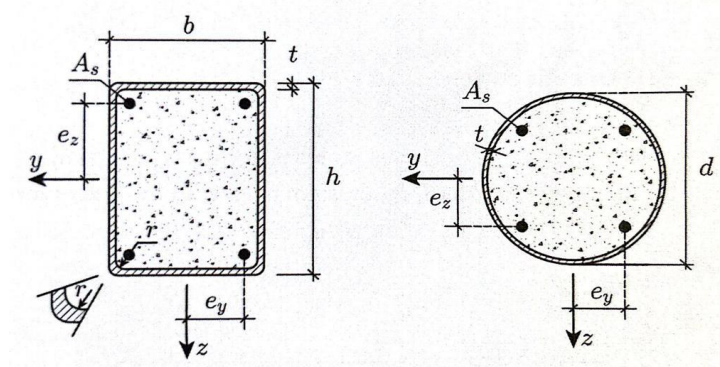


Figura 2.17 - Geometria e anotações de secções tubulares retangulares e circulares cheias de betão [1].

De seguida, são apresentadas as expressões para o cálculo do W_{pa} , W_{pc} , W_{ps} , bem como $W_{pc,n}$, $W_{pa,n}$, $W_{ps,n}$ e h_n , obtidas a partir do ENV 1994-1-1 [14], para a situação específica das secções com geometria circular e retangular.

Note-se que as expressões foram obtidas para secções tubulares retangulares com flexão em torno do eixo y . Ao trocar as dimensões h e b , tal como os índices z e y , consegue-se adaptar as expressões para a flexão em torno do eixo z [1].

As expressões podem também ser utilizadas para as secções tubulares circulares, substituindo:

$$h = b = d \quad r = \frac{d}{2} - t$$

Sendo assim, o módulo de flexão plástico do betão é então obtido da seguinte forma:

$$W_{pc} = \frac{(b - 2t)(h - 2t)^2}{4} - \frac{2}{3}r^3 - r^2(4 - \pi)\left(\frac{h}{2} - t - r\right) - W_{ps} \quad (2.11)$$

O valor do módulo de flexão plástico de toda a armadura é dado por:

$$W_{ps} = \sum_{i=1}^n |A_{s,i} e_i| \quad (2.12)$$

O módulo de flexão plástico do aço estrutural, além de poder ser obtido nas tabelas de perfis em aço, pode também ser calculado com recurso à expressão seguinte:

$$W_{pa} = \frac{bh^2}{4} - \frac{2}{3}(r + t)^3 - (r + t)^2(4 - \pi)\left(\frac{h}{2} - t - r\right) - W_{pc} - W_{ps} \quad (2.13)$$

Por sua vez, o valor de $W_{pc,n}$, $W_{pa,n}$, $W_{ps,n}$ e h_n são calculados a partir das seguintes expressões:

$$h_n = \frac{N_{pm,Rd} - A_{sn}(2f_{sd} - \alpha_{cc}f_{cd})}{2b\alpha_{cc}f_{cd} + 4t(2f_{yd} - \alpha_{cc}f_{cd})} \quad (2.14)$$

$$W_{pc,n} = (b - 2t)h_n^2 - W_{ps,n} \quad (2.15)$$

$$W_{pa,n} = bh_n^2 - W_{pc,n} - W_{ps,n} \quad (2.16)$$

$$W_{ps,n} = \sum_{i=1}^n |A_{sn,i} e_{z,i}| \quad (2.17)$$

O método simplificado não tem em conta a influência do esforço transversal na resistência da secção. Sendo assim, importa verificar se este pode ou não ser desprezado.

O efeito da influência do esforço transversal na resistência da secção é descrito na secção 6.7.3.2.(3) e na 6.2.2.2 do Eurocódigo 4. Segundo estas cláusulas, este pode ser desprezado se o esforço transversal atuante, V_{Ed} , for inferior ou igual a metade do valor de cálculo do esforço resistente plástico da secção de aço, $V_{pl,a,Rd}$, uma vez que, de forma conservativa, se considera que o esforço transversal atuante é resistido unicamente pela secção de aço estrutural [2].

Ou seja:

$$V_{Ed} \leq 0,5V_{pl,a,Rd} \quad (2.18)$$

O cálculo de $V_{pl,a,Rd}$ encontra-se na secção 6.2.6. (2) do Eurocódigo 3 (EC3) e é dado pela seguinte fórmula [15]:

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{A_v (f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (2.19)$$

Em que:

- A_v é a área resistente ao esforço transversal, que depende do eixo segundo o qual atua o esforço transversal, segundo o eixo $y - y$ ou $z - z$;
- f_y é a tensão de cedência do aço;
- γ_{M0} é o coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe e toma o valor 1,0.

Caso a condição indicada em 2.18 não se verifique, significa que o esforço transversal terá influência na resistência da secção. Quando esta situação acontece, é necessário reduzir a tensão de cedência do aço na área resistente ao esforço transversal através de $(1 - \rho)f_{yd}$, em que ρ é dado por:

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,a,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (2.20)$$

Neste caso, a distribuição de tensões, para o caso de uma secção de aço parcialmente betonada e com flexão em torno do eixo de maior inércia, será a indicada na seguinte figura:

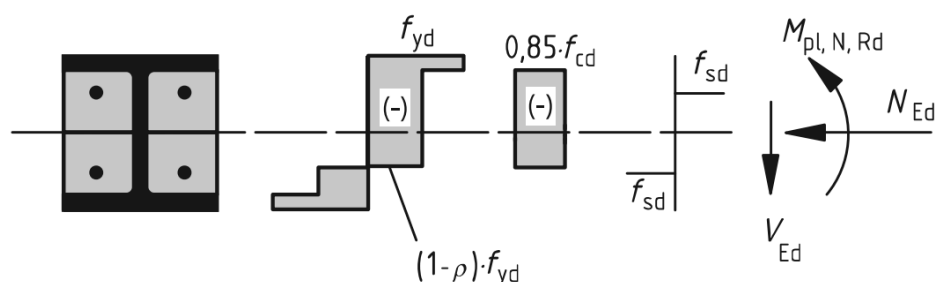


Figura 2.18 - Tensões na secção transversal de uma coluna mista, no caso em que se verifica interação com o esforço transversal [4].

2.4 Colunas Mistas Mono-simétricas

2.4.1 Análise de Colunas Mistas Mono-simétricas segundo o EC4

O Eurocódigo 4 apresenta dois métodos para a verificação de colunas mistas: o método simplificado e o método geral [2].

Como já foi observado no capítulo 2.3, o método simplificado apenas pode ser usado para a análise de colunas mistas totalmente betonadas, parcialmente betonadas ou secções tubulares cheias de betão circulares e retangulares [16].

Na realidade, muitas secções de colunas mistas não cumprem os requisitos do método simplificado, devido ao facto de não apresentarem dupla simetria ou ainda, devido aos elementos de aço estrutural não estarem conectados. Mesmo no caso de algumas secções bi-simétricas, o método simplificado nem sempre pode ser utilizado. Isso acontece quando as secções apresentam uma geometria desfavorável que necessita de deformações muito elevadas para atingir a resistência plástica total (Figura 2.19), ou então por possuírem secções de aço com tensões residuais elevadas. Estas secções, à semelhança das colunas mistas com secções assimétricas, a análise deve ser realizada com base no método geral proposto no EC4 [16].

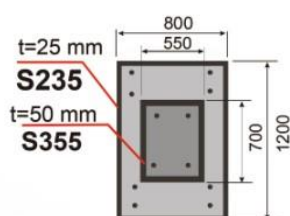


Figura 2.19 - Colunas mistas presentes na estação de comboios de Berlim [8].

No que diz respeito ao método geral, este por sua vez, pode ser utilizado para todo o tipo de secções transversais, em quaisquer limitações em relação à forma da secção de aço ou de betão. Este método tem em conta os efeitos de segunda ordem, incluindo tensões residuais, imperfeições geométricas, instabilidade local, fendilhação, fluência e retração do betão, bem com a cedência do aço

estrutural e das armaduras, caso existam. Neste método, deve ser verificado que a instabilidade não ocorre para a combinação de ações mais desfavorável no estado limite último e ainda que a resistência de cada secção quando solicitada à flexão, esforço normal e esforço transversal não é excedida [16].

Segundo [10], uma secção é considerada assimétrica se:

- Nem todos os lados das colunas de aço existentes que devem ser reforçados podem ser revestidos por betão;
- São utilizadas secções de aço assimétricas para colunas mistas;
- As condutas de serviço estão dispostas no interior do betão da secção transversal;
- A secção de aço não está centrada. Isto pode acontecer no caso de flexão uniaxial pronunciada, de forma a obter a máxima resistência.

Na figura seguinte, encontram-se representadas alguns exemplos de colunas mistas com secção assimétrica.

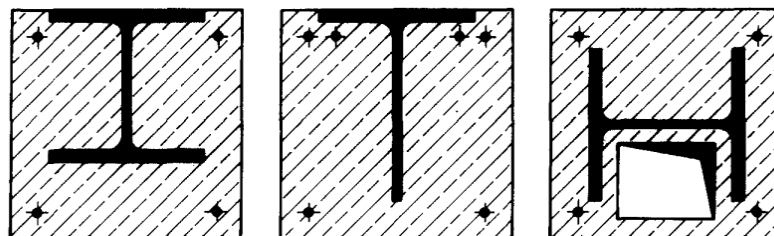


Figura 2.20 - Exemplos de colunas mistas com secção assimétrica [10].

As colunas mistas com secções assimétricas têm aplicações muito variadas. A título de exemplo, podem muitas vezes, ser usadas como pilares, paredes de canto ou núcleos, uma vez que são situações que, frequentemente, precisam de servir situações de projeto com plantas irregulares e/ou requisitos de carga excêntrica [7]. Além disso, têm sido também cada vez mais usadas em edifícios de grande altura [16].

No que diz respeito a este tipo de colunas, poucos estudos têm sido levados a cabo. Os primeiros estudos neste âmbito foram levados a cabo por Roik e Bergmann em 1990, no qual estudaram uma secção mista retangular com uma secção de aço colocada assimetricamente. Neste estudo foi proposto um método de análise aproximado, baseado no método simplificado, que consiste numa modificação do método de análise de colunas mistas com secções bissimétricas [10].

O método desenvolvido por Roik e Bergmann tem a vantagem de ser possível adaptar um método já conhecido, mas por outro lado as propriedades da secção terão de ser calculadas em relação ao eixo do centróide elástico, e os efeitos das ações têm de ser calculados em relação ao eixo plástico do centróide. Se ambos os eixos coincidirem, estamos na presença de uma secção simétrica em que pode ser usado o método simplificado do EC4.

Mais tarde, Hanswille e Bergmann em 2017 [16], conduziram também estudos para secções tubulares de aço cheias de betão com núcleos internos maciços (Figura 2.21). Uma vez que para estas

secções não pode ser aplicado o método simplificado do EC4, foi proposto um método de análise baseado no método geral e explicado como é que este método também pode ser utilizado, alargando o âmbito do método simplificado.

Segundo Hanswille e Bergmann [16] o principal problema das colunas mistas com este tipo de secções, é a determinação realística da distribuição de tensões residuais nos núcleos internos, uma vez que estes arrefecem depois das áreas à superfície, o que origina tensões de compressão no aço já endurecido em contacto com o exterior e tensões de tração nos núcleos internos, o que, conseqüentemente, irá provocar uma diminuição na resistência à flexão e da carga última.

Sendo assim, Hanswille e Bergmann [16] propuseram um método que permite a verificação da segurança de colunas mistas quando se utiliza um cálculo não linear. Além disso, demonstraram também, através de exemplos práticos, que este método permite alargar o âmbito do método simplificado a secções bissimétricas, não abrangidas pelo Eurocódigo 4.



Figura 2.21 - Exemplos de colunas mistas tubulares cheias de betão com núcleos internos maciços [8].

Foi também realizada uma pesquisa aos regulamentos de vários países para tentar encontrar informações em relação à análise de colunas mistas mono-simétricas.

De forma geral, no que se refere aos regulamentos europeus, apenas é referido que este tipo de secções deve ser analisado através do método geral, já descrito anteriormente. No EC4 também não é fornecida nenhuma regra para a verificação de uma coluna no caso de uma análise não linear.

Em relação a esta temática encontram-se, no entanto, nas normas DIN, do anexo nacional alemão do Eurocódigo 4, informações a este respeito. As normas DIN, propõem que é necessário determinar um fator de segurança designado por γ_R , que depende da relação entre o esforço normal e o momento fletor atuante [16], [17].

Na Europa foram também analisados os regulamentos da Suíça, a norma SIA 269/4. De forma geral, segundo Schäfer [18], a Suíça baseia-se nos Eurocódigos, no entanto possui também as próprias normas, cujo objetivo é fornecer informação complementar aos Eurocódigos [19].

A informação que se encontra nesta norma refere apenas práticas em relação à manutenção de estruturas mistas já existentes e no reforço de vigas com secção mista. Em relação às colunas mistas com secções não simétricas, esta temática também não é abordada.

Em relação aos regulamentos americanos, mais especificamente às normas AISC (*American Institute of Steel Construction*), é afirmado por Leon [20] que a construção mista tem uma longa história nos Estados Unidos, tendo-se iniciado em meados de 1890 com a construção de algumas pontes mistas e, depois do terramoto e incêndio de São Francisco em 1906, com a adoção generalizada na zona Oeste dos EUA de secções de aço parcialmente betonadas para reforçar as estruturas e conferir maior proteção ao fogo.

Apesar da adoção rápida deste tipo de construção e do surgimento dos primeiros regulamentos na década de 60, é na década de 80 na Europa que acontece um desenvolvimento enorme dos novos Eurocódigos, o que veio a refletir que determinados aspetos chave do comportamento de colunas mistas não era devidamente abordado nos regulamentos americanos, como é o caso do efeito do tipo de secção, da esbelteza da coluna e o efeito do confinamento [21], [20].

Para abordar as limitações referidas anteriormente é também referido em [20] que as edições de 1999 e 2005 das normas AISC introduziram uma série de alterações, que foram ainda mais reforçadas na edição lançada em 2010. Uma das alterações introduzidas foi a separação das regras de análise de secções parcial ou totalmente betonadas das regras para as secções tubulares em aço cheias de betão.

Sendo assim, no que diz respeito à análise de colunas mistas com secção mono-simétrica, as normas AISC não introduzem nenhuma informação complementar ao EC4.

O mesmo se verifica com as normas conjuntas entre a Austrália e a Nova Zelândia, as normas AS/NZS 2327. Segundo Hicks e Uy [22], estas foram as primeiras normas conjuntas dos dois países, elaboradas para o dimensionamento de estruturas mistas aço-betão. É também referido que, apesar destes dois países terem os seus próprios regulamentos, historicamente sempre seguiram os regulamentos exteriores, nomeadamente o Eurocódigo 4.

De uma forma geral, nestas normas refere-se que a capacidade de dimensionamento de colunas mistas sujeitas à flexão composta é determinada através da sua curva de interação, curva esta que deve ser obtida considerando várias posições da linha neutra para determinar as forças internas e os momentos a partir dos blocos de tensão plástica resultantes [23]. Em relação a tipos de secções menos comuns como as abordadas neste trabalho, não é feita nenhuma referência, limitando-se ao que é dito nas normas europeias.

O regulamento do Japão, publicado pelo *Architectural Institute of Japan* (AIJ), foi também analisado [24]. As colunas do tipo CFST são bastante usadas no Japão, tendo sido contruídos mais de 40 edifícios entre 1998 e 2003 com recurso a este tipo de colunas. A primeira edição das normas AIJ para colunas mistas tubulares com secção circular foi publicada em 1967. Em 1980 esta norma foi revista para incluir também secções quadradas [25].

Em relação à análise deste tipo de secções as normas japonesas também não introduzem nenhuma informação complementar ao EC4 e o tipo de secções mais estudadas são as circulares e quadradas, não apresentando nenhuma informação em relação a secções transversais diferentes.

Por outro lado é na China que têm vindo a ser realizados mais estudos em relação a colunas mistas com secções CFST especiais, devido ao facto deste tipo de secções constituírem uma ótima solução para os engenheiros darem resposta à complexidade cada vez maior das exigências arquitetónicas, sobretudo em edifícios com alturas elevadas e em pilares de pontes [26].

Em 2014, testaram experimentalmente 44 modelos [27], com o objetivo de estudar o comportamento de secções com geometria triangular, *D-shaped*, *fan-shaped*, $\frac{1}{4}$ de círculo e semi-circular (Figura 2.22.) e, nomeadamente, os efeitos da variação da espessura do tudo de aço e do enchimento de betão.

Este estudo concluiu que o modo de rotura é semelhante ao modo de rotura de uma secção com geometria quadrada, com uma encurvadura exterior aproximadamente a meio da coluna. Além disso, calcularam também a resistência da secção transversal da coluna, de acordo com o estabelecido no EC4 e nas normas DBJ/T13-51-2010 e os resultados foram muito parecidos [27], [28].

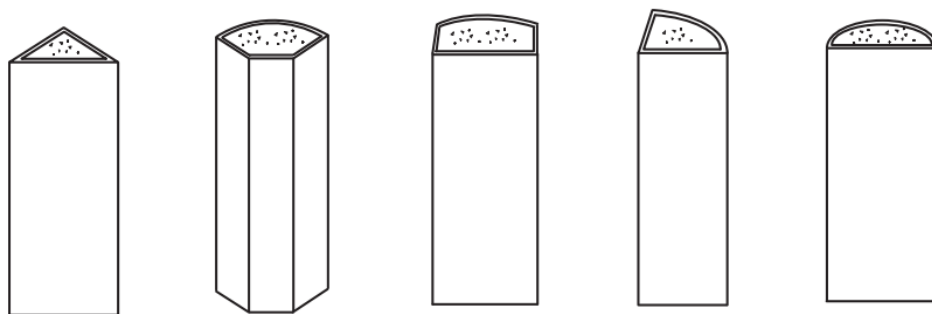


Figura 2.22 - Secções CFST especiais. Da esquerda para a direita: Triangular, Fan-shaped, D-shaped, $\frac{1}{4}$ Circular, Semi-circular [27].

Em 2018, Han e Wang [26], testaram as mesmas secções referidas anteriormente, com o objetivo de estudar o comportamento destas não experimentalmente, mas através de modelos de elementos finitos. Os resultados obtidos foram coerentes com as conclusões de 2014.

3. Análise da Secção Transversal

3.1 Secções alvos de estudo

No âmbito deste trabalho foram estudadas quatro colunas mistas do tipo CFST. Nas Figuras 3.23 e 3.24 apresentam-se alguns exemplos de construções na China em que foram usadas este tipo de colunas [29]. O edifício da Figura 3.23 trata-se de um edifício comercial, construído em 2001, cuja torre oeste é a mais alta, com 84.3 metros de altura e pilares com secção transversal de geometria quadrada. A torre Canton, da Figura 3.24, é mais um exemplo de uma construção com recurso a colunas mistas CFST, neste caso com uma geometria circular. É uma torre com 600 metros de altura na totalidade e só o corpo principal tem 454 metros de altura.

As colunas do tipo CFST possuem inúmeros benefícios estruturais, uma vez que unem o melhor do betão e do aço estrutural, nomeadamente, a elevada capacidade estrutural e resistência ao fogo, boa ductilidade e grande capacidade de absorção de energia. Além disso, o processo construtivo não exige cofragem aquando da betonagem, economizando tempo e dinheiro e contribuir para um tipo de construção mais sustentável para o ambiente [25], [29].

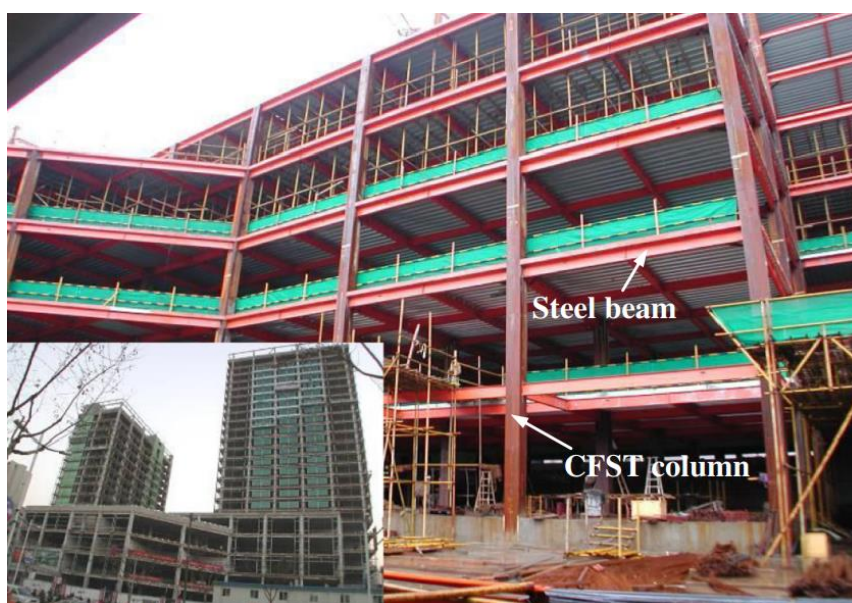


Figura 3.23 - Edifício Ruifeng em Hangzhou, China [29].



Figura 3.24 - Canton Tower em Guangzhou, China [29], [30].

Foram estudadas quatro secções, com o objetivo de estudar duas secções com geometria bi-simétrica e duas secções com geometria mono-simétrica.

Dentro das secções bi-simétricas foi escolhida uma secção com geometria circular e uma com geometria quadrada e dentro das secções mono-simétricas foi escolhida uma secção elíptica e uma secção triangular (onde se incluem uma secção triangular equilátera e uma secção triangular isósceles).

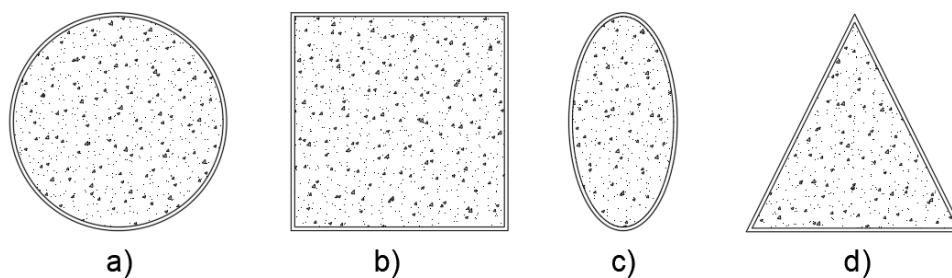


Figura 3.25 - Geometria das secções transversais alvo de estudo. Circular a); Quadrada b); Elíptica c); Triangular d).

3.2 Cálculo das Curvas de Interação $M-N$

A análise da resistência de uma secção transversal à flexão composta é realizada através do cálculo das curvas de interação dos pares de esforços $M - N$.

O objetivo neste capítulo é obter as curvas de interação com base em diversos pontos e não apenas os 4 pontos do diagrama poligonal ABCD indicados no método simplificado do Eurocódigo 4, proposto por Roik e Bergmann em [2], [9], [10].

De forma a obter a curva de interação completa de uma determinada secção transversal, é necessário recorrer ao método dos blocos retangulares, já descrito em 2.3., alterando sucessivamente a posição da linha neutra (LN), até se obter um conjunto de valores significativo para traçar toda a curva.

Assim sendo, com base no método dos blocos retangulares, desenvolveu-se um programa com o objetivo de automatizar o cálculo das curvas de interação para as várias secções.

Este programa foi feito em *Excel* para cada uma das quatro secções. Tendo em consideração as propriedades de cada secção introduzidas no programa, nomeadamente as propriedades geométricas, a resistência do betão e a resistência do aço, a posição da linha neutra irá baixar sucessivamente, calculando a força resultante de aço e betão para cada posição, bem como a distância ao centro de gravidade, de forma a obter os pares de esforços $N - M$.

De seguida irá ser apresentado detalhadamente como o programa funciona e como foi elaborado, tomando como exemplo a secção circular.

Além do ponto de partida inicial (LN0), vão ser mostrados outros três exemplos ilustrativos de três posições diferentes da linha neutra. Na Figura 3.26, pode-se observar a posição correspondente à LN0.

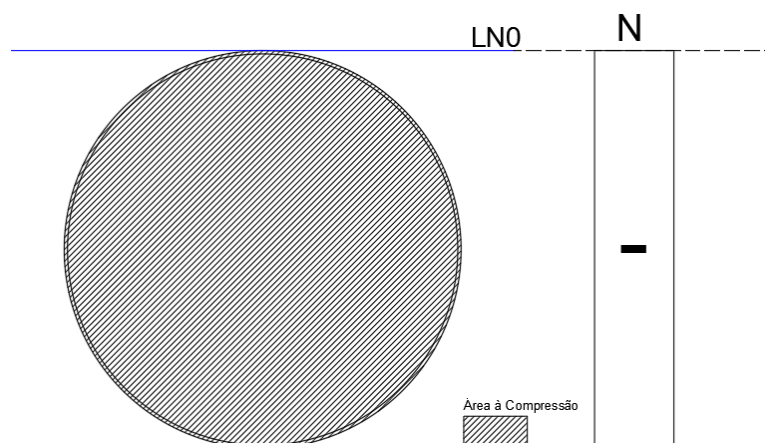


Figura 3.26 - Posição LN0: Secção toda à compressão

Esta posição da LN corresponde ao ponto da curva de interação em que o valor do esforço normal é igual esforço normal resistente plástico de compressão ($N = N_{pl,Rd}$), uma vez que a secção está toda à compressão.

De seguida, segue-se o primeiro exemplo da variação da linha neutra (LN1). Neste caso, representado nas Figuras 3.27, 3.28 e 3.29, a linha neutra encontra-se perto do topo da secção, ou seja, a secção encontra-se maioritariamente à compressão e o momento é pequeno.

No programa desenvolvido, um grau de variação de $\theta_{a,i}$ corresponde a uma posição da LN. Sendo que $\theta_{a,i}$ varia entre 0° e 180° , então a curva de interação foi calculada com base em 180 pontos diferentes.

Os ângulos, representados na figura 3.27, que delimitam a zona de cada faixa, designam-se por:

- $\theta_{a,i}$ é o ângulo de aço inicial, varia entre 0° e 180° e é este que dita a posição da LN;
- $\theta_{a,f}$ é o ângulo de aço final, que corresponde sempre a $\theta_{a,i} + 1^\circ$.

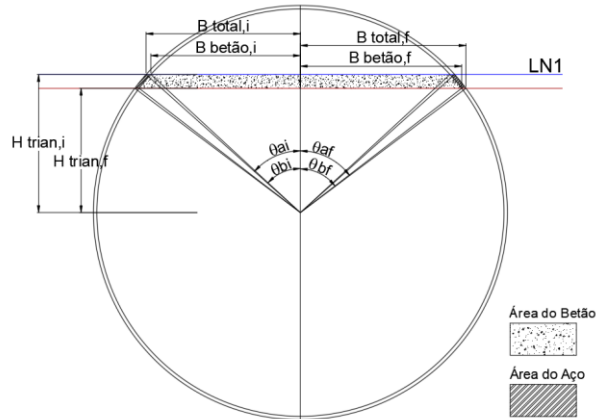


Figura 3.27 - Posição LN1. Parâmetros a calcular.

Para cada posição de $\theta_{a,i}$ e $\theta_{a,f}$, o objetivo é calcular a área de betão e a área de aço em cada faixa. Sendo assim é necessário calcular os restantes parâmetros indicados na figura acima:

$$H_{triang,i} = R_{aço} \times \cos \theta_{a,i} \quad (3.1)$$

$$B_{total,i} = R_{aço} \times \sen \theta_{a,i} \quad (3.2)$$

$$H_{triang,f} = R_{aço} \times \cos \theta_{a,f} \quad (3.3)$$

$$B_{total,f} = R_{aço} \times \sen \theta_{a,f} \quad (3.4)$$

Depois de calculados os parâmetros acima indicados, torna-se necessário calcular o valor de $\theta_{b,i}$ e $\theta_{b,f}$. Estes ângulos designam-se por ângulo de betão inicial e ângulo de betão final e é necessário calculá-los, uma vez que facilitam o cálculo da área de cada faixa que apenas possui betão. A expressão usada para o cálculo destes ângulos encontra-se nas duas expressões seguintes:

$$\theta_{b,i} = \cos^{-1} \left(\frac{H_{triang,i}}{R_{betão}} \right) \quad (3.5)$$

$$\theta_{b,f} = \cos^{-1} \left(\frac{H_{triang,f}}{R_{betão}} \right) \quad (3.6)$$

Em que se $H_{triang,i,f} > R_{bet\tilde{a}o}$ então $\theta_{b,i,f} = 0$, o que significa que a posição da LN está numa zona só com aço. Isto verifica-se nas primeiras posições da linha neutra, enquanto esta não interceta qualquer área de betão.

Calculados os ângulos correspondentes à área só de betão, consegue-se assim calcular as outras dimensões necessárias, sendo estas a $B_{bet\tilde{a}o,i}$ e $B_{bet\tilde{a}o,f}$:

$$B_{bet\tilde{a}o,i} = R_{bet\tilde{a}o} \times \text{sen } \theta_{b,i} \quad (3.7)$$

$$B_{bet\tilde{a}o,f} = R_{bet\tilde{a}o} \times \text{sen } \theta_{b,f} \quad (3.8)$$

De seguida, tendo todas as dimensões necessárias é então possível calcular a respetiva área de cada material na respetiva faixa:

$$A_{total} = \left(\frac{2 \times B_{total,i} + 2 \times B_{total,f}}{2} \right) \times (H_{triang,i} - H_{triang,f}) \quad (3.9)$$

$$A_{bet\tilde{a}o} = \left(\frac{2 \times B_{bet\tilde{a}o,i} + 2 \times B_{bet\tilde{a}o,f}}{2} \right) \times (H_{triang,i} - H_{triang,f}) \quad (3.10)$$

$$A_{a\tilde{c}o} = A_{total} - A_{bet\tilde{a}o} \quad (3.11)$$

Depois de calculadas as áreas de cada material nas respetivas faixas, é então possível calcular os esforços correspondentes a cada posição da linha neutra, com base nos diagramas de tensões e nos diagramas de forças resultantes, como os representados nas Figuras 3.28 e 3.29.

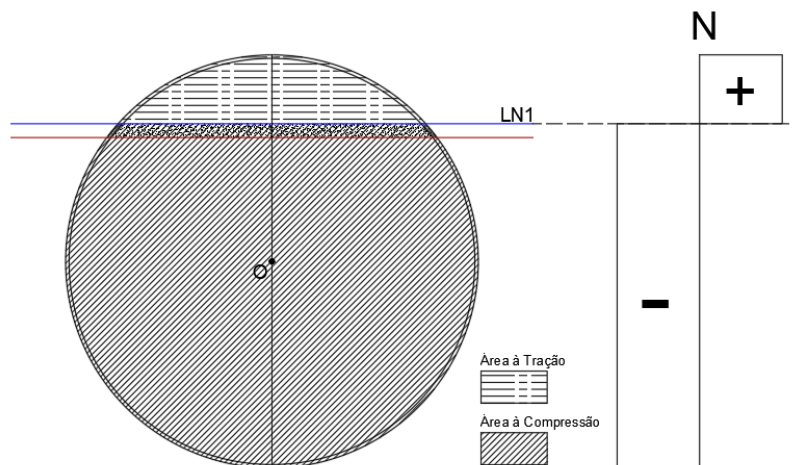


Figura 3.28 - Posição LN1: Diagrama de tensões para o cálculo de N

O valor de N , para cada posição da LN é então dado por:

$$N = \sum A_{bet\tilde{a}o,compress\tilde{a}o} \times f_{cd} + \left(\sum A_{a\tilde{c}o,compress\tilde{a}o} - \sum A_{a\tilde{c}o,tra\tilde{c}\tilde{a}o} \right) \times f_{yd} \quad (3.12)$$

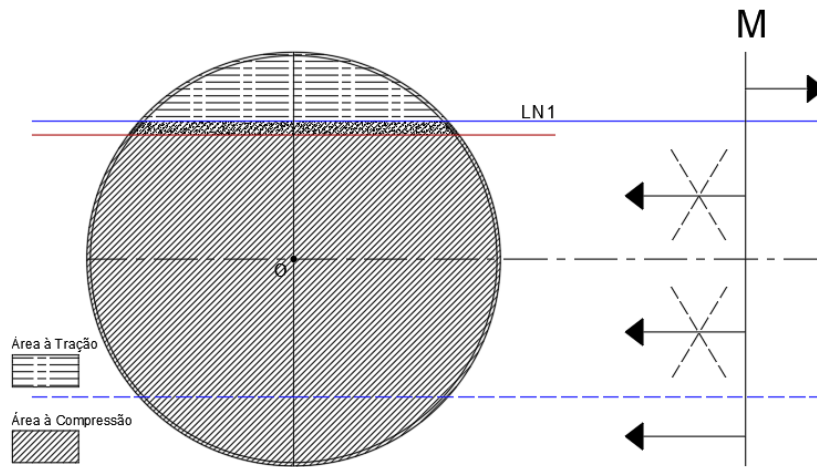


Figura 3.29 - Posição LN1: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.

E o valor de M , é dado por:

$$M = \sum A_{bet\tilde{a}o,tra\tilde{c}\tilde{a}o} \times f_{cd} \times Z_i + 2 \times \left(\sum A_{a\tilde{c}o,tra\tilde{c}\tilde{a}o} \times Z_i \times f_{yd} \right) \quad (3.13)$$

Em que Z_i corresponde ao valor do centro de gravidade de cada faixa, sendo obtido por:

$$Z_i = H_{triang,f} + \left[\left(\frac{H_{triang,i} - H_{triang,f}}{3} \right) \times \left(\frac{2 \times B_{total,f} + B_{total,i}}{B_{total,f} + B_{total,i}} \right) \right] \quad (3.14)$$

De seguida, apresentam-se mais dois exemplos ilustrativos da variação da linha neutra. O segundo exemplo (Figura 3.30 a 3.32), pretende ilustrar a linha neutra mais perto do meio da secção (LN2). Isto quer dizer que nesta situação, aproximadamente metade da secção está à compressão e o momento está quase no seu valor máximo. Note-se que o valor de $M_{m\acute{a}x}$ corresponde exatamente ao ponto em que a linha neutra se encontra a meio da secção, uma vez que nesse caso metade da secção está à tração e outra metade à compressão.

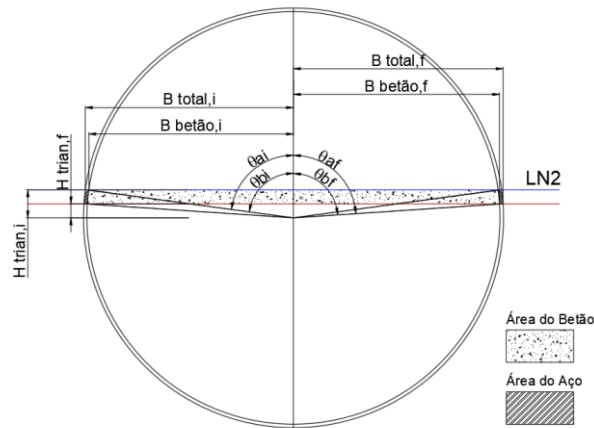


Figura 3.30 - Posição LN2. Parâmetros a calcular.

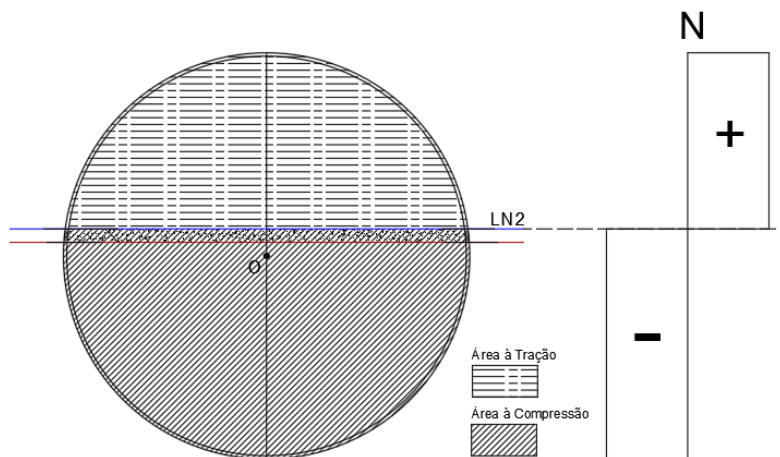


Figura 3.31 - Posição LN2: Diagrama de tensões para o cálculo de N.

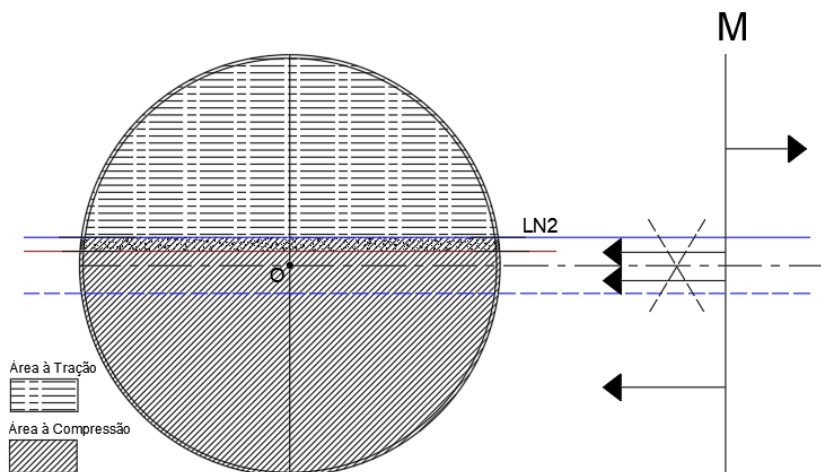


Figura 3.32 - Posição LN2: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.

Por fim, as Figuras 3.33, 3.34 e 3.35 representam o terceiro exemplo (LN3), que pretende ilustrar a linha neutra na parte inferior da secção, quando esta está praticamente toda à tração. Neste ponto, como a área à tração já é menor, o momento volta a ser mais baixo e o esforço normal tem um valor negativo, uma vez que a resultante das forças à tração é superior à resultante à compressão.

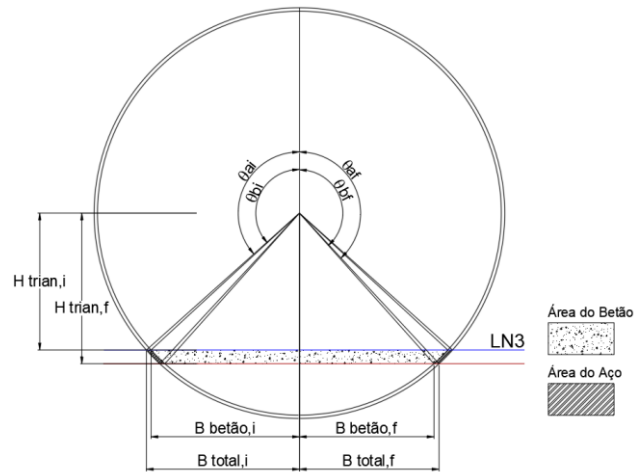


Figura 3.33 - Posição LN3. Parâmetros a calcular.

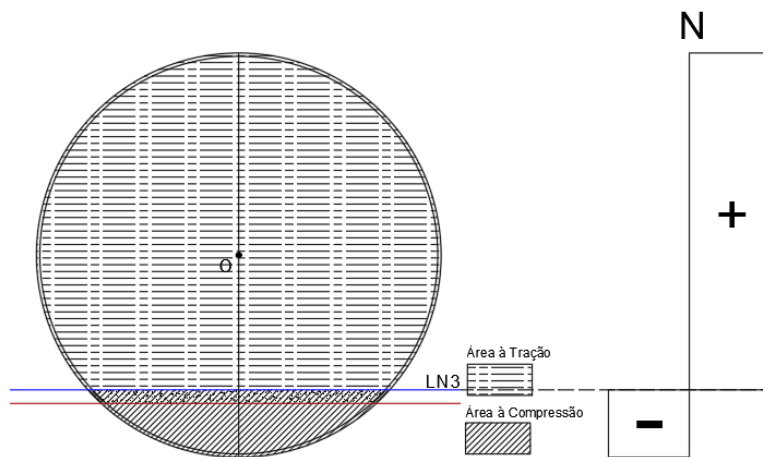


Figura 3.34 - Posição LN3: Diagrama de tensões para o cálculo de N.

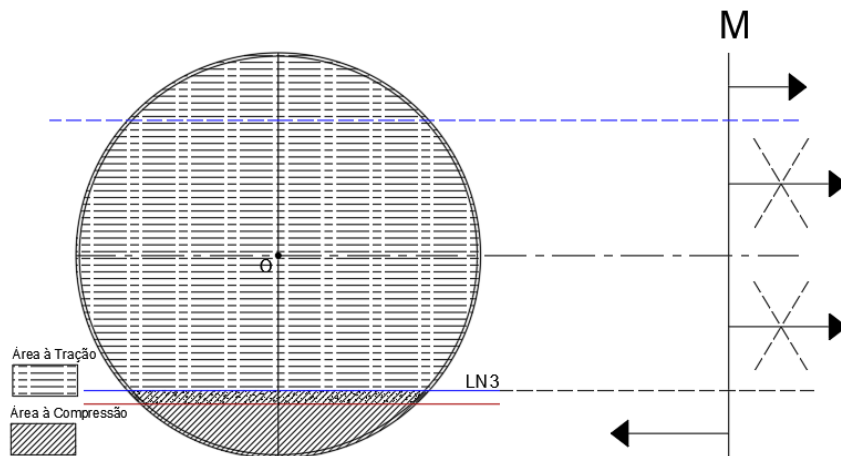


Figura 3.35 - Posição LN3: Diagrama de forças resultantes para o cálculo de M.

3.3 Validação do programa de cálculo

Uma vez criado o modelo, torna-se necessário verificar o mesmo. Os resultados obtidos pelo programa podem ser comparados com os valores calculados através do método simplificado do Eurocódigo 4, representados pelos pontos do diagrama poligonal ABCD.

Sendo que:

- O ponto A corresponde ao valor de $N_{pl,Rd}$;
- O ponto B corresponde ao valor de $M_{pl,Rd}$;
- O ponto C corresponde a $(N_{pm,Rd}; M_{pl,Rd})$;
- O ponto D corresponde a $(\frac{1}{2}N_{pm,Rd}; M_{M\acute{a}x,Rd})$.

Com base na exposição dada em 2.3. para uma secção circular com as características indicadas na tabela seguinte:

Secção Circular	
D (mm) Aço	150
t (mm)	2.5
fck (MPa)	30
fyk (MPa)	355

Tabela 3.1 - Características da secção circular usada como referência.

Foram obtidos os seguintes valores para cada ponto:

Cculos de Verificação		
Ponto A	Npl,Rd (kN)	906.64
Ponto B	Mpl,Rd (kNm)	23.05
Ponto C	Npm,Rd (kN)	495.39
	Mpl,Rd (kNm)	23.05
Ponto D	1/2 Npm,Rd (kN)	247.69
	Mmax,Rd (kNm)	26.93

Tabela 3.2 - Valores obtidos para os pontos A, B, C e D.

Por sua vez, os valores obtidos para a curva de interação calculada pelo programa, bem como os erros entre estes e os valores obtidos pelo método simplificado do EC4, encontram-se na Tabela 3.3:

Valores do Programa		Erros
Npl,Rd (kN)	906.39	0.03%
Mpl,Rd (kNm)	23.02	0.11%
Npm,Rd (kN)	495.38	0.00%
1/2 Npm,Rd (kN)	247.69	0.00%
Mmax,Rd (kNm)	26.91	0.07%

Tabela 3.3 - Valores obtidos pelo programa de cáculo das curvas e respetivos erros.

Analizados os dois conjuntos de valores  possível concluir que o erro observado é muito reduzido, o que significa que o programa obteve os valores esperados e a metodologia pode ser replicada para as outras secções.

Os pequenos erros que se observam justificam-se com o facto de que no programa é assumido que a área de cada faixa se aproxima da área de um trapézio, o que na realidade não acontece. No entanto, uma vez que as faixas são muito pequenas, essa aproximação pode ser realizada.

Na figura seguinte pode ser observado o que foi descrito anteriormente:

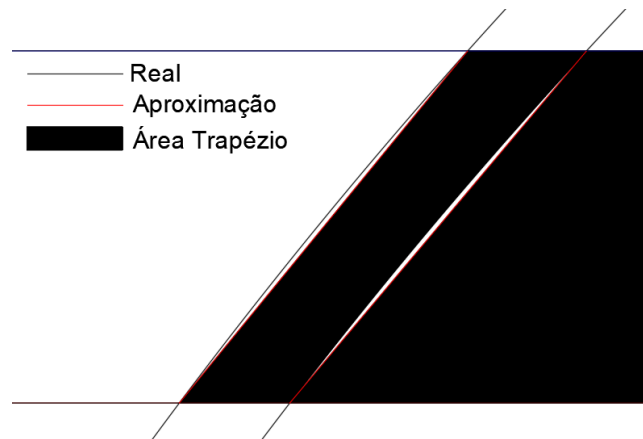


Figura 3.36 - Aproximação realizada para o cálculo da área de cada faixa.

3.4 Estudos paramétricos realizados

Depois de criado o programa de cálculo e mostrar que o mesmo está validado, é necessário definir quais os diferentes parâmetros e os estudos que são realizados de forma a avaliar o comportamento de cada secção.

O objetivo de cada estudo é variar apenas um parâmetro de cada vez, mantendo os outros parâmetros fixos, para assim ser possível saber ao certo como as curvas evoluem ao variar cada parâmetro.

Em cada estudo variam-se os vários parâmetros correspondentes às propriedades de cada secção. Além disso, são também realizados estudos de comparação entre as várias secções.

Para cada uma das quatro secções estudadas (circular, quadrada, elíptica e triangular), variam-se sempre os mesmos parâmetros em cada uma.

Sendo assim, os parâmetros analisados em cada estudo foram os seguintes:

- Variação da resistência do aço: são estudados cinco tipos de aço diferentes: S235, S275, S355, S420 e S460, para dois tipos diferentes de betão (C30 e C50) e sempre para uma secção transversal com as mesmas propriedades geométricas (diâmetro/largura e espessura iguais);
- Variação da resistência do betão: são também estudados cinco tipos de betão diferentes: C25, C30, C35, C40 e C50. Também realizados para dois tipos diferentes de aço (S275 e S460) e sempre com as mesmas propriedades geométricas;
- Variação da espessura: são estudadas as mesmas cinco espessuras diferentes em cada secção (5, 8, 10, 12.5 e 16 milímetros), para quatro combinações de betão e aço diferentes (C30 + S275, C30 + S460, C50 + S275 e C50 + S460) e para dois valores diferentes de diâmetro (no caso da secção circular e elíptica) ou largura (no caso da secção quadrada e das triangulares);
- Variação do diâmetro ou largura: são estudados quatro diâmetros diferentes (114.3, 139.7, 193.7 e 273.0 milímetros) para o caso das secções circular e elíptica) e quatro

larguras diferentes (100, 150, 200 e 300 milímetros) para as secções quadrada e triangulares. São realizados para dois valores diferentes para a espessura (5 e 10 milímetros) e também para as mesmas quatro combinações diferentes de betão e aço.

No caso da secção elíptica e triangular estudam-se ainda outros parâmetros diferentes, além dos referidos. Na secção elíptica realizam-se estudos em que se procura analisar como se comporta a curva de interação para relações D_{Maior}/D_{Menor} (D/d) diferentes. Estudam-se secções elípticas com uma relação de 1, ou seja, uma secção circular, e relações progressivamente maiores (1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 e 5.0), que correspondem a elipses mais achatadas. Além disso, foi também comparado o andamento da curva quando está é calculada segundo o eixo de maior ou menor inércia. O mesmo estudo é também realizado na secção triangular isósceles. Na Figura 3.37 encontra-se a representação do eixo de maior e de menor inércia para a secção elíptica e para a secção triangular isósceles.

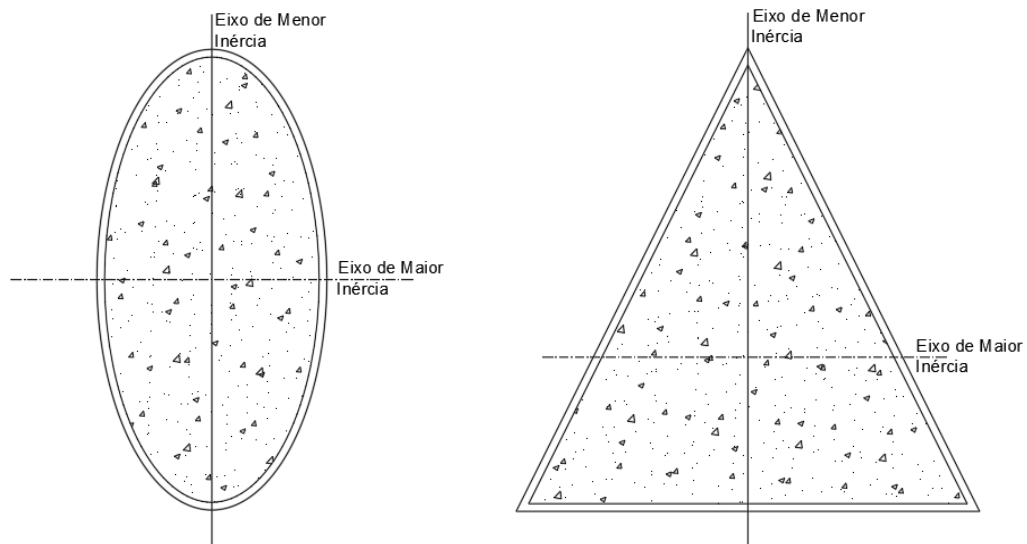


Figura 3.37 - Secção elíptica (esquerda) e triangular isósceles (direita): identificação do eixo de maior e menor inércia.

Além dos estudos acima indicados, são também realizados estudos com o objetivo de comparar a resistência entre as várias secções diferentes. Os estudos em questão foram os seguintes:

- Cinco secções diferentes com as mesmas propriedades. Realizam-se dois estudos neste âmbito em que apenas se mudou o valor do diâmetro ou da largura: no primeiro teste, todas as secções têm a mesma combinação betão e aço (C30 + S355), a mesma espessura de 5 milímetros e um diâmetro ou largura de 150 milímetros. No segundo estudo, mantém-se tudo igual e apenas se aumenta o valor do diâmetro/largura para 250 milímetros. No caso da secção elíptica, o diâmetro menor é sempre metade do maior;
- Curvas de secções diferentes, mas com o mesmo valor do parâmetro δ . Procuram-se em cada tipo de secção combinações de propriedades com o mesmo valor de δ , com o objetivo de estudar a influência deste parâmetro no traçado da curva de interação.

Estuda-se este comportamento para um valor de $\delta = 0.70$, cujas propriedades de cada secção são as seguintes:

Geometria	δ	L ou D (mm)	t (mm)	Betão (Mpa)	Aço (Mpa)
Circular	0.7040	114.3	5	30	355
Quadrada	0.6995	150	8	50	460
Elíptica	0.7036	200	5	30	355
Triangular I.	0.7016	150	5	30	275
Triangular E.	0.7003	150	5	50	420

Tabela 3.4 - Propriedades de cada secção para o mesmo valor de δ .

4. Curvas de Interação – Análise de Resultados

Neste capítulo irão ser apresentados e analisados os resultados dos estudos referidos no capítulo anterior, de forma a avaliar o comportamento de cada secção transversal.

A título de exemplo ilustrativo, apresenta-se uma curva de interação da secção circular, na sua forma completa, ou seja, na totalidade dos seus quatro quadrantes. Neste caso em particular, são estudados diferentes diâmetros para a secção (Gráfico 4.1). A justificação para a variação do traçado da mesma, apresentar-se-á em 4.6.

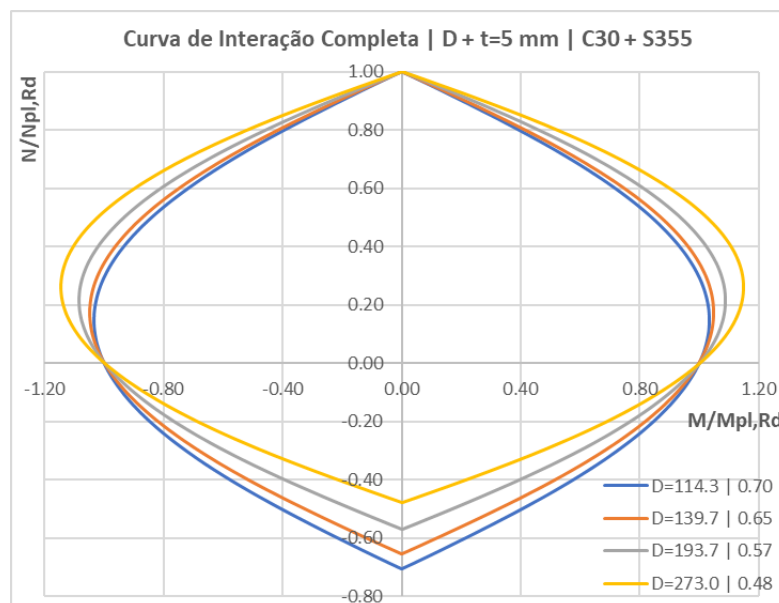


Gráfico 4.1 - Curva de Interação completa de uma secção circular com variação do diâmetro

Na legenda do gráfico, além do diâmetro da secção usado para cada curva, indica-se também o valor do parâmetro δ (equação 2.1). Este parâmetro será também indicado em todos os restantes gráficos apresentados ao longo deste capítulo.

As curvas serão apresentadas sempre no formato adimensional, dividindo $N/N_{pl,Rd}$ e $M/M_{pl,Rd}$, de forma a ser mais fácil comparar as diferentes curvas entre si.

Neste capítulo, as curvas de interação serão todas apresentadas com o traçado em dois quadrantes. A vantagem de apresentar as curvas deste modo é que permite avaliar o seu comportamento quando sujeito à compressão, bem como sujeito à tração (no caso de servirem como elementos de contraventamento, por exemplo).

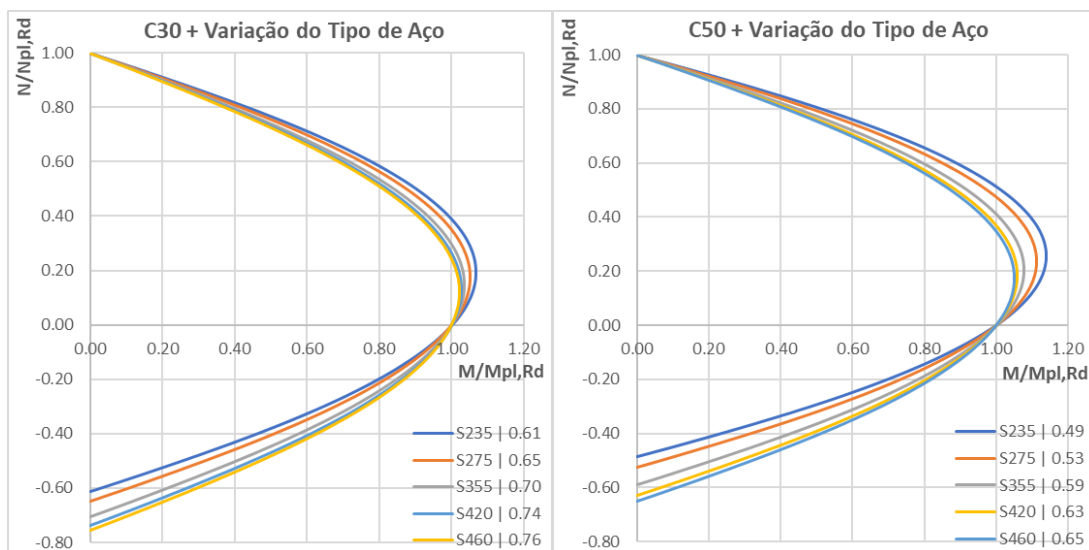
Inicia-se pelos resultados das duas secções bi-simétricas estudadas (secção circular e quadrada) e segue-se a secção elíptica e as duas secções triangulares (os resultados dos estudos da secção triangular equilátera encontram-se no Anexo A). Por fim, serão apresentados os resultados dos estudos realizados entre as várias secções e análise dos mesmos.

4.1 Secção Circular

A secção circular é a primeira secção a ser estudada e a apresentação dos resultados será na mesma ordem que estes foram descritos em 3.4.

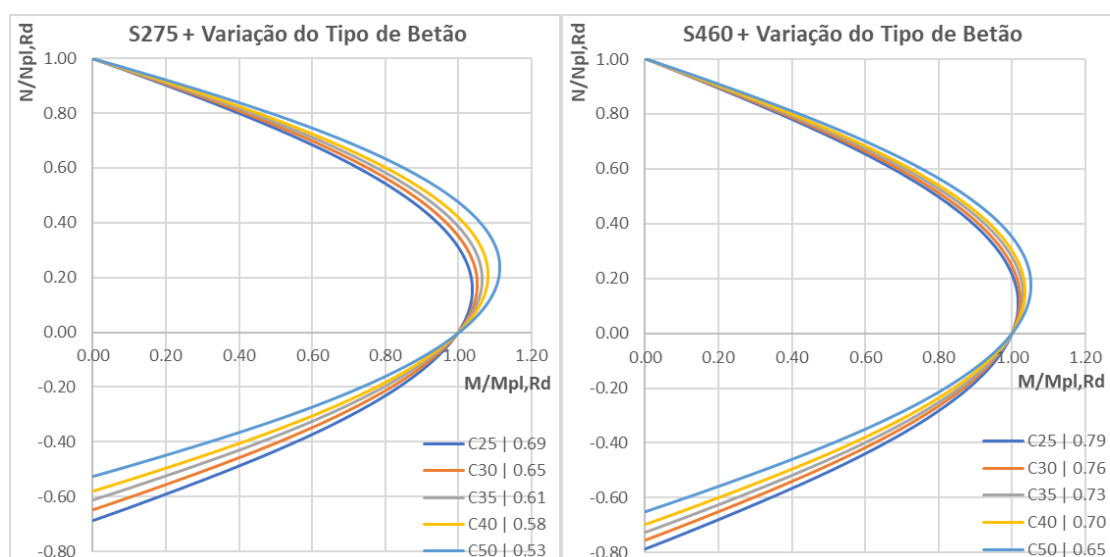
Assim sendo, inicia-se pelos estudos de variação dos materiais (aço e betão) e de seguida, os testes das propriedades geométricas (diâmetro e espessura).

Em relação aos estudos de variação dos materiais, estes são realizados sempre com a mesma secção transversal, que apresenta um diâmetro e uma espessura de 114.3 e 5 milímetros, respetivamente. Os resultados obtidos quando se varia a resistência do aço são apresentados nos Gráficos 4.2:



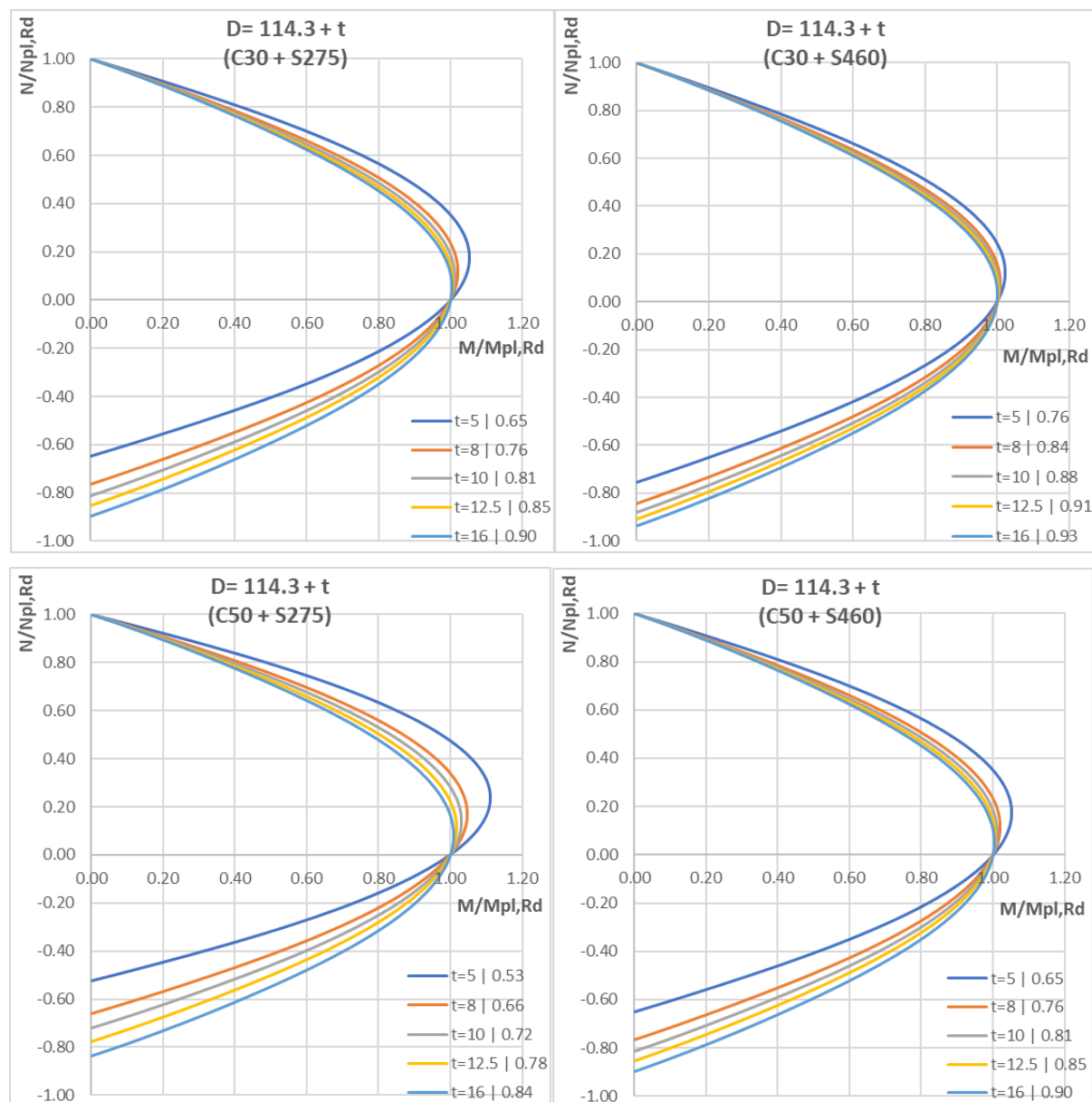
Gráficos 4.2 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.

Em seguida apresentam-se os resultados aquando da variação da resistência do betão (Gráficos 4.3):



Gráficos 4.3 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.

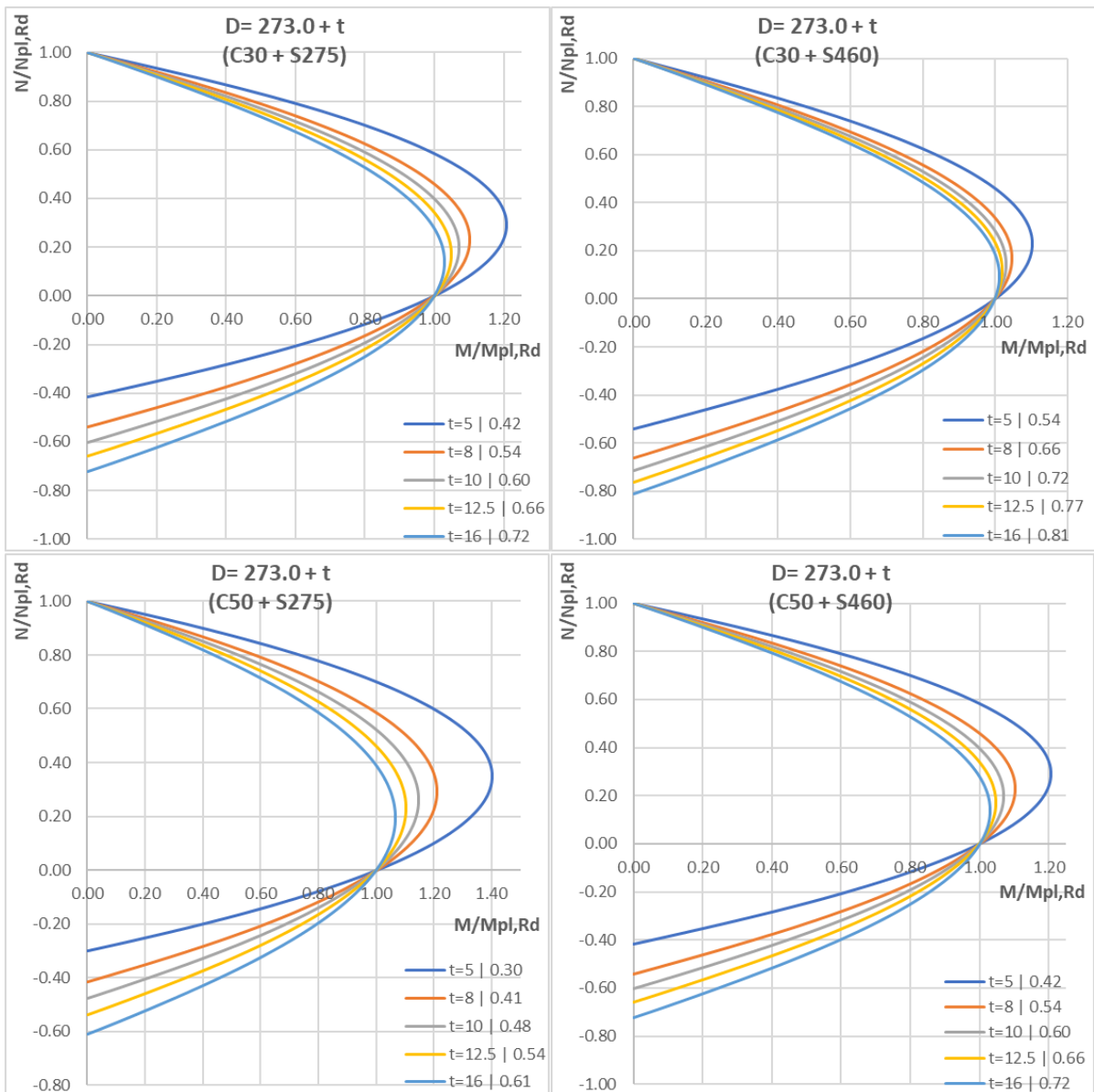
Nos Gráficos 4.4 a 4.7 seguem-se os estudos relativos à variação das propriedades geométricas da secção, começando pela variação da espessura para o diâmetro de 114.3 milímetros.



Gráficos 4.4 - Variação da espessura para um diâmetro de 114.3 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

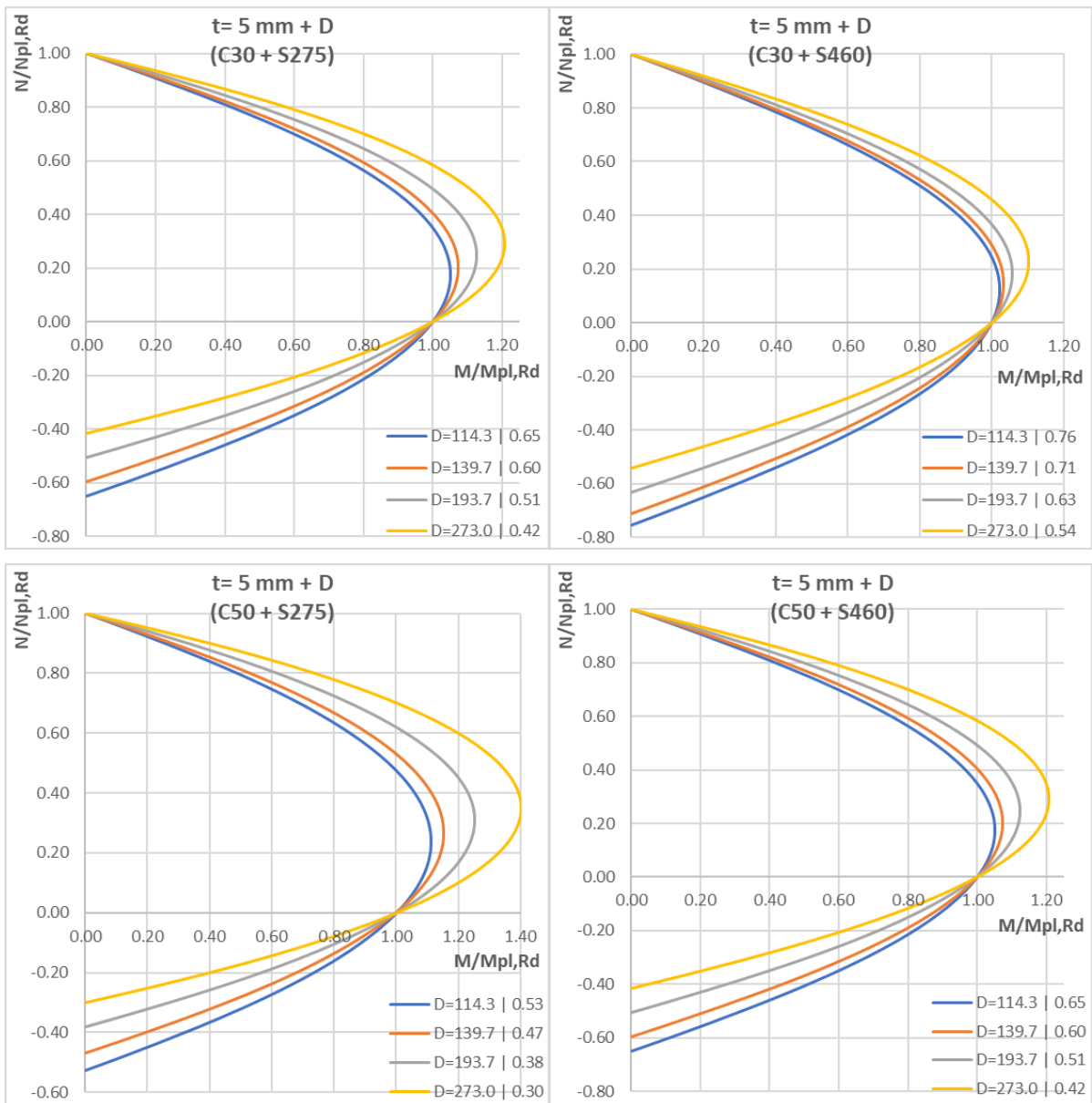
Observa-se, no caso da combinação C30 e S460 que, para a espessura de 12.5 e 16 milímetros, devido ao facto de ser uma espessura elevada, para um diâmetro relativamente baixo e com um aço de alta resistência, o parâmetro δ é superior a 0.9, o que significa que estes dois casos já não representam uma secção mista, mas sim uma secção de aço. Para a combinação C30 + S275 e C50 + S460, quando a espessura é de 16 milímetros a secção encontra-se mesmo no limite entre uma secção mista e uma secção de aço.

Por essa razão estuda-se também o diâmetro de 273 milímetros, que corresponde a uma área de betão maior, cujos resultados são os apresentados no Gráfico 4.5:

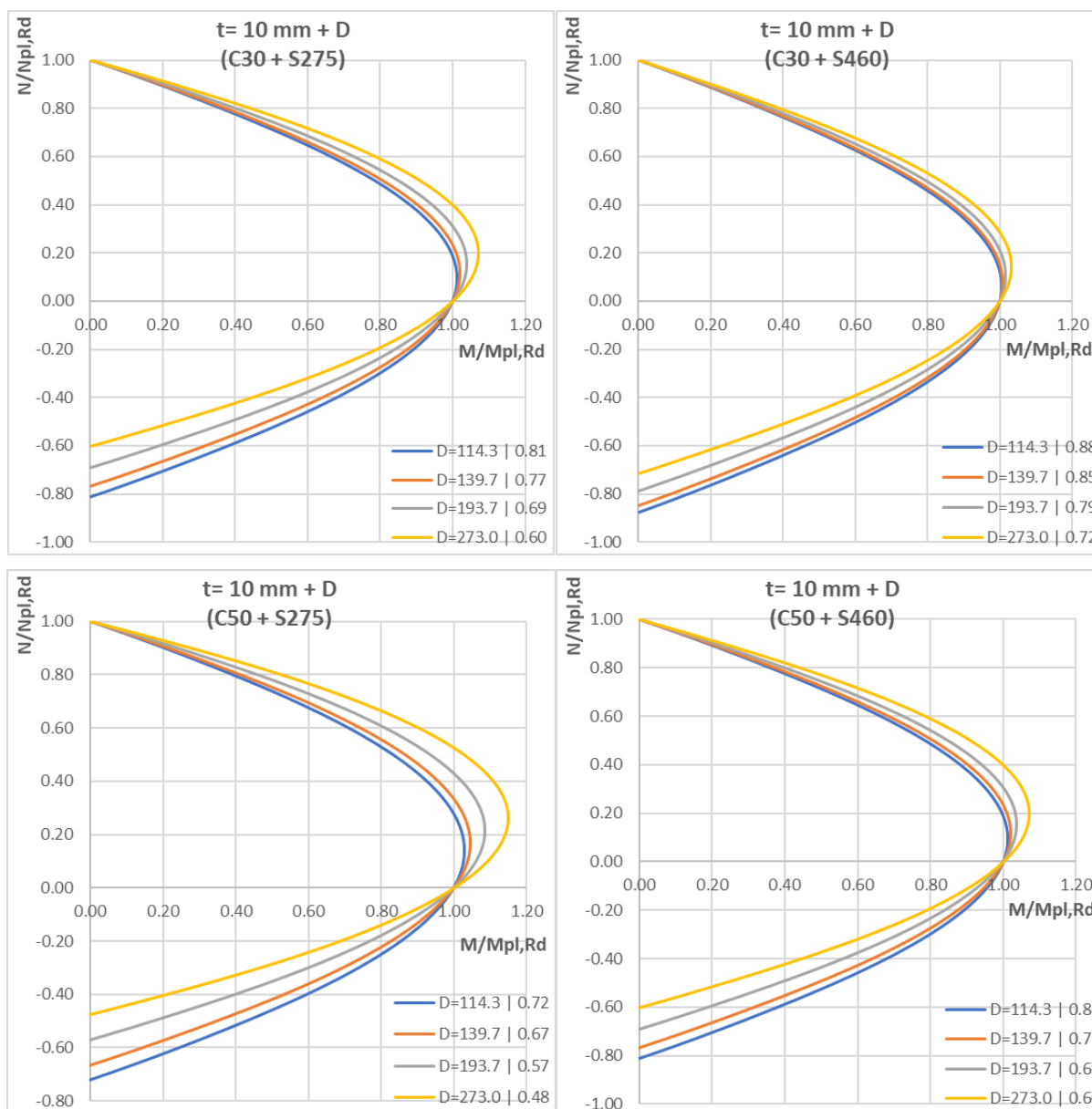


Gráficos 4.5 - Variação da espessura para um diâmetro de 273.0 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Apresenta-se em seguida, o estudo da variação do diâmetro. Neste estudo, para as mesmas combinações aço e betão, começou-se por uma espessura de 5 milímetros e de seguida aumentou-se para 10 milímetros. Ambos os resultados se apresentam nos Gráficos 4.6 e 4.7.



Gráficos 4.6 - Variação do diâmetro para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



Gráficos 4.7 - Variação do diâmetro para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

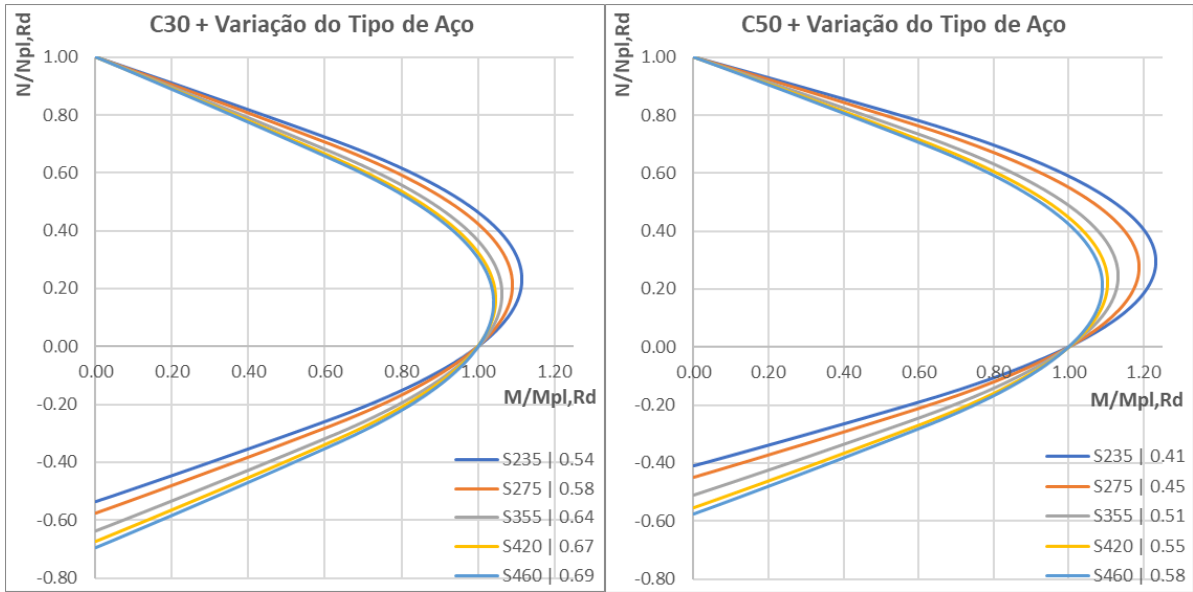
4.2 Secção Quadrada

A segunda e última secção do grupo das secções bi-simétricas a ser estudada é a quadrada.

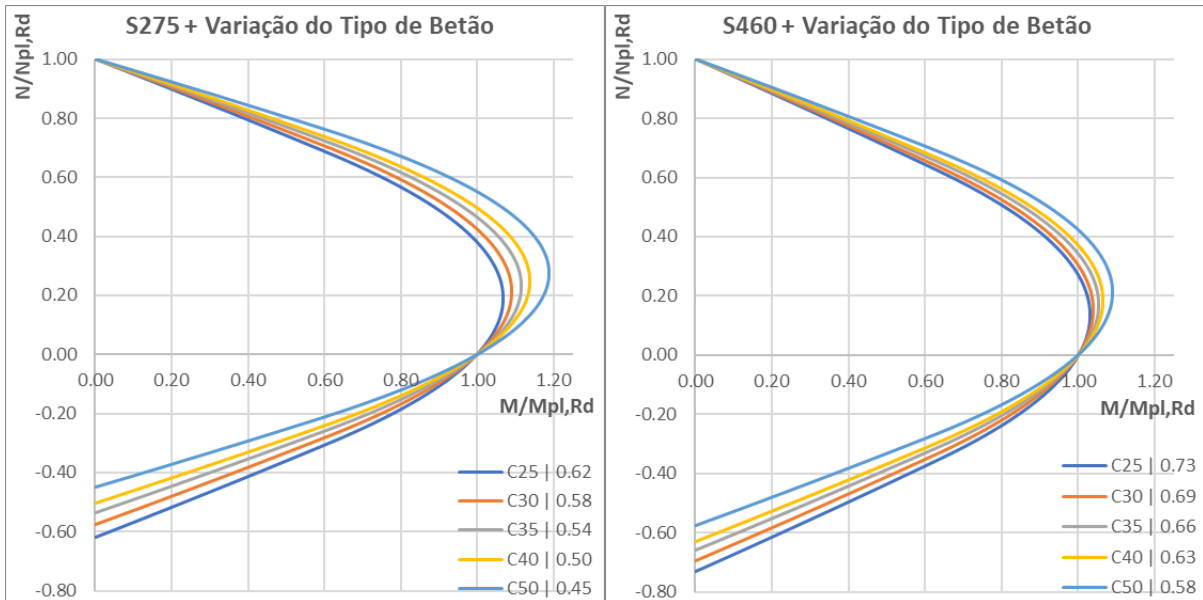
Os estudos a realizar são os mesmos (variação da resistência materiais e variação das propriedades geométricas).

Em relação aos estudos de variação dos materiais, a secção também apresenta sempre as mesmas características sendo estas uma largura de 150 milímetros e uma espessura de 5 milímetros.

Os resultados obtidos para a variação da resistência do aço e do betão apresentam-se nos Gráficos 4.8 e 4.9.

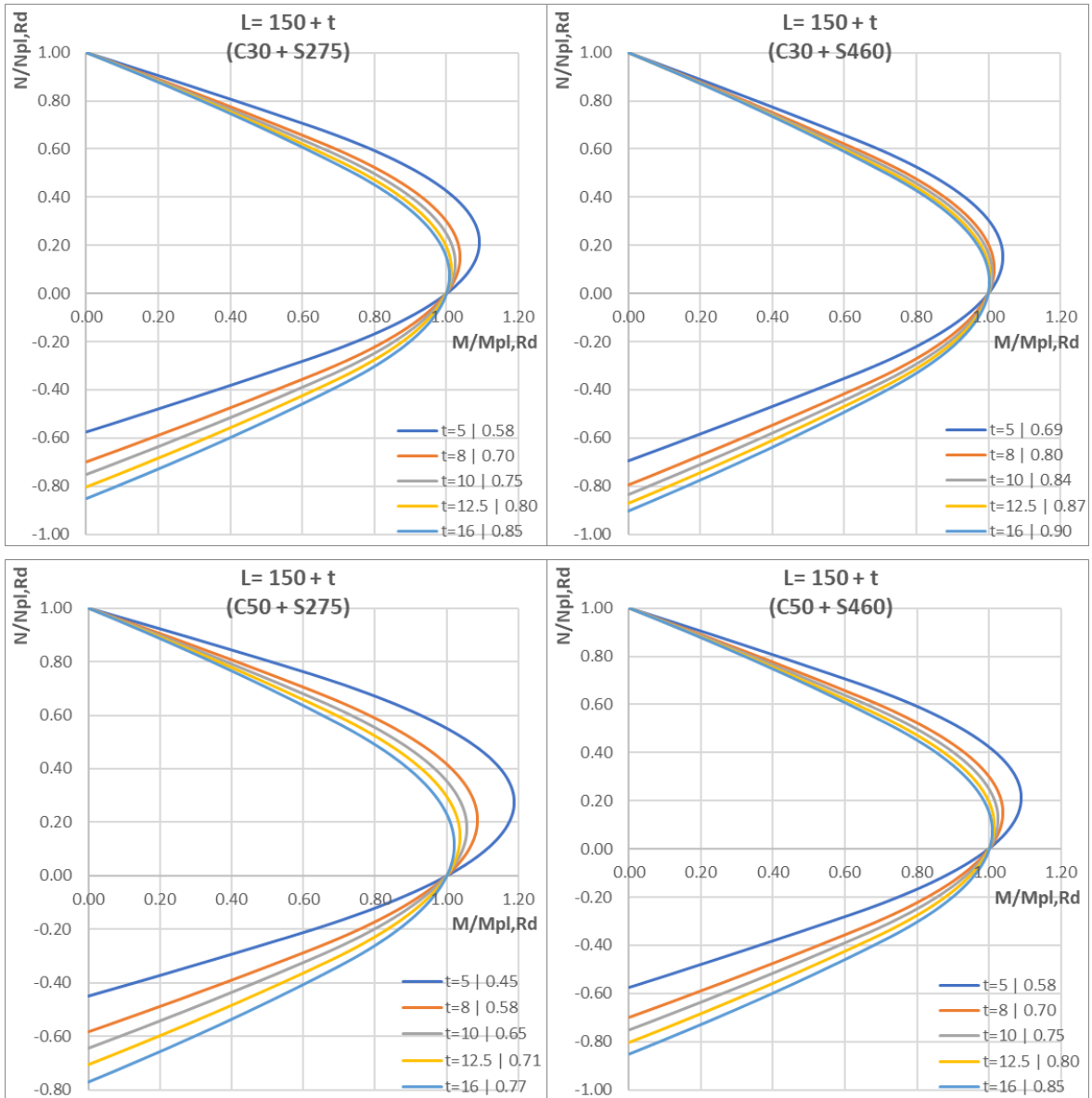


Gráficos 4.8 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.

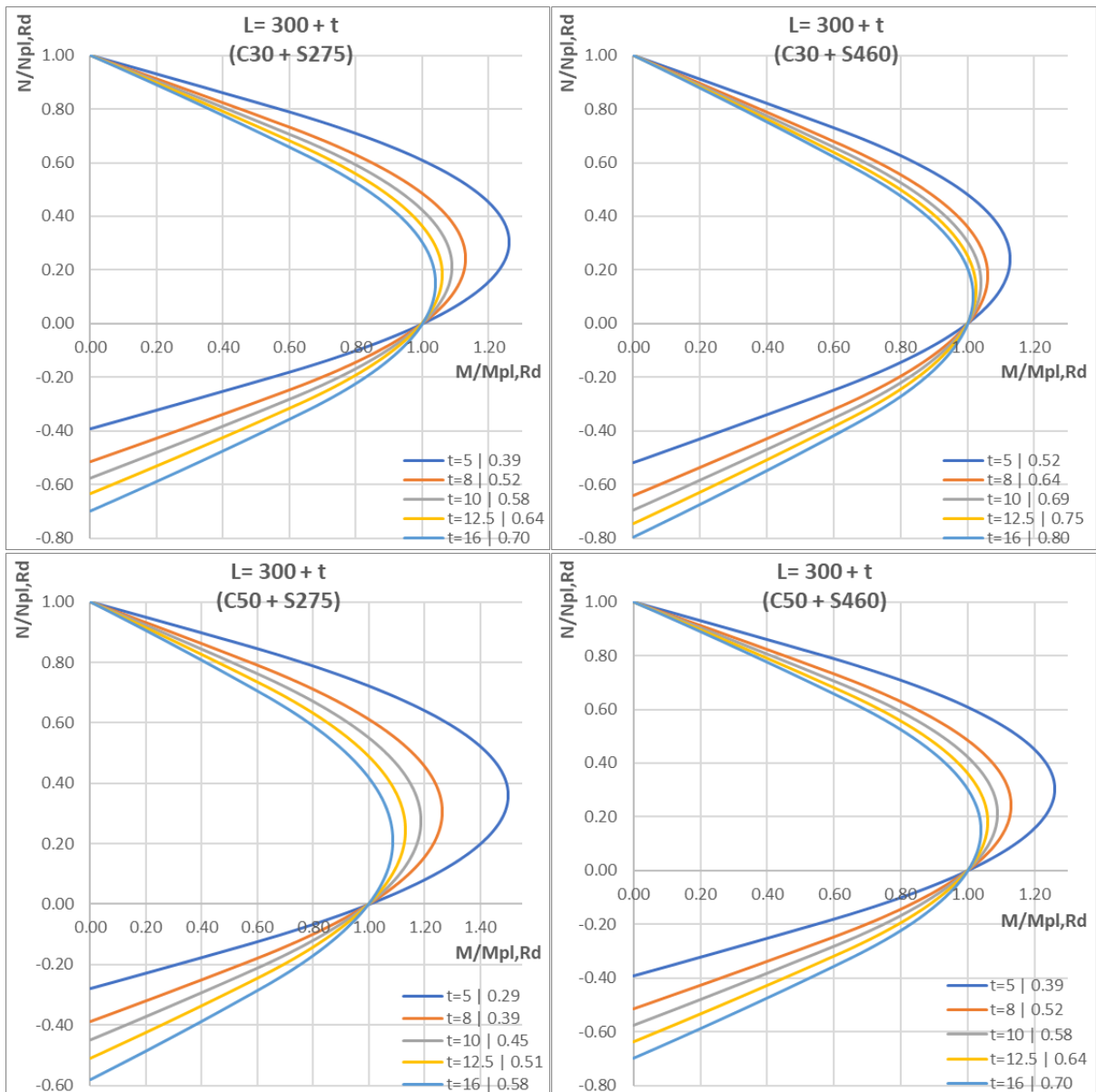


Gráficos 4.9 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.

De seguida, seguem-se os testes da variação da espessura para uma largura de 150 e depois para 300 milímetros. Os resultados são apresentados nos Gráficos 4.10 e 4.11:

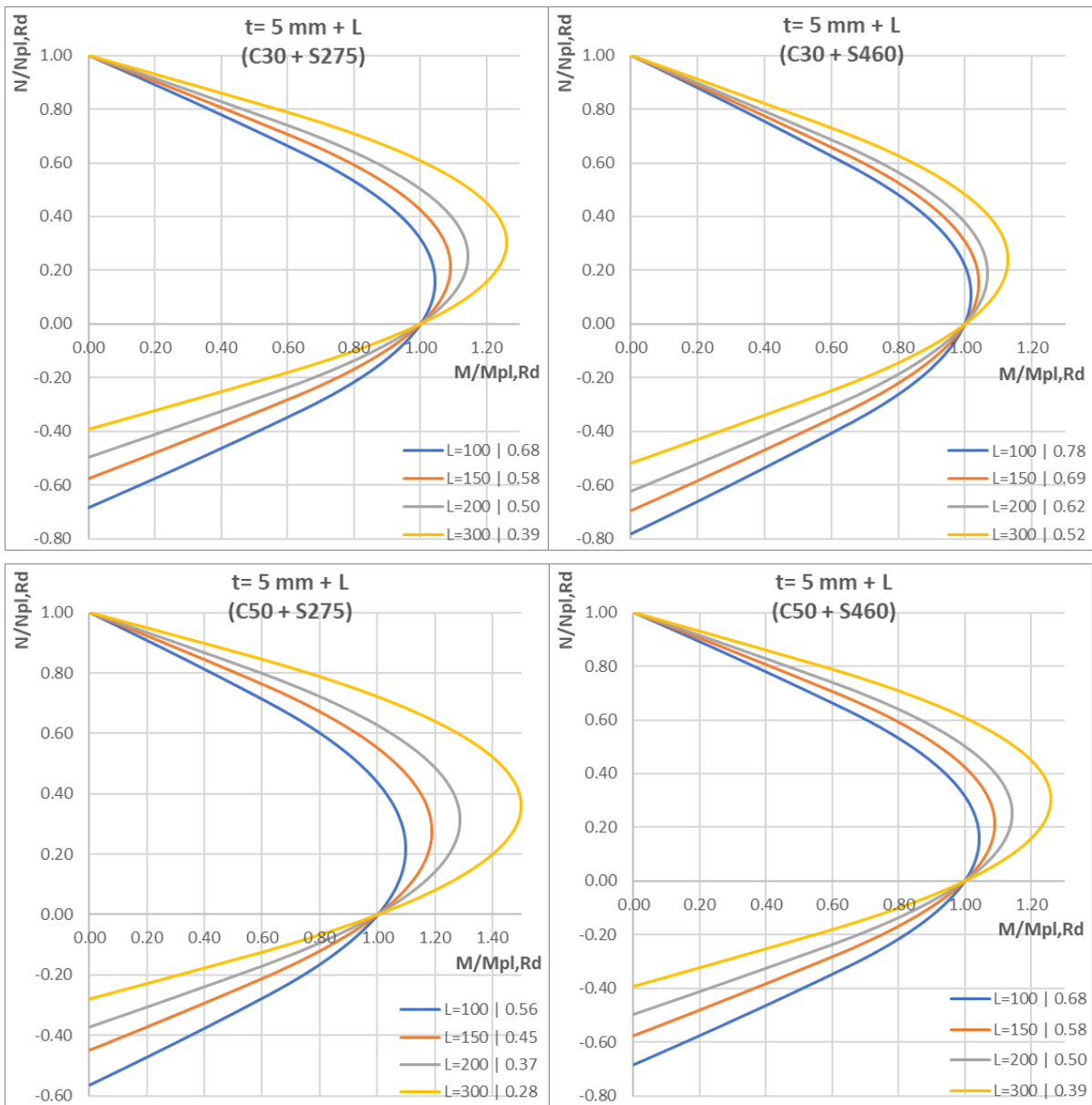


Gráficos 4.10 - Variação da espessura para uma largura de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

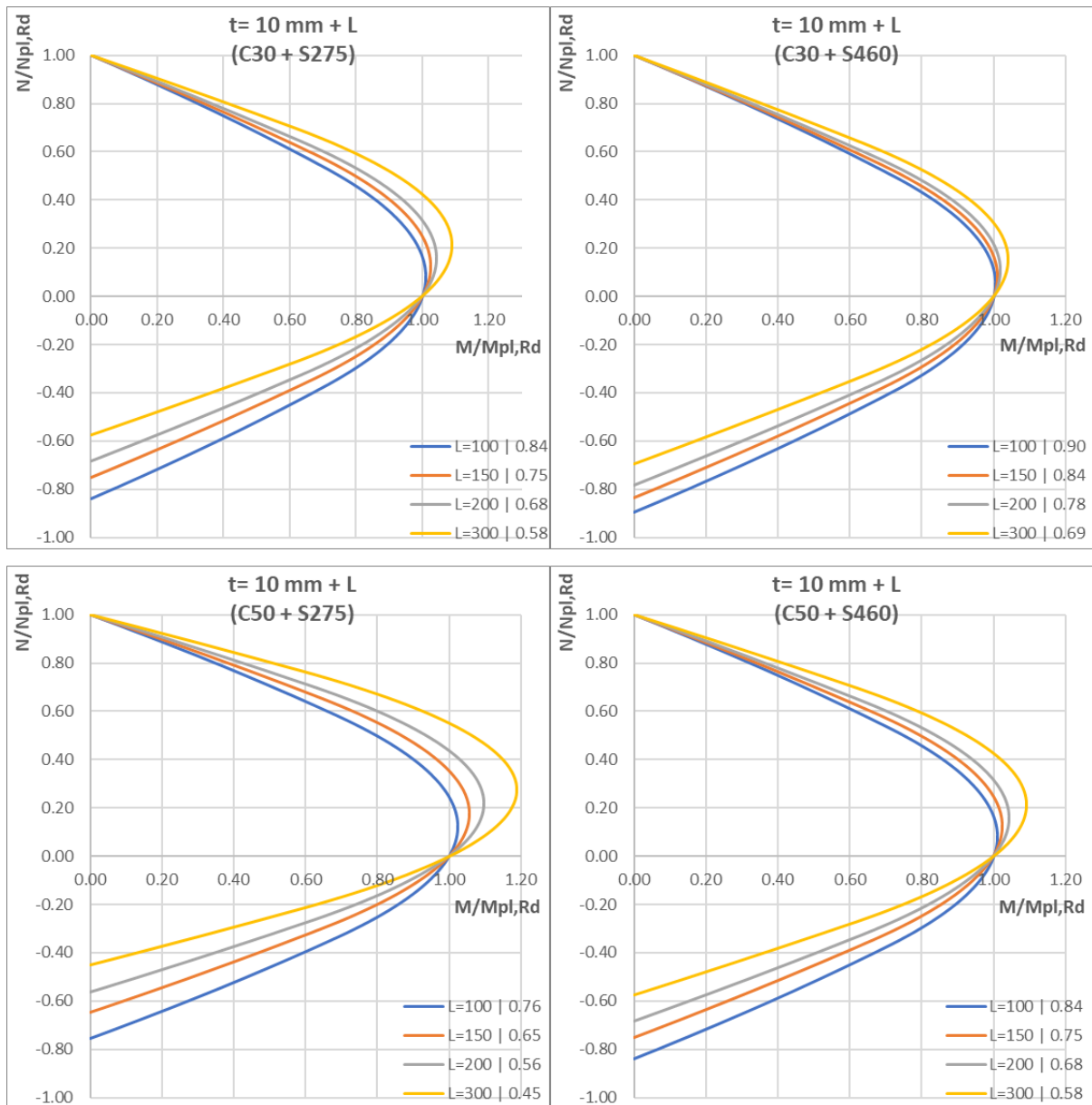


Gráficos 4.11 - Variação da espessura para uma largura de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Por último, segue-se o estudo da variação da largura da secção quadrada. Estes testes, à semelhança da secção circular foram realizados para as mesmas combinações aço e betão e para uma espessura de 5 milímetros e de 10 milímetros. Os resultados são apresentados nos Gráficos 4.12 e 4.13.



Gráficos 4.12 - Variação da largura para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



Gráficos 4.13 - Variação da largura para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

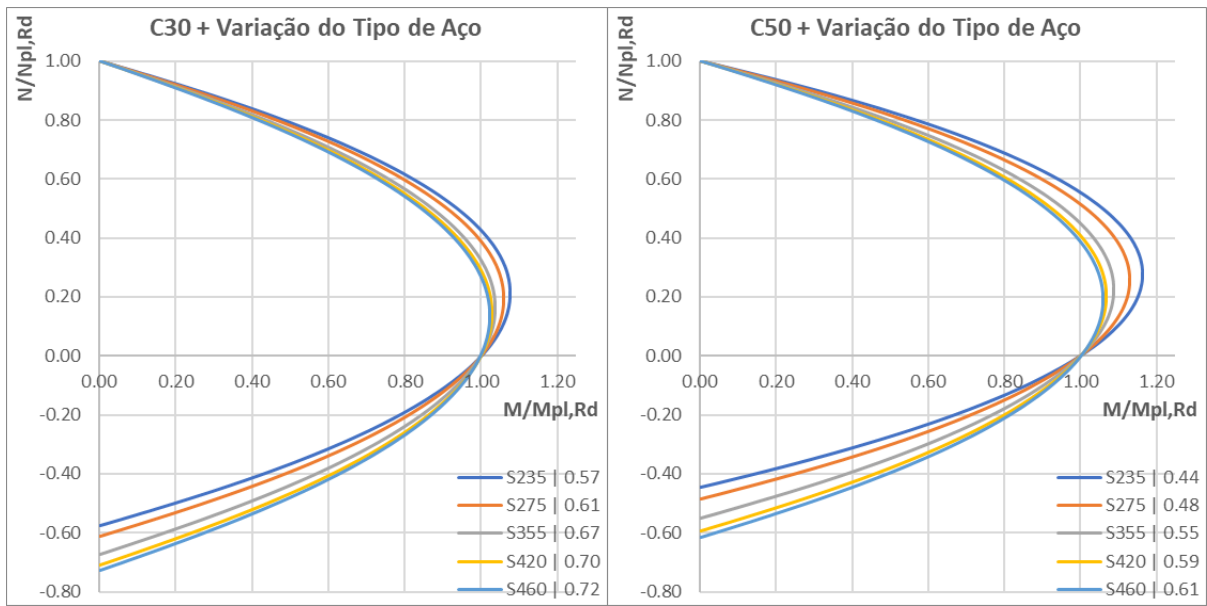
4.3 Secção Elíptica

Depois de analisadas as secções bi-simétricas, seguem-se as secções mono-simétricas, começando-se pela secção elíptica.

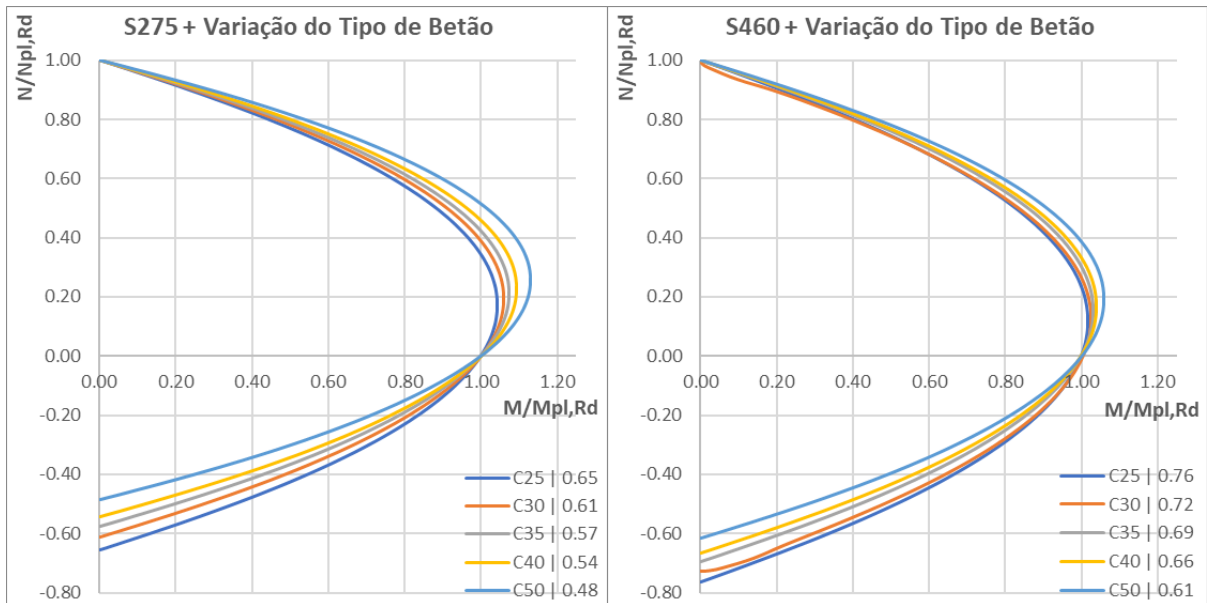
Como já foi referido, os estudos são os mesmos que os realizados para as outras secções e todos são realizados para uma relação D_{Maior}/D_{Menor} (D/d) igual a 2, à exceção do estudo em que são estudadas outras relações. A curva de interação é sempre calculada segundo o eixo de maior inércia.

Os estudos de variação dos materiais são realizados sempre para uma secção transversal com um diâmetro maior e uma espessura de 200 e 5 milímetros, respetivamente.

Os resultados obtidos para a variação dos materiais apresentam-se nos Gráficos 4.14 e 4.15.

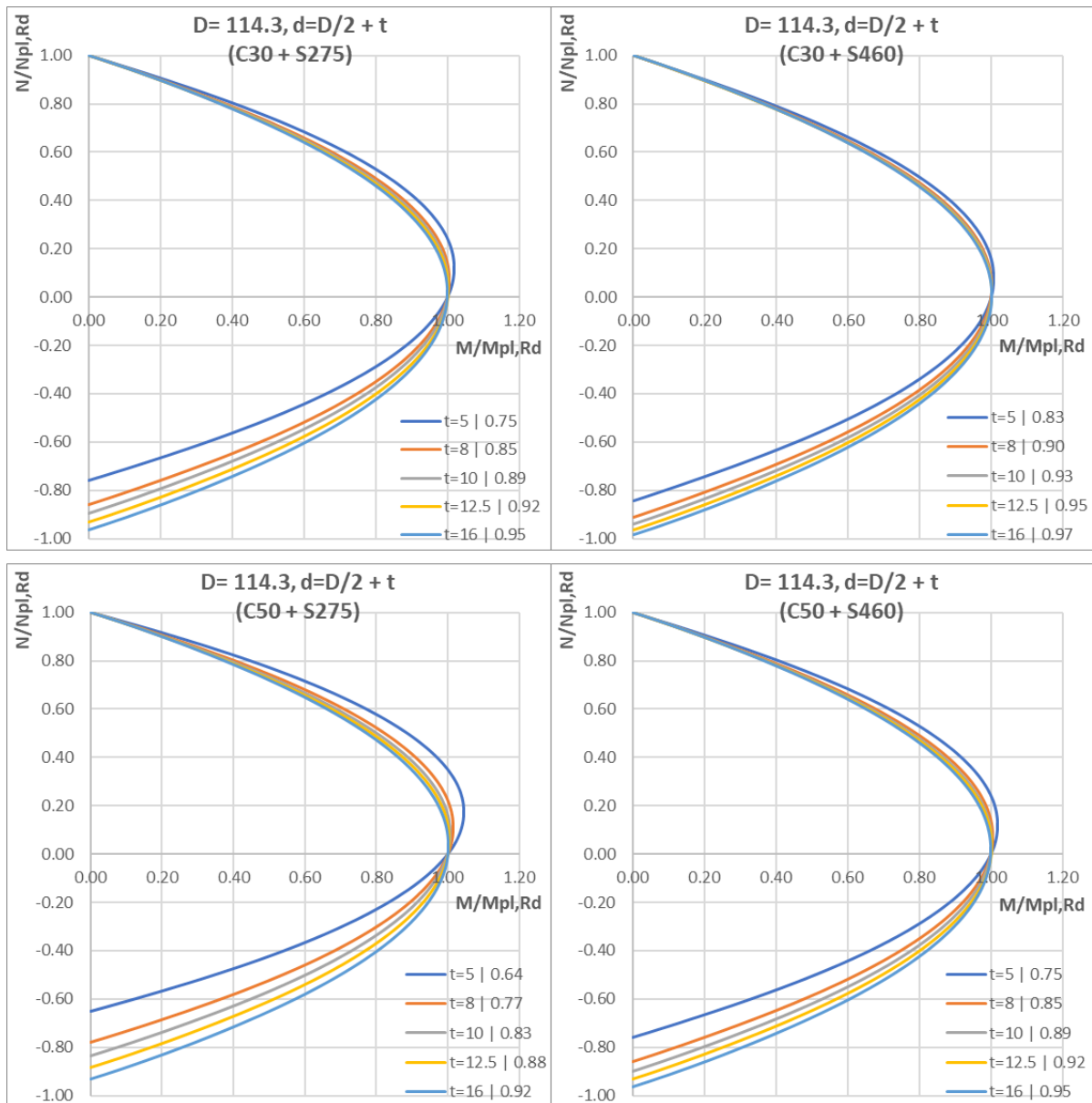


Gráficos 4.14 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.



Gráficos 4.15 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.

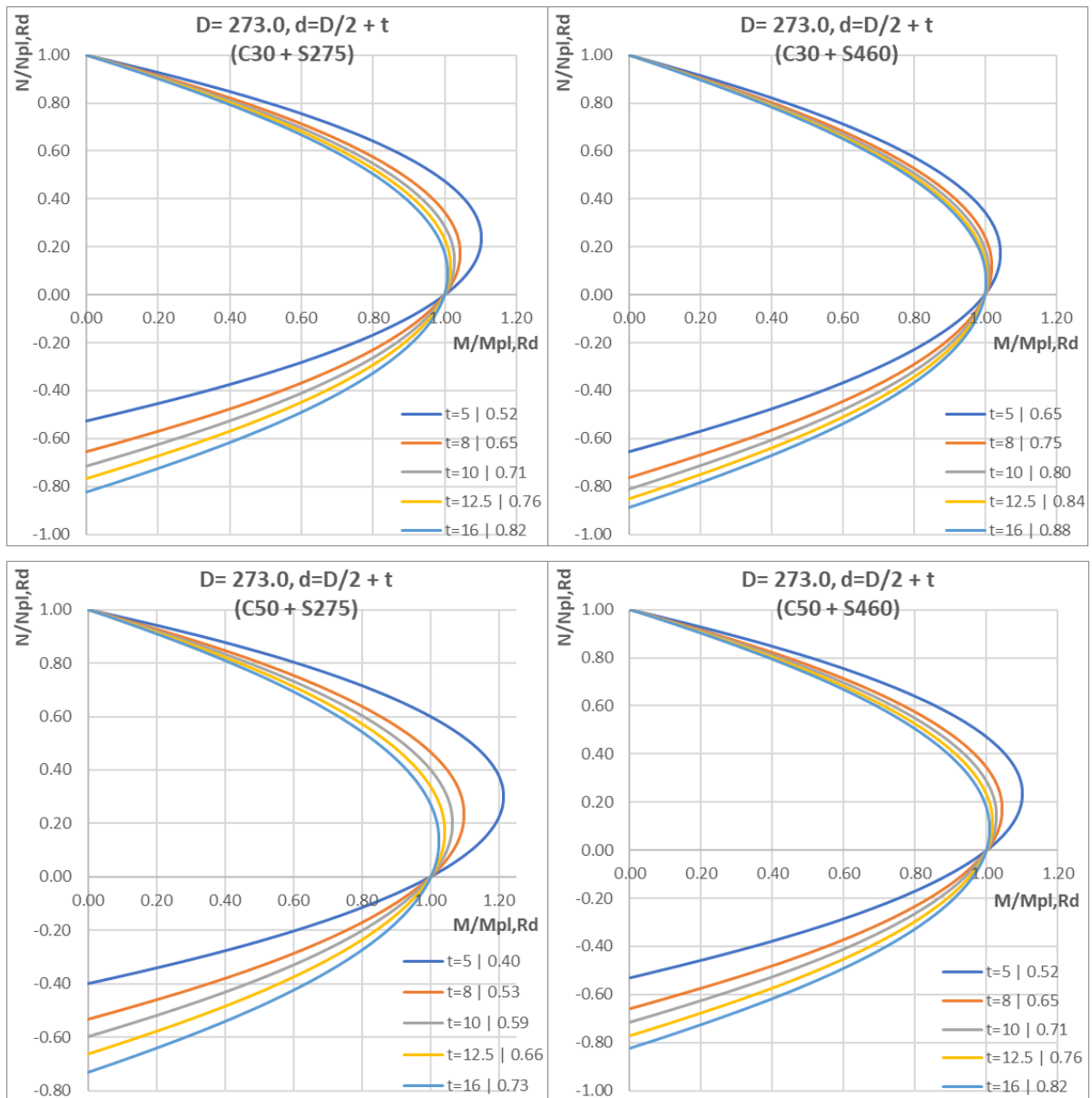
Seguem-se os estudos de variação das propriedades geométricas da secção, começando pela variação da espessura para o diâmetro maior de 114.3 milímetros (Gráficos 4.16).



Gráficos 4.16 - Variação da espessura para um diâmetro maior de 114.3 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

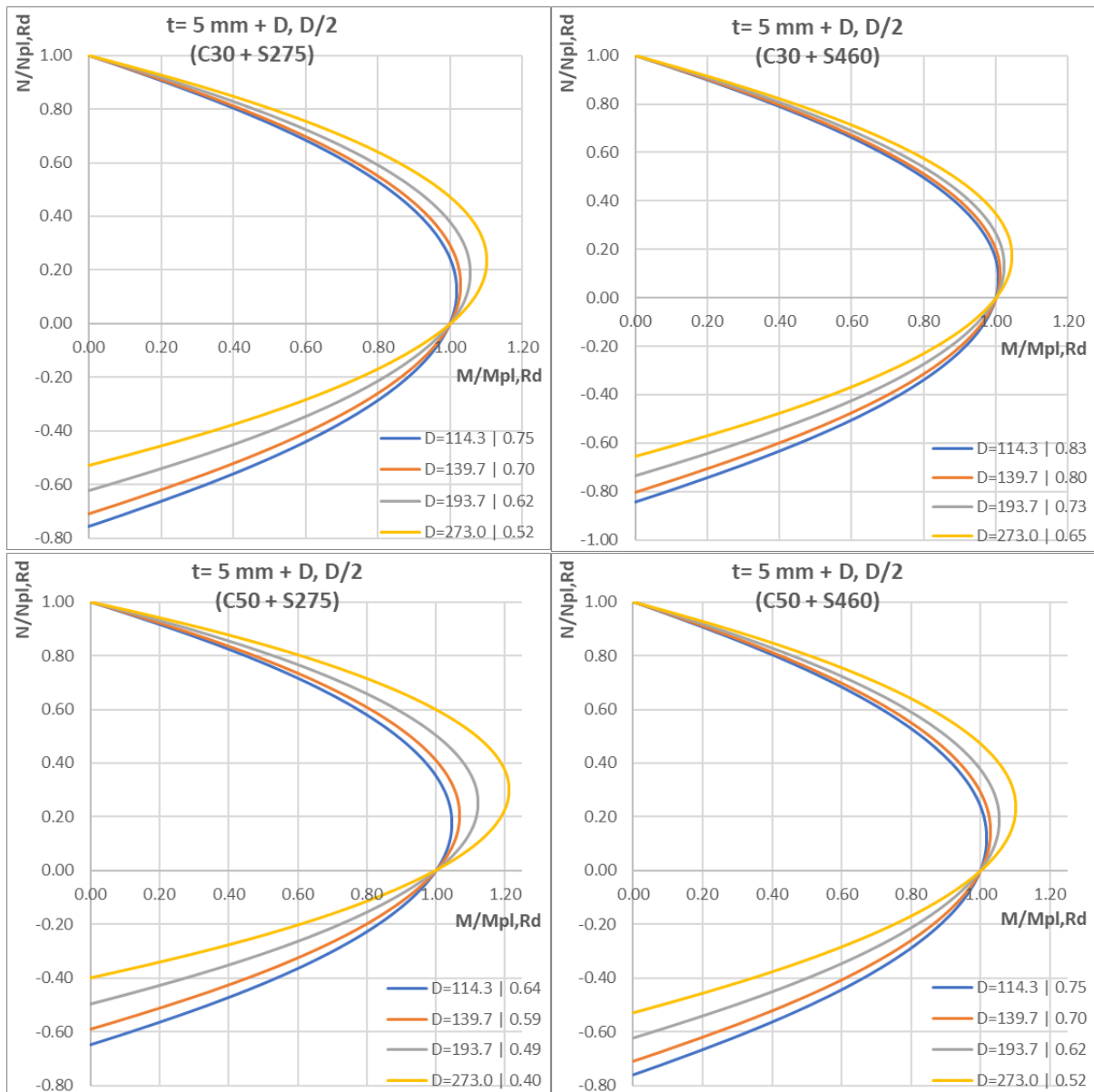
No caso da secção elíptica, uma vez que para o mesmo diâmetro, a área de betão é sempre inferior ao de uma secção circular, observa-se que o parâmetro δ é superior a 0.9 logo na combinação C30 e S275, o que significa que as secções com uma espessura de 12.5 e 16 milímetros já não representam uma secção mista. Na combinação C30 + S460, dado que o aço ainda tem maior resistência, verifica-se logo a partir da espessura de 8 milímetros.

Aumentando o diâmetro para 273 milímetros, δ mantém-se sempre abaixo de 0.9, como se pode observar nos Gráficos 4.17:

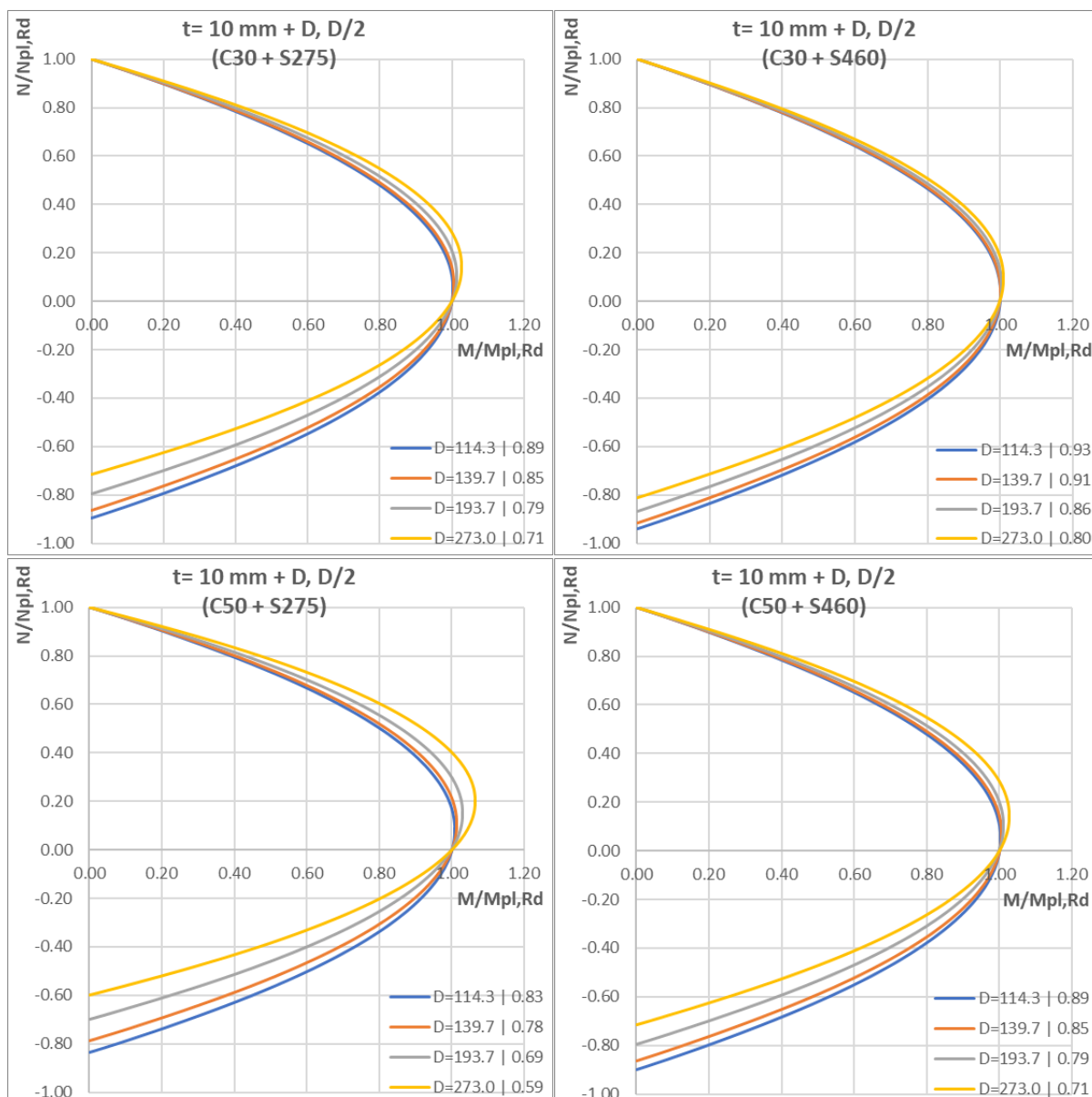


Gráficos 4.17 - Variação da espessura para um diâmetro maior de 273.0 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Segue-se o estudo da variação do diâmetro maior da elipse, mantendo-se o diâmetro menor sempre metade do maior. Neste estudo, foram utilizadas espessuras de 5 e 10 milímetros e os resultados obtidos são apresentados nos Gráficos 4.18 e 4.19.



Gráficos 4.18 - Variação do diâmetro para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



Gráficos 4.19 - Variação do diâmetro para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Neste estudo observa-se que para a combinação materiais de C30 + S460 e uma espessura de 10 milímetros, quando se está na presença de um diâmetro maior de 114.3 e 193.7 milímetros, δ é superior a 0.91.

Como referido em 3.4., para esta secção realizam-se ainda outros estudos. Num deles, o objetivo é estudar a variação da curva de interação quando se varia a relação D_{Maior}/D_{Menor} (D/d) e no outro teste estuda-se o andamento da curva quando calculada segundo o eixo vertical ou horizontal. Sendo assim, apresentam-se, nos Gráficos 4.20 e 4.21, os resultados para ambos os estudos:

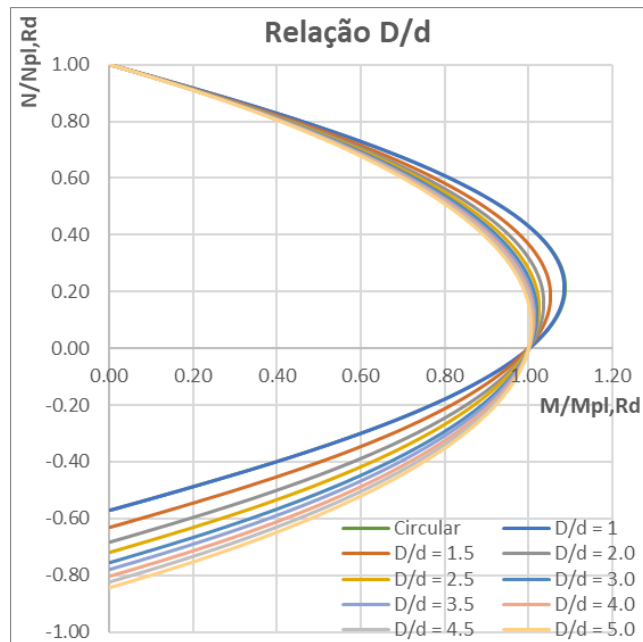


Gráfico 4.20 - Variação da relação D/d na secção elíptica.

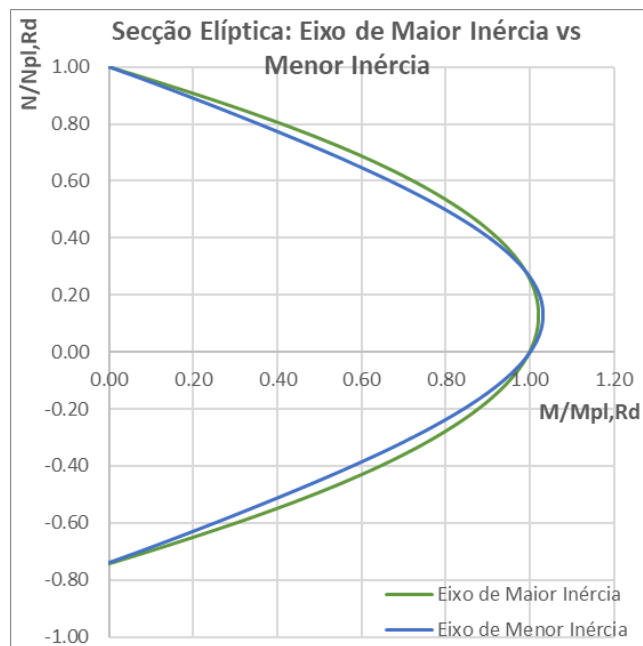
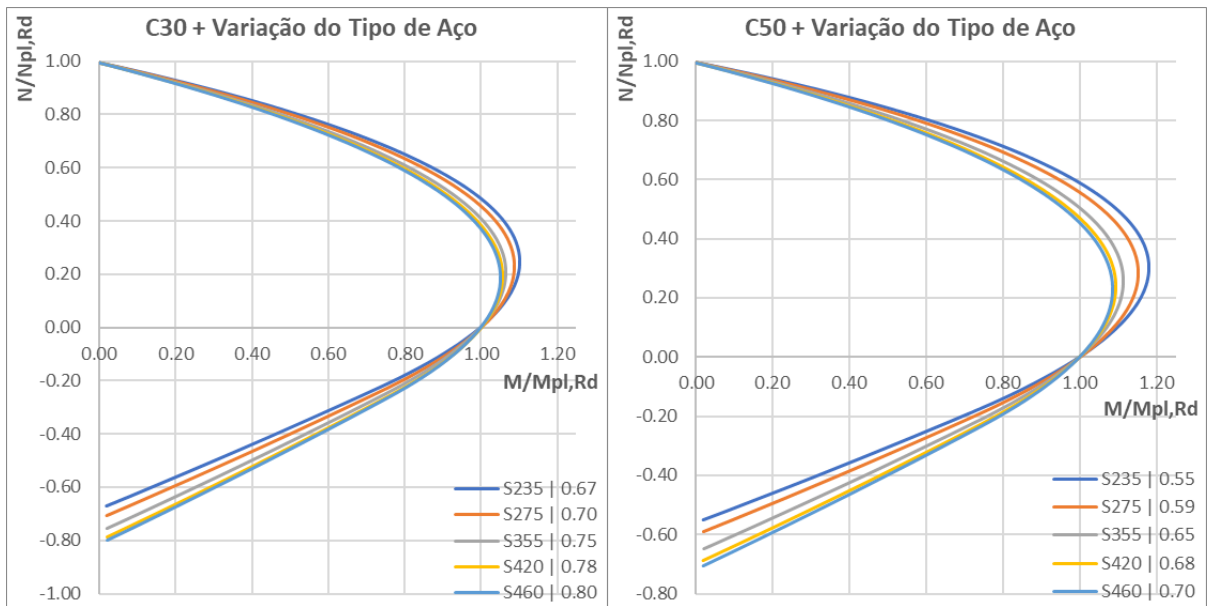


Gráfico 4.21 - Curva de interação da secção elíptica calculada segundo o eixo de maior e menor inércia.

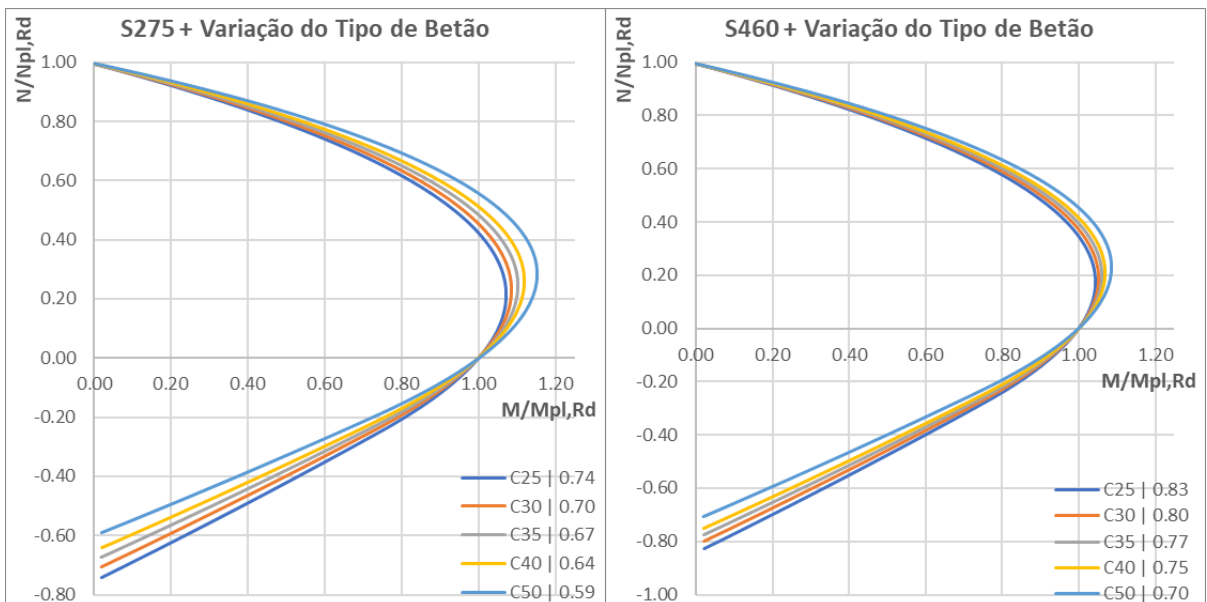
4.4 Secção Triangular Isósceles

Em seguida analisa-se a secção triangular isósceles, na qual em todos os estudos a dimensão da base do triângulo é sempre igual à altura do mesmo.

No estudo dos materiais usa-se sempre 150 milímetros para a base e altura do triângulo e 5 milímetros para a espessura (Gráficos 4.22 e 4.23).

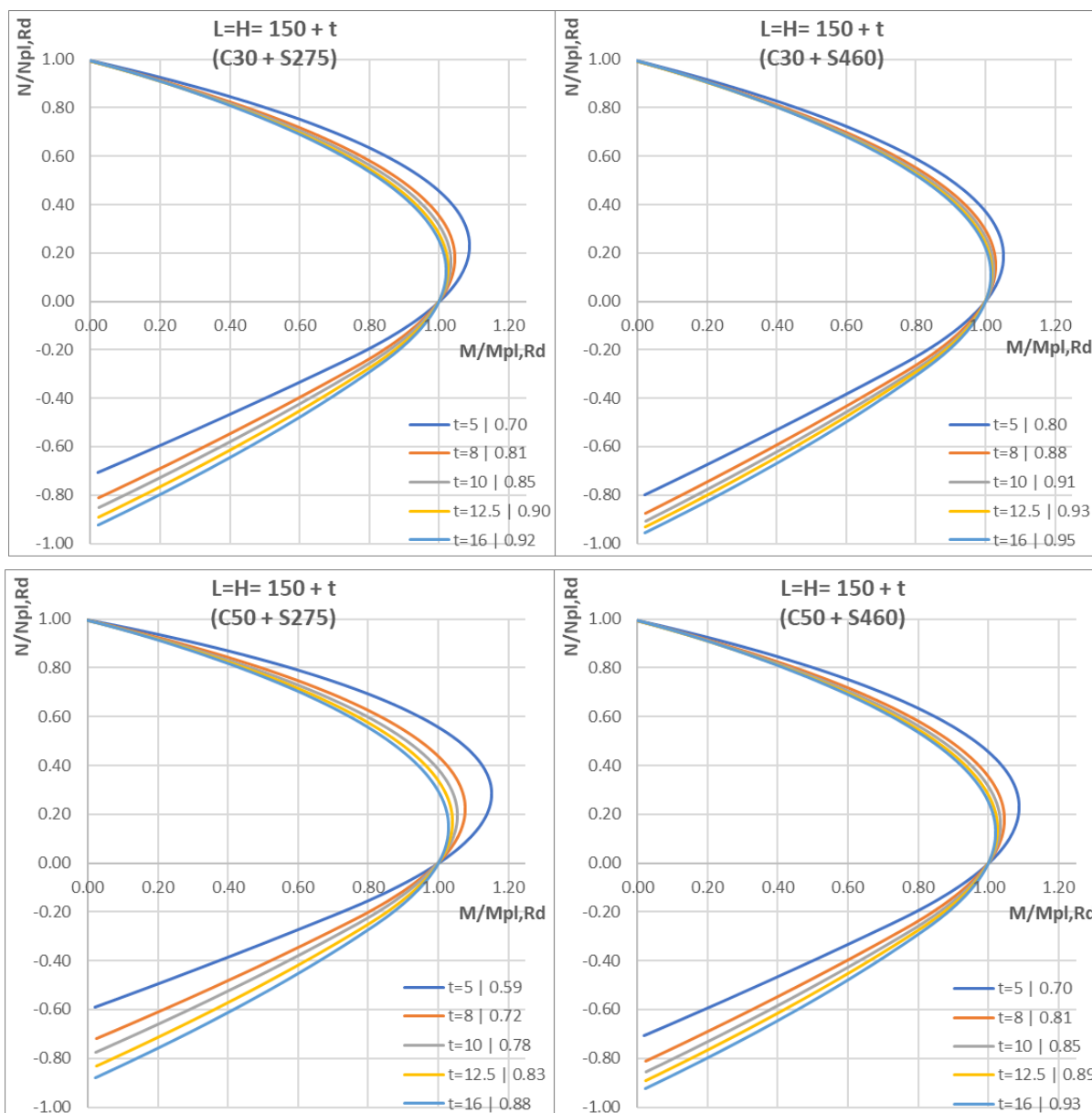


Gráficos 4.22 - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.

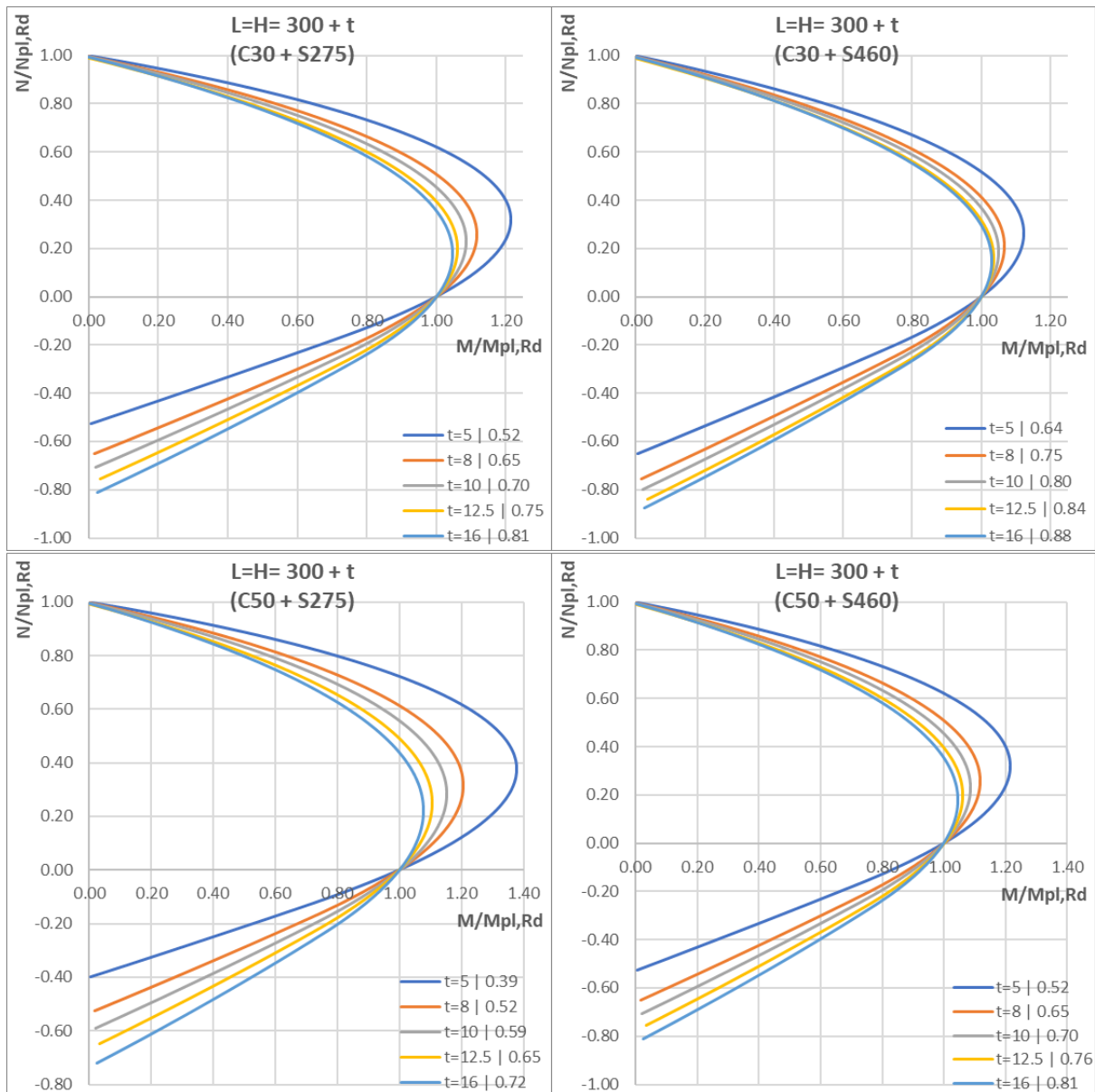


Gráficos 4.23 - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.

De seguida, tal como na secção quadrada, seguem-se os testes da variação da espessura para uma base e altura de 150 e depois de 300 milímetros. Os resultados são apresentados nos Gráficos 4.24 e 4.25.



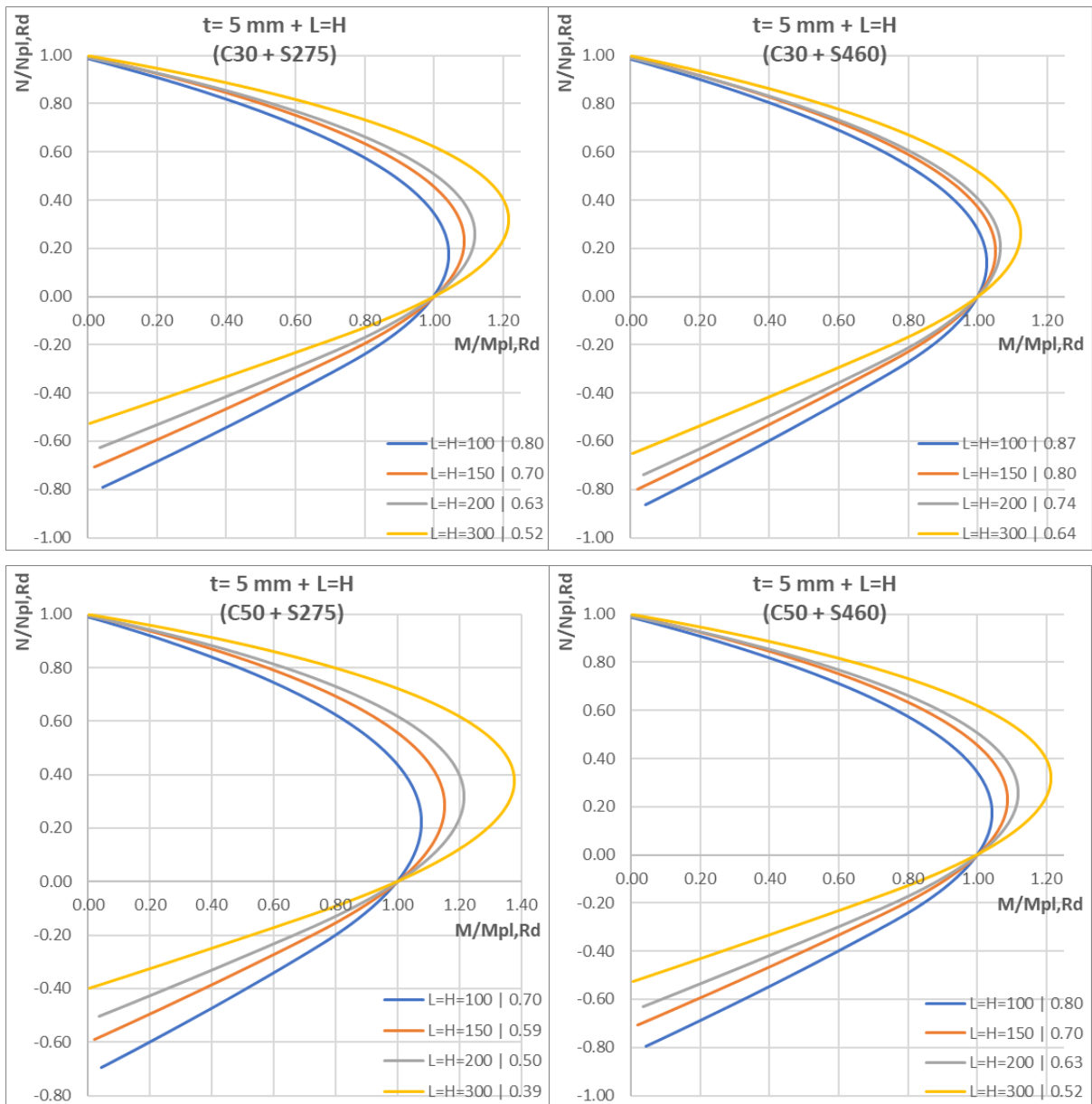
Gráficos 4.24 - Variação da espessura para uma base e altura de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



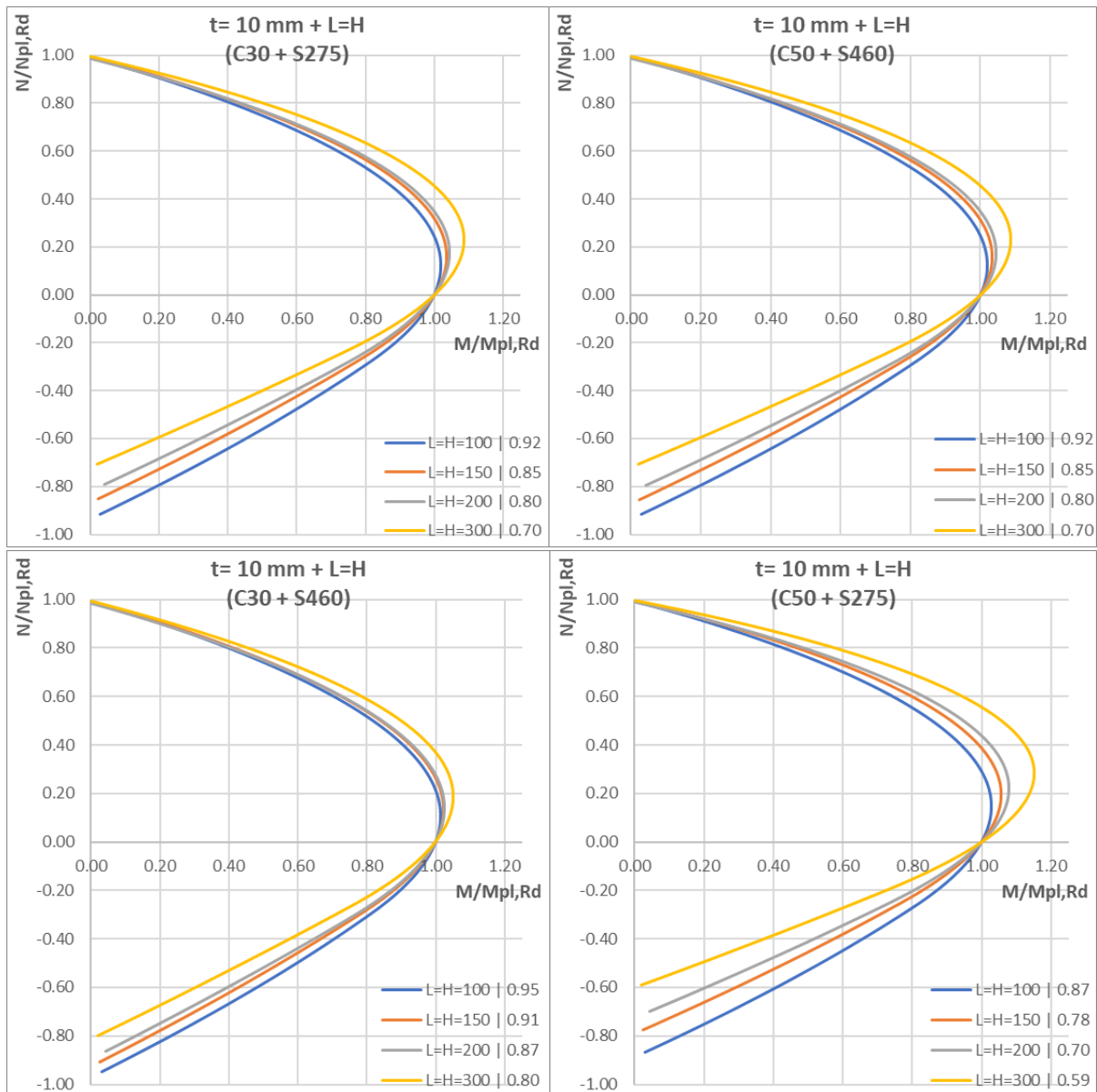
Gráficos 4.25 - Variação da espessura para uma base e altura de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Nos gráficos 4.25 observa-se que para uma base e altura de 150 milímetros, δ encontra-se acima de 0.9 para alguns valores de t . A única combinação em que não se verifica é na combinação C50 + S275.

Por último segue-se o estudo da variação da base e altura da secção triangular, apresentado nos Gráficos 4.26 e 4.27.



Gráficos 4.26 - Variação da base e altura do triângulo para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



Gráficos 4.27 - Variação da base e altura do triângulo para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Tal como acontece no estudo anterior, neste estudo é também possível encontrar valores de δ acima de 0.9 quando se aumenta a espessura para 10 milímetros para uma base do triângulo com valores mais baixos (100 ou 150 milímetros).

Por fim é realizado o teste de comparação do andamento da curva quando calculada segundo o eixo de maior e menor inércia. Este teste apenas foi realizado para uma das secções triangulares e a escolhida foi a isósceles, pelo que o resultado se apresenta no Gráfico 4.28:

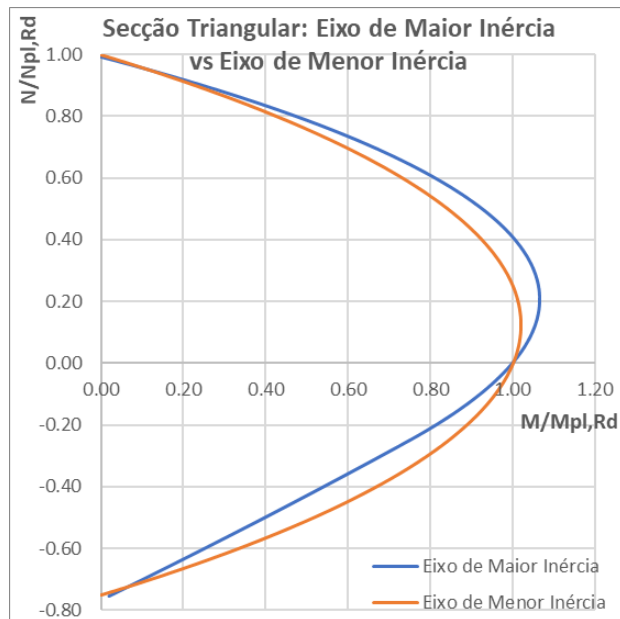


Gráfico 4.28 - Curva de interação da secção triangular calculada segundo o eixo de maior e menor inércia.

Os estudos realizados para a secção triangular equilátera podem-se encontrar no Anexo A.

4.5 Comparação entre secções diferentes

Depois de apresentados os estudos realizados para cada uma das secções individualmente, seguem-se os estudos realizados entre as várias secções, referidos em 3.4.

Inicia-se pelo estudo com a combinação de betão e aço C30 e S355, espessura de 5 milímetros e diâmetro ou largura da secção de 150 milímetros (Gráfico 4.35).

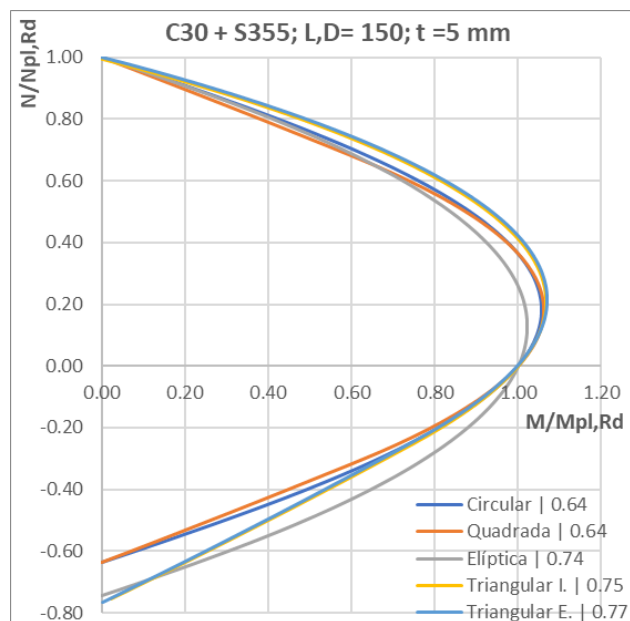


Gráfico 4.29 - Comparação entre as várias secções com as mesmas propriedades e diâmetro/largura de 150 mm.

Segue-se o mesmo estudo, mas aumentando o diâmetro ou a largura de cada secção para 250 milímetros (Gráfico 4.36).

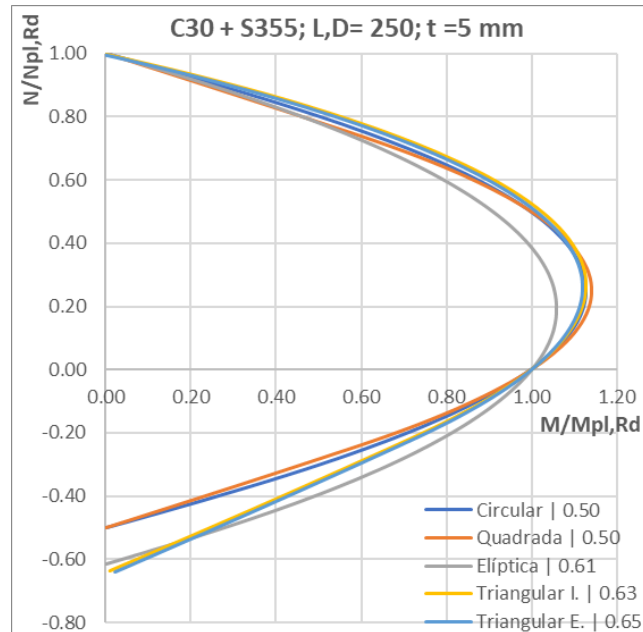


Gráfico 4.30 - Comparação entre as várias secções com as mesmas propriedades e diâmetro/largura de 250 mm.

Por último, realiza-se outro estudo em que se mantém o valor do parâmetro δ constante, independentemente dos valores das outras propriedades da secção. Os resultados apresentam-se no Gráfico 4.31:

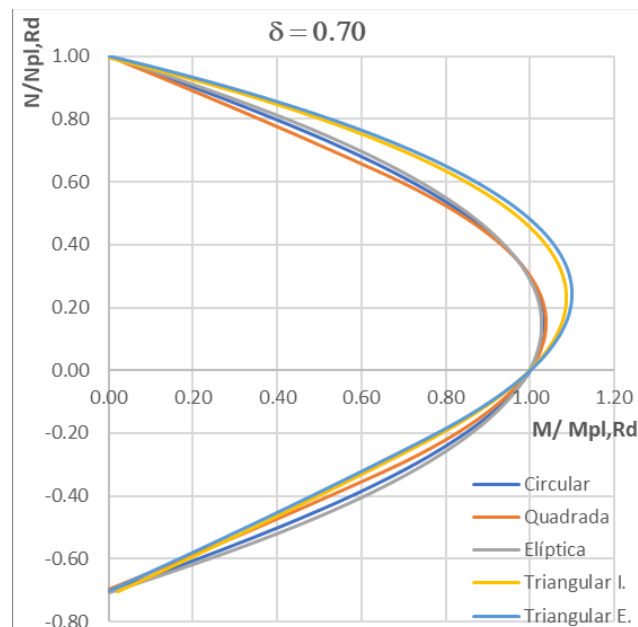


Gráfico 4.31 - Teste entre as várias secções com o mesmo valor de $\delta = 0.70$.

4.6 Análise dos resultados obtidos

Por fim, uma vez apresentados todos os resultados dos estudos realizados, segue-se a análise dos mesmos. A ordem de análise dos resultados será a mesma da ordem em que estes foram

apresentados. Inicia-se pelos estudos da variação da resistência dos materiais em cada secção, seguem-se os estudos da variação das propriedades geométricas e por fim, a análise dos estudos de comparação entre secções diferentes.

Os estudos da variação da resistência dos materiais e da resistência das propriedades geométricas vão ser descritos de forma geral para todas as cinco secções, uma vez que os resultados observados são gerais a todas as secções.

4.6.1 Variação da resistência dos materiais

Ao analisar os estudos de variação dos materiais realizados em cada secção, e no que diz respeito à variação da resistência do aço, é possível tirar as seguintes conclusões:

- Para um betão de resistência C30: à medida que a resistência do aço aumenta de S235 até S460, observa-se que a curva de interação vai baixando. Isto acontece porque, ao aumentar a resistência do aço e mantendo a resistência de betão e as propriedades geométricas constantes, a contribuição do aço na secção para a resistência total vai aumentar, logo o comportamento da secção tende a aproximar-se de uma secção só de aço;
- Para um betão de resistência C50: ao aumentar a resistência do betão para C50, observa-se que a evolução do andamento da curva é semelhante ao observado para o betão C30. No entanto, neste caso, a curva não desce tanto e apresenta um alongamento maior no eixo do Momento. Isto acontece, porque apesar da resistência do aço aumentar, o betão apresenta sempre uma resistência elevada, logo o aumento progressivo da resistência do aço não é tão notório como para um betão C30, isto é, o valor de δ nunca atinge valores consideráveis.

De seguida, analisa-se a variação da resistência do betão para um aço S275 e S460:

- Para um aço S275: para este tipo de aço, ao aumentar progressivamente a resistência do betão de C25 a C50, observa-se que, uma vez que a contribuição do betão aumenta (δ diminui), a curva de interação sobe;
- Para um aço S460: para um aço de resistência maior, o fenómeno que se observa é o mesmo, mas com menos notoriedade, dado que o aço apresenta uma resistência mais elevada e conseqüentemente, o valor de δ não diminui de forma tão acentuada como se verifica para o S275;

4.6.2 Variação das propriedades geométricas

Da análise dos estudos da variação das propriedades geométricas das várias secções, é possível tirar as seguintes conclusões para cada um dos testes realizados:

- Variação da espessura para um diâmetro de 114.3 milímetros (secção circular e elíptica) ou largura de 150 milímetros (secção quadrada e triangulares): à medida que a espessura aumenta (de 5 até 16 milímetros), a curva de interação tende a descer, isto acontece porque como o diâmetro ou a largura têm dimensões reduzidas, ao aumentar

a espessura, a área de aço aumenta consideravelmente em relação à área de betão, logo δ aumenta e a curva desce, aproximando-se do comportamento de uma secção apenas de aço;

- Variação da espessura para um diâmetro de 273 milímetros (secção circular e elíptica) ou largura de 300 milímetros (secção quadrada e triangulares): ao fazer variar os mesmos valores da espessura, mas desta vez para uma área de betão maior, o que se verifica é que a curva desce, no entanto, não é uma descida tão notória, devido à área de betão ser mais significativa, ou seja, o parâmetro δ não aumenta de forma tão notória como no caso anterior, porque δ já é naturalmente mais baixo (devido à maior área base de betão).

Depois de analisado o comportamento das curvas quando se varia a espessura das secções, analisa-se as mesmas quando se varia o diâmetro:

- Variação do diâmetro ou da largura para uma espessura de 5 milímetros: para uma espessura de 5 milímetros, à medida que se aumenta o diâmetro ou a largura da secção, o que se observa é que a curva de interação tende a subir, uma vez que a área de betão aumenta consideravelmente em relação à área de aço (δ diminui);
- Variação do diâmetro ou da largura para uma espessura de 10 milímetros: fazendo o mesmo teste, mas para uma espessura maior ($t = 10$ mm), o que se verifica de um teste para o outro é que a contribuição do aço está a aumentar (δ aumenta neste teste, comparativamente ao anterior). Sendo assim, o que se observa é que ao aumentar o diâmetro ou a largura, a curva tem na mesma tendência a subir, no entanto, não é tão notório como no teste anterior, porque o δ já é naturalmente mais elevado (devido à espessura maior).

Além dos estudos referidos, no caso particular da secção elíptica foi realizado outro teste com o objetivo de analisar o andamento da curva consoante a relação D_{Maior}/D_{Menor} (D/d), ou seja, como a curva varia caso a elipse seja mais ou menos achatada. Pelos resultados obtidos, concluiu-se que ao aumentar a relação D/d , a resistência da secção diminui, devido à diminuição da área de betão, e consequentemente a curva tende a baixar. À medida que a relação aumenta, δ aumenta também, porque a contribuição do aço torna-se mais significativa.

4.6.3 Comparação entre a curva de interação calculada segundo o eixo de maior e menor inércia

Na secção elíptica e nas secções triangulares foi realizado ainda mais um teste. Uma vez que estas secções são mono-simétricas, o objetivo é analisar o andamento da curva quando esta é calculada segundo o eixo de maior e menor inércia de cada uma da secção (eixos indicados na Figura 3.37).

No que diz respeito à secção elíptica, as diferenças encontradas entre o traçado segundo o eixo de maior e menor inércia explicam-se porque quando a curva é calculada segundo o eixo de menor

inércia, a diminuição de resistência à medida que a linha neutra baixa é maior, porque o eixo de menor inércia corresponde ao diâmetro maior da elipse, logo a área segundo esse eixo é maior do que segundo o eixo de maior inércia. Sendo assim, como N diminui de forma mais acentuada, consequentemente, $N/N_{pl,Rd}$, também vai diminuir, o que se traduz no traçado da curva.

Em relação à secção triangular, observa-se que quando a curva é calculada segundo o eixo de maior inércia, é mais alongada no eixo do momento, o que significa que o momento máximo é maior. Isto acontece porque quando a posição da linha neutra coincide com o centro de rigidez, a área de betão à compressão que provoca momento continua a ser maior do que a área à tração, logo não se anulam as duas componentes. Ao contrário do que acontece quando o momento é calculado segundo o eixo de menor inércia, porque dada a simetria em relação a esse eixo, as áreas de betão à compressão e tração anulam-se, logo o momento é menor. Além disso, acontece também o mesmo que se verifica na secção elíptica, em que existe uma perda de resistência maior quando esta é calculada segundo o eixo de menor inércia.

4.6.4 Comparação entre secções diferentes

Em relação aos testes de comparação entre as diferentes secções é possível concluir o seguinte para cada um dos estudos realizados:

- Mesma combinação betão aço (C30 + S355), mesma espessura (5 milímetros) e mesmo diâmetro ou largura (150 milímetros): neste estudo observa-se que a secção elíptica é a que tem menor resistência, o que se justifica por ser aquela que tem menor área de aço e betão. O facto de as curvas das secções triangulares serem mais subidas no 1º quadrante, deve-se ao facto de terem uma diminuição de resistência muito baixa, porque a área de betão para as LN iniciais é baixa, logo $N/N_{pl,Rd}$ diminui de forma menos acentuada. A secção circular e a secção quadrada apresentam um andamento bastante semelhante, uma vez que são ambas bi-simétricas e para estas propriedades o valor de δ é igual a 0.64 em ambas;
- Mesmo estudo que o anterior, mas com um diâmetro/largura de 250 milímetros: as conclusões são iguais ao estudo anterior, mas neste caso, a diferença entre as curvas das secções triangulares com a quadrada e a circular, atenua-se. Uma vez que a área do betão aumenta consideravelmente, ao baixar a LN, a perda de resistência devido à diminuição da área de betão à compressão não é tão notória. À tração observa-se ainda que a curva das secções triangulares é mais baixa, porque tem um δ maior, explicado porque a contribuição do aço nestas secções é maior comparativamente à quadrada e circular;
- Valor de $\delta = 0.70$ em todas as secções, independentemente das restantes propriedades: neste teste o objetivo é verificar se o andamento da curva depende apenas de δ . Ao observar os resultados obtidos, verifica-se que as secções circular, quadrada e elíptica apresentam um andamento muito idêntico. Isto acontece, porque estas secções são todas simétricas em relação ao eixo segundo o qual o momento é

calculado. Sendo assim, a perda de resistência, acontece de maneira uniforme. No entanto, não se verifica com as secções triangulares, uma vez que estas não são simétricas segundo esse eixo, a perda de resistência vai aumentando gradualmente à medida que a LN vai descendo, sendo que no início é muito baixa devido às mesmas razões referidas para os outros testes.

5. Análise global da coluna mista

Uma vez estudadas as várias secções transversais, este capítulo tem como intuito fazer uma análise global de uma coluna mista. Recorreu-se a um programa de elementos finitos, com o objetivo de obter pares de esforços $M - N$ e comparar os mesmos com o a curva de interação obtida pelo programa de cálculo descrito no capítulo 3, de forma a analisar o comportamento global da coluna.

A metodologia adotada consiste em analisar seis colunas com alturas diferentes, todas com uma secção transversal circular. Em todas as colunas aplica-se um deslocamento de 5 milímetros na extremidade superior, sempre com a mesma excentricidade de 50 mm. Começa-se com uma coluna mista curta, com 500 milímetros, e aumenta-se sucessivamente a altura para 1000, 2000, 4000, 5000 e 8000 milímetros. O objetivo é em cada coluna obter o par de esforços $M - N$ com base nas tensões normais da coluna e analisar a influência do momento de segunda ordem, devido às imperfeições iniciais, com o aumento da altura.

5.1 Modelo numérico

O modelo numérico foi realizado no *software* de elementos finitos *ABAQUS* e as características da secção circular estudada são as seguintes:

Circular	
D (mm)	150
t (mm)	2.5
fcd (MPa)	30
fyd (MPa)	355

Tabela 5.5 - Características das secções das colunas analisadas.

No que se refere à modelação da coluna, começou-se pela modelação dos materiais (aço e betão) usados em cada coluna, sendo cada um dos elementos modelados como um elemento sólido (*Three-dimensional 8-node Solid Element - C3D8*).

Em relação ao aço, foi usado um S355, que tem um módulo de elasticidade, E , de 210 GPa, um coeficiente de *Poisson*, ν , de 0.3. A relação constitutiva introduzida no *software* foi obtida com recurso ao programa desenvolvido por Elkady [31] (Gráfico 5.32).

O betão usado foi o C30/37, definido com base no *Concrete Damage Plasticity* (CDP) disponível da biblioteca de materiais do próprio *ABAQUS*, com um módulo de elasticidade, E , de 30 GPa, um coeficiente de *Poisson*, ν , de 0.2. O tipo de betão foi introduzido no programa desenvolvido por Elkady [32] para se obter a relação constitutiva que se encontra representada no Gráfico 5.33.

Entre o aço e o betão da coluna a interação foi definida, na direção tangencial, como *penalty* com um coeficiente de atrito de 0.3 e um valor de τ_{Rd} de 0.55 MPa e na direção normal como *hard contact*.

No topo e na base de cada coluna foi usada uma placa (*plate*) de aço com o objetivo de garantir que o deslocamento introduzido no topo da coluna é transmitido de forma uniforme para os dois materiais e que as condições de apoio na base também se aplicam a ambos os materiais.

Entre a coluna e a placa de aço, a interação na direção tangencial foi definida, inicialmente, como *penalty* com um coeficiente de atrito de 0.05, no entanto ao introduzir a excentricidade na carga, em alguns casos, aconteceu que a placa se separava da coluna, pelo que, por essa razão, alterou-se a interação para *rough*, de forma que essa separação não se verificasse. Na direção normal a ligação foi definida como *hard contact*.

Em relação à dimensão da malha, definem-se várias dimensões, tendo em conta a altura da coluna que se está a analisar. Para colunas mais curtas, como é o caso da coluna de 500 milímetros, definiu-se uma malha com uma dimensão de 10 milímetros para o aço e de 9.5 mm para o betão. Para a coluna de 1000 e 2000 milímetros, aumentou-se a malha para 20 mm e 19.5 mm, respetivamente para o aço e betão. No caso das colunas maiores, de 4000, 5000 e 8000 milímetros, a malha usada foi de 30 mm para o aço e 29.5 mm para o betão. Depois de vários estudos realizados, as dimensões referidas são consideradas as ideais, uma vez o tempo de obtenção dos resultados é de aproximadamente uma hora, mesmo para os testes em que se usa uma malha maior.

Importa também referir que, uma vez que o aço foi modelado como sólido (C3D8) e como a espessura do tubo é relativamente pequena em comparação com outros elementos, dividiu-se a espessura do mesmo em duas camadas (Figura 5.38), seguindo a recomendação de Dai e Lam [33].

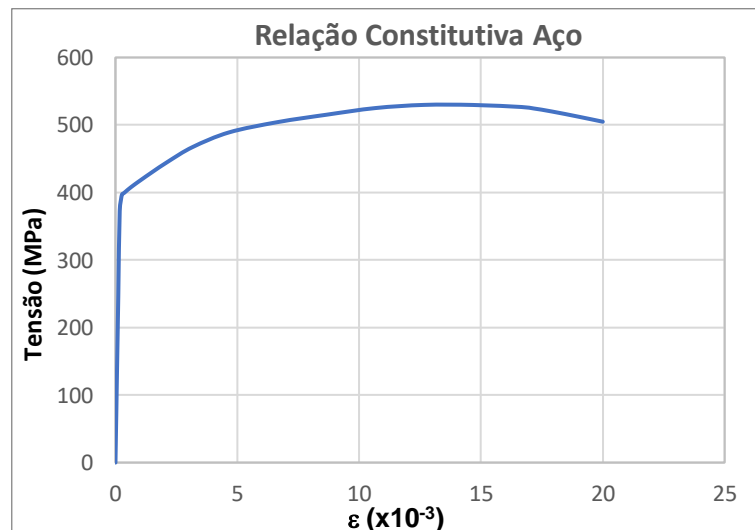


Gráfico 5.32 - Relação constitutiva usada para o aço.

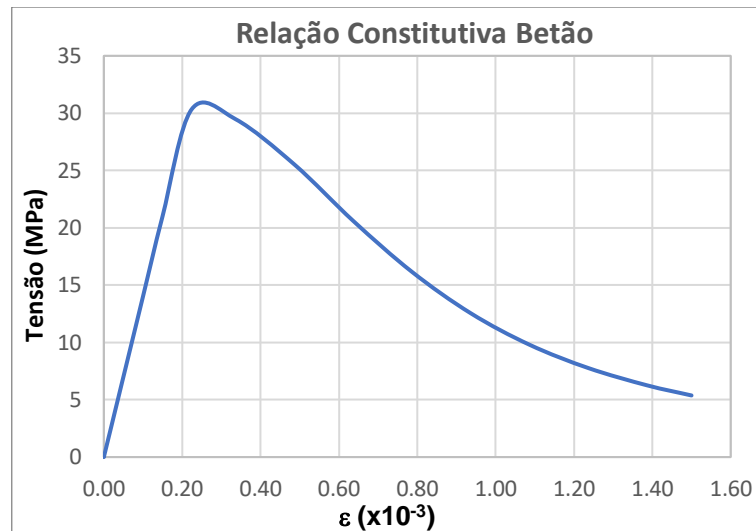


Gráfico 5.33 - Relação constitutiva usada para o betão.

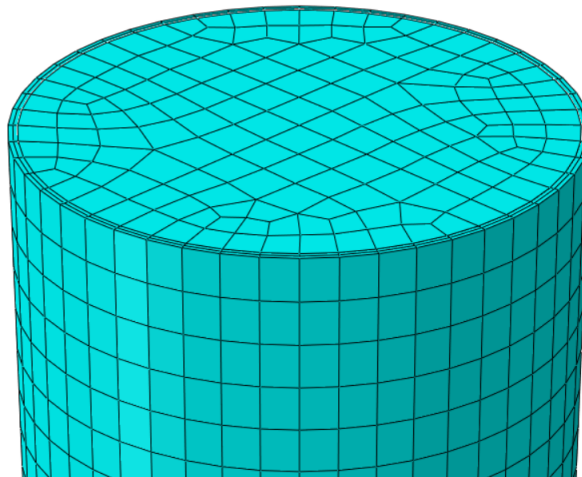


Figura 5.38 - Definição da malha do modelo numérico da coluna mista com secção circular.

5.2 Testes numéricos realizados

Após descrito como foi realizada a modelação numérica da coluna mista aço-betão no *software ABAQUS*, segue-se a descrição dos estudos realizados para obter os pares de esforços $M - N$ necessários.

Em primeiro lugar estudou-se uma coluna com altura de 500 milímetros para melhor visualização dos resultados, apenas sujeita a esforço axial, com o objetivo de avaliar a encurvadura da mesma antes de se avançar para os testes pretendidos.

Aplicou-se um deslocamento na placa de topo da coluna, coincidente com o centro de gravidade da secção. O resultado obtido encontra-se na Figura 5.39. Importa referir que o fator de escala foi aumentado de 1 para 5, para que a deformação existente seja mais visível.

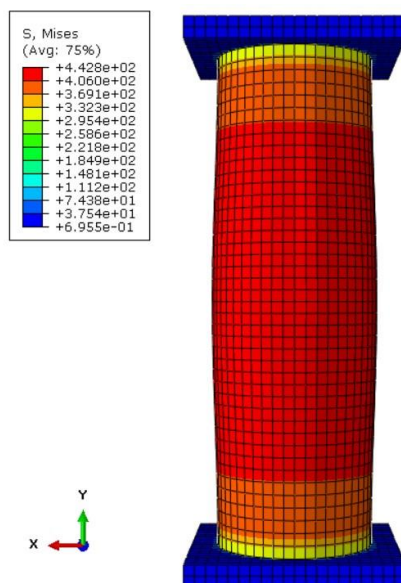


Figura 5.39 - Modo de rotura da coluna mista com secção circular (esquerda) e triangular (direita).

De seguida é então introduzida uma excentricidade de 50 milímetros na carga, de forma a introduzir momento na coluna. Ao introduzir momento na coluna vão existir partes da secção à tração e outras à compressão, às quais correspondem um par de esforços $N - M$.

Além da excentricidade introduz-se também uma imperfeição inicial na coluna, que varia consoante a altura da mesma. O valor introduzido no programa, segue a recomendação da tabela 6.5 do capítulo 6.7.3.6. do EC4, que no presente caso, de uma coluna do tipo tubular em aço, cheia de betão com uma secção transversal circular e sem armadura longitudinal, é de $L/300$ [2], no qual L corresponde à altura da coluna.

Nas Figuras 5.40 a 5.45, representam-se os vários estudos realizados para as várias alturas alvo de estudo. Em cada figura é possível observar os valores das tensões normais (S_{22}) ao longo da coluna, onde se consegue distinguir as zonas da secção que estão à tração e à compressão. Além das tensões normais, representa-se também os valores do deslocamento no eixo x (U_1).

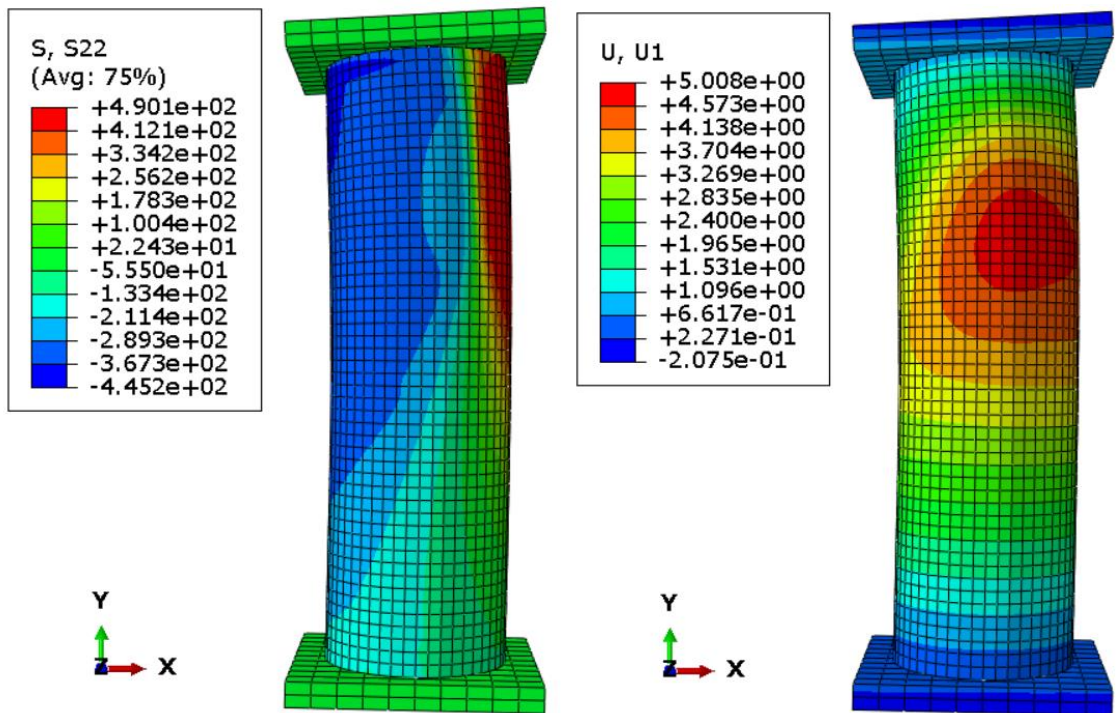


Figura 5.40 – Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 500 mm.

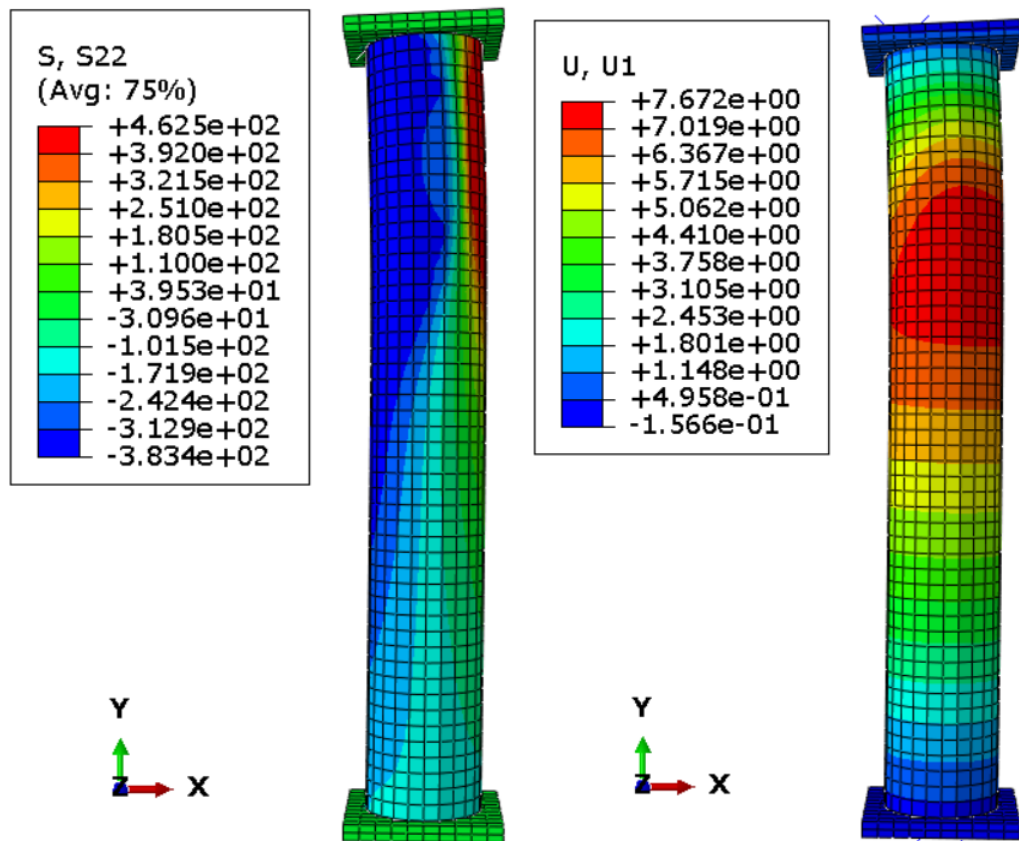


Figura 5.41 - Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 1000 mm.

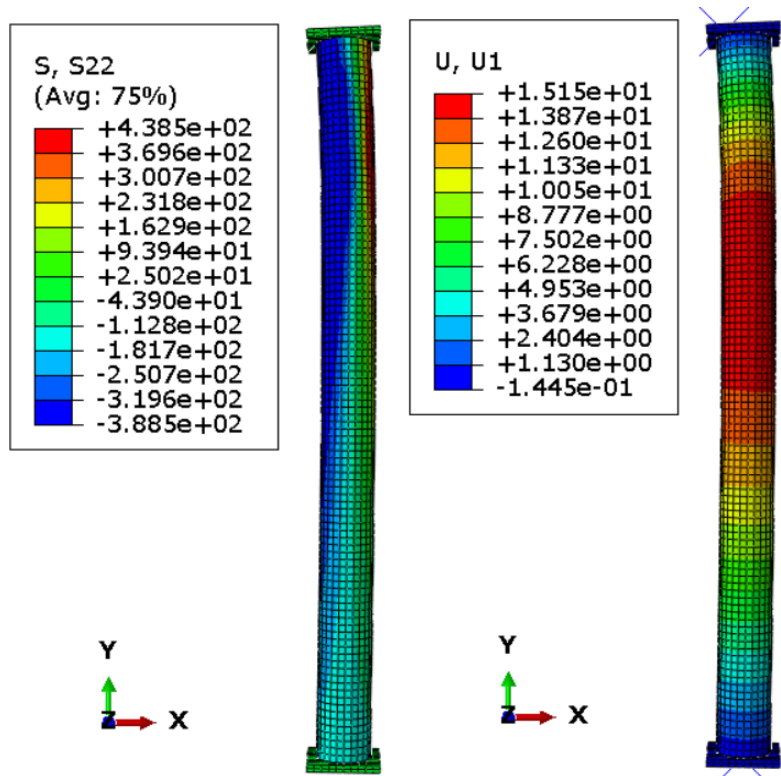


Figura 5.42 - Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 2000 mm.

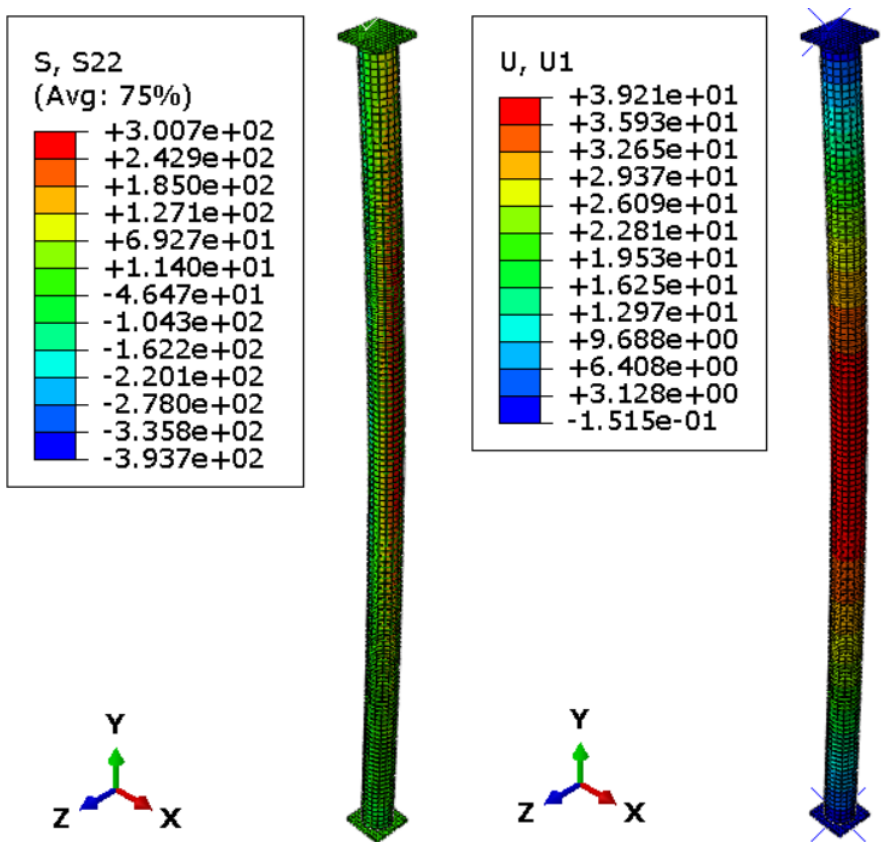


Figura 5.43 - Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 4000 mm.

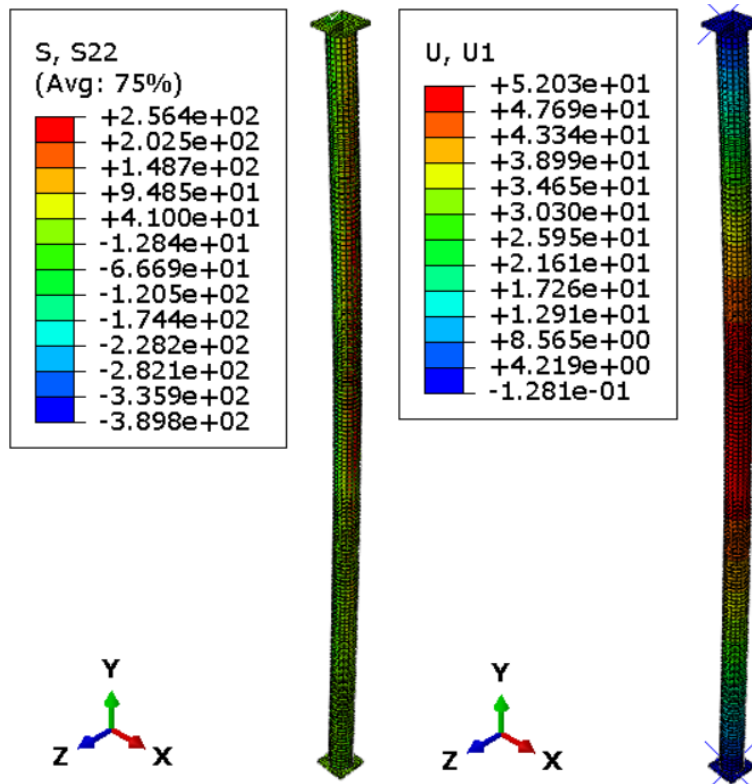


Figura 5.44 - Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 5000 mm.

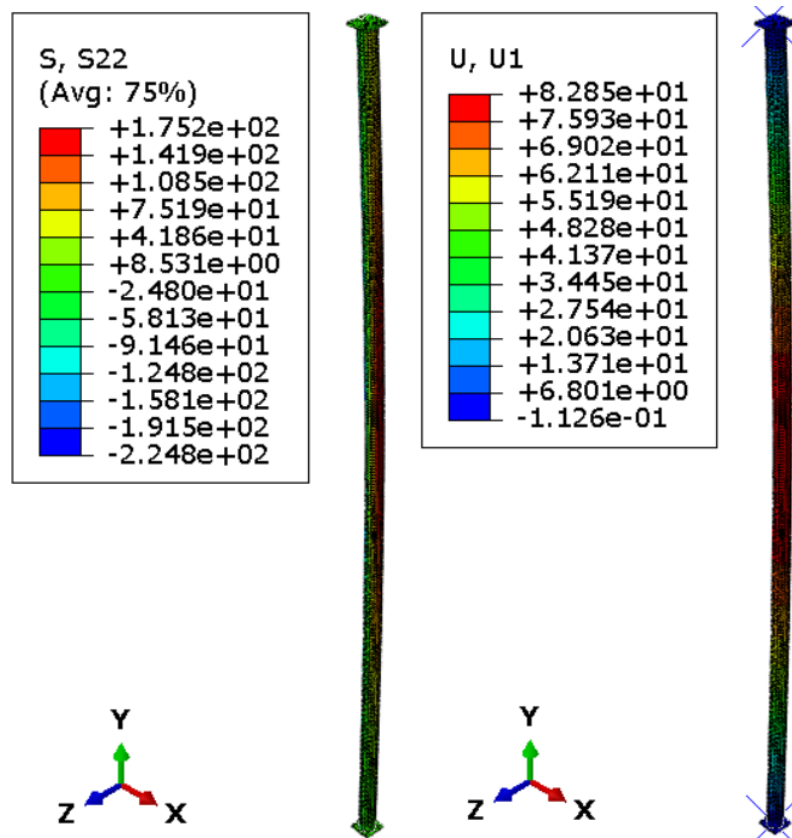


Figura 5.45 - Tensões S22 e deslocamento U1 obtidos, ao aplicar um deslocamento de 5 mm no topo da coluna com uma excentricidade e imperfeição inicial fixa, para uma coluna mista com secção circular e altura de 8000 mm.

Após obtidos os resultados dos vários estudos realizados, calculam-se, na secção 5.3 os vários pares de esforços $M - N$ para cada valor de deslocamento aplicado. A metodologia de cálculo para a obtenção dos mesmos, bem como os valores obtidos, serão indicados no capítulo seguinte.

5.3 Pares de esforços M-N e análise dos resultados

Depois de obtidos os resultados dos modelos para cada altura, segue-se assim o cálculo dos pares de esforços $M - N$.

Em primeiro lugar, realiza-se um corte em cada coluna, na secção onde os esforços são máximos para analisar as tensões normais (S_{22}) da secção transversal. Em seguida, para obter ao certo a posição da linha neutra, recorre-se à função *distance* do software.

A título de exemplo, em seguida, irá ser demonstrado a obtenção do par de esforços para a coluna mista com uma altura de 1000 milímetros. Assim sendo, na figura 5.46 é possível observar a distribuição de tensões normais para esta coluna. Ao analisar as tensões e as cores da legenda do programa, é possível distinguir a zona que está à tração e à compressão. Neste caso, a linha representada a preto na figura constitui a LN, sendo que à esquerda a secção está à compressão e à direita da linha, a secção encontra-se à tração. Assim sendo, a LN está a uma distância de aproximadamente 29.8 milímetros.

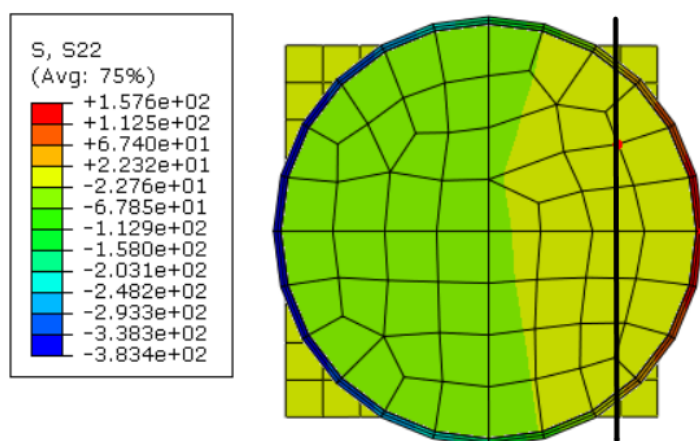


Figura 5.46 - Distribuição de tensões verticais para a coluna mista de secção circular e altura de 1000 mm.

Depois de obtida a posição da LN, é necessário calcular outras distâncias, indicadas na Figura 5.47, de forma a ser possível calcular a área à tração e à compressão da secção e consequentemente o valor do esforço axial e do momento fletor da secção.

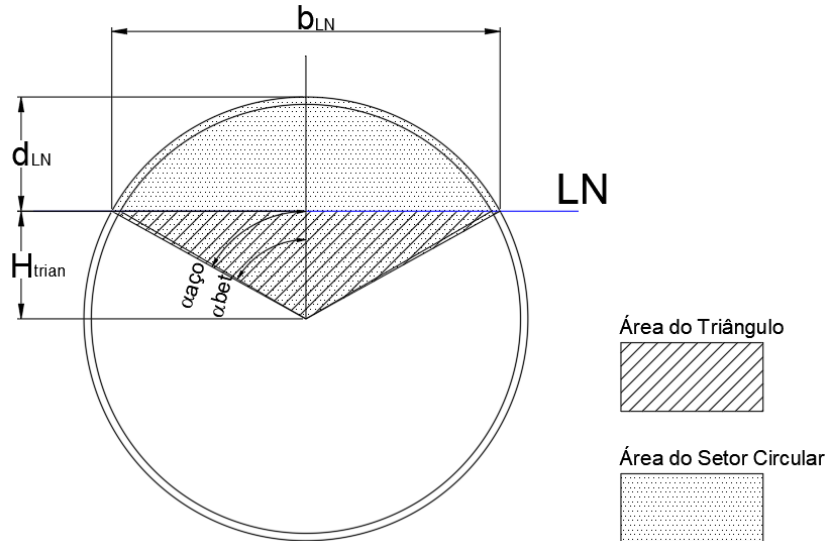


Figura 5.47 - Parâmetros necessários calcular para obter os pares de esforços N e M .

Os parâmetros indicados são obtidos através das seguintes expressões:

$$H_{trian} = R_{aço} - d_{LN} \quad (5.1)$$

$$b_{LN} = 2 \times \sqrt{R_{aço}^2 - H_{trian}^2} \quad (5.2)$$

$$\alpha_{aço} = \cos^{-1} \left(\frac{H_{trian}}{R_{aço}} \right) \quad (5.3)$$

$$\alpha_{betão} = \cos^{-1} \left(\frac{H_{trian}}{R_{betão}} \right) \quad (5.4)$$

Obtidos os parâmetros acima indicados, é assim possível calcular as áreas necessárias:

$$A_{tração,total} = A_{setor,circular} - A_{trian} = \frac{2\alpha_{aço}}{360^\circ} \times \pi \times R_{aço}^2 - \frac{b_{LN} \times H_{trian}}{2} \quad (5.5)$$

$$A_{tração,betão} = A_{setor,circular} - A_{trian} = \frac{2\alpha_{bet}}{360^\circ} \times \pi \times R_{bet}^2 - \frac{b_{LN} \times H_{trian}}{2} \quad (5.6)$$

Uma vez calculada a área à tração total e a área à tração do betão e tendo em conta que a área total de betão e de aço da secção são conhecidas, é então possível calcular as áreas à tração e compressão de ambos os materiais e, conseqüentemente, calcular o valor de N e M .

Os valores do par de esforços $N - M$ para esta coluna, bem como todos os cálculos intermédios, encontram-se na Tabela 5.6:

Coluna H=1000 mm c/Secção Circular	
dist LN (tração)	29.80
H Betão (mm)	145.00
R Betão (mm)	72.50
H Aço (mm)	150.00
R Aço (mm)	75.00
b LN Betão (mm)	113.37
b LN Aço (mm)	119.70
α aço ($^\circ$)	52.94
α betao ($^\circ$)	51.43
H triang (mm)	45.20
A Betão Tração (mm ²)	2156.11
A Betão Compressão (mm ²)	14356.89
A total tração (mm ²)	2492.07
A Aço Tração (mm ²)	335.96
A Aço Compressão (mm ²)	822.50
A Aço Total (mm ²)	1158.46
A Betão Total (mm ²)	16513.00
fcd	30.00
fyd	355.00
N	603.43
M	18.98

Tabela 5.6 – Par de esforços M e N para uma coluna mista com uma secção circular e altura de 2000 mm, obtidos com base na posição da LN determinada através do ABAQUS.

Explicado o método usado, este foi replicado para as restantes alturas. Os pares de esforços para cada estudo realizado apresentam-se na Tabela 5.7.

H (mm)	N (kN)	M (kNm)
500	676.92	15.32
1000	603.43	18.98
2000	566.43	20.57
4000	461.29	24.16
5000	420.43	25.19
8000	360.58	26.32

Tabela 5.7 - Pares de esforços obtidos para as diferentes alturas da coluna mista.

Após obtidos os valores, importa compará-los com a curva de interação calculada pelo programa de cálculo desenvolvido. Sendo assim, introduzem-se as mesmas propriedades da secção circular no programa, de modo a obter a respetiva curva. Em seguida, no mesmo gráfico, adicionam-se os seis pares de esforços $N - M$, para que possam ser comparados com a curva. Os resultados podem-se observar no Gráfico 5.34.

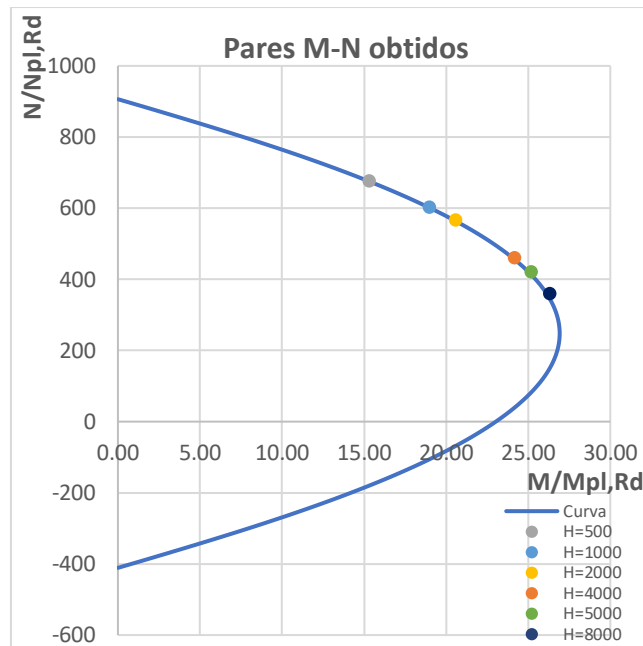


Gráfico 5.34 - Comparação entre os pares de esforços N-M da secção circular e a curva de interação do programa de cálculo.

Ao observar os seis pontos introduzidos no Gráfico 5.34, é possível concluir que os seis são coincidentes com a curva de interação obtida pelo programa de cálculo desenvolvido, o que juntamente com os cálculos realizados em 3.3. contribui para a validação do mesmo.

Uma vez obtidos os pares de esforços $N - M$ para cada altura da coluna, calcula-se o momento devido à imperfeição inicial, de forma a analisar a influência da mesma no momento total obtido.

Com base na expressão de cálculo para o momento total, M_{Ed} (expressão 5.7), é possível obter a parcela devido à imperfeição da coluna, dada pela expressão 5.8.

$$M_{Ed} = k_{gob}M_{1,Ed} + k_{imp}N_{ed}e_0 \quad (5.7)$$

$$M_{e0} = N_{ed}e_0 \quad (5.8)$$

Os valores de M_{e0} para as várias alturas apresentam-se na Tabela 5.8:

Ponto	H (mm)	Ned (kN)	e0 (mm)	Me0 (kNm)
1	500	676.92	1.67	1.13
2	1000	603.43	3.33	2.01
3	2000	566.43	6.67	3.78
4	4000	461.29	13.33	6.15
5	5000	420.43	16.67	7.01
6	8000	360.58	20.00	7.21

Tabela 5.8 - Valores do momento fletor para cada altura, devido à imperfeição da coluna.

Obtidos os valores, estes são inseridos no gráfico representado anteriormente (Gráfico 5.34), de forma a ser possível analisar a influência do mesmo no momento total obtido para cada coluna. Os pontos encontram-se representados no Gráfico 5.35:

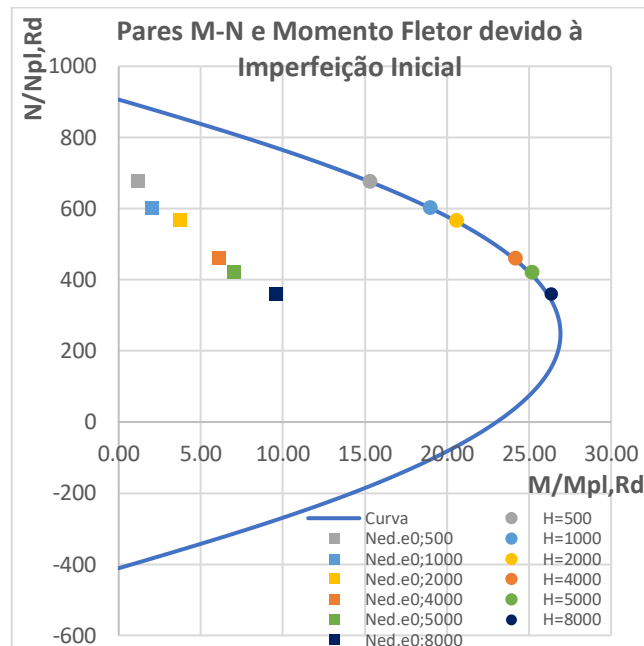


Gráfico 5.35 - Valor do momento devido à imperfeição para cada coluna.

Pela análise do gráfico é possível observar que à medida que a altura da coluna aumenta, o valor do momento devido à imperfeição também aumenta. Note-se o caso da coluna de 500 milímetros que apresenta um M_{e0} de 1.13 kNm e por outro lado, a coluna com uma altura de 8000 mm, com um momento devido à imperfeição de 7.21 kNm. Estes resultados seriam de esperar, uma vez que para uma coluna com uma esbelteza maior, o valor da imperfeição, que está diretamente relacionado com a altura, também é maior. Consequentemente, o valor do momento devido à imperfeição aumenta com a altura.

6. Conclusão

6.1 Introdução

A dissertação apresentada teve como principal objetivo o estudo e análise da resistência à flexão composta de colunas mistas do tipo CFST com secção transversal bi-simétrica e mono-simétrica. Neste capítulo será assim apresentado um resumo geral dos objetivos da dissertação, tal como das conclusões que foram sendo obtidas ao longo do desenvolvimento da mesma. Ao longo deste trabalho, todos os estudos paramétricos e cálculos das curvas de interação foram realizados com recurso ao programa *Excel* e os modelos numéricos foram realizados no *software ABAQUS*. Neste capítulo serão ainda apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

6.2 Considerações finais

A realização desta dissertação é composta por vários capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução da dissertação, bem como a explicação de como esta foi estruturada. No segundo capítulo, é apresentada uma breve introdução e explicação do que são estruturas mistas aço-betão, a sua evolução histórica e campo de aplicação na construção civil, além disso é introduzido o conceito de colunas mistas, nas quais é explicado como é feita a análise, caso a secção transversal seja bi-simétrica ou mono-simétrica, segundo o Eurocódigo 4.

No capítulo três são apresentadas as secções transversais alvos de estudo, consistindo em duas secções transversais bi-simétricas e duas mono-simétricas. Foi usada a secção transversal circular como exemplo para explicar o raciocínio que levou à elaboração do programa de cálculo das curvas de interação. Com base no método simplificado e no cálculo dos pontos do polígono ABCD, foram referidos os cálculos que foram realizados para validar o programa desenvolvido e, além disso, foram descritos quais os estudos paramétricos que se realizaram no capítulo quatro. Por sua vez, no quarto capítulo, foram apresentados os resultados de cada estudo paramétrico, nomeadamente, os resultados individuais de cada secção, bem como os estudos de comparação entre as várias secções diferentes. No final deste capítulo, foram analisados os resultados obtidos para cada tipo de estudo realizado, onde se chega à conclusão que, para cada secção, o andamento da curva de interação depende do maior ou menor valor do parâmetro δ , isto é, da contribuição da resistência do aço, na resistência total da secção. Com os estudos de comparação entre as várias secções diferentes, observou-se que o andamento da curva de interação depende da perda gradual de resistência da secção ao baixar a posição da LN, principalmente no caso das secções mono-simétricas.

Por fim, no quinto capítulo é realizada a análise global de seis colunas mistas com diferentes alturas. Foi descrito como o modelo numérico foi elaborado no *software ABAQUS* e os estudos numéricos que foram realizados. Além disso, explicou-se como é que os pares de esforços M-N foram obtidos através da análise das tensões normais na secção para serem depois comparados com as curvas de interação obtidas através do programa de cálculo desenvolvido, o que permitiu obter resultados bastante aceitáveis. Por fim, calculou-se também a influência da imperfeição no momento total obtido para cada coluna, concluindo que, com o aumento da altura da coluna, a influência da imperfeição no momento total também aumenta.

A realização desta dissertação de mestrado, prova que é possível estudar colunas mistas com secções transversais mono-simétricas nos mesmos termos das colunas com secções transversais bi-simétricas. Ao variar os parâmetros ligados à resistência do aço e do betão, ou as propriedades geométricas de cada secção, o andamento das curvas de interação vai estar diretamente relacionado com o valor do parâmetro δ . Além disso, mostrou-se também que, à medida que a altura da coluna aumenta, o valor do momento devido à imperfeição inicial também aumenta.

6.3 Perspetivas de trabalho futuro

Tendo em conta a inovação na construção civil e a utilidade das estruturas mistas aço-betão, as perspetivas de trabalho são vastas. Entre elas, podem-se destacar as seguintes: realização de testes experimentais de forma a validar o programa de cálculo desenvolvido; alargar o estudo desenvolvido a colunas mistas com outras secções transversais assimétricas, além das estudadas no presente trabalho; estudo da influência do esforço transversal na resistência à flexão composta destas secções; utilização de betão leve no estudo deste tipo de colunas.

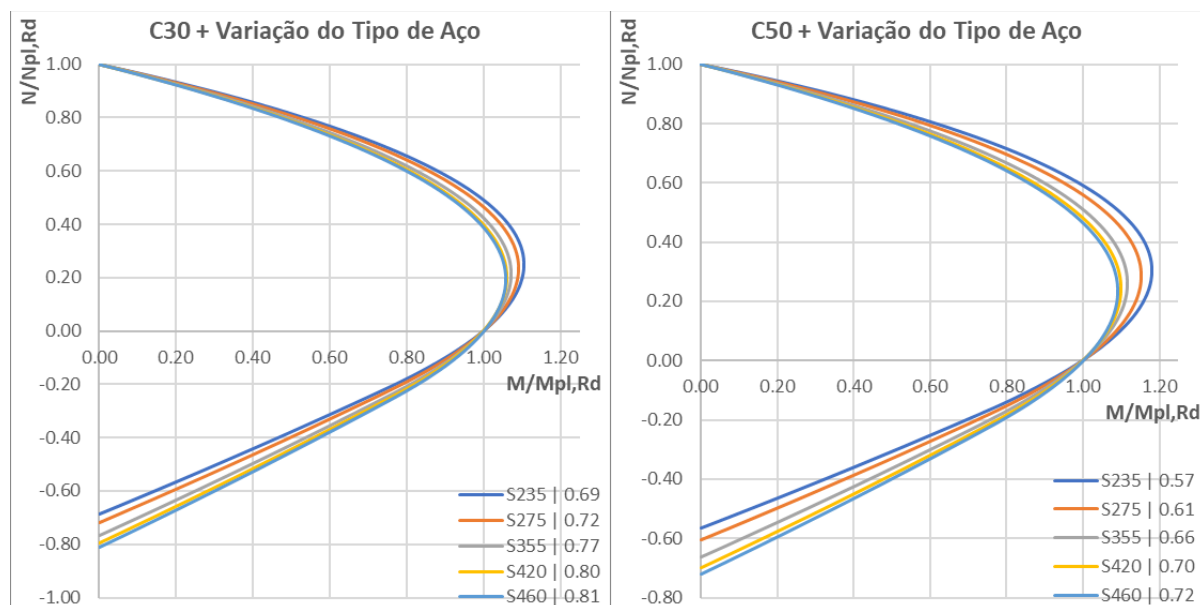
Referências bibliográficas

- [1] L. Calado e J. Santos, *Estruturas Mistas de Aço e Betão*. IST, 2010.
- [2] European Committee for Standardisation (CEN), «Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings». Brussels, 2004.
- [3] D. Nethercot, *Composite Construction*. Londres, Spon Press, 2003.
- [4] G. Carvalho, «Avaliação da resistência à flexão composta de colunas mistas aço-betão segundo o Eurocódigo 4», FCT, UNL, 2018.
- [5] Revista Shopping Centers, «Foto Centro Comercial Colombo», <https://revistashoppingcenters.com.br/>.
- [6] P. Era Imobiliária, «Torres de São Gabriel e São Rafael, Parque das Nações, Lisboa», <https://www.era.pt/empreendimento/torre-sao-rafael-1335>.
- [7] S. F. Chen, J. G. Teng, e S. L. Chan, «Design of Biaxially Loaded Short Composite Columns of Arbitrary Section», *Journal of Structural Engineering*, pp. 678-685, 2001.
- [8] G. Hanswille, «Design of composite columns according to Eurocode 4-1-1», Powerpoint Presentation, *Institute for Steel and Composite Structures*. University of Wuppertal, Germany.
- [9] K. Roik e R. Bergmann, «Composite Columns», *Constructional Steel Design - An International Guide*, pp. 443-469, 1992.
- [10] K. Roik e R. Bergmann, «Design Method for Composite Columns with Unsymmetrical Cross-Sections», *Journal of Constructional Steel Research, Special issue on «Composite Construction Buildings»*, vol. 15, n. 1 e 2, pp. 153-168, 1990.
- [11] L. Calado, «Steel and Composite Structures Course: Composite Columns Class». Instituto Superior Técnico, IST, Lisbon, 2022.
- [12] R. P. Johnson e M. Anderson, *Designers' guide to EN 1994-1-1. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1: General rules and rules for buildings*. London: Thomas Telford, 2004.
- [13] A. Elremaily e A. Azizinamini, «Behavior and Strength of Circular Concrete-Filled Tube Columns», *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 1567-1591, 2002.
- [14] CEN - European Committee for Standardization, «ENV 1994-1-1: 1992, Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings». Brussels, 1992.
- [15] European Committee for Standardisation (CEN), «Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. ». Brussels, 2010.
- [16] G. Hanswille, M. Bergmann, e R. Bergmann, «Design of Composite Columns with Cross-Sections not Covered by Eurocode 4», *Steel Construction*, vol. 10, n. 1, pp. 10-16, Fev. 2017, doi: 10.1002/stco.201710004.
- [17] «DIN EN 1994-1-1/NA: National Annex – Nationally Determined Parameters – Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1/NA: General Rules and Rules for Buildings».

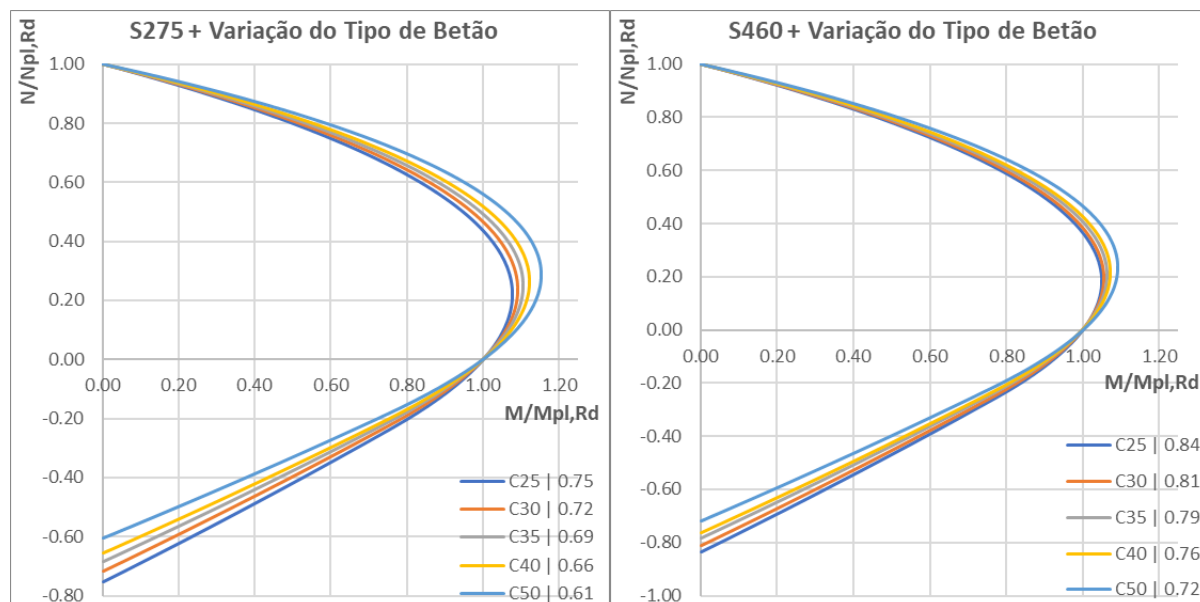
- [18] M. Schäfer, «European Design Code for Composite Structures in Steel and Concrete: Historical Development and Investigation in the Second Generation of Eurocode 4», *Steel Construction*, vol. 12, n. 2, pp. 70–81, Mai. 2019, doi: 10.1002/stco.201800031.
- [19] M. Mensinger, R. Bärtschi, W. Borgogno, e J.-P. Lebet, «SIA 269/4- The New Swiss Standard for Existing Composite Structures». Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/41940003>
- [20] R. T. Leon, «Design of Composite Columns: The American Approach», *Arab J Sci Eng*, vol. 37, n. 2, pp. 381–398, Mar. 2012, doi: 10.1007/s13369-012-0180-y.
- [21] Viest e Ivan M., «Development of Design Rules for Composite Construction», *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*. pp. 181–188, 2003.
- [22] S. J. Hicks, B. Uy, e S. Hicks, «AS/NZS 2327 Composite Structures- A New Standard for Steel-Concrete Composite Buildings», 2015, doi: 10.13140/RG.2.2.22769.68961.
- [23] «AS/NZS 2327:2017 - Composite structures - Composite Steel-Concrete Construction in Buildings», *Standards Australia*. 2017.
- [24] T. Fukumoto, A. Kawano, e H. Suzuki, «Publication of “Design Standard for Composite Structures” by the Architectural Institute of Japan», *Concrete Journal*, vol. 52, n. 11, pp. 971–977, 2014, doi: 10.3151/coj.52.971.
- [25] S. Morino e K. Tsuda, «Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan», *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, vol. 4, n. 1, pp. 51-73, 2003.
- [26] F. C. Wang e L. H. Han, «Analytical Behavior of Special-Shaped CFST Stub Columns under Axial Compression», *Thin-Walled Structures*, vol. 129, pp. 404–417, Ago. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.04.013.
- [27] Q. X. Ren, L. H. Han, D. Lam, e C. Hou, «Experiments on Special-shaped CFST Stub Columns under Axial Compression», *J Constr Steel Res*, vol. 98, pp. 123–133, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.03.002.
- [28] «DBJ/T13-51-2010. Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures.», *The Construction Department of Fujian Province*. Fuzhou (China), 2010.
- [29] L. H. Han, W. Li, e R. Bjorhovde, «Developments and Advanced Applications of Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Structures: Members», *J Constr Steel Res*, vol. 100, pp. 211–228, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.04.016.
- [30] T. Wu, «Canton Tower in June, 2022», [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canton_Tower_20220626_\(cropped_2\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Canton_Tower_20220626_(cropped_2).jpg).
- [31] A. Elkady, «ABAQUS_SteelMat_Generator: A Tool for Generating Metal Plastic and Damage Parameters for ABAQUS». 2023.
- [32] A. Elkady, «ABAQUS_CDP_Generator: A Tool for Generating Concrete Damage Parameters for ABAQUS». 2023.
- [33] X. Dai e D. Lam, «Numerical Modelling of the Axial Compressive Behaviour of Short Concrete-Filled Elliptical Steel Columns», *J Constr Steel Res*, vol. 66, n. 7, pp. 931–942, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.02.003.

Anexos

No presente anexo são apresentados os resultados obtidos para a secção triangular equilátera. No estudo dos materiais usa-se sempre 150 milímetros para os lados do triângulo base e 5 milímetros para a espessura (Gráficos A.1 e A.2).

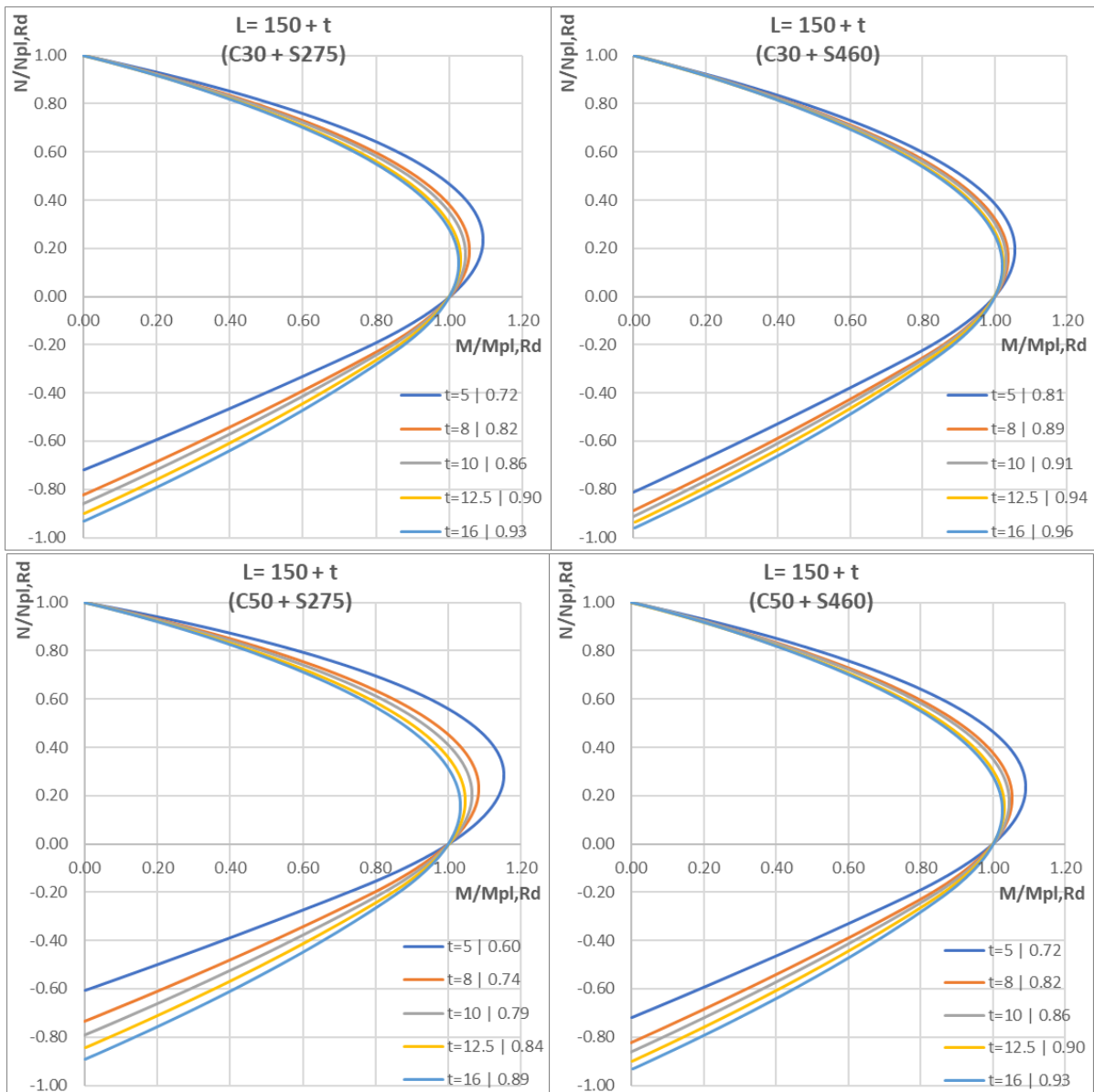


Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento..1** - Variação da resistência do aço para um betão C30 e C50.



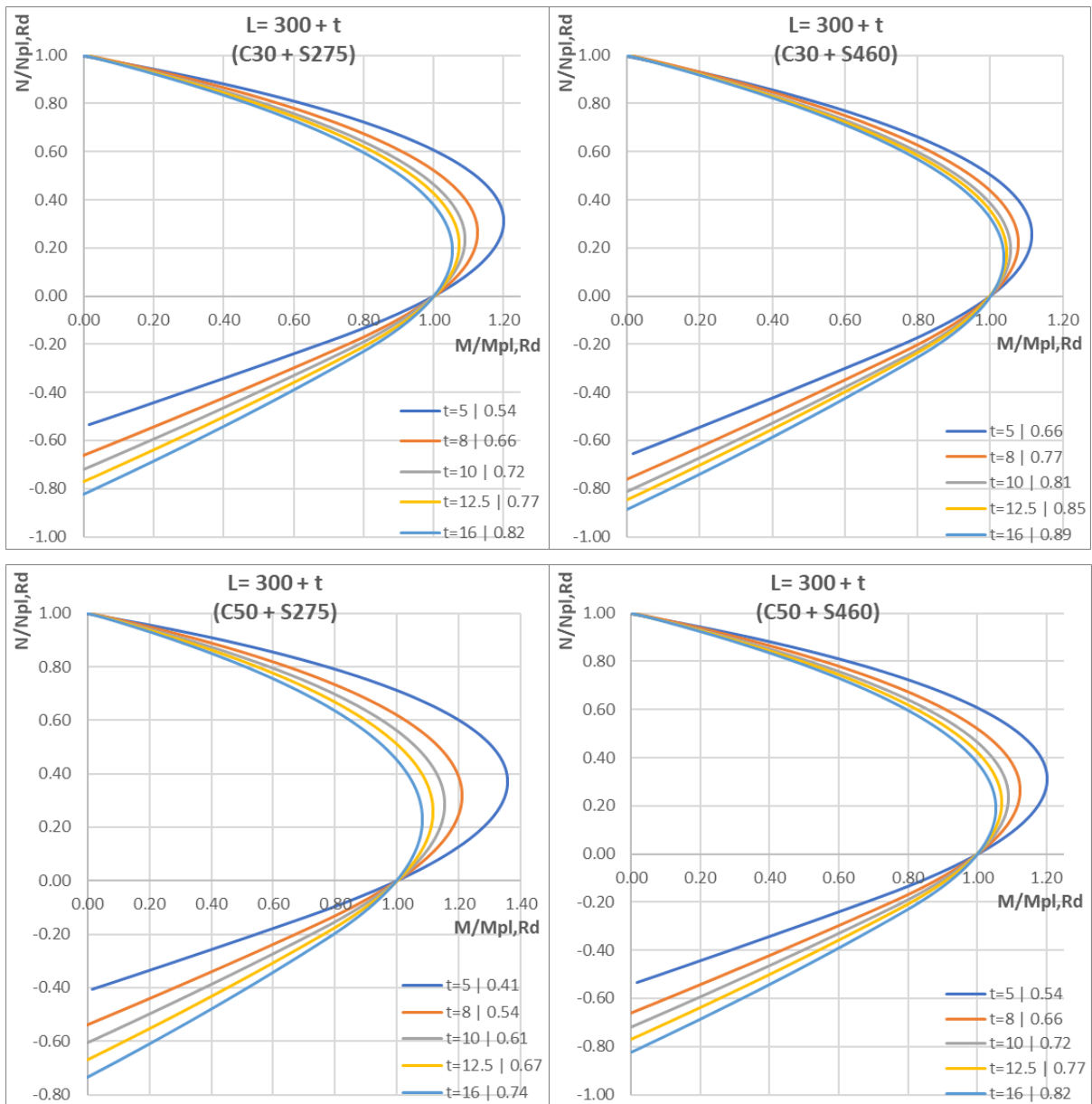
Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento..2** - Variação da resistência do betão para um aço S275 e S460.

O conjunto de estudos realizados para a variação da espessura são realizados em primeiro lugar para lados com 150 milímetros e depois para 300 milímetros. Os resultados são apresentados nos Gráficos A.3 e A.4:



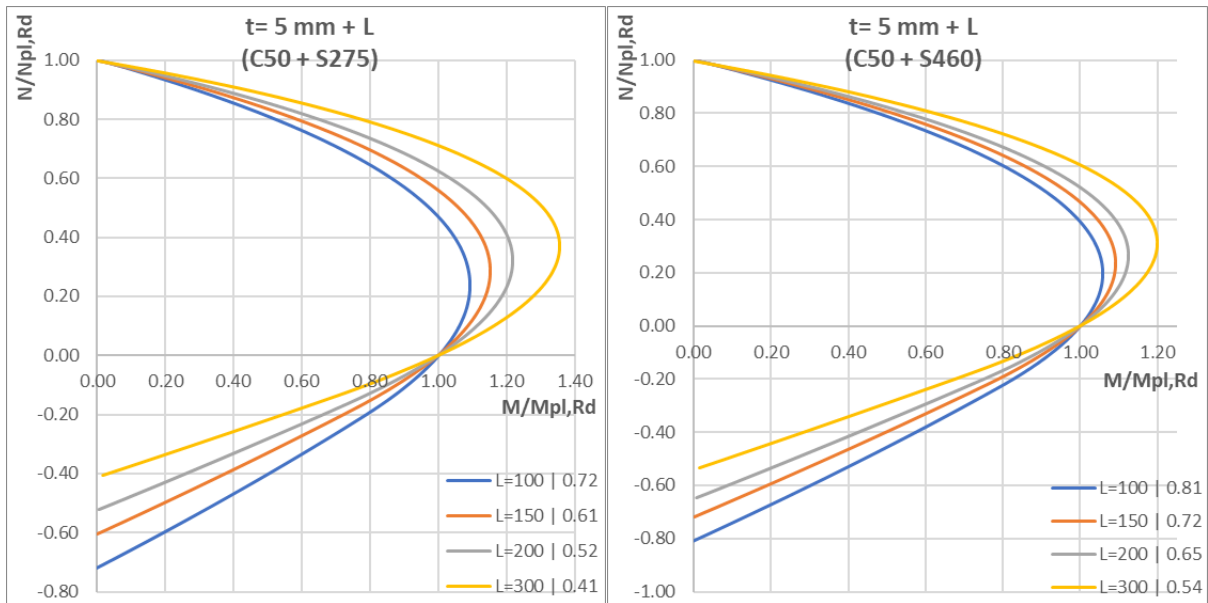
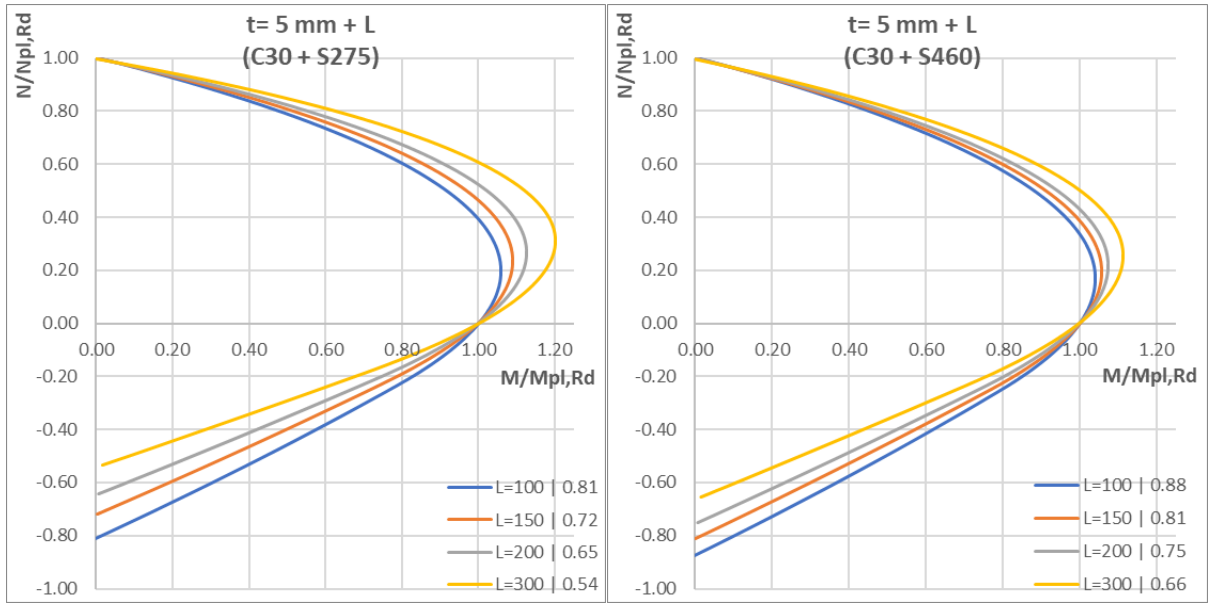
Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento..3** - Variação da espessura para um lado de 150 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Uma vez que a secção triangular equilátera com 150 milímetros, apresenta menor área de betão do que a triangular isósceles com 150 milímetros de base e altura, existem ainda mais situações em que δ está acima de 0.9

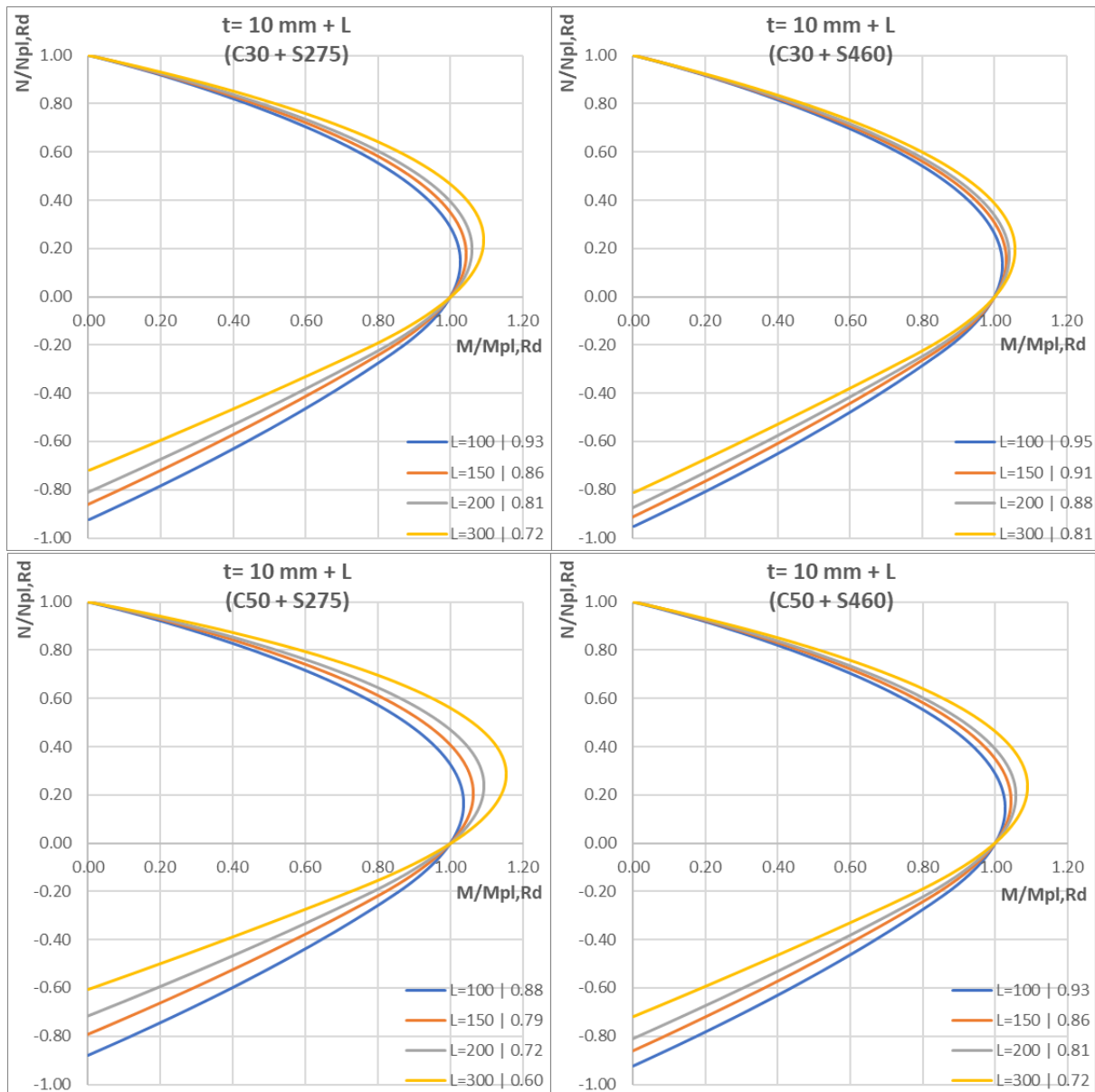


Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento.** 4 - Variação da espessura para um lado de 300 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Segue-se, por último, o estudo da variação da medida dos lados da secção:



Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento.** 5 - Variação do lado do triângulo para uma espessura de 5 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.



Gráficos **Erro! Não existe nenhum texto com o estilo especificado no documento.** 6 - Variação do lado do triângulo para uma espessura de 10 mm e quatro combinações de betão e aço diferentes.

Tal como acontece no estudo anterior, e na secção triangular isósceles, é também possível encontrar valores de δ acima de 0.9 quando se aumenta a espessura para 10 milímetros e a base do triângulo tem valores mais baixos (100 ou 150 milímetros).