

**Toolkit MS Excel:
Verificação da segurança de colunas mistas de aço e betão
de acordo com a EN1994-1-1**

Guilherme de Azevedo Guedes Lebre

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins

Júri

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro
Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Calado de Oliveira Martins
Vogal: Professor Doutor José Joaquim Costa Branco de Oliveira Pedro

Novembro de 2014

RESUMO

O objectivo da presente dissertação é desenvolver um *Toolkit MS Excel* fiável e de fácil utilização que permita a verificação da segurança de colunas mistas de aço-betão em relação aos estados limites últimos de compressão, flexão composta com compressão e flexão desviada composta com compressão, de acordo com a EN 1994-1-1. A ferramenta de cálculo permite realizar uma análise plástica de colunas de secção bissimétrica constante ao longo do seu comprimento, requisito que adicionalmente às restantes normas e disposições construtivas, as enquadra no campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

Em comparação às expressões definidas na *EN1994, Anexo A1*, o *toolkit* determina um número muito superior de pares (M; N) definindo uma curva de interacção ao invés do polígono BDCEA, o que conduz à determinação de um valor do momento resistente até 7% superior, tirando proveito da totalidade da resistência da secção.

O *toolkit* foi desenvolvido de forma a permitir uma rápida interpretação dos resultados. De entre as diversas funcionalidades destacam-se: minimização da introdução de dados; apresentação de um resumo dos resultados; exportação de relatórios das verificações da segurança; apresentação de um esquema da secção transversal e da correspondente curva de interacção M-N; alertas sobre os limites admissíveis que não são respeitados e as verificações adicionais a realizar; capacidade de seleccionar perfis comerciais ou definir secções soldadas.

Devido à existência de distintas geometrias desenvolveram-se metodologias para as secções rectangulares através de blocos rectangulares de tensões e para as secções circulares através de expressões que permitem decompor geometricamente o perfil de aço e o betão, o que por sua vez impele a concepção de dois *toolkits*.

A utilização da capacidade de cálculo do MS Excel aliada à programação em Visual Basic permite compilar um elevado número de resultados de forma a realizar estudos paramétricos e concluir sobre a preponderância da variação da classe de aço estrutural, da classe do betão, da percentagem de armadura longitudinal, da espessura do tubo e do diâmetro do tubo, na resistência da secção.

Em geral, a resistência proveniente da variação de um determinado parâmetro, aumenta com a diminuição da contribuição dos restantes parâmetros. Por exemplo, dependendo da classe de betão (alta-baixa), o aumento máximo de resistência que se pode obter devido à variação (aumento) da classe de aço estrutural é de 46–73% para o esforço normal resistente plástico, e de 44–87% para o momento flector resistente plástico.

Palavras-chave:

Colunas mistas de aço e betão; toolkit MS Excel; análise plástica; verificação da segurança; EN1994-1-1;

ABSTRACT

This dissertation aims to develop a reliable and user-friendly MS Excel toolkit with the objective to check steel-concrete composite columns at ultimate limit states of axial compression, combined compression and uniaxial bending, combined compression and biaxial bending in accordance to EN 1994-1-1. Generally, the cross-section of composite columns is designed doubly symmetrical and uniform over the member length. In addition with the remaining clauses and construction details, this type of columns are within the scope of the simplified method of design. Therefore, a plastic analysis of the cross-section is conducted.

The expressions in *EN 1994, Annex A1* define a set of five points forming a polygon for M-N interaction. The toolkit calculate a much higher number of points, i.e. define an interaction curve, taking advantage of total bending resistance of the cross-section, which represent an increase up to 7%.

The toolkit was developed for an easy interpretation of the results. The features that stand out are: minimization of input data and summarization of results in the first sheet of the workbook; reports separated in different sheets accordingly to each design check; alerts when admissible limits are not respected and the additional verifications to perform; scheme of the cross-section designed and the respective M-N interaction curve; ability to choose between welded steel sections defined by user and commercial steel sections;

Due to the existence of diverse geometries, the rectangular cross-sections are analyzed by rectangular stress blocks and the circular sections by expressions that geometrically decompose the steel section and the concrete.

The computing capability of MS Excel, allied to Visual Basic programmed Macros, make it possible to produce and compile several results. Therefore parametric studies were conducted to determine the influence of structural steel strength, concrete strength, longitudinal reinforcement area, tube thickness, and tube diameter, on the cross-section resistance.

In general, the resistance provided by the variation of one parameter, increase with the decrease of the remaining parameters contribution. For example, depending on the concrete strength (high–low), the maximum increase of resistance obtained from the increase of structural steel strength is 46–73% for plastic resistance to compression, and 44–87% for plastic resistance bending moment.

Keywords:

Steel-concrete composite column; toolkit MS Excel; plastic analysis; safety check; EN1994-1-1;

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho marca o fim de uma importante etapa da minha vida, e por isso gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua concretização.

Embora uma tese seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, reúne contributos de várias pessoas e instituições, sem as quais este trabalho não teria sido possível, pelo que é com muita satisfação que expresso aqui o mais profundo agradecimento a todos eles.

Ao Professor Luís Calado, orientador da tese, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Acima de tudo, obrigado por me continuar a acompanhar nesta jornada e por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela área, desde a primeira aula.

Deixo também uma palavra de agradecimento ao Instituto Superior Técnico por ter me prestado uma formação académica de excelência.

Sou ainda muito grato a todos os meus familiares pelo incentivo recebido ao longo destes anos, em especial, aos meus Pais pela educação, apoio incondicional e valores transmitidos.

Ao Eng^o Marco Caixa pela orientação e conhecimentos.

Ao meu Pai, Eng.^o Francisco Guedes Lebre, pelas ideias discutidas e à Civiconsult, pela oportunidade de conciliar o final desta etapa académica com o início da profissional.

À Patrícia Salvador, pelo apoio, dedicação, carinho e compreensão ao longo deste percurso.

Guilherme Guedes Lebre

Lisboa, Outubro de 2014

SIMBOLOGIA

Símbolo	Descrição	Unidade
$\bar{\lambda}$	Esbelteza normalizada	–
φ_t	Coeficiente de fluência do betão	–
K_e	Parâmetro de correcção da rigidez de flexão do betão	–
e_0	Imperfeição inicial equivalente	–
h	Altura	m
A	Área	m^2
E	Módulo de elasticidade	$Pa (N.m^{-2})$
EI	Rigidez de flexão	$N.m^2$
F	Força	N
I	Inércia	m^4
L	Comprimento da coluna mista	m
M	Momento flector	$N.m$
N	Esforço normal	N
V	Esforço transversal	N
d	Diâmetro do tubo / distância	m
f	Tensão	$Pa (N.m^{-2})$
k	Factor de amplificação dos esforços de flexão	–
t	Espessura da chapa	m
γ	Coeficiente parcial de segurança	–
δ	Contribuição de resistência da secção de aço para a coluna mista	–
σ	Tensão	$Pa (N.m^{-2})$

SUBSCRITOS

0	inicial	II	2ª ordem
a	aço estrutural	imp	imperfeição
c	betão; compressão	k	característico
cr	crítico	pl	plástico
d	valor de cálculo	R	resistente
E	actuante	s	armaduras longitudinais
eff	efectivo	t	tempo
f	banzo	v	corte
glob	global	w	alma

Exemplo:

$M_{pl,z,a,Rd}$ – Valor de cálculo (d) do momento flector (M) resistente (R) plástico (pl) do perfil de aço (a) para o eixo z (z).

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	2
1.3	Metodologia e organização da dissertação	3
2	TIPOLOGIAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL	7
2.1	Secção totalmente betonada e Secção parcialmente betonada	8
2.2	Secção tubular rectangular e quadrangular cheia de betão	9
2.3	Secção tubular circular	10
2.4	Casos de obra	10
3	MÉTODOS DE CÁLCULO	13
3.1	Regulamentação aplicável	13
3.2	Métodos de cálculo	15
3.2.1	Método geral de cálculo	15
3.2.2	Método simplificado de cálculo	15
4	RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL	17
4.1	Esforço normal	17
4.1.1	Determinação do esforço normal resistente plástico	18
4.1.2	Determinação do efeito do confinamento	19
4.2	Flexão composta com compressão	21
4.3	Flexão desviada composta com compressão	26
4.4	Influência do esforço transversal	27
4.4.1	Esforço transversal actuante em ambas as direcções	28
5	METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N	31
5.1	Colunas rectangulares	32
5.2	Colunas circulares	35
6	DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS	41
6.1	Secção rectangular	42
6.1.1	Secção totalmente betonada	43
6.1.2	Secção parcialmente betonada	43

6.1.3	Secção tubular (rectangular/quadrangular) cheia de betão	44
6.2	Secção circular	44
7	VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS	45
7.1	Coluna mista à compressão	45
7.1.1	Determinação do módulo de elasticidade efectivo do betão:	45
7.1.2	Propriedades da coluna mista para a encurvadura	46
7.1.3	Verificação da condição de segurança	48
7.2	Coluna mista à flexão composta com compressão	49
7.2.1	Verificação da influência do esforço transversal	49
7.2.2	Imperfeição inicial	49
7.2.3	Averiguação da necessidade de realização de uma análise de 2ª ordem	49
7.2.4	Determinação do momento de dimensionamento	50
7.2.5	Verificação da condição de segurança	54
7.3	Coluna mista à flexão desviada composta com compressão	55
8	EXEMPLOS DE CÁLCULO E DE APLICAÇÃO DO TOOLKIT	57
8.1	Coluna mista rectangular	57
8.1.1	Materiais	57
8.1.2	Geometria	58
8.1.3	Acções	60
8.1.4	Resultados	61
8.2	Coluna mista circular	62
8.2.1	Materiais	63
8.2.2	Geometria	63
8.2.3	Acções	64
8.2.4	Resultados	65
9	ESTUDO PARAMÉTRICO	67
9.1	Variável: Classe do aço estrutural	68
9.1.1	Secção totalmente betonada	69
9.1.2	Secção quadrada cheia de betão	71
9.1.3	Secção circular	72
9.2	Variável: Classe do betão	73

9.2.1	Secção totalmente betonada	73
9.2.2	Secção quadrada cheia de betão	75
9.2.3	Secção circular.....	76
9.3	Variável: Percentagem de armadura longitudinal	77
9.3.1	Secção totalmente betonada	77
9.3.2	Secção quadrada cheia de betão	79
9.3.3	Secção circular.....	80
9.4	Variável: Espessura do tubo.....	81
9.4.1	Secção quadrada cheia de betão	82
9.4.2	Secção circular.....	83
9.5	Variável: Diâmetro do tubo	84
9.6	Análise dos resultados	86
9.6.1	Classe do aço estrutural	86
9.6.2	Classe do betão	89
9.6.3	Percentagem de armadura longitudinal.....	91
9.6.4	Espessura do tubo	94
9.6.5	Diâmetro do tubo.....	96
10	CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	99
11	BIBLIOGRAFIA	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A	– CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	103
A.1	Betão	103
A.2	Aço estrutural	103
A.3	Aço das armaduras longitudinais	104
ANEXO B	– CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL	105
B.1	Secções rectangulares	105
B.1.1	Definição dos blocos rectangulares de tensão para cada tipologia	105
B.1.2	Área, inércia e centro de massa de blocos rectangulares.....	110
B.1.3	Área de corte.....	112
B.1.4	Perfis comerciais – Dimensões e propriedades relevantes para o cálculo	113
B.2	Secções circulares	123
B.2.1	Área e inércia	123
B.2.2	Área de corte.....	123
B.2.3	Perfis comerciais – Dimensões e propriedades relevantes para o cálculo	124
ANEXO C	– EXEMPLOS DE CÁLCULO	126
C.1	Secção rectangular.....	126
C.2	Secção circular	138
ANEXO D	– ESTUDO PARAMÉTRICO	145
D.1	Variável: Classe do aço estrutural.....	145
D.1.1	Secção totalmente betonada	145
D.1.2	Secção quadrada cheia de betão	151
D.1.3	Secção circular.....	154
D.2	Variável: Classe do betão.....	157
D.2.1	Secção totalmente betonada	157
D.2.2	Secção quadrada cheia de betão	162
D.2.3	Secção circular.....	165
D.3	Variável: Percentagem de armadura.....	168
D.3.1	Secção totalmente betonada	168
D.3.2	Secção quadrada cheia de betão	173
D.3.3	Secção circular.....	176

D.4	Variável: Espessura do tubo.....	179
D.4.1	Secção quadrada cheia de betão	179
D.4.2	Secção circular.....	182
D.5	Variável: Diâmetro do tubo	185
D.6	Influência da variação dos parâmetros na resistência da secção.....	188
D.6.1	Classe do aço estrutural	188
D.6.2	Classe do betão	191
D.6.3	Percentagem de armadura longitudinal.....	195
D.6.4	Espessura do tubo	199
ANEXO E	– EXEMPLO DE CÓDIGO EM LINGUAGEM <i>VISUAL BASIC</i> PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS PARAMÉTRICOS	201

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – (Esq. – Drt.) Secção transversal Mista, de Betão Armado e de Aço	1
Figura 2.1 – Tipologias da secção transversal apresentadas na EN1994-1-1	7
Figura 2.2 – Dimensões dos perfis de aço, comerciais ou soldados, que constituem a secção transversal da coluna mista	7
Figura 2.3 – Execução de uma coluna parcialmente betonada	8
Figura 2.4 – Secção totalmente betonada (esq.) e Secção parcialmente betonada (Dir.)	8
Figura 2.5 – Secção tubular rectangular (esq.) ou quadrangular (dir.) cheia de betão	9
Figura 2.6 – Diferença entre o modo e comprimento de encurvadura de uma secção de aço isolada ou cheia de betão	9
Figura 2.7 – Secção tubular circular de aço cheio de betão	10
Figura 2.8 – Modo de encurvadura de uma coluna de aço (para dentro e fora do plano da chapa) e de uma coluna mista aço-betão (para fora do plano da chapa).....	10
Figura 2.9 – Execução de uma coluna parcialmente betonada, através da técnica apresentada na Figura 2.3.....	11
Figura 2.10 - Fase construtiva de um edifício constituído por elementos mistos de aço-betão	11
Figura 2.11 - Coluna mista de secção circular, antes da betonagem	11
Figura 2.12 - Pormenor da ligação coluna-viga	11
Figura 4.1 – Diagramas de tensão do betão, aço e armaduras de uma secção totalmente comprimida	18
Figura 4.2 – Encurvadura local da chapa de uma secção tubular rectangular.....	19
Figura 4.3 – Diagrama de tensão do betão, aço e armaduras para uma determinada posição da linha neutra.....	21
Figura 4.4 – Decomposição de um perfil de aço e identificação das forças envolvidas.....	22
Figura 4.5 - Curva de interacção M-N de uma secção mista simétrica em relação ao eixo de flexão .	23
Figura 4.6 - Ponto A da curva de interacção M-N: Diagrama de tensões no betão, aço estrutural e aço das armaduras.....	24
Figura 4.7 - Ponto B da curva de interacção M-N: Diagrama de tensões no betão, aço estrutural e aço das armaduras.....	24
Figura 4.8 - Ponto C da curva de interacção M-N: Diagrama de tensões no betão, aço estrutural e aço das armaduras.....	24
Figura 4.9 - Ponto D da curva de interacção M-N: Diagrama de tensões no betão, aço estrutural e aço das armaduras.....	25
Figura 3.10 - Curvas de interacção M_y -N e M_z -N	26
Figura 4.11 - Superfície de interacção M_y - M_z -N.....	26
Figura 4.12 – Influência do esforço transversal na curva de Interacção (M_y – N) da secção transversal apresentada na Figura 3.14	29
Figura 4.13 - Influência do esforço transversal na curva de Interacção (M_z – N) da secção transversal apresentada na Figura 3.14	29
Figura 4.14 - Secção transversal em análise na Figura 3.12 e Figura 3.13	29

Figura 4.15 - Redução da Tensão de cedência do aço na área resistente ao esforço transverso (A_v)	29
Figura 5.1 - Definição dos blocos rectangulares de tensões de uma secção totalmente betonada, para a flexão em torno do eixo de maior inércia	32
Figura 4.2 - Decomposição de uma circunferência na área de betão acima e abaixo da linha neutra plástica.....	36
Figura 5.3 - Decomposição de uma circunferência para a determinação da área de aço acima e abaixo da linha neutra plástica.....	36
Figura 5.4 – Relação entre as áreas e centros de massa do aço e betão, acima e abaixo de posições simétricas da linha neutra plástica	38
Figura 5.5 – Representação das zonas A e B.....	39
Figura 6.1 – Representação das dimensões: hc, bc, b, h, cy, cz	42
Figura 6.2 – Representação das dimensões: b, d, tw, tf	43
Figura 6.3 – Representação das dimensões: h, t	44
Figura 6.4 – Representação das dimensões: d, t	44
Figura 7.1 – Secção transversal em análise na Figura 7.2 e diagrama de momentos flectores actuantes obtidos através de uma análise global	53
Figura 7.2 – Momento de dimensionamento em função do esforço normal actuante e do comprimento da coluna mista apresentada na Figura 7.1, para $rglob = -1, 0$	53
Figura 7.3 – Momento de dimensionamento em função do esforço normal actuante e do comprimento da coluna mista apresentada na Figura 7.1, para $rglob = 1, 0$	54
Figura 8.1 – Secção transversal da coluna mista Rectangular em análise no exemplo de aplicação do toolkit	57
Figura 8.2 – Secção transversal da coluna mista Circular em análise no exemplo de aplicação do toolkit	62
Figura 9.1 - Secção transversal em análise	69
Figura 9.2 - Diagramas de interacção My-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do aço.....	69
Figura 9.3 - Secção transversal em análise	70
Figura 9.4 - Diagramas de interacção Mz-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do aço.....	70
Figura 9.5 - Secção transversal em análise	71
Figura 9.6 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do aço.....	71
Figura 9.7 - Secção transversal em análise	72
Figura 9.8 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do aço.....	72
Figura 9.9 - Secção transversal em análise	73
Figura 9.10 - Diagramas de interacção My-N da secção apresentada na Figura 9.9, para as diversas classes de resistência do betão	74

Figura 9.11 - Diagramas de interacção Mz-N da secção apresentada na Figura 9.9, para as diversas classes de resistência do betão	74
Figura 9.12 - Secção transversal em análise	75
Figura 9.13 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do betão	75
Figura 9.14 - Secção transversal em análise	76
Figura 9.15 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas classes de resistência do betão	76
Figura 9.16 - Secção transversal em análise	77
Figura 9.17 - Diagramas de interacção My-N da secção apresentada na Figura 9.16, para as diversas percentagens de armadura	78
Figura 9.18 - Diagramas de interacção Mz-N da secção apresentada na Figura 9.16, para as diversas percentagens de armadura	78
Figura 9.19 - Secção transversal em análise	79
Figura 9.20 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas percentagens de armadura	79
Figura 9.21 - Secção transversal em análise	80
Figura 9.22 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas percentagens de armadura	80
Figura 9.23 - Secção transversal em análise	82
Figura 9.24 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada, para as diversas espessuras do tubo de aço	82
Figura 9.25 - Secção transversal em análise	83
Figura 9.26 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada na Figura 9.25, para diversas espessuras do tubo de aço	83
Figura 9.27 - Secção transversal em análise	84
Figura 9.28 - Diagramas de interacção M-N da secção apresentada na Figura 9.27, para diversos diâmetros do tubo de aço	85
Figura 9.29 – Esforço normal resistente plástico em função da Classe do Betão e da Classe do Aço	87
Figura 9.30 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de maior inércia, y-y) em função da Classe do Betão e da Classe do Aço	88
Figura 9.31 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de menor inércia, z-z) em função da Classe do Betão e da Classe do Aço	88
Figura 9.32 – Esforço normal resistente plástico em função da classe do betão e da classe do aço..	90
Figura 9.33 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de maior inércia, y-y) em função da classe do betão e da classe do aço	90
Figura 9.34 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de menor inércia, z-z) em função da classe do betão e da classe do aço	91
Figura 9.35 – Esforço normal resistente plástico em função da percentagem de armadura e da classe do Aço.....	92

Figura 9.36 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de maior inércia, y-y) em função da percentagem de armadura e da classe do aço	93
Figura 9.37 – Momento flector resistente plástico máximo (em torno do eixo de menor inércia, z-z) em função da percentagem de armadura e da classe do aço	93
Figura 9.38 – Esforço normal resistente plástico em função da espessura do tubo e da classe do Aço	95
Figura 9.39 – Momento flector resistente plástico máximo em função da percentagem de armadura e da classe do aço.....	96
Figura 9.40 – Esforço normal resistente plástico em função do diâmetro do tubo e da classe do aço	97
Figura 9.41 – Momento flector resistente plástico máximo em função do diâmetro do tubo e da classe do aço	98
Figura 10.1 – Comparação da curva de interacção com o polígono BDCEA, correspondente à secção transversal apresentada na Figura 9.5.....	99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Comparação da resistência e características das secções transversais Mista, de Betão armado e de Aço apresentadas na Figura 1.1.....	2
Quadro 5.1 - Determinação do esforço normal e momento flector correspondente a cada posição da linha neutra plástica, com recurso a blocos rectangulares	33
Quadro 5.2 – Determinação da área e centro de massa do betão acima e abaixo da linha neutra plástica	37
Quadro 5.3 – Determinação da área do betão acima e abaixo da linha neutra plástica, descontando a área das armaduras	37
Quadro 5.4 - Determinação da área e centro de massa do tubo de aço acima e abaixo da linha neutra plástica.....	38
Quadro 6.1 – Valor de ϵ em função da classe de resistência do aço estrutural.....	43
Quadro 7.1 – Módulo de elasticidade secante do betão de acordo com as classe de resistência	45
Quadro 7.2 – Módulo de elasticidade do aço estrutural e do aço das armaduras longitudinais	46
Quadro 7.3 – Curvas de encurvadura e imperfeições iniciais equivalentes de colunas mistas (EN1994-1-1, Quadro 6.5)	48
Quadro 7.4 – Factores de imperfeição, α , para as curvas de encurvadura (EN1993-1-1, Quadro 6.1)	48
Quadro 7.5 – Limite máximo, αM , da condição de verificação da segurança à flexão composta com compressão de acordo com a classe de resistência do aço estrutural	55
Quadro 9.1 – Resumo dos estudos paramétricos realizados	67
Quadro 9.2 – Aumento de resistência, proveniente da variação (aumento) da classe do aço estrutural, de S235 para S460, em função da classe do betão	87
Quadro 9.3 – Aumento (mínimo e máximo) da resistência da secção, proveniente da variação (aumento) da classe do aço estrutural, de S235 para S460	87
Quadro 9.4 – Aumento de resistência, proveniente da variação (aumento) da classe do betão de C20/25 para C50/60, em função da classe do aço.....	89
Quadro 9.5 – Aumento (mínimo e máximo) da resistência da secção, proveniente da variação (aumento) da classe do betão, de C20/25 para C50/60.....	89
Quadro 9.6 – Aumento da resistência da secção, proveniente da variação (aumento) da percentagem de armadura longitudinal, de $\rho = 0\%$ para $\rho = 6\%$, em função da classe do aço.....	91
Quadro 9.7 – Aumento (mínimo e máximo) da resistência da secção, proveniente da variação (aumento) da percentagem de armadura longitudinal, de $\rho = 0\%$ para $\rho = 6\%$	92
Quadro 9.8 – Aumento da resistência da secção, proveniente da variação (aumento de 1 mm) da espessura do tubo, em função da classe do aço estrutural.....	94
Quadro 9.9 – Aumento (mínimo e máximo) da resistência da secção, proveniente da variação (aumento de 1 mm) da espessura do tubo.....	95
Quadro 9.10 – Aumento da resistência da secção, proveniente da variação (aumento de 1 mm) do diâmetro do tubo, em função da classe do aço estrutural	97

Quadro 9.11 – Aumento (mínimo e máximo) da resistência da secção, proveniente da variação (aumento de 1 mm) do diâmetro do tubo	97
Quadro 10.1 – Síntese da variação da resistência da secção para cada variável em estudo	100

ÍNDICE DE QUADROS ANEXOS

Quadro A 1 – Características de resistência e módulo de elasticidade do Betão, EN1992-1-1, Quadro 3.1.....	103
Quadro A 2 – Características de resistência e módulo de elasticidade do Aço Estrutural, EN 1993-1-1, Quadro 3.1.....	103
Quadro A 3 – Características de resistência e módulo de elasticidade do Betão, EN1992-1-1, Quadro 3.1.....	104
Quadro A 4 – Determinação da Área, Inércia e Centro de massa de uma determinada secção (betão ou perfil de aço) composta por blocos rectangulares.	110
Quadro A 5 – Determinação da Inércia e Centro de massa das Armaduras Longitudinais.	111

1. INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

As colunas mistas de aço betão inserem-se no conceito de elemento estrutural misto, que por definição engloba os elementos estruturais, como por exemplo, vigas, lajes ou colunas, constituídos por vários materiais estruturais «interligados de modo a limitar o escorregamento longitudinal e a separação entre eles», dos quais se destacam o aço e o betão. (Calado, et al., 2010)

Em particular, as colunas mistas de aço e betão encontram-se durante a vida útil da estrutura sujeitos à compressão ou à flexão composta. Geralmente, fazem parte de edifícios e têm como função suportar as cargas gravíticas aplicadas nas lajes e vigas, conduzindo-as até às fundações, bem como, resistir às acções horizontais, nomeadamente acções sísmicas ou acções do vento.

Embora as primeiras utilizações de elementos estruturais mistos aconteça nas civilizações antigas, as primeiras investigações sobre colunas mistas de aço e betão, começaram apenas no século 20. Nos anos 20/30 verificou-se uma grande aplicação em edifícios altos em Chicago, EUA, cujo dimensionamento era realizado com base no documento americano “Standard Specifications for Concrete and Reinforced Concrete, 1924”. Porém, apenas em 1943 regulamentação referente a este tipo de solução estrutural entrou em vigor na Alemanha, através da norma DIN 1045.

Em seguida, verificou-se um período de fraco progresso, quebrado durante os anos 50 com o desenvolvimento de diversos métodos de cálculo, tais como as secções de aço cheias de betão de Klöppel (1ª publicação em 1935), tidos em conta na regulamentação alemã para o aço, DIN 1050 (1954).

Durante os anos 70 foi desenvolvido pela equipa de Roik, Bergmann, Bode e Wagenknecht (1975), um método de dimensionamento que fundamenta parte do actual Eurocódigo 4 (EN 1994) – Projecto de estruturas mistas aço-betão. (Eggemann, 2006)

O desenvolvimento de colunas mistas de aço e betão são assim resultado de uma crescente procura por soluções estruturais com elevada resistência que permitam construir estruturas de alta exigência funcional, tais como, edifícios altos, pontes e viadutos. (Calado, et al., 2010)

Através de uma análise comparativa entre estruturas mistas de aço-betão, estruturas tradicionais de betão armado e estruturas metálicas, pode-se concluir que as primeiras apresentam maior resistência à compressão e à flexão e maior rigidez (Quadro 1.1), para uma determinada geometria de secção transversal (Figura 1.1).

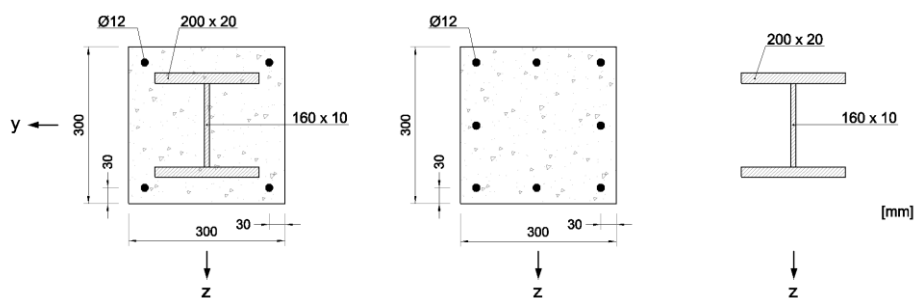


FIGURA 1.1 – (ESQ. – DRT.) SECÇÃO TRANSVERSAL MISTA, DE BETÃO ARMADO E DE AÇO

QUADRO 1.1 - COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA E CARACTERÍSTICAS DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS MISTA, DE BETÃO ARMADO E DE AÇO APRESENTADAS NA FIGURA 1.1.

Secção	Resistência à compressão	Resistência à flexão			Rigidez à flexão		
		y-y	z-z		y-y	z-z	
Mista	100%	100%	64% y-y	100%	100%	70% y-y	100%
Betão Armado	42%	30%	100% y-y	46%	49%	100% y-y	72%
Aço	66%	77%	52% y-y	62%	65%	39% y-y	38%

Notas: Os valores com a indicação “y-y” permitem relacionar o decréscimo de resistência e rigidez do eixo de menor inércia (z-z) em relação o eixo de maior inércia (y-y); Admite-se a rigidez não fissurada da secção de betão armado.

Deste modo, as colunas mistas apresentam, face às soluções unicamente em betão armado, menor secção para atingir uma determinada resistência, sendo uma característica com especial relevância em edifícios altos ou com limitações de espaço. Comparando as colunas mistas às colunas metálicas, o betão que as envolve aumenta a resistência ao fogo e diminui a tendência de encurvadura local das chapas do perfil de aço. (Calado, et al., 2010)

A principal motivação da concepção de um *toolkit* em *MS Excel* atende à diminuta oferta e crescente procura de programas de cálculo que permitam verificar a segurança de colunas mistas de aço e betão de acordo com a EN1994-1-1. Por outro lado, a mesma ferramenta permite analisar diferentes geometrias e classes dos materiais constituintes e concluir quais os parâmetros com maior preponderância no dimensionamento deste tipo de solução estrutural.

1.2 OBJECTIVOS

Pretende-se com a elaboração do *toolkit* em *MS Excel*, desenvolver uma ferramenta sólida e de fácil utilização que permita o dimensionamento e verificação da segurança de colunas mistas de acordo com a EN1994-1-1, quer na prática de projecto como no estudo e análise individual deste tipo de solução estrutural.

Visto se tratar de colunas mistas – aço e betão – é importante a capacidade de utilização de secções soldadas com geometria a definir pelo utilizador, bem como de perfis de aço comerciais.

A análise e verificação deste tipo de solução estrutural é realizada de acordo com as metodologias apresentadas na regulamentação referida anteriormente, as quais devem ser apresentadas ao utilizador na forma de relatórios organizados de acordo com as verificações da segurança a realizar, permitindo assim a interpretação dos resultados e o dimensionamento de colunas mistas que verifiquem as exigências do projecto em que se enquadram.

As metodologias de cálculo a desenvolver devem-se adequar às geometrias circulares e rectangulares da secção transversal, o que impele a concepção de dois *toolkits* distintos:

- *Colunas Mistas Circulares - Verificação da Segurança (EN1994-1-1).xlsx*
- *Colunas Mistas Rectangulares - Verificação da Segurança (EN1994-1-1).xlsx*

De forma a facilitar a utilização da ferramenta de cálculo é importante minimizar a introdução de dados, apresentar ao utilizador um esquema gráfico da secção transversal que dimensiona, bem como, alertar o utilizador quando os limites admissíveis não são respeitados e as verificações adicionais a realizar nesses casos.

Adicionalmente, o agrupamento dos dados a introduzir e de um resumo dos resultados das diversas verificações da segurança, é essencial para uma rápida avaliação da solução estrutural dimensionada.

Após conclusão da ferramenta de cálculo, a presente dissertação tem como objectivo desenvolver um estudo paramétrico – como recurso ao *toolkit* – e assim determinar quais as secções transversais com melhor relação material/resistência, ou seja, a melhor relação custo/resistência.

Será ainda possível avaliar qual a influência da variação da classe de resistência do aço estrutural, do betão, a percentagem de armadura, a espessura das chapas, e o diâmetro do tubo, na resistência da secção transversal.

1.3 METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

De forma a desenvolver uma ferramenta fiável, é efectuado em primeiro lugar um levantamento da regulamentação e conceitos aplicáveis, o que permite definir os parâmetros a analisar aquando da verificação da segurança de colunas mistas de aço-betão.

Em segundo lugar, com base no primeiro ponto e em casos de obra, identificam-se os casos a resolver pela ferramenta de cálculo a elaborar, organiza-se as tipologias de secção transversal e define-se os dados, parâmetros e resultados comuns a todos os casos.

Após o levantamento dos métodos de cálculo e conceitos teóricos fundamentais à análise de colunas mistas, desenvolve-se, utilizando o *MS Excel*, várias folhas de cálculo que permitem determinar os diferentes parâmetros.

Depois de desenvolvidos os mecanismos necessários, de forma a facilitar a utilização do programa e interpretação dos resultados, minimizam-se os dados introduzidos e agrupa-se num primeiro separador do *toolkit* todos os dados e resultados finais. Nos restantes separadores, encontram-se as ferramentas necessárias ao cálculo, bem como, relatórios da verificação da segurança de acordo com *EN1994-1-1* onde se apresentam os resultados parciais dos cálculos efectuados.

Em simultâneo com a elaboração do *toolkit*, redigiu-se a presente dissertação, na qual se pretendeu compilar e organizar todas as informações, análises e conclusões. Este documento encontra-se estruturado em capítulos organizados da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução – Enquadramento das colunas mistas de aço e betão e sua evolução cronológica, apresentação dos objectivos que motivaram a realização da presente dissertação e apresentação das etapas do desenvolvimento do *toolkit* em *MS Excel*.
- Capítulo 2: Tipologias da secção – Apresentação das tipologias dispostas na *EN1994-1-1*, e identificação das tipologias a analisar no *toolkit*. Apresentam-se ainda figuras de casos de obra.

- Capítulo 3: Métodos de cálculo – Pretende-se enunciar os estudos e investigações realizadas na área científica em que se enquadra a presente dissertação, designadamente a análise de colunas mistas. Para tal, realiza-se o levantamento da regulamentação aplicável, que para o efeito será considerada a *EN1994*, com especial relevância à *Parte 1-1* do mesmo documento.
- Capítulo 4: Resistência da secção transversal – Apresentação das metodologias que permitem determinar, através de uma análise plástica, a resistência da secção transversal a esforços de cálculo associados à verificação da coluna mista aos estados limites últimos de encurvadura, tais como a compressão, a flexão composta com compressão e a flexão desviada composta com compressão. Adicionalmente, apresenta-se uma metodologia que permite avaliar a influência ou não do esforço transversal a qual pode implicar uma diminuição da tensão de cedência do perfil de aço estrutural da coluna mista.
- Capítulo 5: Metodologias para a determinação da curva de interacção M-N – Neste capítulo são apresentadas as diferentes metodologias para a determinação do diagrama de interacção de colunas rectangulares e colunas circulares. No primeiro caso com recurso a blocos rectangulares de tensões, e no segundo caso através de expressões que permitem decompor geometricamente a circunferência, de forma a que sejam equivalente aos elementos da secção transversal acima e abaixo da linha neutra plástica.
- Capítulo 6: Disposições construtivas – De forma a conduzir ao dimensionamento de secções que apresentam boas condições de resistência e utilização, apresenta-se neste capítulo limites para determinados parâmetros, tanto geométricos como mecânicos, que permitem verificar o campo de aplicação das soluções estruturais analisadas. As disposições construtivas a ter em conta no dimensionamento de colunas mistas dependem directamente das tipologias de secção pelo que se apresentam organizadas de acordo com as mesmas.
- Capítulo 7: Verificação da segurança em relação aos estados limites últimos – Neste capítulo são apresentadas metodologias que permitem verificar a segurança aos estados limites últimos associados à encurvadura da coluna por compressão, à flexão composta com compressão e à flexão desviada composta com compressão, de acordo com a *EN1994-1-1*. No *toolkit* de cálculo recorre-se a essas metodologias, e apresenta-se em diferentes separadores os relatórios de cada verificação da segurança.
- Capítulo 8: Exemplos de cálculo e de aplicação do toolkit – Após expostos todos os elementos necessários à análise e dimensionamento de colunas mistas de aço e betão, apresenta-se dois exemplos de aplicação: uma coluna rectangular e uma coluna circular, com objectivo de facilitar ao utilizador a aplicação da ferramenta de cálculo.
- Capítulo 9: Estudo paramétrico – Com recurso ao *toolkit* e a programação de *Macros (MS Excel)* em linguagem *visual basic*, é possível fixar determinados parâmetros e comparar semelhantes soluções fazendo variar por exemplo, o diâmetro, as espessuras das chapas, a classe de resistência do aço estrutural, a classe de resistência do betão, e a taxa de armadura. Este capítulo tem especial importância na aquisição de conhecimentos que permitam

fundamentar conclusões em relação às diferentes tipologias e suas dimensões, bem como, avaliar a influência dos diversos parâmetros na resistência da secção.

- Capítulo 10: Conclusões – Com recurso à capacidade de cálculo automático do toolkit é possível analisar um elevado número de tipologias de secção transversal em relação à resposta que dão aos esforços a que estão sujeitas e aos resultados das respectivas verificações da segurança. Utilizando os conhecimentos adquiridos nesta análise tiram-se conclusões quanto à preponderância dos diferentes parâmetros na verificação da segurança e no dimensionamento deste tipo de solução estrutural.
- Capítulo 11: Bibliografia – Neste capítulo registam-se os elementos bibliográficos que serviram de investigação e apoio científico na elaboração da presente dissertação, bem como, as regulamentações e normas em que se baseiam as metodologias apresentadas para a verificação da segurança de colunas mistas de aço e betão.
- Anexo A – Propriedades e características dos materiais estruturais constituintes das colunas mistas, nomeadamente, o betão, aço estrutural e aço das armaduras longitudinais.
- Anexo B – Organização das características geométricas da secção transversal em secções rectangulares e circulares. Definição dos blocos rectangulares de tensões para cada tipologia da secção transversal. Definição de expressões que permitem determinar a área, inércia e centro de massa de blocos rectangulares de tensões e de secções circulares. Adicionalmente, apresenta-se as dimensões e propriedades dos perfis comerciais relevantes para os métodos de cálculo apresentados.
- Anexo C – Relatórios das verificações de segurança correspondentes aos exemplos de cálculo apresentados no capítulo 8.
- Anexo D – Estudo paramétrico: Apresentação dos resultados obtidos organizados de acordo com as variáveis em análise, e caso se aplique, com as tipologias de secção transversal.
- Anexo E – Apresentação de um exemplo de código em linguagem Visual Basic, desenvolvido para realização de estudos paramétricos.

No restante corpo da dissertação, quando se refere a colunas mistas, refere-se naturalmente às de aço e betão. Em todo o omissivo, os artigos enunciados referem-se à *EN1994-1-1*, indicando-se apenas o seu número. Em relação às expressões e equações, os números entre parênteses rectos, [6.34] por exemplo, referem-se à mesma norma (*EN1994-1-1*). As restantes expressões apresentam-se entre parênteses, (3.5) por exemplo, e seguem uma numeração contínua de acordo com o capítulo em questão.

2. TIPOLOGIAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL

2 TIPOLOGIAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL

As situações mais correntes de tipologias da secção transversal apresentam-se geometricamente divididas em:

- Secções rectangulares;
- Secções circulares.

As secções podem ainda diferenciar-se, de acordo com a sua tipologia, em dois grupos:

- Secções tubulares
- Secções não-tubulares

As secções de forma circular (Figura 2.1 – e, f) são tipicamente constituídas por perfis de aço tubulares cheios de betão (e), por outro lado, as secções rectangulares podem ser dimensionadas utilizando perfis de aço tubulares cheios de betão (d), e não-tubulares (a, b, c) utilizando-se correntemente secções em I e H total (a) ou parcialmente (b) betonadas.

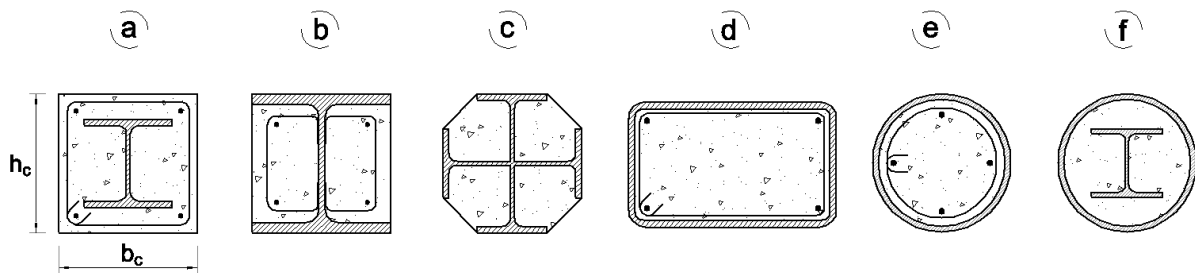


FIGURA 2.1 – TIPOLOGIAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL APRESENTADAS NA EN1994-1-1

Os perfis metálicos utilizados podem ser constituídos por chapas de aço soldadas ou por perfis comerciais (Figura 2.2), como por exemplo, *Circular Hollow Section (CHS)*, *Rectangular Hollow Section (RHS)*, *Square Hollow Section (SHS)*, *IPE*, *HEA*, *HEB* e *HEM*. As dimensões e propriedades, relevantes para o cálculo, dos perfis comerciais são apresentadas nos Anexos B.1.4 e B.2.3.

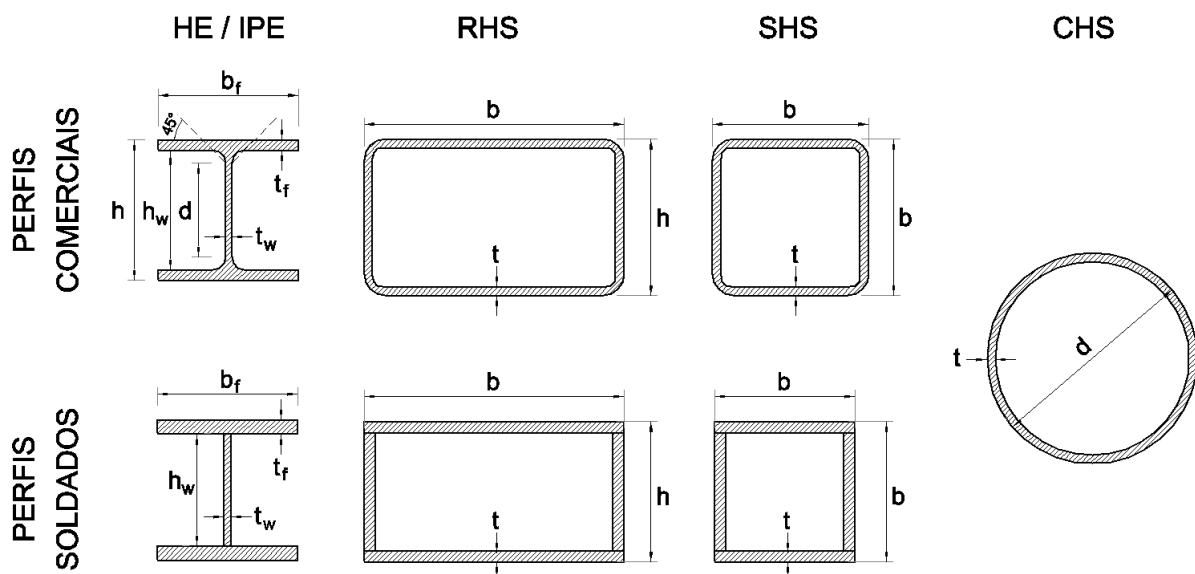


FIGURA 2.2 – DIMENSÕES DOS PERFIS DE AÇO, COMERCIAIS OU SOLDADOS, QUE CONSTITUEM A SECÇÃO TRANSVERSAL DA COLUNA MISTA

As tipologias das secções transversais das colunas mistas a verificar através do *toolkit* de cálculo enquadram-se no campo de aplicação do método simplificado de cálculo (ver 0). As vantagens específicas de cada tipologia são apresentadas em seguida.

2.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA E SECÇÃO PARCIALMENTE BETONADA

Este tipo de solução estrutural caracteriza-se por um perfil de aço estrutural em I ou H que poderá estar envolvido em betão, denominando-se de secção totalmente betonada (Figura 2.1 – a), ou apresentar somente a alma do perfil de aço envolvida em betão, designada por secção parcialmente betonada (Figura 2.1 – b).

As secções totalmente betonadas apresentam vantagens em situações de exigência de segurança ao fogo, visto que o betão que protege o aço estrutural apresenta maior resistência ao fogo. Por outro lado, as parcialmente betonadas são vantajosas durante o processo de betonagem, por permitirem a sua execução na horizontal, utilizando como área de cofragem o perfil de aço estrutural, diminuindo o tempo de execução e aumentando a sua aplicabilidade em obra (Figura 2.3).

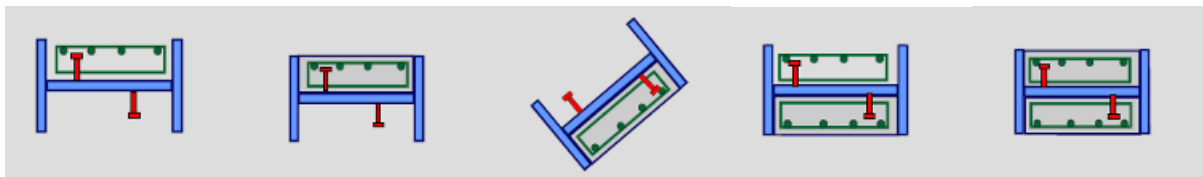


FIGURA 2.3 – EXECUÇÃO DE UMA COLUNA PARCIALMENTE BETONADA

Adicionalmente, as primeiras permitem atribuir à estrutura um acabamento em betão. (Liu)

Salienta-se que a presença de betão em torno do perfil de aço impede a encurvadura local das chapas. Para as secções parcialmente betonadas, o betão confere resistência adicional à encurvadura local dos banzos para o interior da secção.

Ambas as tipologias referidas permitem, pelo facto de serem constituídas por perfis de aço estrutural, suportar cargas durante a fase construtiva.

Deverá ainda ter-se em conta que o betão não é confinado pelo perfil de aço, logo a ligação entre os materiais é assegurada por meio de reforços de armadura transversal.

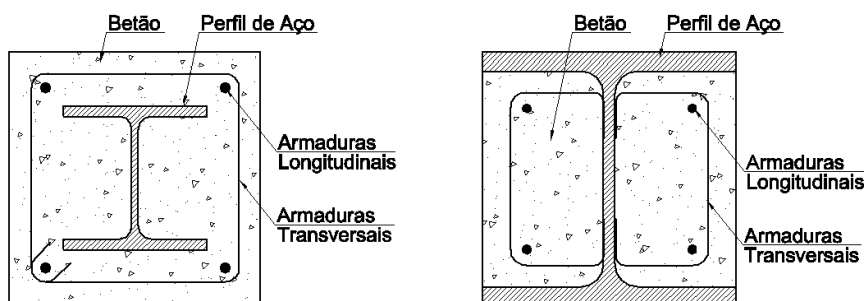


FIGURA 2.4 – SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA (ESQ.) E SECÇÃO PARCIALMENTE BETONADA (DIR.)

2.2 SECÇÃO TUBULAR RECTANGULAR E QUADRANGULAR CHEIA DE BETÃO

Esta tipologia de secção transversal apresenta grandes vantagens na economia do projecto, visto que se pode considerar um aumento da resistência do betão à rotura por compressão devido ao facto de o betão se encontrar confinado pelo perfil de aço estrutural (Figura 2.5), que por sua vez também serve de cofragem.

Dado que o aço estrutural se encontra na periferia da secção transversal, e este apresenta uma resistência superior ao betão, o momento resistente de secções tubulares é superior ao das secções total e parcialmente betonadas, para um determinada área de aço. Esta diferença é evidente para o eixo de menor inércia.

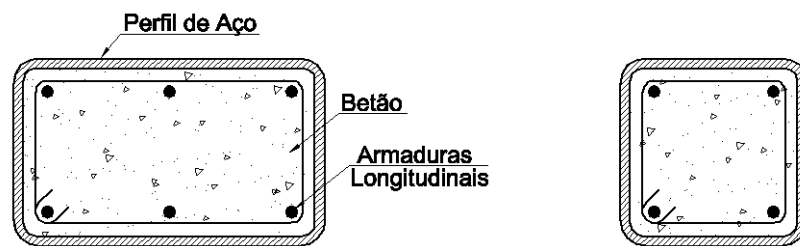


FIGURA 2.5 – SECÇÃO TUBULAR RECTANGULAR (ESQ.) OU QUADRANGULAR (DIR.) CHEIA DE BETÃO

Tais vantagens asseguram por um lado um aumento da capacidade resistente e conseqüentemente a diminuição da quantidade de betão e aço necessário para atingir a resistência exigida, bem como, a diminuição do tempo de execução em obra e dos custos, obtendo-se assim uma solução estrutural competitiva.

Salienta-se que a presença de betão no interior do tubo de aço confere resistência adicional à encurvadura local da chapa. Comparando o modo de encurvadura local da chapa de um tubo de aço isolado com um tubo de aço cheio de betão, conclui-se que o comprimento de encurvadura no primeiro caso é superior pois a chapa pode encurvar livremente para o interior do tubo (Figura 2.6).

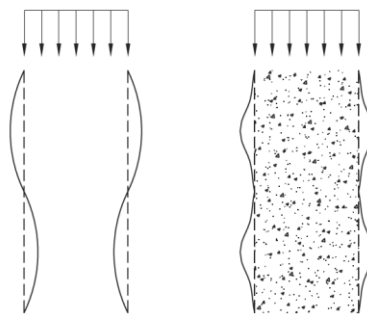


FIGURA 2.6 – DIFERENÇA ENTRE O MODO E COMPRIMENTO DE ENCURVADURA DE UMA SECÇÃO DE AÇO ISOLADA OU CHEIA DE BETÃO

Adicionalmente, as colunas tubulares apresentam superior resistência ao esforço transversal, considerando que este esforço é resistido por uma secção de aço fechada.

2.3 SECÇÃO TUBULAR CIRCULAR

As secções tubulares circulares cheias de betão apresentam as mesmas vantagens que as secções rectangulares tubulares. Porém, pelo facto de serem circulares poderá considerar-se um aumento da resistência do betão superior ao valor de cálculo, f_{cd} , devido ao efeito de confinamento, cuja determinação é apresentada no ponto 4.1.1.

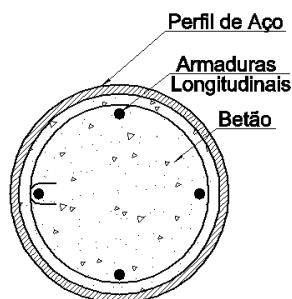


FIGURA 2.7 – SECÇÃO TUBULAR CIRCULAR DE AÇO CHEIO DE BETÃO

A concepção do *toolkit* exige o levantamento da regulamentação aplicável, bem como dos métodos de cálculo a considerar na verificação de segurança colunas mistas.

Adicionalmente, identificam-se as tipologias de secção transversal abrangidas por essa mesma regulamentação e apresentam-se casos de obras em que se dimensionou colunas mistas.

2.4 CASOS DE OBRA

Tal como referido no ponto 1.1 as colunas mistas de aço e betão têm a sua utilização difundida em edifícios altos. A evolução das técnicas construtivas é evidente após as inúmeras construções de edifícios e pontes mistas. Por outro lado, os ensaios experimentais realizados permitiram aproximar os métodos de cálculo à realidade dos casos práticos.

Em seguida apresentam-se diversos pormenores e ilustrações de colunas mistas após ensaios experimentais e durante a fase construtiva de edifícios.



FIGURA 2.8 – MODO DE ENCURVADURA DE UMA COLUNA DE AÇO (PARA DENTRO E FORA DO PLANO DA CHAPA) E DE UMA COLUNA MISTA AÇO-BETÃO (PARA FORA DO PLANO DA CHAPA)



FIGURA 2.9 – EXECUÇÃO DE UMA COLUNA PARCIALMENTE BETONADA, ATRAVÉS DA TÉCNICA APRESENTADA NA FIGURA 2.3



FIGURA 2.11 - COLUNA MISTA DE SECÇÃO CIRCULAR, ANTES DA BETONAGEM

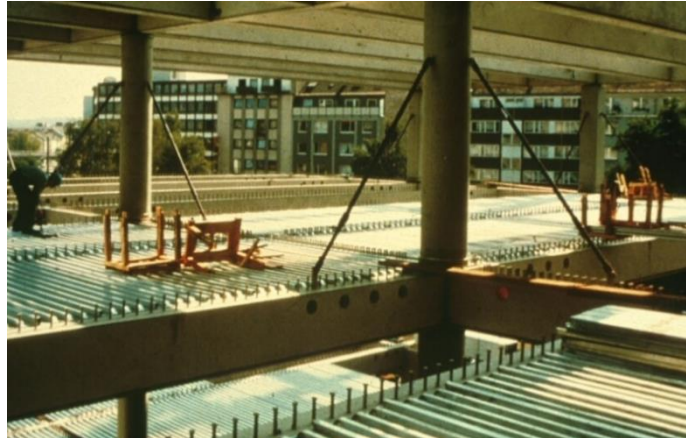


FIGURA 2.10 - FASE CONSTRUTIVA DE UM EDIFÍCIO CONSTITUÍDO POR ELEMENTOS MISTOS DE AÇO-BETÃO

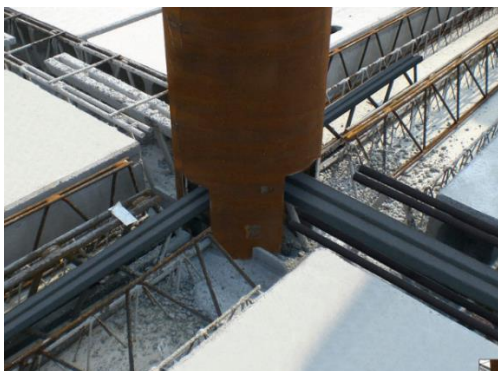


FIGURA 2.12 - PORMENOR DA LIGAÇÃO COLUNA-VIGA

3. MÉTODOS DE CÁLCULO

3 MÉTODOS DE CÁLCULO

3.1 REGULAMENTAÇÃO APLICÁVEL

O Comité Europeu de Normalização (CEN) dispõe de diversos regulamentos, denominados de Eurocódigos, que visam a unificação de critérios e normativas de cálculo e verificação da segurança de estruturas na comunidade europeia.

Os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP) têm como objectivo corresponder às exigências e condicionalismos presentes no país onde se implanta a estrutura dimensionada.

Em Portugal, a responsabilidade pela tradução dos Eurocódigos e definição dos NDP recai no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por incumbência do Instituto Português da Qualidade (IPQ).

Em seguida, apresentam-se os Eurocódigos publicados, e enunciam-se os conteúdos a ter em conta no projecto de estruturas mistas de aço e betão:

- Eurocódigo 0 (EN 1990) - Bases do projecto de estruturas
 - Definição dos coeficientes de majoração e minoração das acções com efeito favorável e desfavorável, respectivamente;
 - Definição das combinações de acções, organizadas de acordo com os estados limites últimos (ELU) e estados limites de utilização (ELS).
- Eurocódigo 1 (EN 1991) - Acções em estruturas
 - Quantificação das acções a ter em conta no cálculo e dimensionamento de estruturas.
- Eurocódigo 2 (EN 1992) - Projecto de estruturas de betão
 - Definição dos coeficientes parciais, γ , de minoração da resistência do betão e das armaduras para os estados limites últimos;
 - Apresentação das propriedades do betão, tais como, o módulo de elasticidade, o coeficiente de poisson, o coeficiente de dilatação térmica linear, o coeficiente de fluência, as relações tensões-extensões, e o valor característico da tensão de rotura por compressão;
 - Apresentação das propriedades do aço das armaduras para betão armado, tais como, o módulo de elasticidade, o coeficiente de dilatação térmica linear, o valor característico da tensão de cedência à tracção, as relações tensões-extensões, e o valor característico da extensão à tensão máxima;
 - Definição do recobrimento das armaduras para o betão armado.
- Eurocódigo 3 (EN 1993) - Projecto de estruturas de aço
 - Definição dos coeficientes de parciais, γ , de minoração da resistência do aço para os estados limites últimos.

- Apresentação das propriedades do aço estrutural, tais como, a ductilidade, o módulo de elasticidade, o coeficiente de poisson, o módulo de distorção, o coeficiente de dilatação térmica linear, o valor característico da tensão de cedência e da tensão de rotura à tracção, e as relações tensões-extensões;
 - Determinação do valor de cálculo da resistência plástica ao esforço transversal da secção de aço estrutural;
 - Definição das curvas europeias de dimensionamento de colunas de aço e do factor de imperfeição correspondente.
- Eurocódigo 4 (EN 1994) - Projecto de estruturas mistas aço-betão
 - Apresentação das tipologias de secção transversal e correspondentes disposições construtivas e definição do campo de aplicação de colunas mistas;
 - Apresentação das propriedades mecânicas das colunas mistas, tais como, a rigidez de flexão efectiva e a esbelteza normalizada;
 - Determinação da resistência da secção transversal de colunas mistas, nomeadamente, resistência ao esforço transversal, ao esforço normal, à flexão composta com compressão e à flexão desviada composta com compressão;
 - Apresentação dos métodos de cálculo e das verificações da segurança a ter em conta no dimensionamento de colunas mistas de aço e betão.
 - Eurocódigo 7 (EN 1997) - Projecto geotécnico
 - Quantificação de acções, propriedades do terreno e definição de modelos de cálculo para o dimensionamento de fundações;
 - Eurocódigo 8 (EN 1998) - Projecto de estruturas em regiões sísmicas
 - Quantificação da acção sísmica a ter em conta no projecto de estruturas implantadas em regiões sísmicas, tendo em consideração os parâmetros definidos nos anexos nacionais.

No caso das estruturas mistas, a norma que prevê o seu correcto dimensionamento e verificação da segurança é portanto o *Eurocódigo 4* (EN 1994). Em particular, as colunas mistas de aço e betão são previstas na *Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, do mesmo documento (EN 1994-1-1). Porém, em relação ao projecto de estruturas em que este tipo de solução se enquadra, é necessário considerar os vários Eurocódigos em simultâneo.

3.2 MÉTODOS DE CÁLCULO

A verificação de segurança de elementos estruturais é realizada, como previsto na *EN1990*, para os estados limites últimos de resistência garantindo que os esforços resistentes são superiores aos actuantes. As metodologias para a determinação da resistência da secção e verificação de colunas mistas, apresentadas na presente dissertação, baseiam-se nos conteúdos teóricos e métodos de cálculo expostos no livro *Estruturas Mistas de Aço e Betão* (Calado, et al., 2010) e estão de acordo com os diversos Eurocódigos.

Em particular, a *EN1994-1-1* prevê a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos associados aos seguintes fenómenos:

- Encurvadura local das chapas (6.7.1)
- Encurvadura da coluna mista (6.7.2 e 6.7.3)
- Cargas localizadas (6.7.4)

A verificação da encurvadura local das chapas pode ser evitada quando a sua esbelteza não excede os valores máximos (Quadro 6.3, *EN1994-1-1*) apresentados no capítulo 5.

Em relação à encurvadura da coluna são previstos na *EN1994-1-1* dois métodos de cálculo:

- Método geral de cálculo (6.7.2)
- Método simplificado de cálculo (6.7.3)

De acordo com o artigo 6.7.1(2), os métodos de cálculo apresentados aplicam-se a elementos mistos comprimidos, constituídos por Aço e Betão de densidade normal, das seguintes classes de resistência:

- Aço S235 a S460
- Betão C20/25 a C50/60

Salienta-se no artigo 6.7.1(3) que os elementos comprimidos designam-se tanto a colunas mistas isoladas como a outros elementos comprimidos inseridos em estruturas reticuladas onde os restantes elementos estruturais são elementos mistos ou de aço.

3.2.1 MÉTODO GERAL DE CÁLCULO

O método geral de cálculo consiste num conjunto de critérios direccionados à análise elasto-plástica de elementos estruturais mistos considerando o comportamento não linear dos diversos materiais, e deve ser aplicado quando a secção transversal é assimétrica, recorrendo a um programa numérico que tenha em conta os critérios preconizados pela *EN1994-1-1*, artigo 6.7.2.

3.2.2 MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO

O campo de aplicação do método simplificado de cálculo é limitado a elementos estruturais mistos sujeitos a compressão com secção transversal bissimétrica ao longo do comprimento, que representa a generalidade dos casos das colunas mistas de aço-betão, e portanto será objecto de estudo da presente dissertação.

Os esforços actuantes (N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$, $V_{z,Ed}$, $V_{y,Ed}$) devem ser obtidos através de uma análise global da estrutura de acordo com a secção 5 da EN1994-1-1.

3.2.2.1 Campo de Aplicação

A EN1994-1-1 prevê, adicionalmente, um conjunto de normas de modo a que as colunas mistas dimensionadas se enquadrem nos «200 ensaios experimentais que calibraram o método simplificado de cálculo, desenvolvido na década de 80 na Universidade de Bochum, Alemanha, por Roik e Bergmann [1990 e 1992]». (Calado, et al., 2010)

De entre esse conjunto de normas salienta-se (artigo, 6.7.3.1):

- Secção bissimétrica ao longo de todo o seu comprimento;
- Não aplicável a tipologias constituídas por duas ou mais secções de aço não ligadas entre si (Figura 2.1 – f);
- A secção de aço deve ser Laminada, Enformada a frio ou Soldada;
- As disposições construtivas apresentadas no capítulo 5, de acordo com os artigos 6.7.3.1(2) a (4);
- Limitação da esbelteza normalizada, determinada de acordo com o artigo 6.7.3.3(2), tal que:

$$\bar{\lambda} \leq 2,0 \quad [6.28]$$

A concepção do *toolkit* de verificação da segurança tem em consideração as diversas tipologias de secção (ponto 2.2) a que se aplica o método simplificado de cálculo (Figura 2.1 – a, b, d, e), bem como, os campos de aplicação e disposições construtivas (capítulo 6), alertando o utilizador caso os limites não sejam respeitados.

4. RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

4 RESISTÊNCIA DA SECÇÃO TRANSVERSAL

Os esforços resistentes plásticos¹ da secção transversal são determinados com base na área, geometria e tensão característica de cada material – Aço, Betão e Armaduras longitudinais. O valor de cálculo das resistências dadas por estes materiais é determinado considerando as seguintes hipóteses:

- Interação² total entre:
 - Betão – Aço Estrutural;
 - Betão – Armaduras;

- Betão:
 - Resistência à tracção desprezada;
 - Resistência à compressão reduzida a 85% do valor de cálculo da tensão de rotura do betão ($0,85 f_{cd}$) para as situações em que se verifica a ausência do efeito de confinamento (secções não-tubulares);
 - Resistência à compressão igual ou superior ao valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão para situações em que se verifica o efeito de confinamento (secções tubulares);

- Perfil de Aço Estrutural:
 - Resistência à tracção e compressão igual ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço do perfil (f_{yd});

- Armaduras Longitudinais:
 - Resistência à tracção e compressão igual ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço das armaduras (f_{sd}).

4.1 ESFORÇO NORMAL

A tensão, σ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), é uma medida de força (N) por unidade de área, A (m^2):

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (\text{N m}^{-2}) \quad (4.1)$$

Logo, a força é dada pelo produto entre a tensão com a área onde actua:

$$N = A \times \sigma \quad (4.2)$$

Visto se tratar de uma análise plástica, a resistência da secção transversal ao esforço normal é calculada considerando que os diferentes materiais apresentam em toda a sua área transversal uma tensão igual ao respectivo valor de cálculo. Em particular, para o betão, a EN1994-1-1 preconiza a redução do valor de cálculo da tensão de rotura por compressão, f_{cd} , através do factor de 0.85, de forma a considerar a influência dos efeitos de longa duração, excluindo a fluência e retracção que são

¹ – A resistência plástica da secção resulta de um diagrama vertical das tensões de cálculo de cada material.

² – A interação está relacionada com o escorregamento verificado entre os dois materiais, e depende da rigidez do meio de conexão, do seu número e do seu posicionamento na interface do elemento (Calado, et al., 2010).

tidas em conta na determinação do módulo de elasticidade efectivo do betão ($E_{c,eff}$, ver 7.1.1). (Bergmann, 1995)

Na Figura 4.1, apresentam-se os diagramas de tensão nos diversos materiais da secção transversal da coluna mista. A linha neutra encontra-se fora da secção, a que corresponde compressões em toda a sua área transversal.

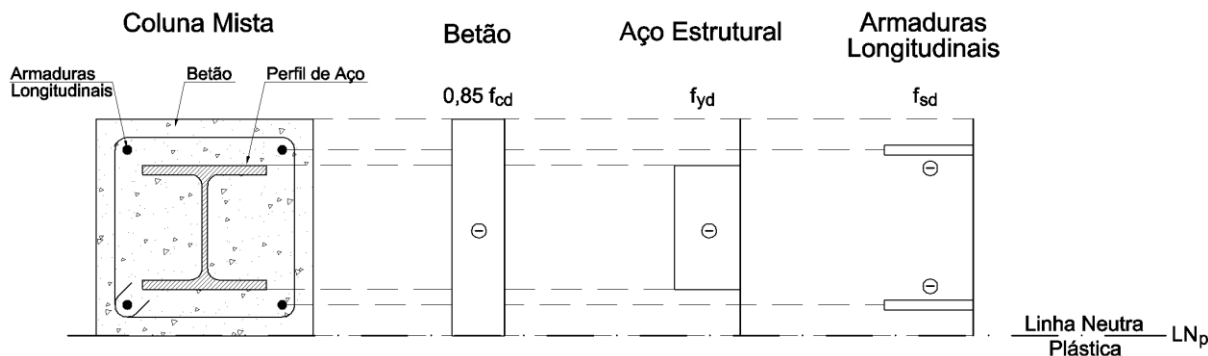


FIGURA 4.1 – DIAGRAMAS DE TENSÃO DO BETÃO, AÇO E ARMADURAS DE UMA SECÇÃO TOTALMENTE COMPRIMIDA

4.1.1 DETERMINAÇÃO DO ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO

Considerou-se inicialmente que todos os materiais resistem à compressão. Deste modo, o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico, $N_{pl,Rd}$, da secção transversal da coluna mista depende da área e da tensão de cada um dos seus componentes, e é obtido, de acordo com o artigo 6.7.3.2(1), através da soma das resistências plásticas dos vários materiais:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.30]$$

Em que,

A – Área da secção transversal correspondente ao perfil de aço (A_a), betão (A_c) e armaduras (A_s), determinadas de acordo com os métodos apresentados no Anexos B.1.2 e B.2.1.

f – Valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural (f_{yd}), da tensão de rotura por compressão do betão (f_{cd}) e da tensão de cedência das armaduras longitudinais (f_{sd}), Anexo A.

Por outro lado, tal como referido no ponto 3, no caso das colunas tubulares, o perfil de aço confina o betão e oferece melhores condições de cura (Calado, et al., 2010). De forma a contabilizar o aumento de resistência, o coeficiente 0,85 referente ao valor de cálculo da tensão de rotura por compressão do betão é substituído por 1,0 (artigo 6.7.3.2(1)).

Deste modo, surgem diferentes formulações para determinar o valor de cálculo do esforço normal resistente plástico:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.30]$$

(Secções tubulares cheias de betão)

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + 0,85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.30]$$

(Secções total ou parcialmente betonadas)

4.1.2 DETERMINAÇÃO DO EFEITO DO CONFINAMENTO

Devido à sua geometria, as secções tubulares circulares cheias de betão permitem considerar um aumento da tensão de rotura por compressão do betão, superior ao valor de cálculo, f_{cd} .

Este efeito só ocorre em secções tubulares circulares, visto que o esforço normal aplicado na secção provoca, por efeito de poisson, um incremento de área transversal do betão. Devido à sua geometria circular, o tubo de aço resiste a tal incremento e não se deforma, originando uma tensão circunferencial no perfil de aço, um estado de compressão triaxial no betão e consequentemente tensões radiais de compressão no betão, as quais permitem considerar um aumento da sua tensão de rotura por compressão, f_{cd} . O aumento da tensão circunferencial actuante no perfil de aço provoca, por outro lado, uma diminuição da sua resistência. (Calado, et al., 2010)

O efeito do confinamento só ocorre caso o tubo circular seja rígido o suficiente para impedir a dilatação transversal do betão (Elremaily, et al., 2002).

Deste modo, quando a secção é quadrangular ou rectangular (Figura 4.2), a tendência para o incremento de área transversal dá origem a tensões perpendiculares às faces laterais do perfil, as quais se deformam e não permitem considerar um aumento de resistência do betão. (Calado, et al., 2010)

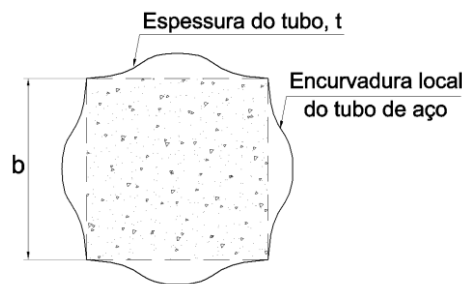


FIGURA 4.2 – ENCURVADURA LOCAL DA CHAPA DE UMA SECÇÃO TUBULAR RECTANGULAR

Adicionalmente, quando a área comprimida diminui, isto é, nos casos em que a secção está sujeita a momento flector, o incremento de área transversal sentido pelo betão é inferior, verificando-se uma redução do efeito do confinamento. De acordo com a proposição anterior o aumento da imperfeição inicial, e_0 , e o aumento da esbelta da coluna, $\bar{\lambda}$, implicam uma diminuição do efeito do confinamento.

Resumidamente:

$$\begin{array}{l}
 N_{Ed} \uparrow \quad \text{Efeito do Confinamento} \uparrow \\
 M_{Ed} \uparrow \quad e_0 \uparrow \quad \bar{\lambda} \uparrow \quad \text{Efeito do Confinamento} \downarrow
 \end{array}$$

Para que se possa considerar um aumento da resistência, aquando da verificação da segurança de colunas mistas circulares cheias de betão à compressão, é necessário verificar o seguinte campo de aplicação, artigo 6.7.3.2(6):

$$\bar{\lambda} < 0,5 \quad e \quad \frac{e}{d} \leq 0,1 \quad (4.3)$$

Em que,

$\bar{\lambda}$ – Esbelteza normalizada, determinada de acordo com a equação [6.39] (ver ponto 7.1.2.4).

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \quad (4.4)$$

d – diâmetro exterior do tubo de aço estrutural

A determinação do efeito do confinamento, depende dos parâmetros do aço, η_a , e do betão η_c , que por sua vez dependem da excentricidade, e , do esforço normal, N_{Ed} , e da esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}$.

Na verificação de segurança da coluna mista aos estados limites últimos de encurvadura, deverá portanto calcular-se a esbelteza normalizada e em seguida avaliar o campo de aplicação dos efeitos do confinamento.

O valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de compressão para secções tubulares circulares cheias de betão, considerando o efeito do confinamento, é dado pela expressão:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}\right) A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.33]$$

Em que,

t – espessura do tubo de aço estrutural

$$\begin{cases} \eta_a = \eta_{a0} \\ \eta_c = \eta_{c0} \end{cases} \quad \text{se} \quad e = 0$$

$$\begin{cases} \eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \left(10 \frac{e}{d}\right) & [6.36] \\ \eta_c = \eta_{c0} \left(1 - 10 \frac{e}{d}\right) & [6.37] \end{cases} \quad \text{se} \quad 0 < \frac{e}{d} \leq 0,1$$

$$\begin{cases} \eta_a = 1,0 \\ \eta_c = 0,0 \end{cases} \quad \text{se} \quad \frac{e}{d} > 0,1$$

$$\eta_{a0} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}) \leq 1,0 \quad [6.34]$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2 \geq 0,0 \quad [6.35]$$

Naturalmente, o valor do factor de majoração da resistência do betão à rotura por compressão não deverá ser inferior a 1,0 e o valor do factor de minoração da resistência do tubo de aço não deverá ser superior a 1,0.

$$\left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}\right) \geq 1,0 \quad (4.5)$$

$$\eta_a \leq 1,0 \quad (4.6)$$

4.2 FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

Tendo em conta as hipóteses definidas inicialmente no ponto 3, a cada posição da linha neutra plástica, LN_p , está associado, por equilíbrio estático de forças, um valor excedente – o esforço normal actuante, N_{Ed} .

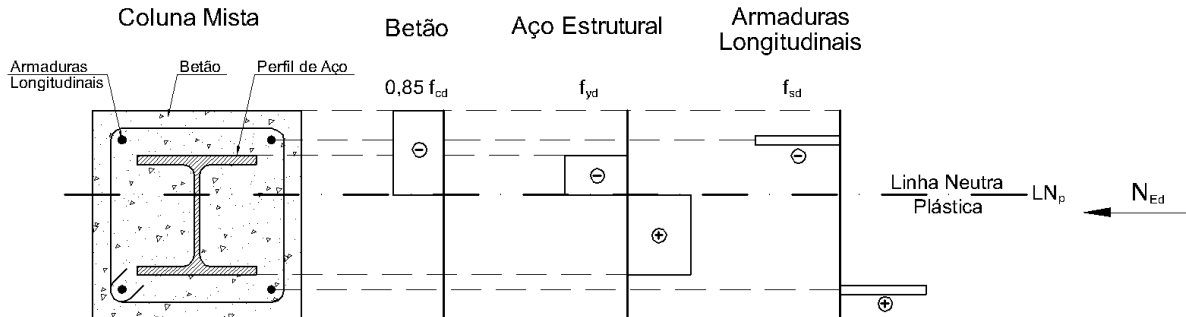


FIGURA 4.3 – DIAGRAMA DE TENSÃO DO BETÃO, AÇO E ARMADURAS PARA UMA DETERMINADA POSIÇÃO DA LINHA NEUTRA.

Deste modo, definindo inicialmente a posição da linha neutra, LN_p , é possível determinar o valor de N_{Ed} através do equilíbrio de forças da secção transversal:

$$N_{Ed} = \sum F_x \quad (4.7)$$

Para posições da LN_p entre o topo e a base da secção, encontram-se todos os valores possíveis de esforço normal, compreendidos, em termos de valor absoluto, entre o mínimo e o máximo, para os casos em que a secção se encontra totalmente traccionada [+] e totalmente comprimida [-], respectivamente.

Por outro lado, para uma determinada posição da linha neutra é possível determinar o momento flector resistente, $M_{pl,Rd}$, obtido através do somatório do produto entre braço, d , e força, F , de cada componente, i , da secção:

$$M_{pl,Rd} = \sum_i d_i F_{x,i} \quad (4.8)$$

A força é obtida pelo produto entre a área e a tensão de cálculo de cada componente. O braço corresponde à distância entre o centro de massa de cada componente e o centro de massa da secção. Visto se tratar de secções bissimétricas, o centro de massa encontra-se a meia altura.

Por outro lado, é importante notar que a área e o sinal da tensão (compressão/tracção) de cada componente depende da posição da LN_p , pois o mesmo material pode conter uma área à tracção e outra à compressão, originando diferentes componentes (i) com diferentes centros de massa.

Na Figura 4.4, apresenta-se um exemplo de uma possível decomposição de um perfil de aço, onde se identificam os diversos componentes considerados na determinação do esforço normal actuante e momento flector resistente de uma dada posição da linha neutra plástica.

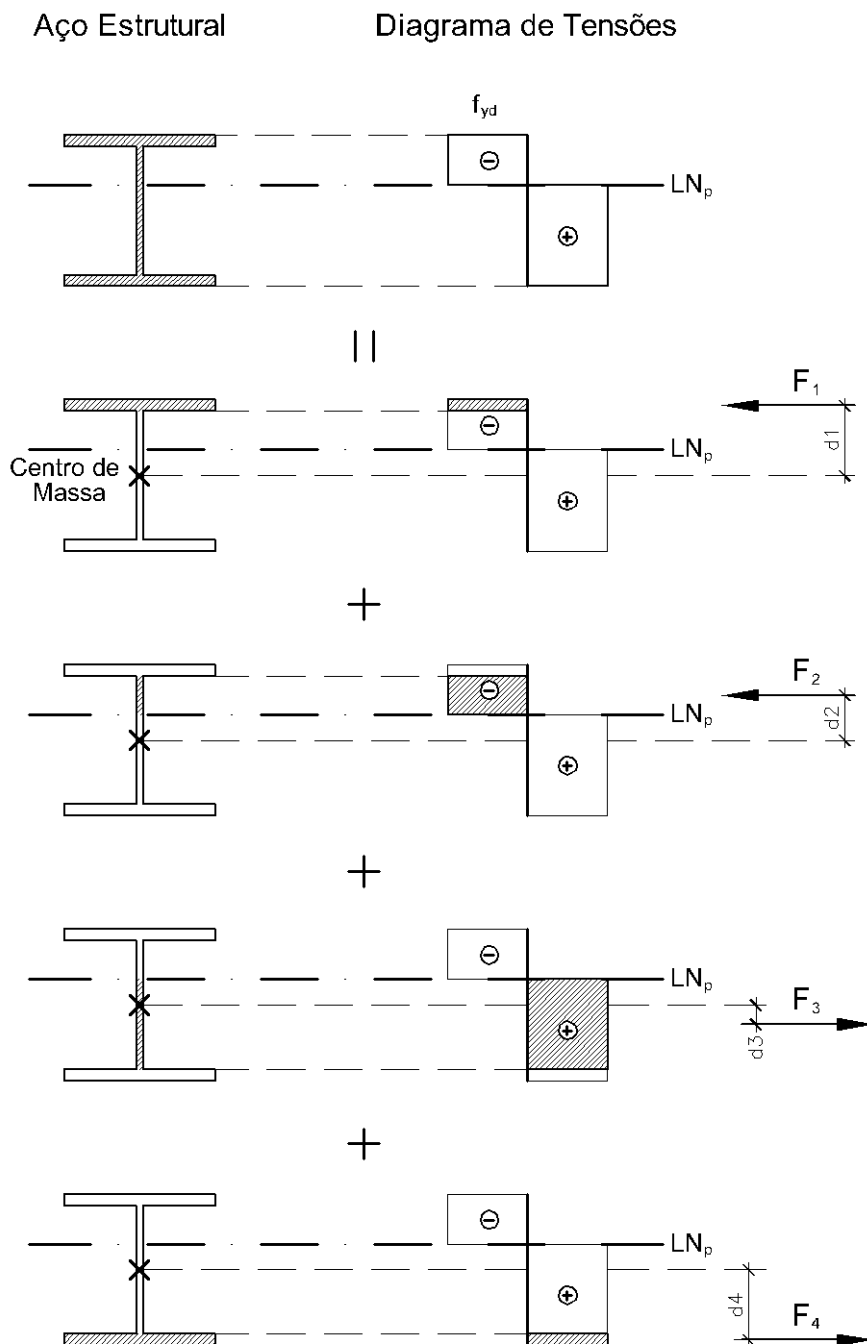


FIGURA 4.4 – DECOMPOSIÇÃO DE UM PERFIL DE AÇO E IDENTIFICAÇÃO DAS FORÇAS ENVOLVIDAS

$$N_{Ed} = \sum F_x$$

$$N_{Ed} = -|F_1| - |F_2| + |F_3| + |F_4|$$

$$M_{pl,Rd} = \sum_i d_i F_{x,i}$$

$$M_{pl,Rd} = -|F_1| d_1 - |F_2| d_2 + |F_3| d_3 + |F_4| d_4$$

Fazendo variar a posição da linha neutra plástica é possível determinar os vários pares de valores ($M_{pl,N,Rd}; N_{Ed}$) permitindo definir a curva de interacção M-N da secção transversal da coluna mista.

Através da análise dos resultados provenientes das várias posições da linha neutra plástica, conclui-se que é possível definir um conjunto de quatro pontos (6.7.3.2(5)) ao longo da curva de interacção M-N (Figura 4.5), que genericamente, se podem extrapolar a todas as secções mistas de aço-betão simétricas em relação ao eixo de flexão. Destaca-se ainda que nos diversos diagramas apresentados neste trabalho, os valores positivos do eixo vertical correspondem a esforço normal de compressão.

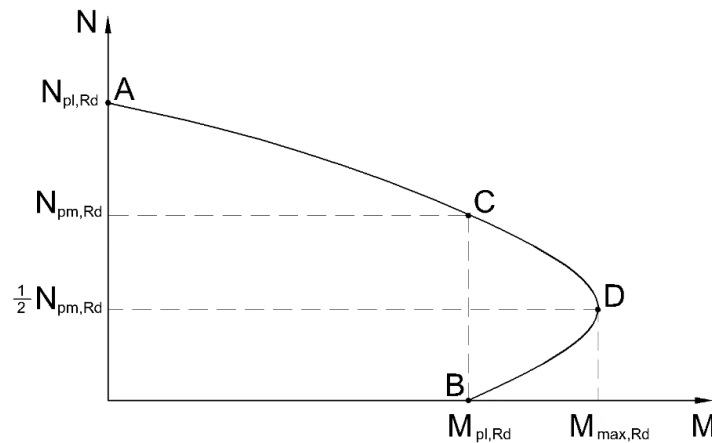


FIGURA 4.5 - CURVA DE INTERACÇÃO M-N DE UMA SECÇÃO MISTA SIMÉTRICA EM RELAÇÃO AO EIXO DE FLEXÃO

Em que,

$N_{pl,Rd}$ – Esforço normal resistente plástico de compressão

$N_{pm,Rd}$ – Esforço normal resistente da área transversal de betão

$$N_{pm,Rd} = \alpha_{cc} A_c f_{cd} \quad (4.9)$$

$$\alpha_{cc} = \begin{cases} 1,00 & \text{(secções tubulares em aço cheias de betão)} \\ 0,85 & \text{(restantes secções)} \end{cases}$$

$M_{pl,Rd}$ – Momento flector resistente plástico

$M_{max,Rd}$ – Momento flector resistente plástico máximo

Salienta-se que, no caso das secções tubulares circulares, o incremento de resistência do betão à rotura por compressão devido aos efeitos do confinamento, não é considerado na determinação das forças normais à secção. A presença de esforços de flexão, provocam uma diminuição da área comprimida e conseqüentemente a diminuição do efeito do confinamento. Deste modo, tal incremento só é considerado na verificação da coluna mista circular à compressão.

Em primeiro lugar, quando a secção está totalmente comprimida (Ponto A, Figura 4.6), o somatório das forças normais à secção é igual ao valor de cálculo do esforço normal resistente plástico, $N_{pl,Rd}$. Por simetria da secção, o momento resistente é nulo, visto que, em relação ao centro de massa, os braços das forças são simétricos mas as forças têm igual direcção e sentido.

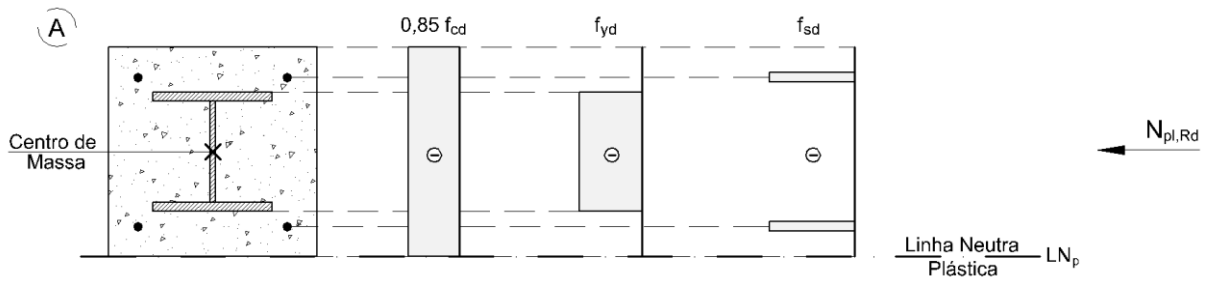


FIGURA 4.6 - PONTO A DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N: DIAGRAMA DE TENSÕES NO BETÃO, AÇO ESTRUTURAL E AÇO DAS ARMADURAS

O valor do esforço normal é nulo (Ponto B, Figura 4.7) para a posição da linha neutra cuja força equivalente ao betão comprimido (acima da LN_p) anula a força equivalente ao perfil de aço traccionado compreendido entre essa posição da linha neutra (Ponto B) e a posição simétrica em relação ao centro de massa da secção (Ponto C, Figura 4.8). Desta forma, metade da restante área do perfil de aço está à tracção e a outra metade à compressão, anulando-se. Assim é possível, por equilíbrio de forças, determinar as referidas posições da linha neutra.

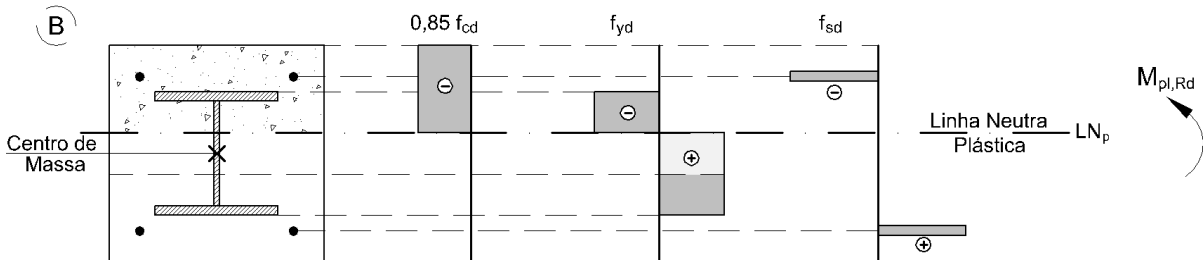


FIGURA 4.7 - PONTO B DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N: DIAGRAMA DE TENSÕES NO BETÃO, AÇO ESTRUTURAL E AÇO DAS ARMADURAS

Analisando as posições da linha neutra correspondentes ao ponto C e ponto B, verifica-se que são simétricas em relação ao centro de massa da secção. Decompondo geometricamente a secção, a região compreendida entre as linhas neutras plásticas associadas aos referidos pontos é simétrica em relação ao centro de massa da secção, logo quando submetida a tensão constante, gera uma força cujo ponto de aplicação é coincidente com o da secção, não originando assim um incremento de momento resistente, quando se compara os pontos B e C, ou seja, o seu valor é igual para ambos os pontos.

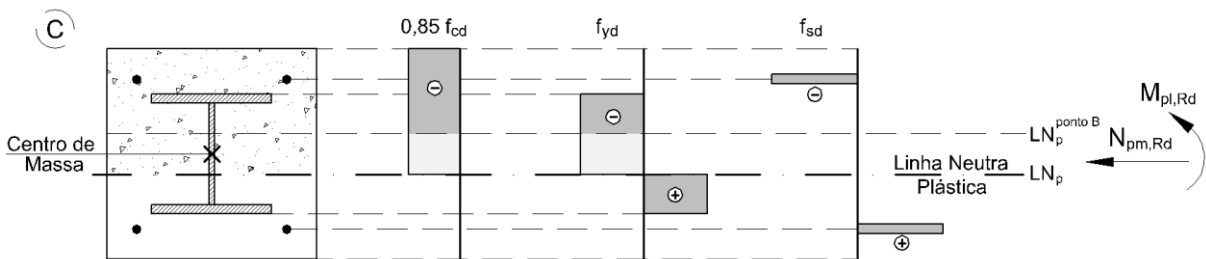


FIGURA 4.8 - PONTO C DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N: DIAGRAMA DE TENSÕES NO BETÃO, AÇO ESTRUTURAL E AÇO DAS ARMADURAS

Esta conclusão pode extrapolar-se a posições de linha neutra simétricas em relação ao centro de massa da secção, dado que apresentam o mesmo valor de momento resistente. Quanto maior for a distância da linha neutra ao centro da secção, maior será essa região central que não oferece resistência à flexão, e conseqüentemente menor o valor do momento resistente.

Por outro lado, quanto menor for essa região, isto é, aproximando a linha neutra do centro da secção, o momento aumenta até atingir o máximo momento resistente plástico, $M_{max,Rd}$, no ponto D da curva de interacção M-N (Figura 4.9).

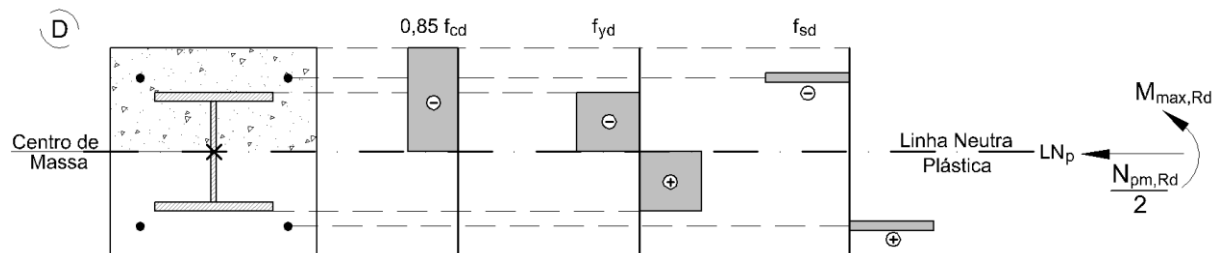


FIGURA 4.9 - PONTO D DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N: DIAGRAMA DE TENSÕES NO BETÃO, AÇO ESTRUTURAL E AÇO DAS ARMADURAS

Deste modo, na hipótese da secção ser simétrica, a linha neutra a meia altura (Ponto D, Figura 4.9) corresponde a metade da área de betão e aço à tracção e a restante metade à compressão. Considerando que o betão resiste somente à compressão e o aço estrutural resiste tanto à compressão como à tracção, por equilíbrio estático de forças normais à secção, as forças provenientes do aço anulam-se, obtendo-se o esforço normal equivalente a metade da área de betão comprimido, $\frac{1}{2} N_{pm,Rd}$.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia desenvolvida na concepção do *toolkit* para determinar a curva de interacção M-N de colunas mistas.

4.3 FLEXÃO DESVIADA COMPOSTA COM COMPRESSÃO

As colunas mistas sujeitas a esforços de flexão em torno de dois eixos de inércia e a esforço normal de compressão, devem ser analisadas separadamente para a flexão em torno do eixo de maior inércia (y-y) e em torno do eixo de menor inércia (z-z). Para cada direcção define-se, de forma análoga ao ponto anterior, duas curvas de interacção:

- M_y-N ;
- M_z-N ;

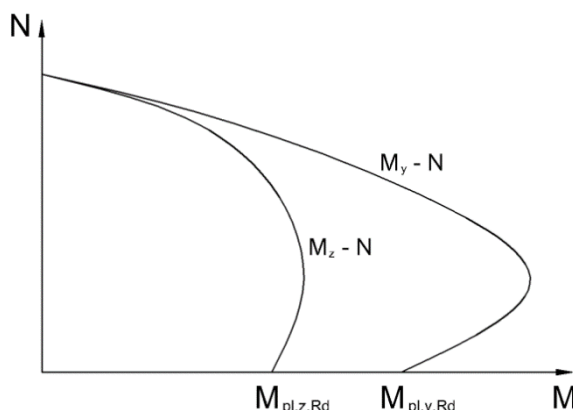


FIGURA 4.10 - CURVAS DE INTERACÇÃO M_y-N E M_z-N

Por outro lado, para um determinado valor de esforço normal actuante, os momentos flectores, M_y e M_z , relacionam-se de acordo com a curva:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,N,Rd}}\right)^\beta \leq 1 \quad (4.10)$$

Em que:

$M_{pl,y/z,N,Rd}$ – Momento flector resistente plástico em torno do eixo y ou eixo z, correspondente a um valor de esforço normal actuante.

$M_{y/z,Ed}$ – Momento flector actuante em torno do eixo y ou eixo z.

Simplificadamente e do lado da segurança, quando $\alpha = 1$ e $\beta = 1$, para um dado esforço normal obtém-se a recta representada na Figura 4.11 a tracejado (paralela ao plano y-z), definida pela seguinte expressão:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,N,Rd}} \leq 1 \quad [6.47]$$

Deste modo, é possível determinar uma superfície de interacção M_y-M_z-N , de uma secção mista sujeita a flexão desviada composta com compressão.

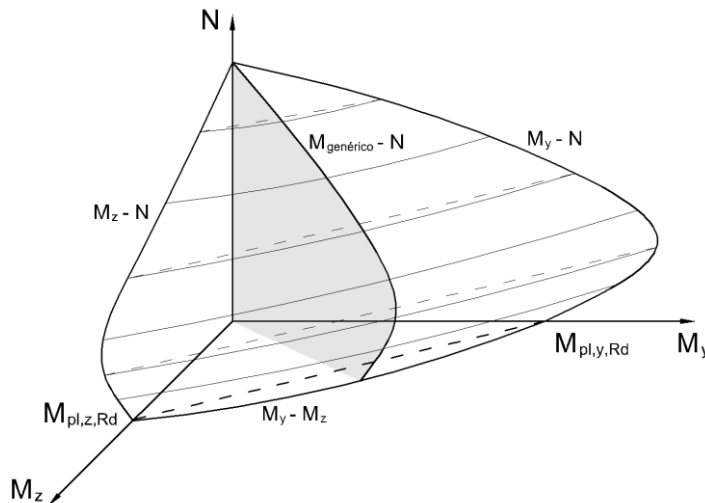


FIGURA 4.11 - SUPERFÍCIE DE INTERACÇÃO M_y-M_z-N

4.4 INFLUÊNCIA DO ESFORÇO TRANSVERSO

No caso do esforço transversal actuante, V_{Ed} , ultrapassar 50% da resistência ao esforço transversal, $V_{pl,Rd}$, verifica-se uma redução da resistência da secção. Tal redução é geralmente expressa pela diminuição do valor de cálculo da tensão de cedência do aço do perfil que, por hipótese e do lado da segurança, resiste à totalidade do esforço transversal. A diminuição da resistência é realizada na área de corte, A_v , isto é, na área que efectivamente resiste a essa acção.

De forma a determinar a influência do esforço transversal na redução da resistência da secção, considera-se, em primeiro lugar, que o esforço transversal actuante, V_{Ed} , é transferido na totalidade para a secção de aço:

$$V_{Ed} = V_{a,Ed} \quad (4.11)$$

De acordo com a igualdade anterior, considera-se que a resistência ao esforço transversal da coluna mista, $V_{pl,Rd}$, é conservadoramente igual à resistência da secção de aço, $V_{pl,a,Rd}$.

$$V_{pl,Rd} = V_{pl,a,Rd} \quad (4.12)$$

Em que, de acordo com a EN1993-1-1, artigo 6.2.6:

$$V_{pl,a,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad \text{EN1993-1-1 [6.18]}$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

A_v – Área resistente ao esforço transversal (Anexo B.1.3 e B.2.2)

Caso o esforço transversal actuante no perfil de aço seja superior a 50% da resistência da secção de aço ao esforço transversal, é necessário considerar a sua influência, 6.7.3.2(4):

$$V_{Ed} > 0,5 \times V_{pl,a,Rd} \quad (4.13)$$

Nesse caso, ainda há a possibilidade de distribuir o esforço transversal actuante para o perfil de aço e para o betão, de acordo com a contribuição da resistência de cada material para a secção mista, 6.7.3.2(4):

$$V_{a,Ed} = \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} V_{Ed} \quad [6.31]$$

$$V_{c,Ed} = V_{Ed} - V_{a,Ed} \quad [6.32]$$

Em que,

$M_{pl,a,Rd}$ – Momento flector resistente plástico da secção de aço estrutural;

$M_{pl,Rd}$ – Momento flector resistente plástico da secção mista;

O valores do momento flector resistente supracitado são determinados, por simplicidade de cálculo, para esforço axial nulo.

Analogamente, de acordo com o artigo 6.7.3.2(3) considera-se a influência do esforço transversal se o esforço actuante no perfil de aço for superior a 50% do resistente:

$$V_{a,Ed} > 0,5 \times V_{pl,a,Rd} \quad (4.14)$$

A substituição da expressão [6.31] na expressão (4.14) dá origem à expressão (4.15), que permite determinar o valor de esforço transversal actuante na coluna mista, a partir do qual se considera a influência do esforço transversal.

$$V_{Ed} > 0,5 \times V_{pl,a,Rd} \times \frac{M_{pl,Rd}}{M_{pl,a,Rd}} \quad (4.15)$$

A redução da resistência da secção de aço, é feita de acordo o artigo 6.2.2.4(2), através da redução do valor de cálculo da tensão de cedência do aço, f_{yd} , na área resistente ao esforço transversal, A_v :

$$(1 - \rho) f_{yd} \quad (4.16)$$

$$\rho = \left[\left(\frac{2 V_{a,Ed}}{V_{pl,a,Rd}} \right) - 1 \right]^2 \quad (4.17)$$

4.4.1 ESFORÇO TRANSVERSO ACTUANTE EM AMBAS AS DIRECÇÕES

Na generalidade dos casos as colunas estão sujeitas a esforço transversal actuante em ambas as direcções. A análise da sua influência deve ser realizada isoladamente em cada direcção.

No caso de se verificar a influência do esforço transversal para a flexão em torno do eixo de maior inércia (y-y) a redução da tensão de cedência do aço ocorre na alma (Figura 4.12) de acordo com as expressões (4.16) e (4.17) apresentadas na Figura 4.15. Analogamente, para a flexão em torno do eixo de menor inércia (z-z) a redução ocorre nos banzos (Figura 4.13). Dado que o aço que se encontra mais afastado do eixo de flexão considerado contribui em grande parte para o momento flector resistente, e em relação à área total de aço, a área dos banzos é superior à área da alma, pode-se concluir que a influência do esforço transversal ($V_{y,Ed}$) é mais preponderante para a flexão em torno do eixo de menor inércia ($M_{pl,z,Rd}$). Por outro lado, visto que os elementos – banzos e alma(s) – que resistem ao esforço transversal são ortogonais, a redução ocorre geralmente, para cada direcção, em elementos diferentes.

No caso das secções tubulares rectangulares cheias de betão, dado que o perfil de aço se encontra no exterior da secção, a diferença entre a redução do momento flector resistente devido ao esforço transversal actuante em cada direcção de cálculo é atenuada, e diminui com o decréscimo da diferença entre a altura e a base da secção.

É importante referir que a redução do esforço transversal é realizada de acordo com a área de corte, A_v , a resistência à flexão do perfil de aço e da secção mista, em cada direcção, tendo apenas influência na determinação do momento resistente correspondente, de forma a evitar a sobreposição de efeitos:

$$V_{z,Ed} \quad A_{v,z} \quad V_{pl,z,a,Rd} \quad M_{pl,y,Rd} \quad M_{pl,y,a,Rd} \quad V_{z,a,Ed} \quad \rho_z \rightarrow M_{pl,y,Rd}$$

$$V_{y,Ed} \quad A_{v,y} \quad V_{pl,y,a,Rd} \quad M_{pl,z,Rd} \quad M_{pl,z,a,Rd} \quad V_{y,a,Ed} \quad \rho_y \rightarrow M_{pl,z,Rd}$$

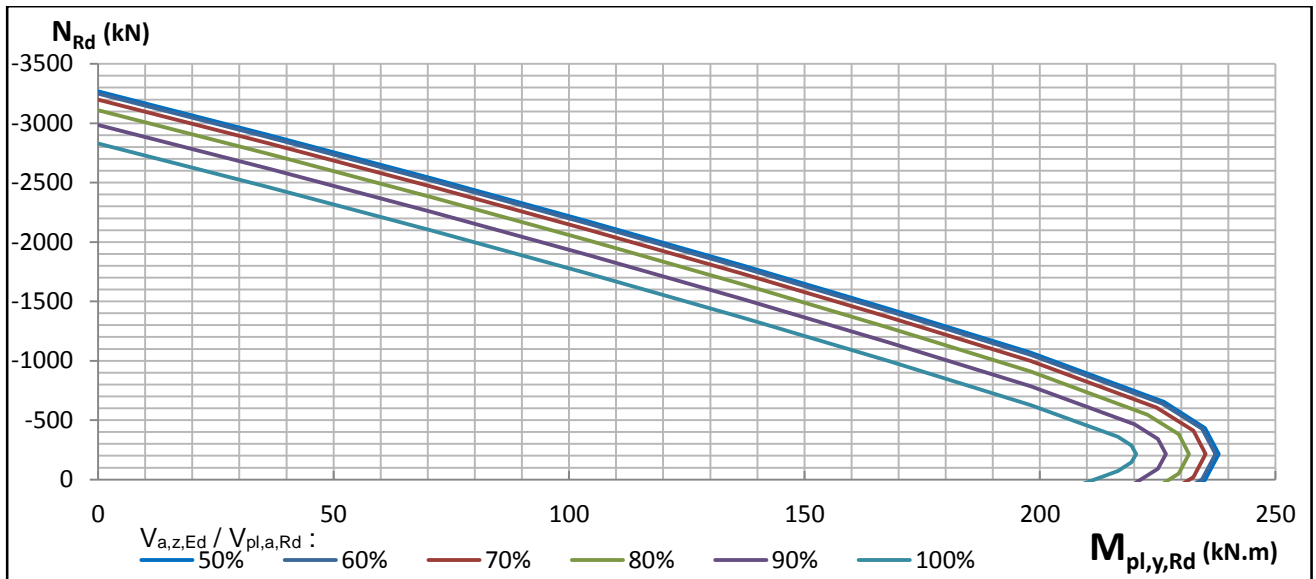


FIGURA 4.12 – INFLUÊNCIA DO ESFORÇO TRANSVERSO NA CURVA DE INTERAÇÃO ($M_y - N$) DA SECÇÃO TRANSVERSAL APRESENTADA NA FIGURA 4.14

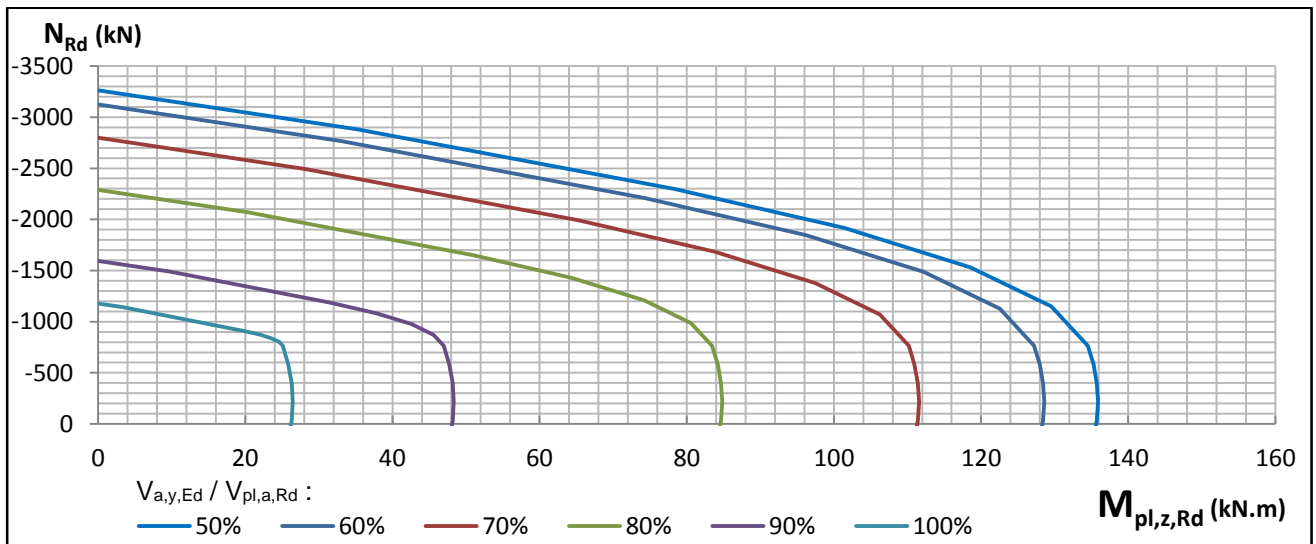


FIGURA 4.13 - INFLUÊNCIA DO ESFORÇO TRANSVERSO NA CURVA DE INTERAÇÃO ($M_z - N$) DA SECÇÃO TRANSVERSAL APRESENTADA NA FIGURA 4.14

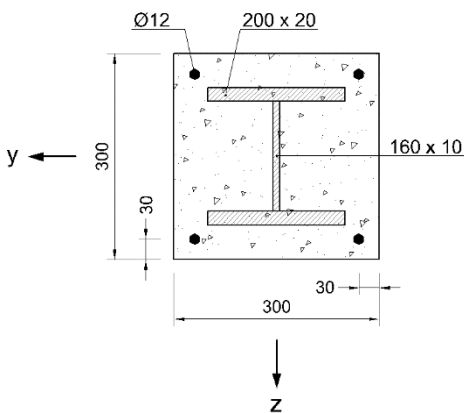


FIGURA 4.14 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE NA FIGURA 4.12 E FIGURA 4.13

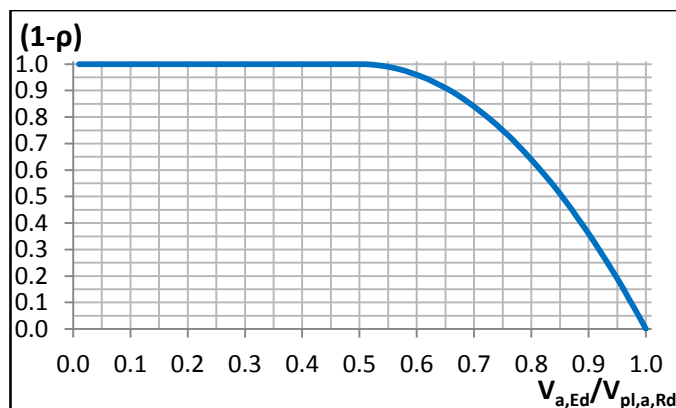


FIGURA 4.15 - REDUÇÃO DA TENSÃO DE CEDÊNCIA DO AÇO NA ÁREA RESISTENTE AO ESFORÇO TRANSVERSO (A_v)

5. METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N

5 METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA CURVA DE INTERACÇÃO M-N

A curva de interacção é constituída por um conjunto de pares (M; N) que correspondem a cada posição da linha neutra plástica, de onde se podem destacar quatros pontos (A, B, C, D) constituindo um polígono aproximado à curva de interacção M-N (ver Figura 4.5). As expressões apresentadas no Anexo A1 da EN1994, não permitem determinar todos os pontos do diagrama de interacção, e embora do lado da segurança, não tiram proveito da totalidade da resistência da secção transversal. Deste modo, optou-se por desenvolver uma metodologia que permita determinar diversos pontos ao longo da curva de interacção M-N.

Como se pretende determinar o valor do momento resistente correspondente ao valor do esforço normal actuante introduzido pelo utilizador, é necessário calcular à priori um determinado número de pares M-N, correspondentes às várias posições de linhas neutra, e efectuar uma interpolação linear utilizando esse conjunto de pontos e o valor introduzido. Salienta-se que por se realizar uma interpolação linear, se obtém um ponto do lado interior/esquerdo da curva de interacção “real”, e portanto do lado da segurança.

O número de posições de linhas neutras calculadas é igual ao número de pares (M;N). Esse número ditará a precisão do cálculo efectuado, visto que o valor de esforço normal actuante introduzido não será precisamente o calculado, e deve ser fixado tendo em conta a grandeza numérica dos valores a determinar para que o intervalo de valores utilizados na interpolação seja o mais próximo possível do valor introduzido.

Então, após se fixarem as várias posições da linha neutra plástica é possível determinar o esforço normal e momento flector e utilizando o valor introduzido como ponto de interpolação, determinar o momento resistente e a posição da linha neutra plástica.

A determinação das forças provenientes dos diferentes elementos da secção transversal são determinadas através da decomposição geométrica da secção, recorrendo à capacidade de cálculo do *MS Excel* para decompôr geometricamente a secção num número elevado de blocos rectangulares de tensões quando se analisam secções rectangulares, ou através de expressões que permitam determinar partes da área da secção quando se analisam secções circulares.

Resumidamente, a metodologia para a determinação da curva de interacção M-N, envolve os seguintes passos:

- Definição das posições das linhas neutras plásticas a analisar, em toda a secção transversal.
- Determinação do esforço normal correspondente a cada linha neutra plástica.
- Determinação das duas posições de linha neutra plástica cujo valor do esforço normal é o mais próximo do introduzido.
- Determinação do momento flector resistente correspondente às posições definidas inicialmente para a linha neutra plástica.
- Determinação do momento flector resistente através da interpolação linear dos valores de momento flector resistente calculados no ponto anterior, utilizando como valor de interpolação o esforço normal introduzido e como valores base os valores de esforço normal mais próximos.

- Determinação da posição da linha neutra plástica através da interpolação linear de forma análoga ao ponto anterior.

5.1 COLUNAS RECTANGULARES

Devido à sua geometria, as colunas rectangulares permitem a utilização de blocos rectangulares equivalentes à secção analisada. Por exemplo, um perfil de aço pode ser decomposto geometricamente em 3 blocos rectangulares, nomeadamente, dois banzos e uma alma, quando se analisa a secção em relação ao eixo y-y. Então tal decomposição deve ser realizada para cada eixo de inércia, y-y e z-z.

Inicialmente idealizou-se um *toolkit* que permitisse a definição de qualquer tipologia de secção desde que esta apresentasse geometria rectangular. Deste modo, avaliou-se diferentes tipologias e estipulou-se como número máximo, 10 blocos rectangulares.

Em seguida demonstra-se, como exemplo, a decomposição geométrica de uma secção em I ou H totalmente betonada, em blocos rectangulares, em relação ao maior eixo de inércia. As restantes decomposições são apresentadas no Anexo B.1.1.

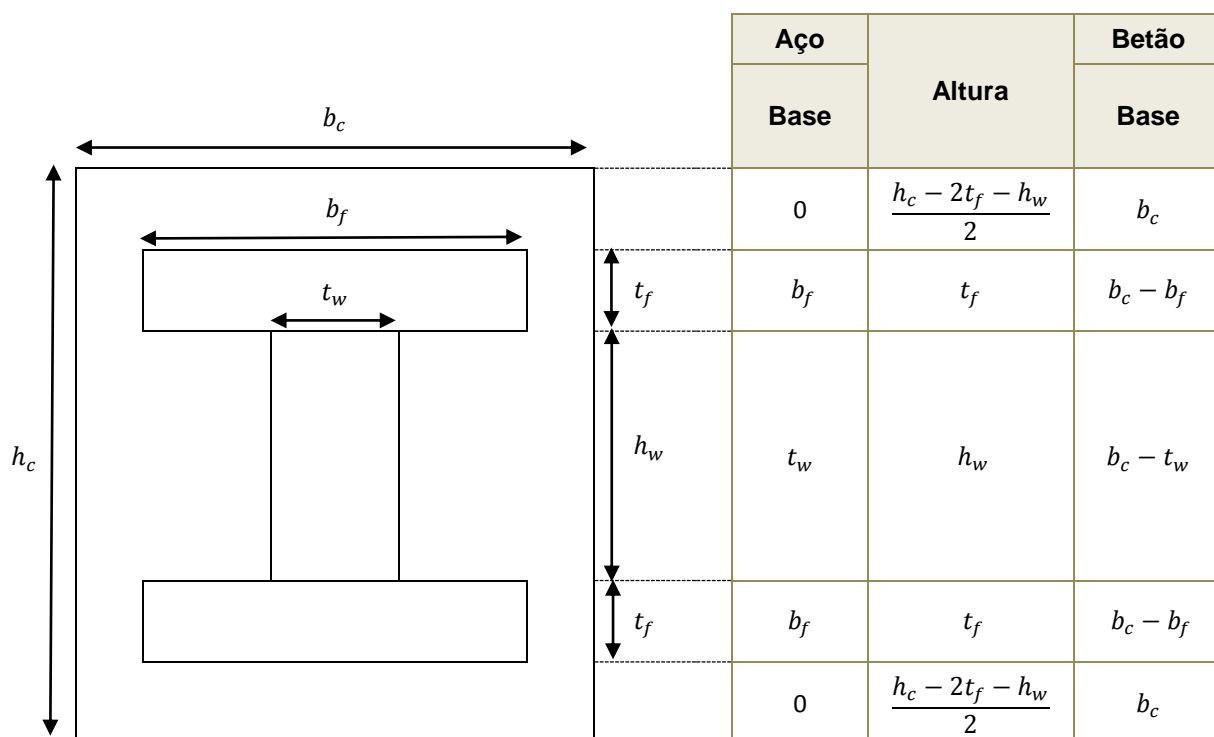


FIGURA 5.1 - DEFINIÇÃO DOS BLOCOS RECTANGULARES DE TENSÕES DE UMA SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA, PARA A FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA

- **Definição das posições das linhas neutras plásticas a analisar**

Os limites entre cada bloco rectangular foram estabelecidos como sendo as posições de linha neutra para as quais se determina o esforço normal correspondente. Apenas duas posições de LNp são utilizadas na interpolação linear da posição da linha neutra e do momento resistente correspondentes ao valor de esforço normal introduzido pelo utilizador.

▪ **Determinação do esforço normal correspondente a cada linha neutra plástica**

Para determinar o esforço normal, definiu-se uma tabela cujas colunas correspondem à posição da linha neutra plástica e as linhas aos blocos rectangulares definidos anteriormente. O valor de cada entrada da tabela é a força normal correspondente ao bloco rectangular já dividido. Deste modo, a tabela considerada apresenta um número de entradas igual ao produto de n por $(n+1)$, em que n representa o nº de blocos considerados.

QUADRO 5.1 - DETERMINAÇÃO DO ESFORÇO NORMAL E MOMENTO FLECTOR CORRESPONDENTE A CADA POSIÇÃO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA, COM RECURSO A BLOCOS RECTANGULARES

Bloco Rectangular (i)	Base Aço ($b_{a,i}$)	Base Betão ($b_{c,i}$)	Altura (h_i)	Centro de Massa do Bloco ($z_{CM,i}$)	Linha Neutra Plástica ($z_{LNp,k}$) $k = \{1, 2, \dots, n + 1\}$				
					$z_{LNp,1} = 0$	$z_{LNp,2} = h_1$	$z_{LNp,3} = h_1 + h_2$	...	$z_{LNp,k} = \sum_{i=1}^{k-1} h_i$
1	$b_{a,1}$	$b_{c,1}$	h_1	$z_{CM,1} = h_1/2$	N_1	N_1	...	...	...
2	$b_{a,2}$	$b_{c,2}$	h_2	$h_1 + h_2/2$	N_2	N_2	...	...	...
...	...	...	...	$h_1 + h_2 + h_3/2$	...	...	...	...	...
...
n	$b_{a,n}$	$b_{c,n}$	h_n	$z_{CM,n} = \left(\sum_{i=1}^{n-1} h_i\right) + \frac{h_n}{2}$	N_n	N_n	...	...	...
Esforço Normal $N_{k'} =$					$\sum_{i=1}^n N_i$	...	...	...	...
Momento Flector $M_{Rd,k'} =$					$\sum_{i=1}^n (z_{CM,i} - \frac{h}{2}) \times N_i$	...	...	...	...

Nota: Por forma a simplificar os cálculos, o centro de massa de cada bloco e a posição da linha neutra plástica são medidos em relação ao topo da secção.

O somatório por coluna (Quadro 5.1) das forças de cada bloco é igual ao esforço normal proveniente do betão e do aço estrutural correspondente à linha neutra plástica dessa mesma coluna. A força normal de cada bloco é obtida tendo em conta se o bloco se encontra acima ou abaixo da linha neutra (k), isto é, à compressão (-) ou à tracção (+), respectivamente.

Tendo em conta que não se contabiliza o betão à tracção, a força normal de cada bloco (i) é obtida, através da seguinte expressão:

$$N_i = h_i (b_{a,i} f_{yd} + b_{c,i} \alpha_{cc} f_{cd}) \tag{5.1}$$

Em que,

$\alpha_{cc} = 1,0$ (Secções Tubulares)

$\alpha_{cc} = 0,85$ (Secções Não Tubulares)

$$\alpha_{cc} = 0 \quad \Leftarrow \quad z_{CM,i} > z_{LNp,k}$$

A influência do esforço transversal é contabilizada na determinação da força normal dos blocos em que se verifica a redução do valor de cálculo da tensão de cedência do aço, f_{yd} .

Adicionalmente, contabiliza-se por coluna a área de armaduras que se encontra à tracção e à compressão e determina-se a resultante das forças das armaduras longitudinais. Salienta-se que para evitar a sobreposição da área da armadura à compressão com a área de betão, reduz-se a tensão de cedência do aço das armaduras, f_{sd} , (apenas as armaduras à compressão) subtraindo a tensão de rotura por compressão do betão, f_{cd} , de acordo com a expressão (5.2).

$$f_{sd} = f_{sd} - \alpha_{cc} f_{cd} \quad \Leftarrow \quad z_{CM,i} > z_{LNp,k} \quad (5.2)$$

O somatório de todas as forças por coluna, isto é, por cada linha neutra, corresponde ao valor de esforço normal que serve de base à interpolação linear a realizar posteriormente.

Sendo necessário diminuir o erro inerente à interpolação linear efectuada, calcula-se à priori um número suficiente de linhas neutras de forma a que o valor de esforço normal calculado seja suficientemente próximo do introduzido. Por esse motivo, divide-se a altura do bloco onde se situa a linha neutra (por determinar) em 400 partes iguais.

A determinação de qual é o bloco a dividir é realizada previamente com recurso a uma tabela semelhante, com um número inferior de divisões, visto que se pretende apenas determinar as posições da linha neutra, que se situam entre blocos, às quais corresponde um esforço normal inferior e superior ao introduzido. No processo inicial de determinação do bloco a decompor, divide-se todos os blocos em 6 partes de forma a se determinar um conjunto de pontos correspondentes ao diagrama de interacção M-N a apresentar ao utilizador. Salienta-se o cuidado de dividir os blocos em número par de forma a obter uma posição de LNp a meia altura, ou seja, o ponto D de momento máximo do diagrama de interacção (Figuras 4.5 e 4.9).

Após se determinar qual o bloco a dividir, determina-se o esforço normal nos 400 blocos divididos e nos restantes 9 blocos, concentrando assim a capacidade de cálculo onde é necessário, visto que decompor cada um dos restantes blocos não produz um resultado com maior precisão tanto em termos de esforço normal como de momento flector.

- **Determinação das duas posições de linha neutra plástica cujo valor do esforço normal é o mais próximo do introduzido**

As posições das linhas neutras que servem de base à interpolação linear a realizar posteriormente são determinadas localizando nos valores de esforço normal calculados no ponto anterior, o valor inferior e superior ao introduzido (Esforço normal actuante, N_{Ed}).

- **Determinação do momento flector resistente correspondente às posições definidas inicialmente para a linha neutra plástica**

O momento flector resistente proveniente do betão e aço estrutural para uma determinada posição da linha neutra, k , obtém-se através do produto entre as forças normais de cada bloco com a distância do centro de massa da secção (meia altura) ao centro de massa do bloco, de acordo com a expressão seguinte:

$$M'_{Rd,k} = \sum_{i=1}^n \left(z_{CM,i} - \frac{h}{2} \right) \times N_i \quad (5.3)$$

O momento flector resistente é obtido adicionando o momento resistente correspondente às armaduras longitudinais, o qual é determinado para cada linha neutra plástica, multiplicando a cada uma das forças determinadas anteriormente a distância entre o centro de massa da secção (meia altura) e o nível onde se situam as armaduras.

- **Determinação do momento flector resistente**

Após se calcular o momento flector resistente associado a cada posição da linha neutra, é possível determinar o momento flector resistente correspondente ao valor de esforço normal introduzido através da interpolação linear dos valores calculados anteriormente:

$$M_{pl,N,Rd} = M_{pl,N,Rd-1} + \frac{(M_{pl,N,Rd+1} - M_{pl,N,Rd-1})}{(N_{Ed+1} - N_{Ed-1})} (N_{Ed} - N_{Ed-1}) \quad (5.4)$$

Onde, os índices +1 e -1 correspondem aos valores de esforço normal determinados à priori que são respectivamente superior e inferior ao valor de esforço normal introduzido, N_{Ed} .

- **Determinação da posição da linha neutra plástica**

Analogamente ao ponto anterior, a determinação da linha neutra plástica é realizada através da interpolação linear dos valores calculados anteriormente:

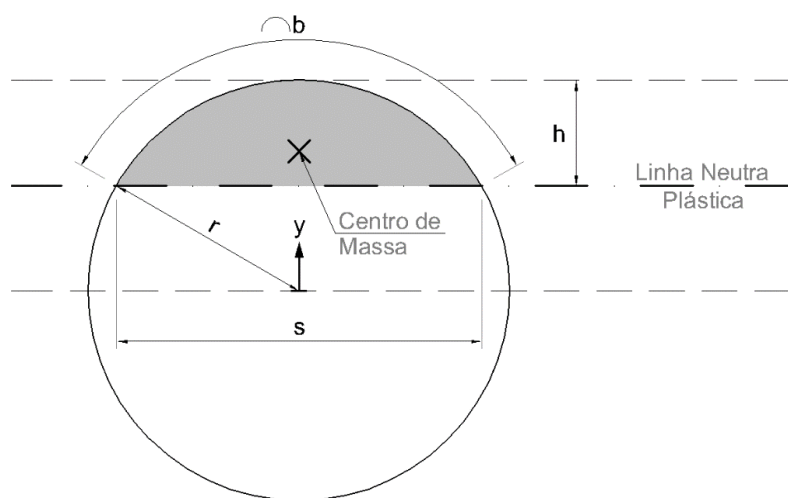
$$LN_p = LN_{p-1} + \frac{(LN_{p+1} - LN_{p-1})}{(N_{Ed+1} - N_{Ed-1})} (N_{Ed} - N_{Ed-1}) \quad (5.5)$$

No caso das colunas rectangulares é necessário executar o processo para os dois eixos de inércia. Porém, é possível aplicar o mesmo método tendo em conta a correcta decomposição geométrica da secção em relação ao eixo considerado (Anexo B.1.1).

5.2 COLUNAS CIRCULARES

A curva de interacção M-N de colunas circulares é determinada através das expressões (5.6) a (5.11) que permitem decompor geometricamente os diversos elementos que constituem a secção transversal, nomeadamente, o perfil de aço e o betão.

No caso das secções circulares, é possível dividir cada elemento da secção (tubo de aço e o betão) em apenas duas partes, acima e abaixo de uma determinada posição da linha neutra. O objectivo dessa decomposição geométrica é obter a área e centro de massa dos elementos já decompostos.



$$h = r - y_{LNp} \quad (5.6)$$

$$r = \frac{4 \cdot h^2 + s^2}{8 \cdot h} \quad (5.7)$$

$$s = \sqrt{8 \cdot r \cdot h - 4 \cdot h^2} \quad (5.8)$$

$$b = 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\frac{s}{2 \cdot r}\right) \quad (5.9)$$

$$A = \frac{r \cdot b}{2} - \frac{s \cdot (r - h)}{2} \quad (5.10)$$

$$y_{CM} = \frac{s^3}{12 \cdot A} \quad (5.11)$$

FIGURA 5.2 - DECOMPOSIÇÃO DE UMA CIRCUNFERÊNCIA NA ÁREA DE BETÃO ACIMA E ABAIXO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA

As expressões apresentadas permitem determinar a área de betão acima da linha neutra plástica, LN_p . A área a baixo é obtida pela diferença entre a área total de betão e a área de betão acima da LN_p .

$$A_{abaixo da LNp} = A_{betão} - A_{acima da LNp}$$

Em relação ao perfil de aço (Figura 5.3 – 1), a área acima da linha neutra é obtida através da diferença entre a região (2) e a área de betão acima da LN_p (3).

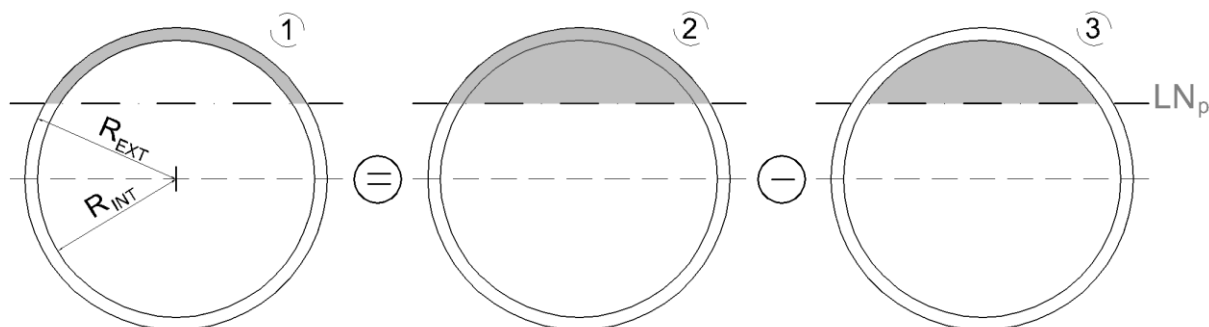


FIGURA 5.3 - DECOMPOSIÇÃO DE UMA CIRCUNFERÊNCIA PARA A DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE AÇO ACIMA E ABAIXO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA

A determinação do centro de massa do aço é realizada de forma análoga à determinação das áreas de aço e betão. Com efeito, tem-se:

$$A_2 = A_1 + A_3 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow A_1 = A_2 - A_3$$

Em que,

A_2 e A_3 – Áreas das regiões 2 e 3 (Figura 5.3) determinadas através das expressões (5.6) a (5.10) considerando os raios R_{EXT} e R_{INT} , respectivamente.

O centro de massa da região 1 (Figura 5.3) é obtido utilizando o valor das áreas e centros de massas das regiões 2 e 3, tal que:

$$y_{CM,2} = \frac{y_{CM,1} \cdot A_1 + y_{CM,3} \cdot A_3}{A_1 + A_3} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow y_{CM,1} = \frac{y_{CM,2} \cdot (A_1 + A_3) - y_{CM,3} \cdot A_3}{A_1} \quad (5.12)$$

Em que,

$y_{CM,2}$ e $y_{CM,3}$ – Centros de massa das regiões 2 e 3 (Figura 5.3) obtidos através da expressão (5.11), considerando os raios R_{EXT} e R_{INT} , respectivamente.

Após determinadas as áreas e centros de massa correspondentes às regiões com raio R_{EXT} e R_{INT} , é possível determinar as áreas e centros de massa do betão, aço estrutural, abaixo e acima da linha neutra plástica de acordo com as expressões apresentadas nos Quadros 5.2 a 5.4.

Notas:

- Os subscritos “+” e “-” referem-se às regiões acima e abaixo da linha neutra plástica, respectivamente.
- Quando isolados, os subscritos “aço” e “betão” referem-se à totalidade da área dos materiais na secção transversal.

QUADRO 5.2 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA E CENTRO DE MASSA DO BETÃO ACIMA E ABAIXO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA

Betão (não descontando armaduras longitudinais)			
Acima da LN_p		Abaixo da LN_p	
$A_{betão+}$	$y_{CM,betão+}$	$A_{betão-}$	$y_{CM,betão-}$
$A_{R_{INT}}$	$y_{CM,R_{INT}}$	$A_{betão} - A_{R_{INT}}$	$\frac{y_{CM,betão} \cdot A_{betão} - y_{CM,R_{INT}} \cdot A_{R_{INT}}}{A_{betão-}}$

A área efectiva de betão é obtida descontando a área das armaduras longitudinais contida na região correspondente a cada uma das áreas de betão calculadas. Por outro lado, dado que a área das amaduras longitudinais não representa uma percentagem significativa da área de betão, por simplicidade não se contabilizou esse decréscimo de área de betão no cálculo do centro de massa.

QUADRO 5.3 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA DO BETÃO ACIMA E ABAIXO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA, DESCONTANDO A ÁREA DAS ARMADURAS

Betão (descontando armaduras longitudinais)	
Acima da LN_p	Abaixo da LN_p
$A_{betão+}$	$A_{betão-}$
$A_{R_{INT}} - A_{armaduras+}$	$A_{betão} - A_{betão+} - A_{armaduras-}$

QUADRO 5.4 - DETERMINAÇÃO DA ÁREA E CENTRO DE MASSA DO TUBO DE AÇO ACIMA E ABAIXO DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA

Aço Estrutural			
Acima da LN_p		Abaixo da LN_p	
$A_{aço+}$	$y_{CM,aço+}$	$A_{aço-}$	$y_{CM,aço-}$
$A_{R_{EXT}} - A_{R_{INT}}$	$\frac{y_{CM,R_{EXT}} \cdot A_{R_{EXT}} - y_{CM,R_{INT}} \cdot A_{R_{INT}}}{A_{R_{EXT}} - A_{R_{INT}}}$	$A_{aço} - A_{aço+}$	$\frac{y_{CM,aço} \cdot A_{aço} - y_{CM,aço+} \cdot A_{aço+}}{A_{aço-}}$

Em que,

$$A_{betão} = \pi \cdot R_{INT}^2 \quad (5.13)$$

$$A_{aço} = \pi \cdot (R_{EXT}^2 - R_{INT}^2) \quad (5.14)$$

$$y_{CM,aço} = y_{CM,betão} = 0$$

Salienta-se que as expressões apresentadas podem ser utilizadas quando a linha neutra plástica se situa entre a face interior e exterior do tubo (Figura 5.5, zona A), tendo em conta que:

$$A_{R_{INT}} = A_{betão+} = 0$$

E portanto para essas posições da LN_p , obtém-se:

$$A_{aço+} = A_{R_{EXT}}$$

$$y_{CM,aço+} = y_{CM,R_{EXT}} \quad y_{CM,betão+} = y_{CM,betão}$$

Para as posições de linha neutras situadas abaixo do centro da secção, tanto a área como os centros de massa são iguais aos valores para as posições de LN_p simétricas em relação ao centro da secção, tal que os valores determinados para as regiões acima da linha neutra correspondem agora aos valores das regiões abaixo da linha neutra (Figura 5.4).

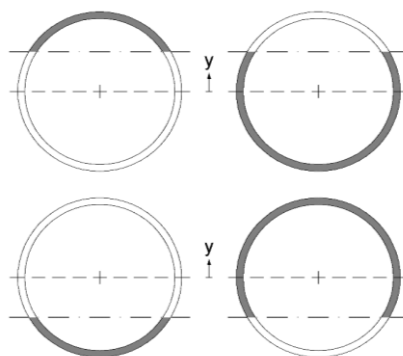


FIGURA 5.4 – RELAÇÃO ENTRE AS ÁREAS E CENTROS DE MASSA DO AÇO E BETÃO, ACIMA E ABAIXO DE POSIÇÕES SIMÉTRICAS DA LINHA NEUTRA PLÁSTICA

A determinação das forças provenientes do aço das armaduras longitudinais é realizada para cada posição da linha neutra. Para tal, contabiliza-se a área de armaduras que se encontra à tracção e à compressão e determina-se a resultante das forças.

Utilizando esses resultados, é possível determinar para cada posição da linha neutra, o esforço normal actuante e o momento flector, através dos passos seguintes:

- **Definição das posições das linhas neutras plásticas a analisar**

Após se avaliar qual o número de LN_p que permite determinar com precisão o momento resistente, optou-se por dividir a zona A em 10 partes com igual altura e a zona B em 100 partes também de igual altura, Figura 5.5. Deste modo, são calculados 221 pontos da curva de interacção M-N.

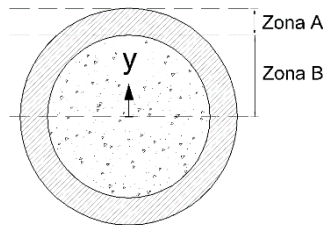


FIGURA 5.5 – REPRESENTAÇÃO DAS ZONAS A E B

- **Determinação do esforço normal correspondente a cada linha neutra plástica**

Após se determinar as áreas de cada elemento da secção que estão à tracção/compressão, o esforço normal é obtido através do produto dessa área com o valor de cálculo da tensão do respectivo material, tendo em conta que a área de betão abaixo da LN_p está à tracção e portanto não é contabilizada.

- **Determinação das duas posições de linha neutra plástica cujo valor do esforço normal é o mais próximo do introduzido**

As posições das linhas neutras que servem de base à interpolação linear a realizar posteriormente são determinadas localizando nos valores de esforço normal calculados no ponto anterior, o valor inferior e superior ao introduzido.

- **Determinação do momento flector resistente correspondente às posições definidas inicialmente para a linha neutra plástica**

O momento flector resistente associado a cada posição da linha neutra resulta da soma dos produtos das forças normais, F_x , com a distância, d , entre o centro de massa, já determinado, e o centro de massa da secção (a meia altura), de forma análoga à que se apresenta na Figura 4.4, de acordo com a expressão (5.15).

$$M_{pl,Rd} = \sum_i d_i F_{x,i} \quad (5.15)$$

A contribuição das armaduras longitudinais para o momento resistente é também determinada recorrendo à expressão (4.15), em que as forças normais, $F_{x,i}$, correspondem a cada varão, i , à distância, d , do centro de gravidade da secção medida na vertical. O momento resistente final resulta da soma do momento proveniente do betão, aço e armaduras longitudinais.

- **Determinação do momento flector resistente**

Após se calcular o momento flector resistente associado a cada posição da linha neutra, é possível determinar o momento flector resistente correspondente ao valor de esforço normal introduzido através da interpolação linear dos valores calculados anteriormente, recorrendo à equação (5.4).

Utilizando a mesma expressão é possível determinar o momento flector resistente correspondente aos vários pontos do diagrama de interacção (Figura 4.5, Pontos A, B, C, D) já que o valor do esforço normal, N_{Ed} , correspondente é conhecido.

- **Determinação da posição da linha neutra plástica**

Analogamente ao ponto anterior, a determinação da linha neutra plástica é realizada através da interpolação linear dos valores calculados anteriormente, através da expressão (5.5).

6. DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS

6 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS

O presente capítulo tem por objectivo definir intervalos de valores para determinados parâmetros, e assim, conduzir ao dimensionamento de secções que apresentam boas condições de resistência e de utilização. De acordo com as tipologias de secção existem logicamente diferentes disposições construtivas e limites admissíveis adequados.

As verificações e limites a ter em conta, independentemente da tipologia da secção, são a percentagem mínima e máxima de armadura longitudinal e a relação da contribuição da secção de aço para a resistência da secção transversal.

▪ Área de armadura longitudinal

A percentagem máxima de armadura longitudinal⁽³⁾ é de 6% da área de betão, de acordo com o artigo 6.7.3.1(3):

$$A_{s,max} = 0,06 A_c \quad (6.1)$$

Nota: Não se

No artigo 6.7.5.2(1) é preconizado um valor mínimo de percentagem de armadura de 0,3% da área de betão, para as secções parcial ou totalmente betonadas. Caso as secções tubulares cheias de betão não sejam dimensionadas para resistirem ao fogo, pode-se dispensar de armaduras longitudinais.

$$A_{s,min} = 0,003 A_c \quad (\text{Secções Não-Tubulares}) \quad (6.2)$$

$$A_{s,min} = 0 \quad (\text{Secções Tubulares}) \quad (6.3)$$

O limite inferior assegura o controlo à fendilhação. O limite superior impede que a força nas armaduras seja superior à força no betão, tal que:

$$F_s < F_c$$

Em que,

$$F_s = A_s f_{yd} \quad \text{e} \quad F_c = A_c f_{cd}$$

Então,

$$A_s f_{sd} < A_c f_{cd} \quad \Leftrightarrow \quad A_s < \frac{f_{cd}}{f_{sd}} A_c$$

Já que os limites estabelecidos devem assegurar os casos correntes, obtém-se:

$$\frac{f_{cd}}{f_{sd}} \cong 0,06 \quad \text{c.q.d.}$$

Caso a área de armadura exceda o limite máximo, poderá considerar-se um diâmetro fictício para o varão de forma a que a área seja igual ao máximo admissível :

$$d_{ficticio} \leq \sqrt{\frac{A_c \times 0,06 \times 4}{n \times \pi}} \quad n - \text{número total de varões} \quad (6.4)$$

⁽³⁾ – Não incluindo os empalmes.

Adicionalmente, a EN1994-1-1, artigo 6.7.5.2(2) remete para a EN1992-1-1, 9.5, o dimensionamento e pormenorização das armaduras longitudinais e transversais de colunas parcial ou totalmente betonadas. O artigo 6.7.5.2(3) prevê que o recobrimento das armaduras longitudinais deverá estar de acordo com a Secção 4 da EN1992-1-1.

▪ **Relação da contribuição da secção de aço, δ , para a resistência da secção transversal**

A classificação de elemento estrutural misto (aço-betão) é feita de acordo com a relação da contribuição de resistência dada por cada material. De acordo com o artigo 6.7.1(4), a contribuição de resistência da secção de aço, δ , deverá compreender-se entre 0,2 e 0,9 tal que:

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad [6.38]$$

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9 \quad [6.27]$$

Em que,

$N_{pl,Rd}$ – valor de cálculo do esforço normal resistente plástico (cap. 3.1), considerando $\alpha_{cc}=1,0$ no caso das secções (circulares e rectangulares) tubulares cheias de betão e $\alpha_{cc}=0,85$ para as restantes tipologias;

Sendo possível identificar duas geometrias distintas (rectangulares e circulares), os parâmetros associados às disposições construtivas são logicamente diferentes para ambos os casos, sendo por esse motivo apresentados em separado.

6.1 SECÇÃO RECTANGULAR

▪ **Relação entre largura e altura**

A relação entre a altura da secção mista, h_c , e a base, b_c , deve respeitar a seguinte condição, 6.7.3.1(4):

$$0,2 \leq \frac{h_c}{b_c} \leq 5,0 \quad (6.5)$$

Esta relação tem como objectivo evitar o dimensionamento de secções alongadas as quais não pertencem ao campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

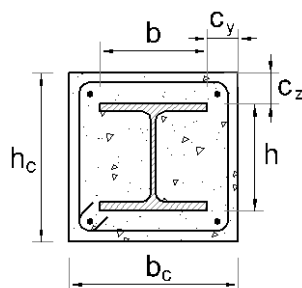


FIGURA 6.1 – REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES: h_c , b_c , b , h , c_y , c_z .

6.1.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

▪ Recobrimento mínimo e máximo dos banzos da secção de aço

De acordo com o artigo 6.7.5.1(2) o recobrimento mínimo dos banzos do perfil de aço de colunas totalmente betonadas deve respeitar a seguinte condição:

$$c_z \geq \max \left\{ 40 \text{ mm}; \frac{b}{6} \right\} \quad (6.6)$$

Em que,

b – largura do banzo do perfil (Figura 6.1).

Por outro lado, de acordo com o artigo 6.7.3.1(2), o recobrimento máximo do perfil de aço a considerar nos cálculos deve respeitar a seguinte condição:

$$c_z \leq 0,3 h \quad (6.7)$$

$$c_y \leq 0,4 b \quad (6.8)$$

Em que,

c_z – recobrimento vertical do banzo (Figura 6.1).

c_y – recobrimento horizontal do banzo (Figura 6.1).

6.1.2 SECÇÃO PARCIALMENTE BETONADA

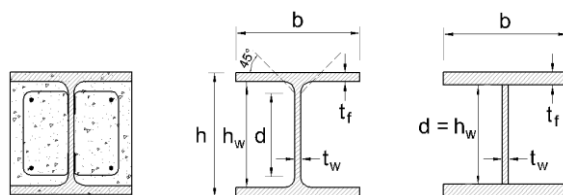


FIGURA 6.2 – REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES: b , d , t_w , t_f .

▪ Esbelteza dos banzos e da alma

De acordo com os artigos 6.7.1(5)(8)(9) a encurvadura local das chapas deve ser analisada. Por forma a evitar tal verificação, a esbelteza das chapas deve respeitar os limites máximos para os banzos definidos na EN1994-1-1, Quadro 6.3, e para a alma os valores indicados para as vigas, 6.3.1(2):

Banzos:

$$\max \left(\frac{b}{t_f} \right) < 44 \varepsilon \quad (6.9)$$

Alma:

$$\max \left(\frac{d}{t_w} \right) \leq 124 \varepsilon \quad (6.10)$$

QUADRO 6.1 – VALOR DE ε EM FUNÇÃO DA CLASSE DE RESISTÊNCIA DO AÇO ESTRUTURAL

Classe do Aço	S235	S275	S355	S420	S460
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71

6.1.3 SECÇÃO TUBULAR (RECTANGULAR/QUADRANGULAR) CHEIA DE BETÃO

- Esbelteza máxima da chapa

Analogamente, por forma a evitar a verificação da encurvadura local das chapas, a esbelteza das mesmas deve respeitar os limites máximos definidos na EN1994-1-1, Quadro 6.3:

$$\max\left(\frac{h}{t}\right) < 52\varepsilon \quad (6.11)$$

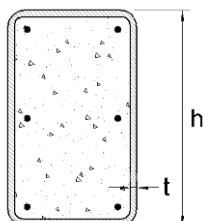


FIGURA 6.3 – REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES: *h*, *t*.

6.2 SECÇÃO CIRCULAR

- Esbelteza máxima da chapa

Analogamente, a esbelteza máxima da chapa do tubo de aço deverá respeitar a seguinte condição:

$$\max\left(\frac{d}{t}\right) < 90\varepsilon \quad (6.12)$$

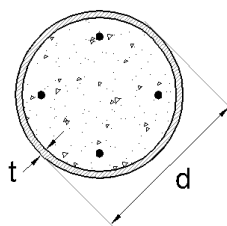


FIGURA 6.4 – REPRESENTAÇÃO DAS DIMENSÕES: *d*, *t*.

7. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

7 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMOS

A presente dissertação apresenta as metodologias para a verificação de segurança de colunas mistas preconizadas na EN 1994-1-1, tendo como objectivo a verificação aos estados limites últimos de encurvadura:

- Coluna mista à compressão (artigo 6.7.3.5)
- Coluna mista à flexão composta com compressão (artigo 6.7.3.6)
- Coluna mista à flexão desviada composta com compressão (artigo 6.7.3.7)

As verificações associadas aos esforços de cálculo devem ser sempre realizadas isoladamente, nomeadamente à encurvadura devido a compressão, ainda que a coluna mista esteja sujeita a esforços compostos. O *toolkit* é uma ferramenta de cálculo de colunas mistas e por esse motivo são apresentadas em forma de relatório as diversas verificações de segurança.

7.1 COLUNA MISTA À COMPRESSÃO

O fenómeno de encurvadura da coluna mista associada à compressão depende, entre outros factores, do momento de inércia, da rigidez e da esbelteza da coluna.

A verificação da coluna mista à compressão apresentada tem por base as curvas de dimensionamento de presentes na EN 1993-1-1 no artigo 6.3.1.2, cujo modelo de cálculo corresponde a uma coluna simplesmente apoiada. Em alternativa poder-se-ia recorrer a uma análise de 2ª ordem de acordo com a EN 1994-1-1, artigo 6.7.3.6.

Em seguida apresenta-se uma possível metodologia para a verificação da segurança de colunas mistas à compressão:

7.1.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EFECTIVO DO BETÃO:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}}\right) \varphi_t} \quad [6.41]$$

Em que,

$N_{G,Ed}$ – Esforço normal actuante devido às acções permanentes;

N_{Ed} – Valor de cálculo do esforço normal actuante;

φ_t – Coeficiente de fluência do betão, determinado de acordo com a EN 1992-1-1, artigo 3.1.4.

E_{cm} – Módulo de elasticidade secante do betão, EN1992-1-1, 3.1.3(2)

QUADRO 7.1 – MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE DO BETÃO DE ACORDO COM AS CLASSE DE RESISTÊNCIA

Classe de betão	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
E_{cm} (GPa)	30	31	33	34	35	36	37

7.1.2 PROPRIEDADES DA COLUNA MISTA PARA A ENCURVADURA

A determinação das propriedades da coluna mista deve ser realizada para os diferentes planos de encurvadura, ou seja, no caso das secções rectangulares deverá ser realizada para a encurvadura em torno do eixo de maior inércia (y-y) e em torno do eixo de menor inércia (z-z).

De forma a explicitar as variáveis que dependem do eixo de flexão considerado, apresenta-se em seguida a formulação com o índice (y) relativo ao eixo de maior inércia.

7.1.2.1 Determinação da rigidez de flexão efectiva, $(EI)_{eff}$

$$(EI)_{eff,y} = E_a I_{a,y} + E_s I_{s,y} + K_e E_c E_{c,eff,y} I_{c,y} \quad [6.40]$$

Em que,

E_a – Módulo de elasticidade do aço estrutural definido na EN 1993-1-1, artigo 3.2.6.

E_s – Módulo de elasticidade do aço das armaduras. De acordo com a EN 1994-1-1, artigo 3.2(2), considera-se um valor igual ao do aço estrutural.

QUADRO 7.2 – MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO ESTRUTURAL E DO AÇO DAS ARMADURAS LONGITUDINAIS

E_a	210 GPa
E_s	210 GPa

$I_{a,y}$, $I_{s,y}$, $I_{c,y}$ – Momento de inércia da secção de aço estrutural, do aço das armaduras, e do betão não-fendilhado (Anexo B.1.2e B.2.1).

K_e – Parâmetro de correcção da rigidez de flexão do betão associada à fendilhação do mesmo (Johnson, 2004). De acordo com a EN 1994-1-1 6.7.3.3(3):

$$K_e = 0,6 \quad (7.1)$$

7.1.2.2 Determinação do valor crítico do esforço normal, N_{cr}

Recorrendo à expressão da carga crítica de Euler, determina-se o valor crítico do esforço normal:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff,y}}{L^2} \quad (7.2)$$

Em que,

L – Comprimento da coluna mista.

7.1.2.3 Determinação do valor característico do esforço normal resistente plástico, $N_{pl,Rk}$

A determinação do valor de cálculo do esforço normal resistente plástico é apresentada no capítulo 3.1. Neste caso deve-se utilizar os valores característicos das resistências dos materiais (Anexo A).

$$N_{pl,Rk} = A_a f_{yk} + \alpha_{cc} A_c f_{ck} + A_s f_{sk} \quad (7.3)$$

De acordo com o artigo 6.7.3.2 (1),

$$\alpha_{cc} = \begin{cases} 1,00 & \text{(secções tubulares em aço cheias de betão)} \\ 0,85 & \text{(restantes secções)} \end{cases}$$

7.1.2.4 Determinação da esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}_y$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr,y}}} \quad [6.39]$$

Para valores de esbelteza normalizada inferiores a 0,2 os efeitos da encurvadura podem ser ignorados em torno do eixo de flexão considerado. Se o valor for superior a 2,0 não se verifica o campo de aplicação do método simplificado de cálculo, 6.7.3.1(1).

7.1.2.5 Determinação dos efeitos do confinamento

Em relação às secções tubulares circulares cheias de betão, após a determinação da esbelteza normalizada, é possível avaliar o campo de aplicação da determinação dos efeitos do confinamento (ponto 3.1.1.1).

Caso se verifique, determina-se o valor de cálculo e o valor característico do esforço normal resistente plástico. Dado que se obtém um valor característico, $N_{pl,Rk}$, que contabiliza os efeitos do confinamento, determina-se novamente a esbelteza normalizada, $\bar{\lambda}_y$.

7.1.2.6 Determinação do valor de cálculo do esforço normal resistente plástico, $N_{pl,Rd}$

As expressões que permitem determinar o valor de $N_{pl,Rd}$ (ver ponto 4.1) são resumidamente apresentadas em seguida.

Considerando o efeito do confinamento:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_a f_{yd} + \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}}\right) A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.33]$$

(Secções tubulares circulares cheias de betão)

Não considerando o efeito do confinamento:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + \alpha_{cc} A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad [6.30]$$

Em que,

$$\alpha_{cc} = \begin{cases} 1,00 & \text{(secções tubulares em aço cheias de betão)} \\ 0,85 & \text{(restantes secções)} \end{cases}$$

7.1.2.7 Determinação do coeficiente de redução, χ_y

De acordo com a EN 1993-1-1, artigo 6.3.1.2:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \leq 1,0 \quad \text{EN1993-1-1 [6.49]}$$

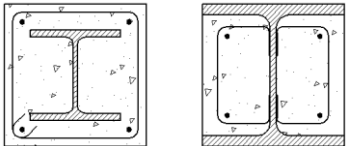
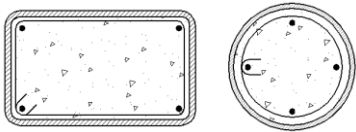
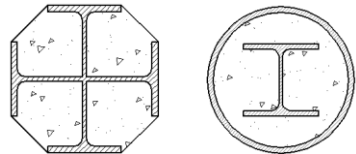
$$\phi_y = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$$

Em que,

α – Factor de imperfeição (Quadro 7.4) correspondente à curva de encurvadura apropriada (Quadro 7.3).

A determinação da curva de encurvadura depende da tipologia da secção em estudo, e caso se aplique do eixo de inércia considerado. Para as secções tubulares, é necessário avaliar também a taxa de armadura.

QUADRO 7.3 – CURVAS DE ENCURVADURA E IMPERFEIÇÕES INICIAIS EQUIVALENTES DE COLUNAS MISTAS (EN1994-1-1, QUADRO 6.5)

Secção Transversal	Limites	Eixo de encurvadura	Curva de encurvadura EN1993-1-1	Imperfeição do elemento (e_0)
	-	y – y	b	$\frac{L}{200}$
		z – z	c	$\frac{L}{150}$
	$\rho_s \leq 3\%$	qualquer	a	$\frac{L}{300}$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$		b	$\frac{L}{200}$
	-	qualquer	b	$\frac{L}{200}$
Taxa de Armadura		$\rho_s = A_s/A_c$		

QUADRO 7.4 – FACTORES DE IMPERFEIÇÃO, α , PARA AS CURVAS DE ENCURVADURA (EN1993-1-1, QUADRO 6.1)

Curva de Encurvadura	a	b	c
Factor de imperfeição, α	0,21	0,34	0,49

7.1.3 VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SEGURANÇA

Após a determinação do coeficiente de redução, caso se aplique, para os dois eixos de inércia, deve-se ter em conta o valor mais baixo, isto é, o mais condicionante à verificação da segurança.

A condição que satisfaz a segurança de colunas mistas sujeitas a compressão é a seguinte:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad [6.44]$$

A condição [6.44] deverá ser verificada mesmo sob esforços compostos. Lembra-se que na determinação dos efeitos do confinamento associados ao valor de cálculo do esforço normal resistente plástico de compressão, $N_{pl,Rd}$, contabiliza-se a presença de esforços compostos (N_{Ed} ; M_{Ed}) no cálculo da excentricidade, e .

7.2 COLUNA MISTA À FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO

A verificação da segurança à flexão composta com compressão exige uma análise que depende das características geométricas da secção transversal da coluna mista. O cálculo do momento de inércia exige que a análise deva ser realizada em relação aos dois eixos para as colunas mistas não bissimétricas. Por outro lado, as secções circulares não apresentam flexão desviada, sendo analisada apenas uma direcção.

Sendo cumprida a condição de segurança da coluna à compressão [6.44] (ver ponto 7.1), e sendo a mesma submetida a esforços de flexão ou a excentricidades, cujos valores mínimos regulamentares a respeitar são preconizados na EN 1994-1-1, é necessário verificar a segurança da secção, apresentando-se em seguida uma possível metodologia.

7.2.1 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ESFORÇO TRANSVERSO

De acordo com o artigo 6.7.3.2(3), deve analisar-se a influência ao esforço transversal de acordo com a metodologia que se apresenta no capítulo 3.4, e caso se verifique reduzir a tensão de cedência do aço, f_{yd} , na área de corte, A_v .

7.2.2 IMPERFEIÇÃO INICIAL

A imperfeição inicial equivalente é preconizada no artigo 6.7.3.4(4), e provoca um momento adicional dado por:

$$e_{0,y} \cdot N_{Ed} \quad (7.4)$$

O seu valor é obtido para cada direcção de cálculo através do Quadro 7.3.

7.2.3 AVERIGUAÇÃO DA NECESSIDADE DE REALIZAÇÃO DE UMA ANÁLISE DE 2ª ORDEM

As propriedades da coluna mista devem ser determinadas para os diferentes planos de encurvadura, ou seja, no caso das secções rectangulares deverá ser realizada para a encurvadura em torno do eixo de maior inércia (y-y) e em torno do eixo de menor inércia (z-z).

De forma a explicitar as variáveis que dependem do eixo de flexão considerado, apresenta-se em seguida a formulação com o índice (y) relativo ao eixo de maior inércia.

7.2.3.1 Determinação da rigidez de flexão efectiva, $(EI)_{eff,II}$

De forma a realizar uma análise de segunda ordem, deverá determinar-se a rigidez de flexão efectiva de acordo com o artigo 6.7.3.4(2):

$$(EI)_{eff,y,II} = K_0 (E_a I_{a,y} + E_s I_{s,y} + K_{e,II} E_{c,eff,y} I_{c,y}) \quad [6.42]$$

Em que,

K_0 – Coeficiente de calibração:

$$K_0 = 0,9 \quad (7.5)$$

$K_{e,II}$ – Parâmetro de correcção da rigidez de flexão do betão associada à fendilhação do mesmo em análises de segunda ordem.

$$K_{e,II} = 0,5 \quad (7.6)$$

7.2.3.2 Determinação do valor crítico do esforço normal, $N_{cr,eff}$

O valor crítico do esforço normal para análises de 2ª ordem é obtido utilizando a expressão de carga crítica de Euler, considerando a rigidez de flexão efectiva:

$$N_{cr,eff,y} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff,y,II}}{L^2} \quad (7.7)$$

Em que,

L – comprimento da coluna mista

7.2.3.3 Campo de aplicação de análises de 2ª ordem

A relação entre o valor crítico do esforço normal, $N_{cr,eff}$, e o esforço normal actuante N_{Ed} , corresponde ao factor, α_{cr} , que o esforço normal actuante teria de ser aumentado de forma a causar a instabilidade elástica da coluna, 5.2.1(3). Assim, para verificar a possibilidade de realizar uma análise de 2ª ordem deverá determinar-se tal factor através da expressão seguinte:

$$\alpha_{cr,y} = \frac{N_{cr,y,eff}}{N_{Ed}} \quad (7.8)$$

Nos casos em que o aumento dos esforços devido às deformações provenientes de análises de 1ª ordem seja inferior a 10% é possível realizar uma análise de 1ª ordem:

$$\alpha_{cr,y} \geq 10 \quad \text{realizar} \quad \text{Análise de 1ª Ordem} \quad [5.1]$$

Logicamente,

$$\alpha_{cr,y} < 10 \quad \text{realizar} \quad \text{Análise de 2ª Ordem} \quad (7.9)$$

No caso das secções rectangulares, tais como, secções total ou parcialmente betonadas e secção cheias de betão, relembra-se a necessidade de verificar qual a análise apropriada para cada eixo de flexão.

7.2.4 DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE DIMENSIONAMENTO

Dependendo se a análise realizada é de primeira ou segunda ordem, surgem diferentes metodologias para a determinação do momento de dimensionamento.

7.2.4.1 Análise de primeira ordem [$\alpha_{cr} \geq 10$]

O momento de dimensionamento de uma análise de primeira ordem é dado por:

$$M_{y,Ed} = M_{1,y,Ed} + e_{0,y} \cdot N_{Ed} \quad (7.10)$$

Em que,

$M_{1,Ed}$ – Maior momento flector obtido na análise global de 1ª ordem para o eixo de flexão em análise.

7.2.4.2 Análise de segunda ordem [$\alpha_{cr} < 10$]

O momento de dimensionamento de uma análise de segunda ordem é determinado com recurso a factores de amplificação, k , dos esforços de flexão resultantes de uma análise global e da imperfeição inicial equivalente, representados por k_{glob} e k_{imp} , respectivamente.

A amplificação dos esforços de 1ª ordem deve-se ao facto de os momentos resultantes de uma análise global, $M_{1,Ed}$ e $M_{2,Ed}$, e da imperfeição inicial equivalente, $e_0 N_{Ed}$, causarem um afastamento, u , da coluna em relação à posição inicial, a que se associam separadamente dois momentos de 2ª ordem.

No primeiro caso, o momento de 2ª ordem é contabilizado através do factor de amplificação global, k_{glob} , e no segundo caso deve-se à presença do esforço normal e terá o valor de $u \cdot N_{Ed}$. O momento final devido à imperfeição inicial equivalente resulta da soma de ambos os momentos e será igual a $(e_0 + u) \cdot N_{Ed}$, contabilizado no factor de amplificação, k_{imp} .

O momento flector máximo de dimensionamento, $M_{y,Ed}$, que contabiliza os efeitos de segunda ordem referidos anteriormente, para cada direcção de cálculo, é obtido através da soma do momento proveniente da análise global com o momento devido à imperfeição inicial:

$$M_{y,Ed} = k_{glob,y} M_{1,y,Ed} + k_{imp,y} e_{0,y} N_{Ed} \quad (7.11)$$

Em que,

$$k_{glob/imp,y} = \frac{\beta_{glob/imp,y}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y,eff}}} \geq 1,0 \quad [6.43]$$

Recorrendo ao Quadro 6.4 (EN1994-1-1) determina-se o factor β_{glob} de forma a amplificar o momento flector actuante proveniente de uma análise global de primeira ordem, e o factor β_{imp} de forma a amplificar o momento devido à imperfeição inicial equivalente.

$$\beta_{imp,y} = 1,0 \quad (7.12)$$

$$\beta_{glob,y} = 0,66 + 0,44 r_{glob,y} \geq 0,44 \quad (7.13)$$

$$-1,0 \leq r_{glob,y} = \frac{M_{2,y,Ed}}{M_{1,y,Ed}} \leq 1,0 \quad (7.14)$$

Em que,

$M_{1,Ed}$ – Maior momento flector obtido na análise global, para o eixo em análise;

$M_{1,Ed}$ e $M_{2,Ed}$ – Momentos flectores nas extremidades da coluna, para o eixo em análise.

7.2.4.3 Momento de dimensionamento em função da altura da coluna e do esforço normal actuante

O momento de dimensionamento depende das características geométricas da secção transversal (tipologia, dimensões e materiais), da altura da coluna mista e do valor do esforço normal actuante.

Por outro lado, para uma determinada geometria da secção transversal, o valor crítico do esforço normal, $N_{cr,eff}$, é função da altura da coluna mista, L , de acordo com a expressão (7.7). Nesse caso, de acordo com a expressão (7.8) o factor $\alpha_{cr}(L, N_{Ed})$ é função de L e N_{Ed} .

Deste modo, de acordo com as expressões (7.10) e (7.11) o momento flector de dimensionamento, M_{Ed} , de uma determinada geometria da secção transversal, é função dos momentos flectores actuantes obtidos de uma análise de primeira ordem, do factor $\alpha_{cr}(L, N_{Ed})$ e da imperfeição geométrica equivalente, e_0 (que depende apenas da tipologia da secção).

Para um determinado comprimento da coluna mista, L , e momentos flectores actuantes (de 1ª ordem) é então possível definir o momento de dimensionamento $M_{Ed}(N_{Ed})$ em função do esforço normal actuante, N_{Ed} .

Nas Figuras 7.2 e 7.3 apresentam-se os gráficos $M_{Ed}-N_{Ed}$ da secção transversal ilustrada na Figura 7.1 para diversos comprimentos da coluna mista. O momento de dimensionamento será então a intersecção de uma recta horizontal ($N = N_{Ed}$) com o gráfico $M_{Ed}-N_{Ed}$ correspondente ao comprimento da coluna. Para o caso em estudo arbitrou-se $N_{Ed} = 2500 \text{ kN}$.

Caso o comprimento da coluna seja igual a zero, está-se perante uma análise da secção, logo o momento de dimensionamento é directamente o máximo momento obtido de um análise global e não depende do esforço normal actuante, dado que a parcela correspondente à imperfeição equivalente anula-se. Para comprimentos da coluna mista $L > 0$, e caso se verifique o campo de aplicação de uma análise de 1ª ordem ($\alpha_{cr,y} \geq 10$), ou seja, quando $N_{Ed} \leq \frac{N_{cr,eff}}{10}$, a inclinação do gráfico $M_{Ed}-N_{Ed}$ é constante e igual à imperfeição equivalente e_0 ($L/200$, para o caso em estudo). Caso $N_{Ed} > \frac{N_{cr,eff}}{10}$ deve realizar-se uma análise de 2ª ordem e o momento de dimensionamento depende dos factores de amplificação k_{glob} e k_{imp} , os quais aumentam com o esforço normal actuante N_{Ed} , motivo pelo qual o gráfico não apresenta uma inclinação constante. Entre as duas situações, quando $N_{Ed} = \frac{N_{cr,eff}}{10}$ regista-se um troço horizontal devido ao acréscimo de momento proveniente dos factores de amplificação.

Materiais: Aço estrutural da classe S355; Aço das armaduras longitudinais da classe A500; Betão da classe C30/37 com um coeficiente de fluência de 2,5.

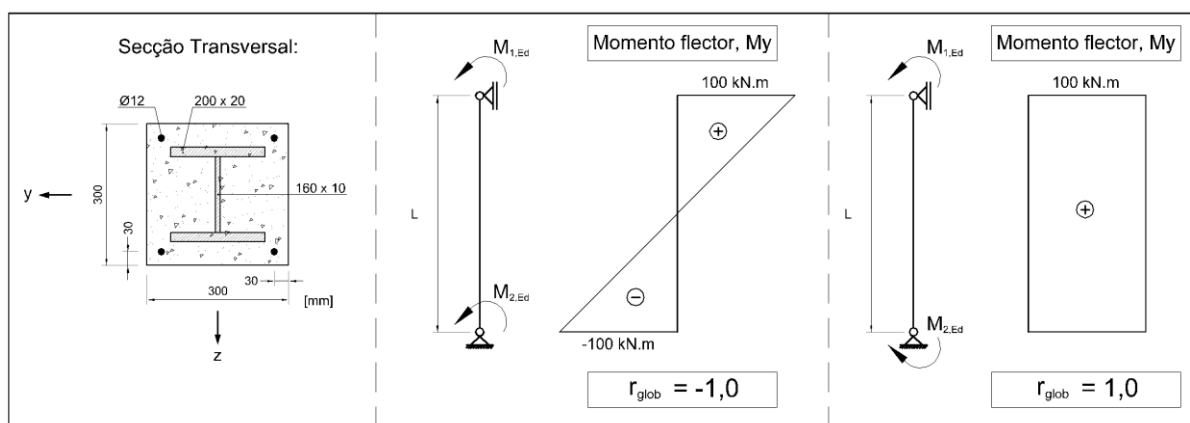


FIGURA 7.1 – SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE NA FIGURA 7.2 E DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES ACTUANTES OBTIDOS ATRAVÉS DE UMA ANÁLISE GLOBAL

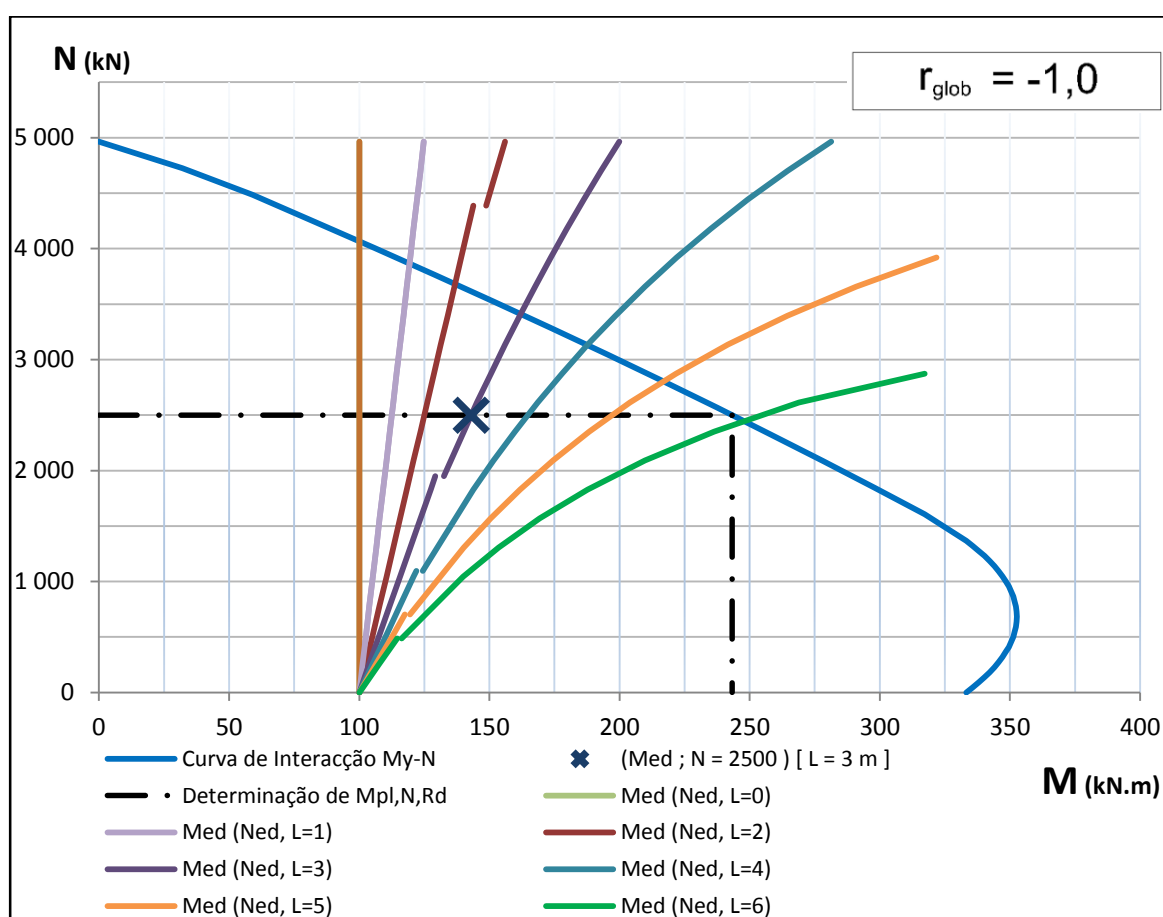


FIGURA 7.2 – MOMENTO DE DIMENSIONAMENTO EM FUNÇÃO DO ESFORÇO NORMAL ACTUANTE E DO COMPRIMENTO DA COLUNA MISTA APRESENTADA NA FIGURA 7.1, PARA $r_{glob} = -1,0$.

Para um determinado comprimento da coluna, esforço normal actuante e geometria da secção transversal, de acordo com as expressões [6.43] e (7.11) a (7.14), o momento de dimensionamento é máximo quando o factor de amplificação, k_{glob} , também é, ou seja, quando os momentos de extremidade são iguais ($r_{glob} = 1$). Deste modo comparando os gráficos $M_{Ed}-N_{Ed}$ das situações extremas, $r_{glob} = -1,0$ (Figura 7.2), e $r_{glob} = 1,0$ (Figura 7.3), observa-se que há um aumento do momento de dimensionamento para um dado valor de esforço normal actuante, N_{Ed} , logicamente para

valores de $N_{Ed} > \frac{N_{cr,eff}}{10}$ (análise de 2ª ordem). Por outro lado, os valores do gráfico correspondentes a análise de 1ª ordem são iguais em ambos os casos ($r_{glob} = -1,0$ e $r_{glob} = 1,0$). Observa-se também que a análise a realizar (1ª ou 2ª ordem) não depende da relação, r_{glob} , entre os momentos de extremidade obtidos de uma na análise global, mas sim apenas das características da secção transversal, comprimento da coluna e valor do esforço normal actuante.

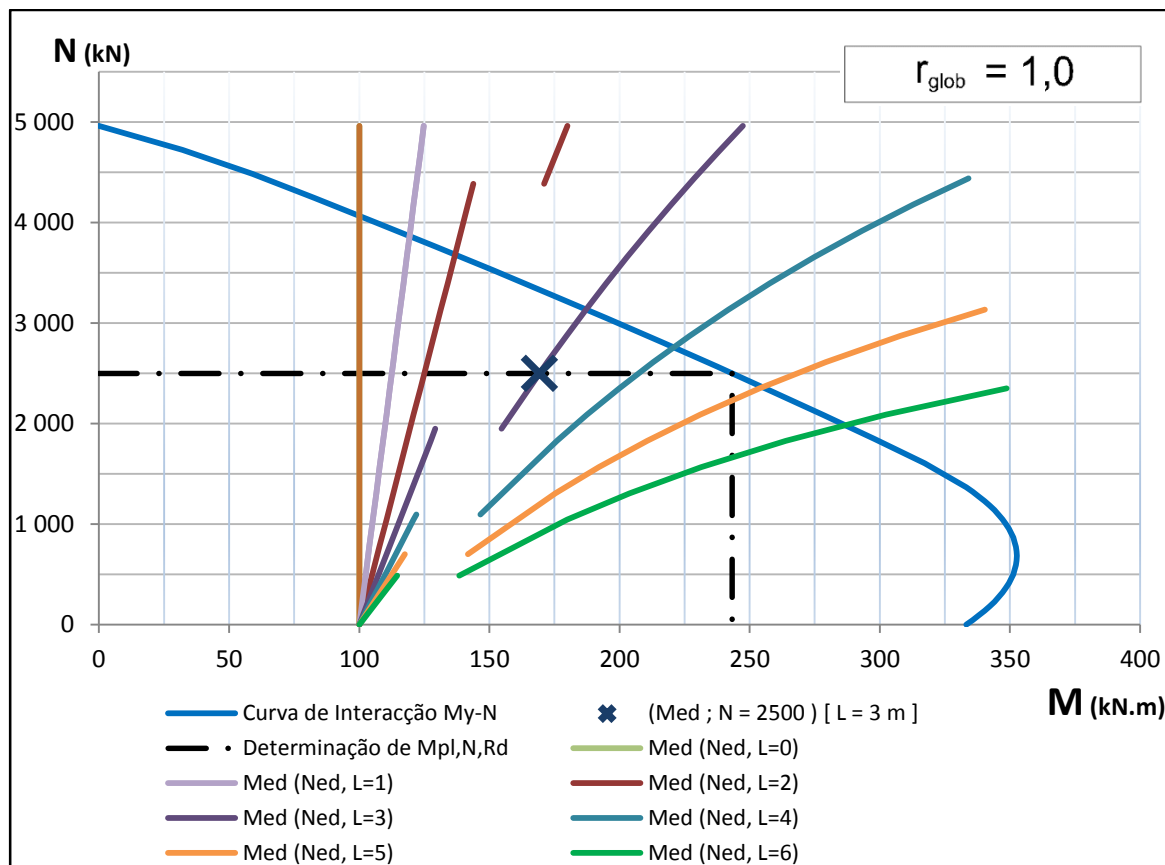


FIGURA 7.3 – MOMENTO DE DIMENSIONAMENTO EM FUNÇÃO DO ESFORÇO NORMAL ACTUANTE E DO COMPRIMENTO DA COLUNA MISTA APRESENTADA NA FIGURA 7.1, PARA $r_{glob} = 1,0$.

7.2.5 VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SEGURANÇA

Após a determinação dos factores de amplificação, para o eixo de inércia em análise, deve-se ter em conta ambos os valores isoladamente, de tal forma que se relacione os valores resistentes reduzidos do momento flector, $M_{pl,N,Rd}$, com os valores de dimensionamento, M_{Ed} , para cada direcção de cálculo. O método de determinação de $M_{pl,N,Rd}$ é apresentado no capítulo 4, e depende directamente do esforço normal actuante, N_{Ed} .

As condições apresentadas em seguida satisfazem a segurança de colunas mistas sujeitas a flexão composta com compressão.

Flexão em torno de y-y:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} \leq \alpha_M \quad [6.45]$$

Flexão em torno de z-z:

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,N,Rd}} \leq \alpha_M \quad [6.45]$$

Secções circulares:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} \leq \alpha_M \quad [6.45]$$

O valor de α_M é preconizado no artigo 6.7.3.6(1) para ter em conta o valor sobrestimado de momento flector resistente devido à superioridade de resistência e capacidade de deformação antes da rotura do aço em relação ao betão (Calado, et al., 2010). Deverá então diminuir-se o limite máximo da condição de segurança, α_M , dependendo da classe de resistência do aço do perfil.

QUADRO 7.5 – LIMITE MÁXIMO, α_M , DA CONDIÇÃO DE VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA À FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO DE ACORDO COM A CLASSE DE RESISTÊNCIA DO AÇO ESTRUTURAL

Classe de Resistência do Aço	S235, S275 e S355	S420 e S460
α_M	0.9	0.8

A presente verificação deverá ser realizada mesmo sob flexão desviada composta com compressão. Por outro lado, caso não se verifique a segurança da coluna mista à compressão [6.44] a verificação da condição [6.45] poderá ser dispensada.

7.3 COLUNA MISTA À FLEXÃO DESVIADA COMPOSTA COM COMPRESSÃO

A verificação à flexão desviada composta com permite analisar a coluna mista quando sujeita a momentos flectores actuantes em ambos os eixos de inércia. Admitindo que a rotura irá acontecer num dos planos de flexão, deve-se considerar a imperfeição inicial equivalente apenas no plano da rotura. Para tal é necessário determinar isoladamente a rotura em torno do eixo y-y e em torno do eixo z-z, 6.7.3.7(1):

Rotura em torno de y-y:

$e_{0,z} \neq 0$	$e_{0,y} = 0$
$M_{y,Ed} = k_{glob} M_{1,y,Ed} + k_{imp} e_{0,z} N_{Ed}$	$M_{z,Ed} = k_{glob} M_{1,z,Ed}$

Rotura em torno de z-z:

$e_{0,z} = 0$	$e_{0,y} \neq 0$
$M_{y,Ed} = k_{glob} M_{1,y,Ed}$	$M_{z,Ed} = k_{glob} M_{1,z,Ed} + k_{imp} e_{0,y} N_{Ed}$

A condição de segurança a respeitar em cada caso é a seguinte:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,N,Rd}} \leq 1,0 \quad [6.47]$$

8. EXEMPLOS DE CÁLCULO E DE APLICAÇÃO DO TOOLKIT

8 EXEMPLOS DE CÁLCULO E DE APLICAÇÃO DO TOOLKIT

Devido à existência de geometrias distintas, desenvolveu-se dois toolkits:

- *Colunas Mistas Circulares - Verificação da Segurança (EN1994-1-1).xism*
- *Colunas Mistas Rectangulares - Verificação da Segurança (EN1994-1-1).xism*

Por outro lado, existem diversas características comuns a ambos os casos, tais como, as classes de resistência dos materiais, a necessidade de definir a geometria da secção, o número, diâmetro e posição dos varões de aço ordinário, as acções, bem como os resultados a analisar.

De forma a facilitar a utilização do programa manteve-se a estrutura e a interface dos *toolkits* muito semelhante. Os dados distinguem-se através do sombreado azul e os resultados distinguem-se através do sombreado a laranja.

Em seguida apresenta-se a metodologia de utilização do toolkit, através da sua aplicação de forma a verificar a segurança de uma coluna mista rectangular e circular.

8.1 COLUNA MISTA RECTANGULAR

No exemplo de cálculo verifica-se a segurança da coluna mista rectangular apresentada na Figura 8.1, com 3,0m de altura. Além dos esforços apresentados, cujos valores são obtidos através de uma análise global da estrutura, a coluna suporta uma carga axial $N_{Ed} = 4000 \text{ kN}$ (acções permanente: $N_{G,Ed} = 2800 \text{ kN}$; acções variáveis: $N_{Q,Ed} = 1200 \text{ kN}$). O perfil soldado é constituída por um aço da classe S355. O aço das armaduras longitudinais é da classe A500. O betão é da classe C30/37 e apresenta um coeficiente de fluência $\varphi_t = 2,5$ (obtido a partir do artigo 3.1.4 da EN 1992-1-1).

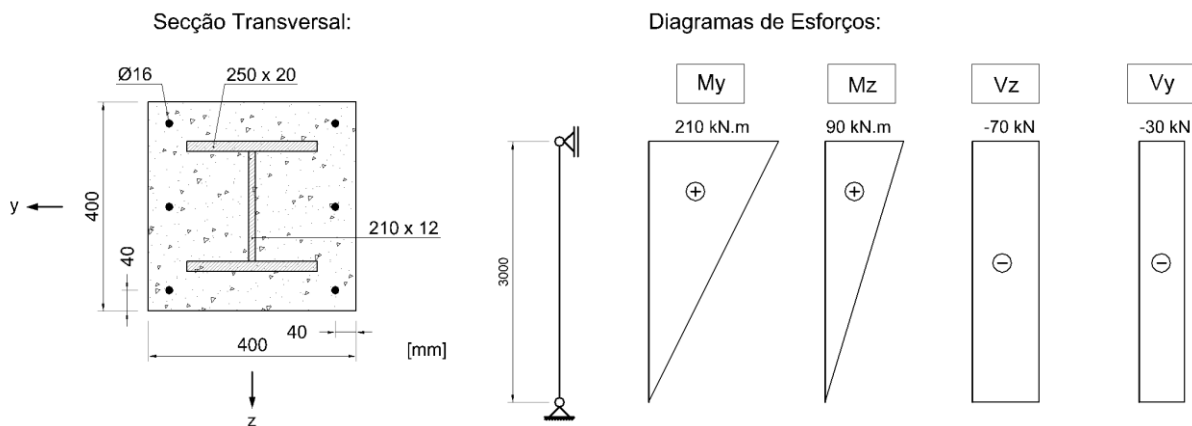


FIGURA 8.1 – SECÇÃO TRANSVERSAL DA COLUNA MISTA RECTANGULAR EM ANÁLISE NO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO TOOLKIT

8.1.1 MATERIAIS

A classe de resistência dos materiais é definida seleccionando de uma lista a classe desejada. O coeficiente de fluência do betão, φ_t , deve ser introduzido pelo utilizador.

Materiais:

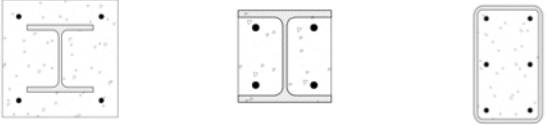
Aço das Armaduras
 Aço Estrutural
 Betão $\varphi_c =$

8.1.2 GEOMETRIA

Geometria:

Tipologia da Secção

Totalmente Betonada Parcialmente Betonada Rectangular cheia de betão



Perfil de Aço

Secção Soldada - OU - Perfil Comercial

bf	250
tf	20
hw	210
tw	12

[mm]

hc	400	[mm]
bc	400	[mm]

Betão

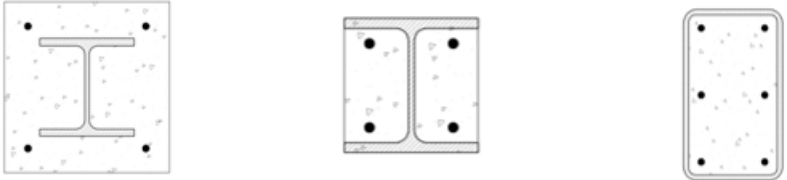
Comprimento da Coluna, L (m)

Armadura	
ϕ (mm)	16
distância:	número:
dz =	40 2
dy =	40 3
A_s (cm ²)	12.06 ($\rho=0.8\%$)
$A_{s,min}$ (cm ²)	4.42
$A_{s,max}$ (cm ²)	88.49

1. Seleccionar a **tipologia da secção** que representa a secção a dimensionar. No presente exemplo (Figura 8.1), a tipologia apropriada será a **secção totalmente betonada**.

Tipologia da Secção

Totalmente Betonada Parcialmente Betonada Rectangular cheia de betão



2. Seleccionar o **tipo de perfil de aço**. Neste caso, pretende-se definir a geometria da secção e portanto deverá seleccionar-se **Secção Soldada**. De acordo com a secção apresentada anteriormente, as dimensões (em milímetros) dos banzos são designadas por **b_f** e **t_f** e as dimensões da alma por **h_w** e **t_w**.

Perfil de Aço

Secção Soldada - OU - Perfil Comercial

bf	250
tf	20
hw	210
tw	12

[mm]

#N/A
#N/A
#N/A
#N/A

No caso de se escolher um **Perfil Comercial**, deverá **Seleccionar** em primeiro lugar o tipo de perfil comercial (**IPE / HEA / HEB / HE / RHS / SHS**) e em seguida o perfil desejado (**HEB 240**, por exemplo). O toolkit irá apresentar as dimensões do perfil, de acordo com as nomenclaturas supracitadas.

3. Definir as **dimensões do betão** (em milímetros), nomeadamente a base, **b_c**, e a altura, **h_c**.

Betão	
bc	400 [mm]
hc	400 [mm]

No caso do utilizador ter escolhido entre as tipologias *Parcialmente betonadas* ou *Rectangular cheia de betão*, estas dimensões não se aplicam e o toolkit apresentará o seguinte formato:

-- sem efeito --	
---	400 [mm]
---	400 [mm]

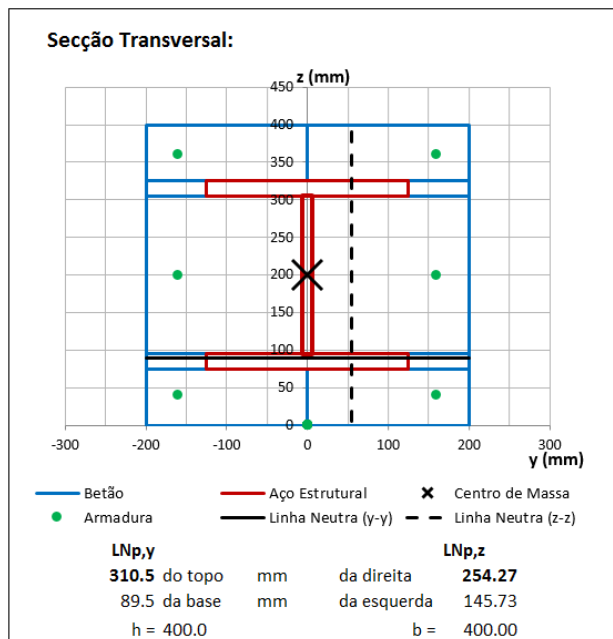
4. Definir o **Comprimento da Coluna** mista (em metros), **L**. No presente caso arbitrou-se 3,0 metros.

Comprimento da Coluna (L)
3.0 m

5. Definir a **Armadura** longitudinal. Seleccionar da lista o **diâmetro, \varnothing** , que neste caso é 16 mm. Definir a **distância ao topo da secção, dz**, e o **número de varões** que existem **na horizontal**. Analogamente, definir a **distância ao limite esquerdo/direito da secção, dy**, e o **número de varões na vertical**.

Armadura	
\varnothing (mm)	16
distância:	número:
dz =	40 2
dy =	40 3
A_s (cm ²)	12.06 ($\rho=0.8\%$)
$A_{s,min}$ (cm ²)	4.42
$A_{s,max}$ (cm ²)	88.49

A qualquer momento o utilizador pode consultar o **esquema da secção transversal** e verificar se os dados introduzidos correspondem à secção transversal que deseja dimensionar.



8.1.3 ACÇÕES

As secções rectangulares devem ser analisadas nas duas direcções de cálculo. Por outro lado, as secções circulares permitem considerar apenas uma direcção. Deste modo, existe uma ligeira diferença nos dados a introduzir.

As acções consideradas para o exemplo de aplicação são as apresentadas em seguida.

Acções:					
N_{Ed} (kN)	$M_{1,y,Ed}$ (kN.m)	$M_{1,z,Ed}$ (kN.m)	$V_{z,Ed}$ (kN)	$V_{y,Ed}$ (kN)	
4 000.0	210.0	90.0	70.0	30.0	
Sim					
$N_{G,Ed}$	$M_{2,y}$	$M_{2,z}$	$V_{a,z,Ed}$	$V_{a,y,Ed}$	
2 800.0	0.0	0.0	53.3	15.6	
	$M_{y,Ed}$	$M_{z,Ed}$	Influência a V_{Ed} :		
	270.0	182.6	338.9	1 976.7	

Sim

$V_{a,z,Ed}$ 53.3

Esforço Transverso Actuante
 Distribuir esforço transverso actuante pela secção de aço e pelo betão na mesma proporção com que estes materiais contribuem para o momento flector resistente da secção

Influência 338.9

A EN1994-1-1 permite **distribuir o esforço transverso actuante para o perfil de aço e para o betão**, de acordo com a contribuição da resistência de cada material para a secção mista (ver ponto 4.4, equações [6.31] e [6.32]). Nesse caso deverá seleccionar-se **Sim**.

O toolkit determinará qual o valor a partir do qual há influência do esforço transverso actuante na coluna mista, de acordo com as expressões 4.14 e 4.15, tendo em conta a opção seleccionada.

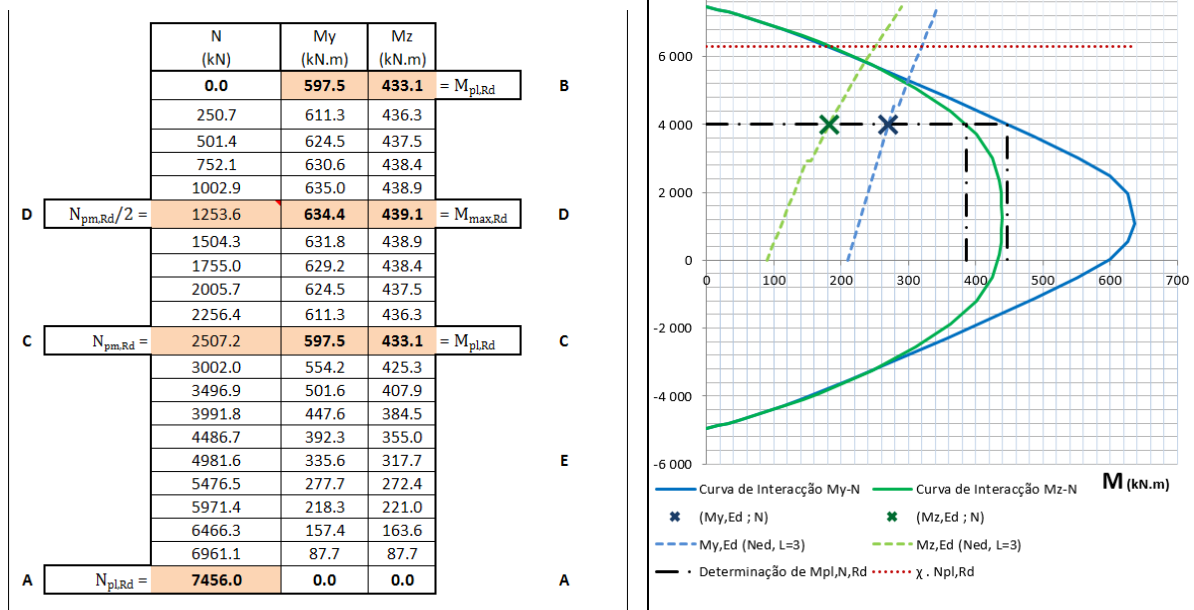
O toolkit determinará ainda o valor do esforço transverso actuante no perfil de aço, $V_{a,Ed}$, permitindo ao utilizador avaliar se pretende distribuir ou não o esforço transverso pelo perfil de aço e pelo betão.

8.1.4 RESULTADOS

Os valores de resistência são agrupados de forma a permitir ao utilizador uma rápida avaliação da resistência da secção dimensionada.

Resistência:				
$N_{pl,Rd}$ (kN)	$M_{pl,y,N,Rd}$ (kN.m)	$M_{pl,z,N,Rd}$ (kN.m)	$V_{pl,a,z,Rd}$ (kN)	$V_{pl,a,y,Rd}$ (kN)
7 456.0	446.9	385.7	516.5	2 049.6
$\min(\chi_y ; \chi_z) \cdot N_{pl,Rd}$ (kN)			258.2	1024.8
6 291.0			(50%)	
			η	
			1.0	

É apresentado um também conjunto de pontos da curva de interacção de forma a permitir realizar uma estimativa dos valores de momento flector plástico resistente correspondente aos diversos valores de esforço normal.



Adicionalmente, apresenta-se ao utilizador um resumo dos resultados das diversas verificações da segurança, com as observações apropriadas. Os **botões azuis**, permitem visualizar os relatórios de cada verificação da segurança (ver Anexo C.1), organizados de acordo com as metodologias apresentadas no capítulo 7.

Verificações da Segurança (Resumo):		0.943
0- Resumo		
1- Disp. construtivas e campo de aplicação		Verificado.
2- V.S. à Compressão		0.636
<i>$\chi = 0.844$, condicionado pela encurvadura em torno do eixo z-z.</i>		
3- Esforço Transverso		Sem influência ()
4- V.S. Flexão Composta N-My		0.604
<i>Análise de 1ª ordem ($\alpha_{cr,y} = 11.33$)</i>		
5- V.S. Flexão Composta N-Mz		0.473
<i>Análise de 2ª ordem ($\alpha_{cr,z} = 7.34$)</i>		
6- V.S. Flexão Desviada Composta N-My-Mz		0.943
<i>Condicionado pela rotura em torno de z-z</i>		

8.2 COLUNA MISTA CIRCULAR

No exemplo de cálculo verifica-se a segurança da coluna mista rectangular apresentada na Figura 8.2, com 4,0m de altura. Além dos esforços apresentados, cujos valores são obtidos através de uma análise global da estrutura, a coluna suporta uma carga axial $N_{Ed} = 4000 \text{ kN}$ (acções permanente: $N_{G,Ed} = 3000 \text{ kN}$; acções variáveis: $N_{Q,Ed} = 1000 \text{ kN}$). O tubo é constituído por um aço da classe S355. O aço das armaduras longitudinais é da classe A500. O betão é da classe C30/37 e apresenta um coeficiente de fluência $\varphi_t = 2,5$ (obtido a partir do artigo 3.1.4 da EN 1992-1-1).

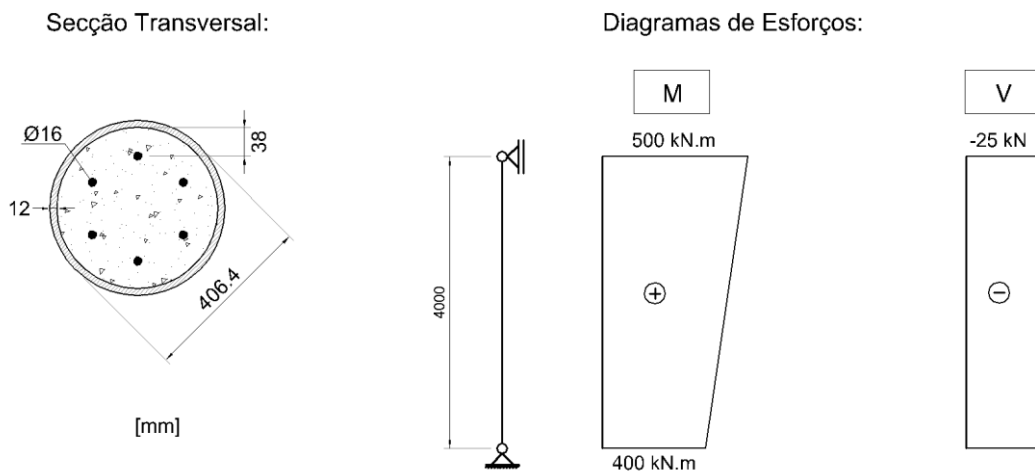


FIGURA 8.2 – SECÇÃO TRANSVERSAL DA COLUNA MISTA CIRCULAR EM ANÁLISE NO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO TOOLKIT

8.2.1 MATERIAIS

A classe de resistência dos materiais é definida seleccionando de uma lista a classe desejada. O coeficiente de fluência do betão, φ_t , deve ser introduzido pelo utilizador.

Materiais:

Aço das Armaduras

Aço Estrutural

Betão $\varphi_t =$

8.2.2 GEOMETRIA

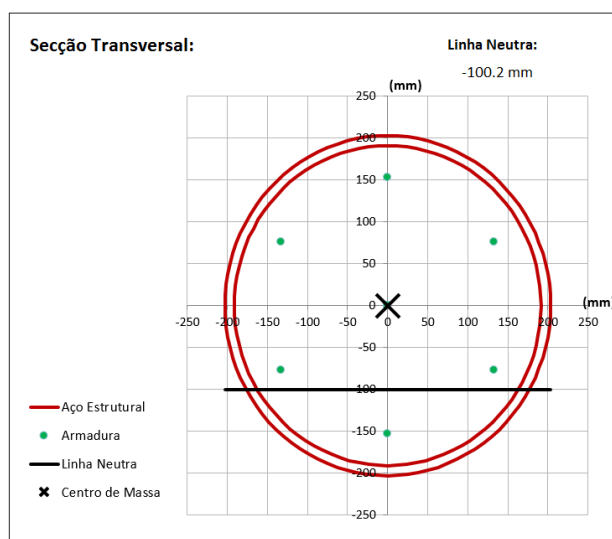
No exemplo em estudo optou-se por dimensionar a coluna utilizando um *Perfil Comercial*.

1. Seleccionar **Perfil Comercial**. Seleccionar da lista o **Diâmetro Exterior**, D_{ext} , desejado, e em seguida a **Espessura**, t , correspondente.
Caso o perfil que o utilizador deseje não se encontre disponível, deverá seleccionar **Definir Geometria**, e introduzir as dimensões (em milímetros).
2. Definir a **Armadura** longitudinal. Definir o **número de varões**. Seleccionar da lista o **diâmetro**, \varnothing , que neste caso é 16 mm. Definir a **distância do centro do varão à face interior do tubo**, $(D/2 - t - r_\varnothing)$, neste exemplo, igual a 38 mm.
A **percentagem mínima de armadura**, ρ_{min} , depende se a coluna é dimensionada para resistir ao fogo (ver capítulo 6).
3. Definir o **Comprimento da coluna** mista (em metros), L . No presente caso arbitrou-se 4,0 metros.

Geometria:

Armadura		Aço-Betão	
nº varões	6	<input type="radio"/> Definir Geometria	<input checked="" type="radio"/> Perfil Comercial
\varnothing	16	D_{ext} (mm) =	<input type="text" value="406.4"/>
$D/2 - t - r_\varnothing$	38	t (mm) =	<input type="text" value="12"/>
r_\varnothing	153.2	d_{int} (mm) =	0.0 382.4
recobrimento	30	Comprimento, L (m)	
A_s (cm ²)	12.06 ($\rho=1.1\%$)	<input type="text" value="4.00"/>	
$A_{s,min}$ (cm ²)	0.00	$\rho_{min} =$	<input type="text" value="0.0%"/>
$A_{s,max}$ (cm ²)	68.19		

À medida que introduz os dados, o utilizador pode confirmar no **esquema da secção transversal** apresentado, se corresponde à secção transversal que deseja dimensionar.



8.2.3 ACÇÕES

As acções consideradas para o exemplo de aplicação são as apresentadas em seguida.

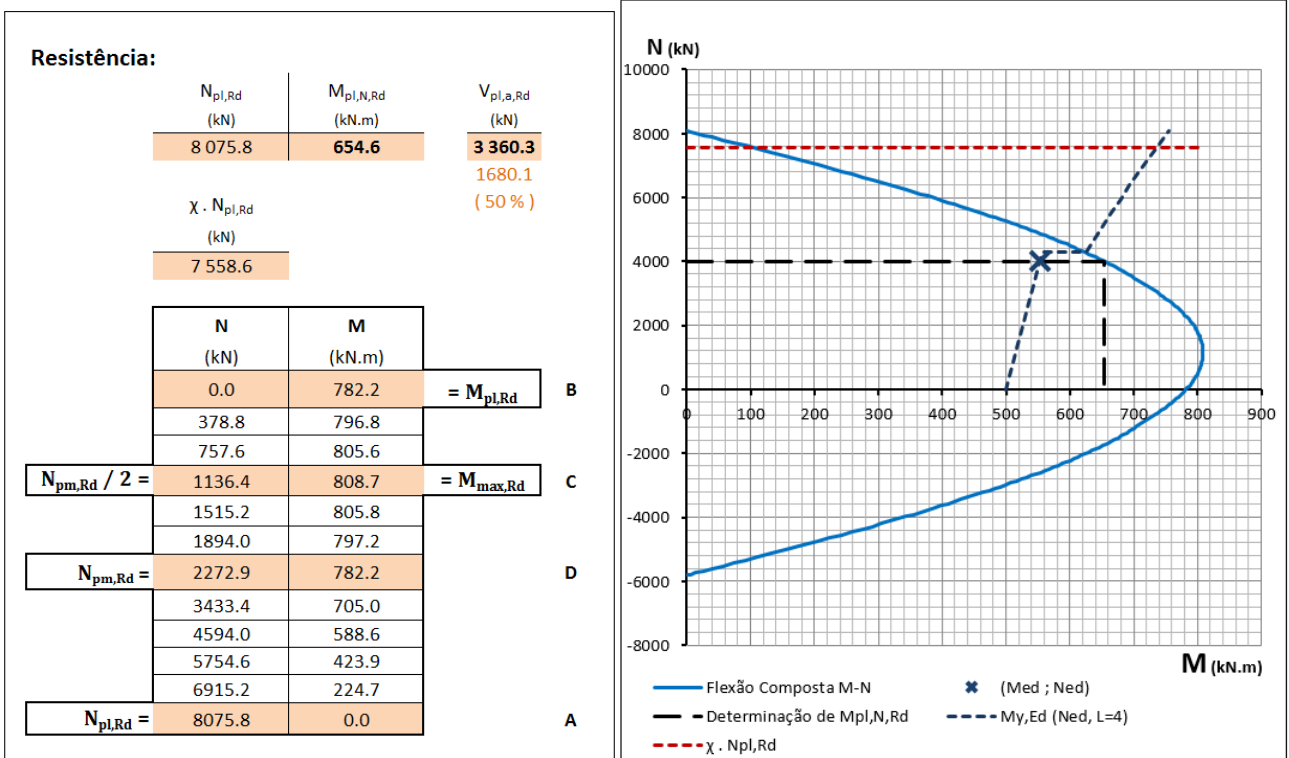
O momento de dimensionamento, M_{Ed} , é apresentado em conjunto com as acções, e tem em conta a imperfeição inicial e caso se aplique os efeitos de 2ª ordem (ver ponto 7.2.4).

Acções:			
N_{Ed} (kN)	$M_{1,y,Ed}$ (kN.m)	M_{Ed} (kN.m)	V_{Ed} (kN)
4 000.0	500.0	553.3	25.0
			Sim
$N_{G,Ed}$	$M_{2,y}$		$V_{a,Ed} =$
3 000.0	400.0		20.5
			$V_{Ed, c/ influência} =$
			2 049.7

De forma análoga às secções rectangulares, o esforço transversal pode ser distribuído pela secção de aço e pelo betão. A título de exemplo, optou-se por seleccionar **Não**. Nesse caso o valor a partir do qual há influência do esforço transversal será 50% do valor resistente proveniente do perfil de aço, disponível na secção **Resistência** (ver ponto 4.4).

8.2.4 RESULTADOS

Analogamente às secções rectangulares, os valores resistentes são agrupados. No caso do esforço transversal, apresenta-se o valor correspondente a 50% da resistência, permitindo avaliar qual o contributo de distribuir o esforço transversal actuante pelo perfil de aço e pelo betão.



O resumo das verificações de segurança permite uma rápida análise dos resultados. Caso não verifique a segurança ou os limites para as diversas disposições construtivas, o utilizador pode pressionar os **Botões azuis** para consultar os relatórios (Ver Anexo C.2) e avaliar quais as alterações necessárias. Em particular, o botão **0-Resumo** apresenta comentários sobre as disposições construtivas e as verificações mais relevantes.

Verificações da Segurança (Resumo):	0.845
0- Resumo	
1- Disp. construtivas e campo de aplicação	Verificado.
2- VS Compressão	0.529 $\chi = 0.936$
3- Esforço Transverso	Sem influência
4- VS Flexão Composta	0.845

Análise de 1ª ordem (acr = 10.75)

9. ESTUDO PARAMÉTRICO

9 ESTUDO PARAMÉTRICO

Com recurso à capacidade de cálculo do programa realizaram-se diversos estudos paramétricos com o objectivo de avaliar a preponderância dos parâmetros que caracterizem as colunas mistas de aço-betão. Deste modo, o estudo incide numa determinada variável e avalia a sua evolução, fixando os restantes parâmetros envolvidos.

Os estudos paramétricos realizados têm como variáveis os seguintes parâmetros:

- Classe do aço estrutural, f_{yd}
- Classe do betão, f_{cd}
- Percentagem de Armadura Longitudinal
- Espessura do tubo
- Diâmetro do tubo

No Quadro 9.1 apresenta-se um resumo dos estudos paramétricos realizados. As Figuras 9.2 a 9.28, contêm (na mesmo gráfico) as curvas de interacção correspondentes à variável em análise. De forma a facilitar a análise da influência dos diversos parâmetros, apresentam-se apenas os gráficos correspondentes ao primeiro e último caso analisado. Por exemplo, para a análise da influência da classe do aço estrutural (ponto 8.1), apresentam-se os diagramas correspondentes à classe do betão C20/25 e C50/60. No Anexo D disponibilizam-se as restantes curvas de interacção.

QUADRO 9.1 – RESUMO DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS REALIZADOS

Classe do aço estrutural e Classe do betão						
Tipologias de Secção em análise						
	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C50/60
Variáveis a combinar	S235		S275		S420	S460
Percentagem de armadura longitudinal, ρ_s						
Tipologias de Secção em análise						
	$\rho_s = 0\%$	$\rho_s = 1\%$	$\rho_s = 2\%$	$\rho_s = 3\%$	$\rho_s = 4\%$	$\rho_s = 5\%$
Variáveis a combinar	S235		S275		S420	S460
	C30/37					

Espessura do tubo, t					
Tipologias de Secção em análise					
Variáveis a combinar	$t = 10mm$	$t = 15mm$	$t = 20mm$	$t = 25mm$	$t = 30mm$
	S235	S275	S355	S420	S460
	C30/37				
Diâmetro do tubo, d					
Tipologias de Secção em análise					
Variáveis a combinar	$d = 200mm$	$d = 225mm$	$d = 250mm$	$d = 275mm$	$d = 300mm$
	S235	S275	S355	S420	S460
	C30/37				

9.1 VARIÁVEL: CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

A análise dos diversos diagramas de interacção M-N (Figura 9.2 a Figura 9.8), permite observar que o aumento da classe de resistência do aço estrutural implica logicamente um aumento de resistência ao esforço normal e ao momento flector. Dado que a classe de resistência do betão não varia, conclui-se que o aumento do esforço normal resistente plástico resulta da variação da tensão de cedência do aço estrutural, f_{yd} :

$$\Delta N_{pl,Rd} = A_a \times \Delta f_{yd} \quad (9.1)$$

De acordo com os pontos notáveis do diagrama de interacção M-N (Figura 4.5 – Ponto D), o esforço normal resistente da área transversal de betão, $N_{pm,Rd}$ (representado a tracejado nas figuras seguintes), é constante visto que não depende de f_{yd} . Com efeito, a área de betão, A_c , e o valor de cálculo da tensão de rotura por compressão, f_{cd} , são constantes.

$$\frac{1}{2} N_{pm,Rd} = \frac{1}{2} \alpha_{cc} A_c f_{cd} = constante \quad (9.2)$$

O momento flector resistente aumenta, naturalmente, com a classe de resistência do aço. Esse aumento, depende apenas da variação da classe de resistência. As maiores diferenças registam-se entre as classes de aço S275 e S355 ($\Delta = 355 - 275 = 80$), bem como, entre as classes S355 e S420 ($\Delta = 420 - 355 = 65$). O momento flector apresenta então uma variação linear, visto que se varia a

força, ou seja, apenas uma das parcelas do produto (equação 3.8) de que resulta o momento e que se mantém constante o ponto de aplicação da força.

9.1.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

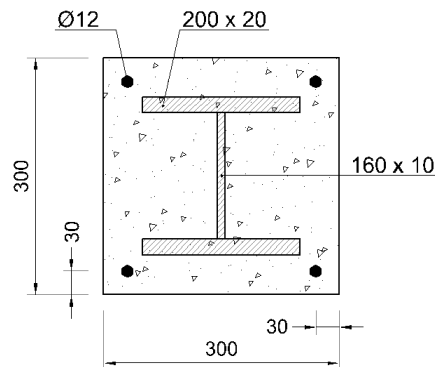


FIGURA 9.1 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

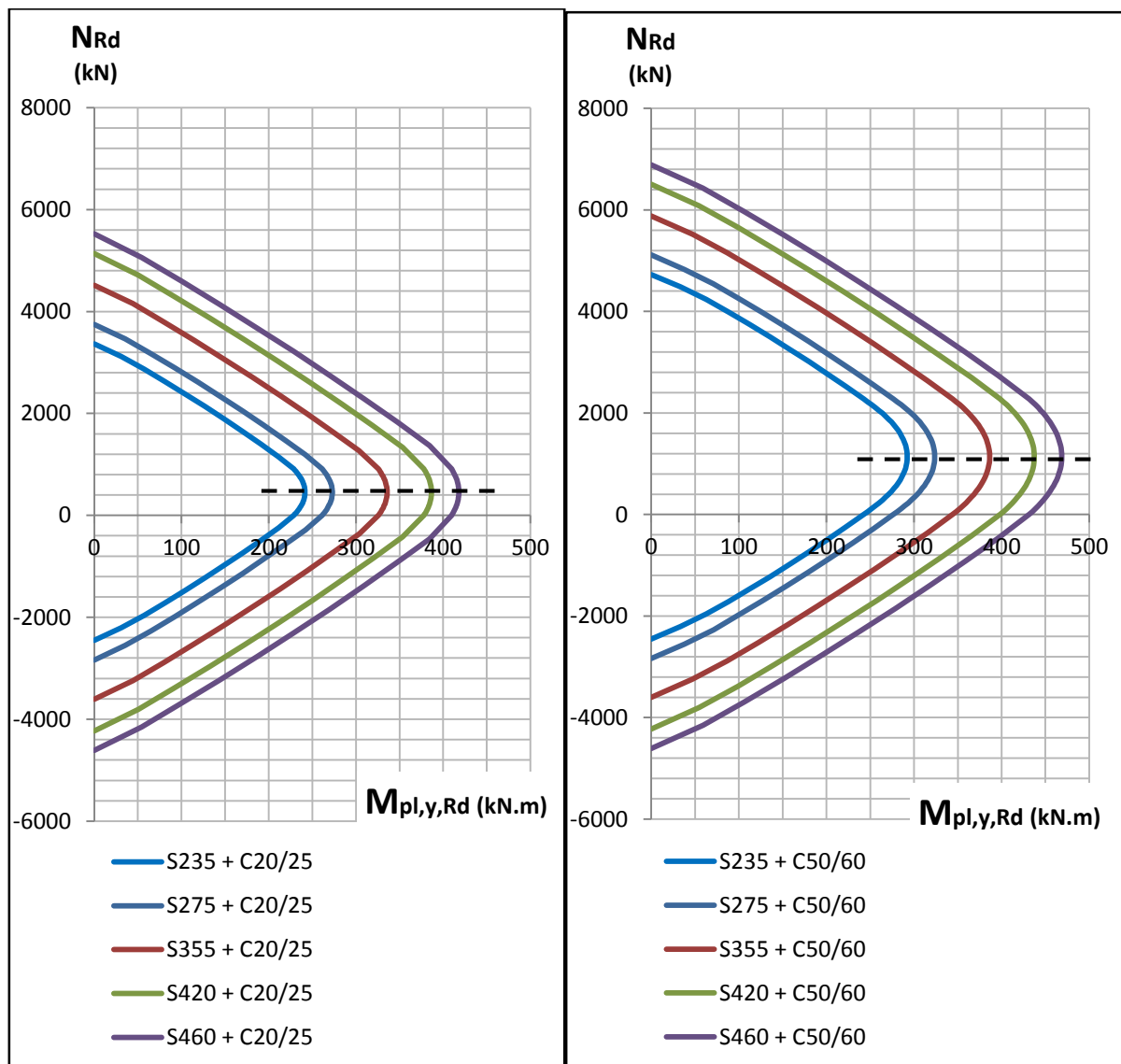


FIGURA 9.2 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO MY-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO AÇO

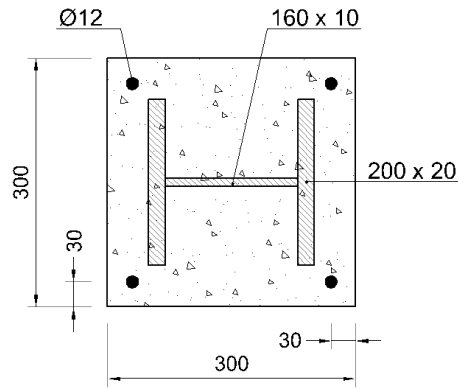


FIGURA 9.3 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

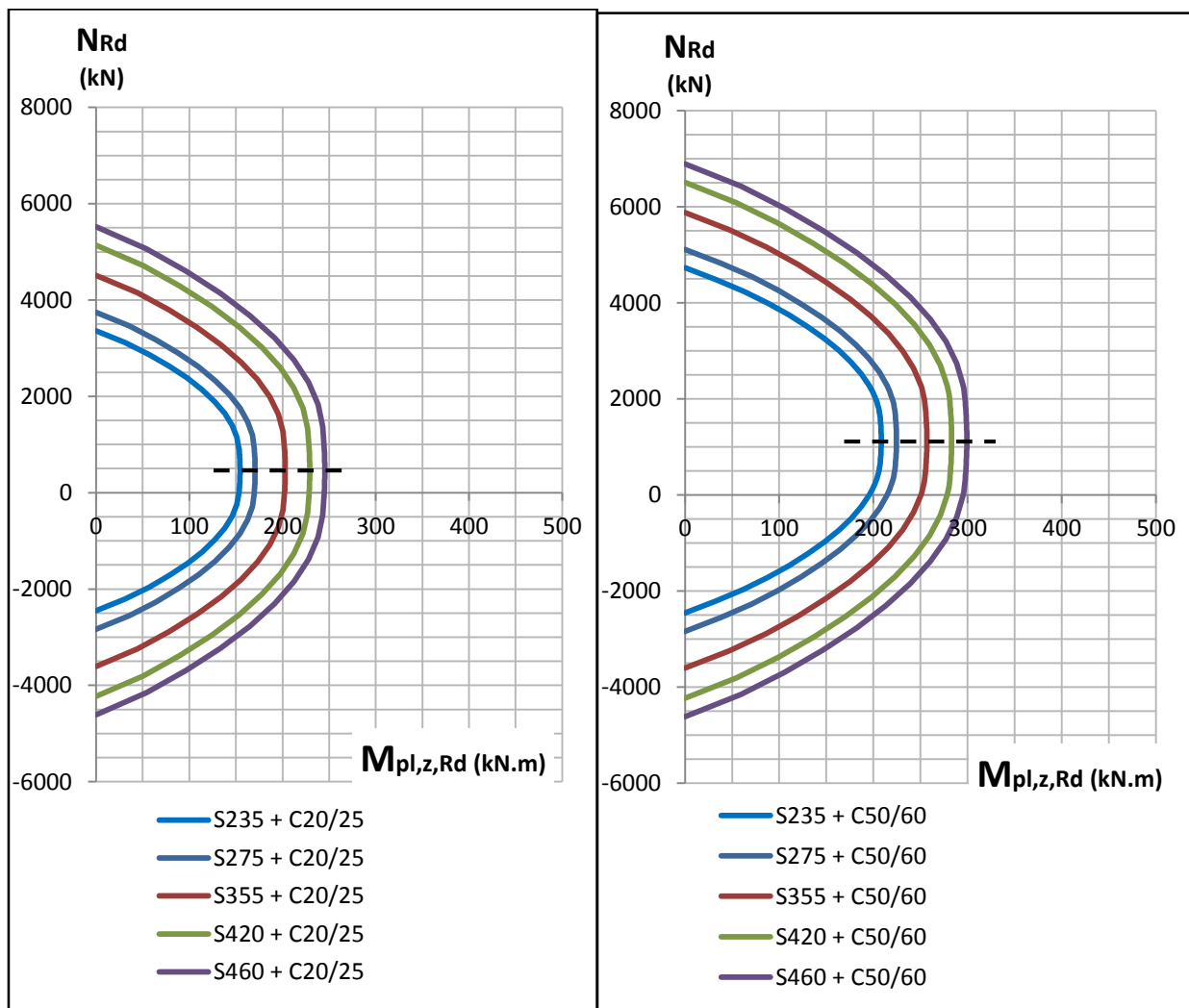


FIGURA 9.4 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO Mz-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO AÇO

9.1.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

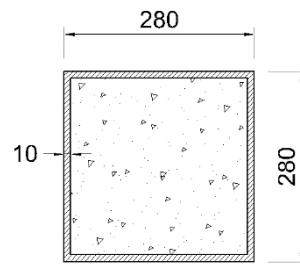


FIGURA 9.5 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

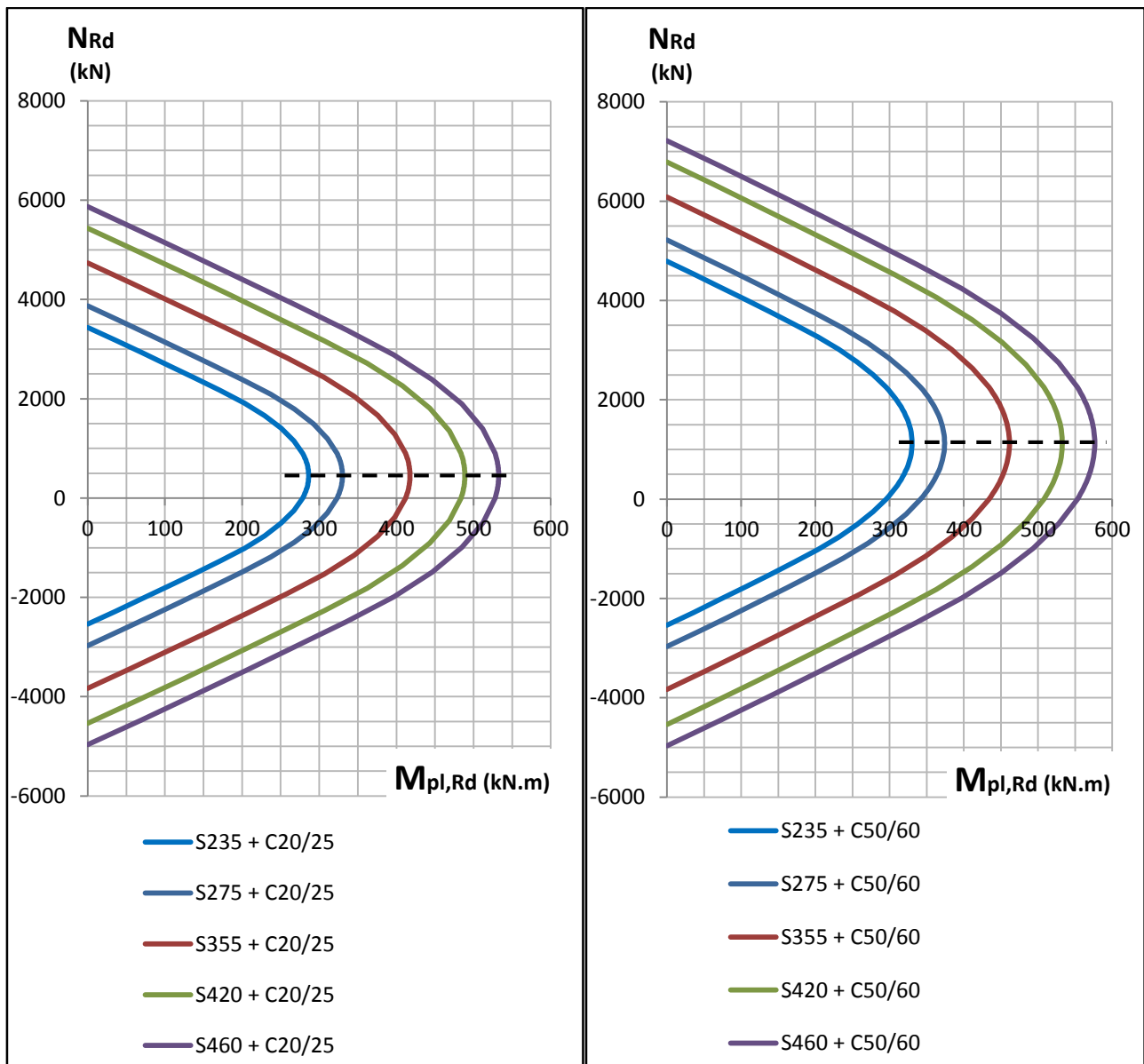


FIGURA 9.6 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO AÇO

9.1.3 SECÇÃO CIRCULAR

Embora a curva de interação M-N de secções circulares apresente uma forma parabólica mais aberta, os pontos notáveis do diagrama são determinados de igual modo às secções rectangulares. Deste modo, as análises e conclusões podem ser extrapoladas às secções circulares.

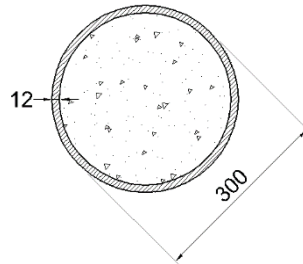


FIGURA 9.7 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

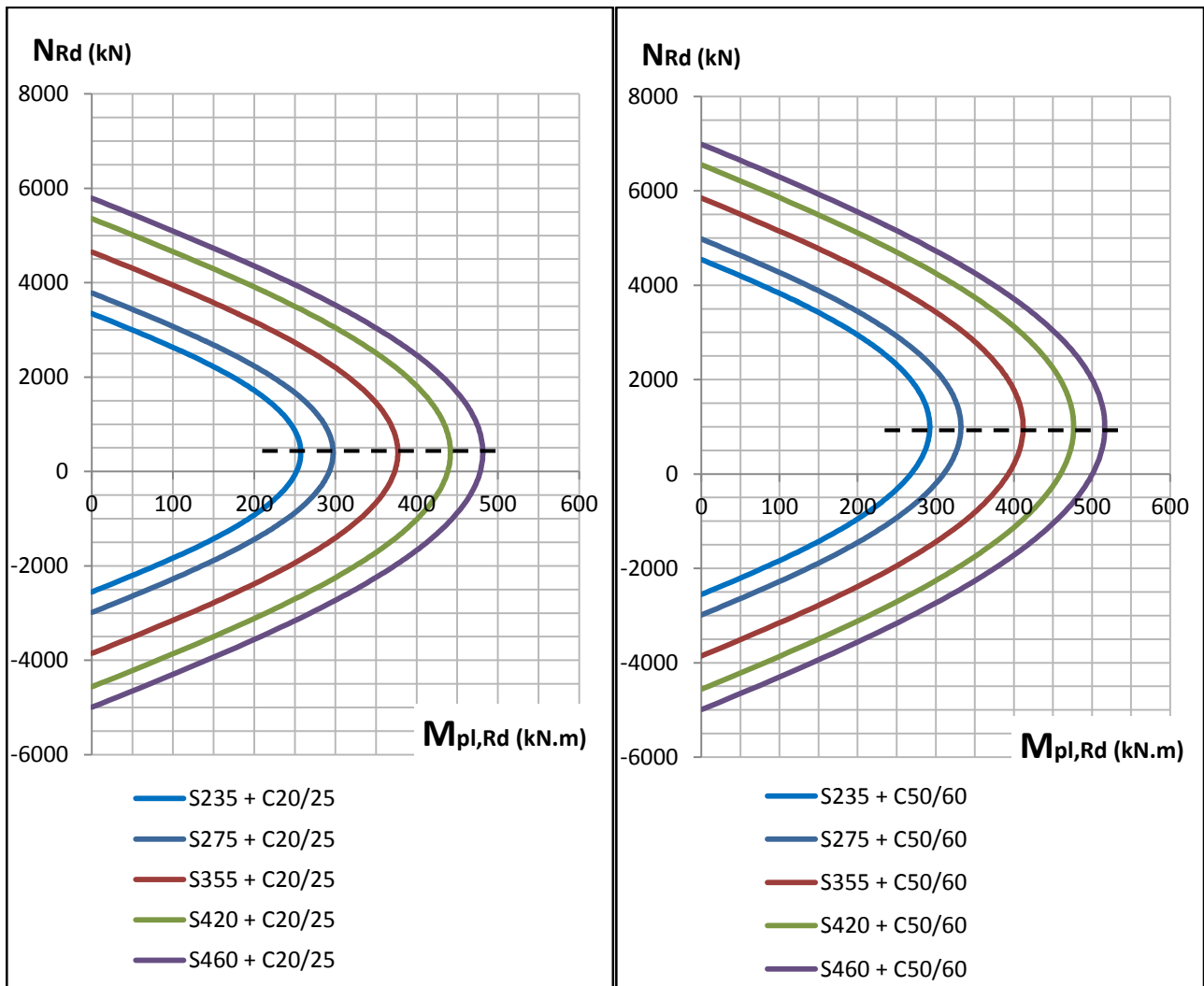


FIGURA 9.8 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO AÇO

9.2 VARIÁVEL: CLASSE DO BETÃO

A determinação dos diversos diagramas de interacção M-N (Figura 9.10 a Figura 9.15) das secções apresentadas, permite observar que o aumento da classe de resistência do betão implica também um aumento do esforço normal e do momento resistente.

Neste caso, o aumento do esforço normal plástico de compressão resulta da variação da tensão de rotura por compressão do betão, f_{cd} :

$$\Delta N_{pl,Rd} = \alpha_{cc} A_c \Delta f_{cd} \quad (9.3)$$

Pelo mesmo motivo, o valor do momento resistente do Ponto D do diagrama de interacção M-N (Figura 4.5) apresenta um valor de esforço normal actuante que, neste caso, varia com a classe de resistência do betão:

$$\frac{1}{2} \Delta N_{pm,Rd} = \frac{1}{2} \alpha_{cc} A_c \Delta f_{cd} \quad (9.4)$$

A comparação dos resultados para o momento resistente e o esforço axial do Ponto D, permite observar que as linhas (a tracejado) que passam por esse ponto, apresentam a mesma inclinação. Tal análise justifica-se pelo facto da variação do momento flector resistente e do esforço normal serem lineares.

Por outro lado, quando se analisa o valor do esforço normal resistente de tracção, observa-se que o seu valor é constante. Com efeito, a resistência do betão à tracção não é contabilizada na determinação do esforço normal resistente, $N_{pl,Rd}$:

$$N_{pl,Rd, \text{tracção}} = A_a f_{yd} + 0,0 \times A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (9.5)$$

9.2.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

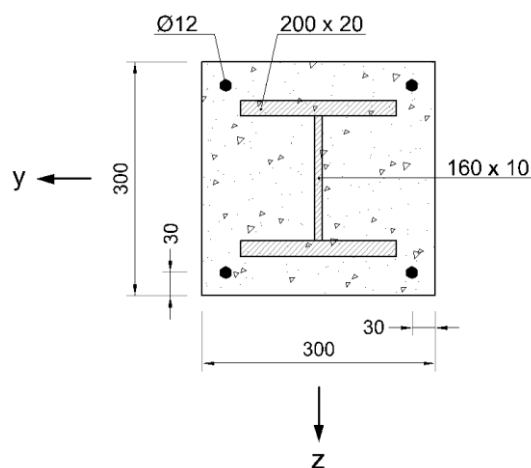


FIGURA 9.9 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

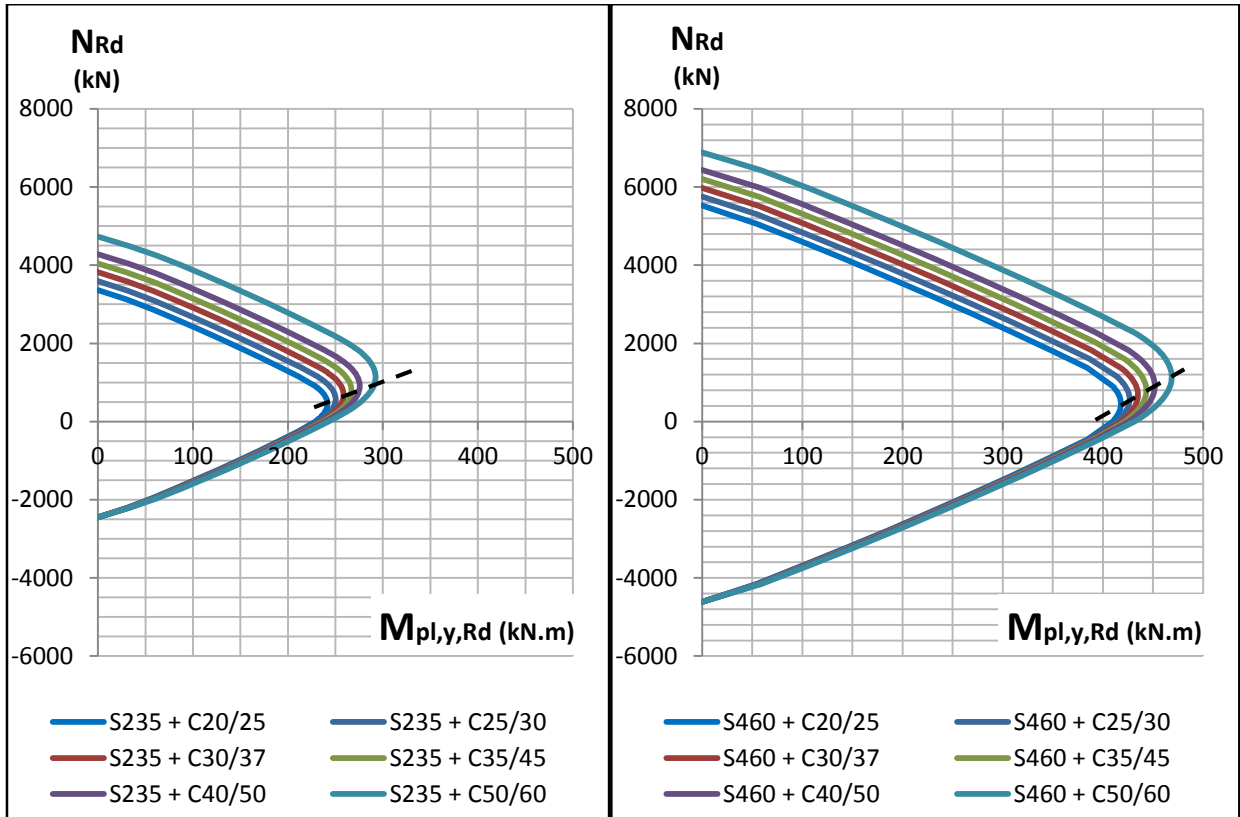


FIGURA 9.10 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO My-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.9, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

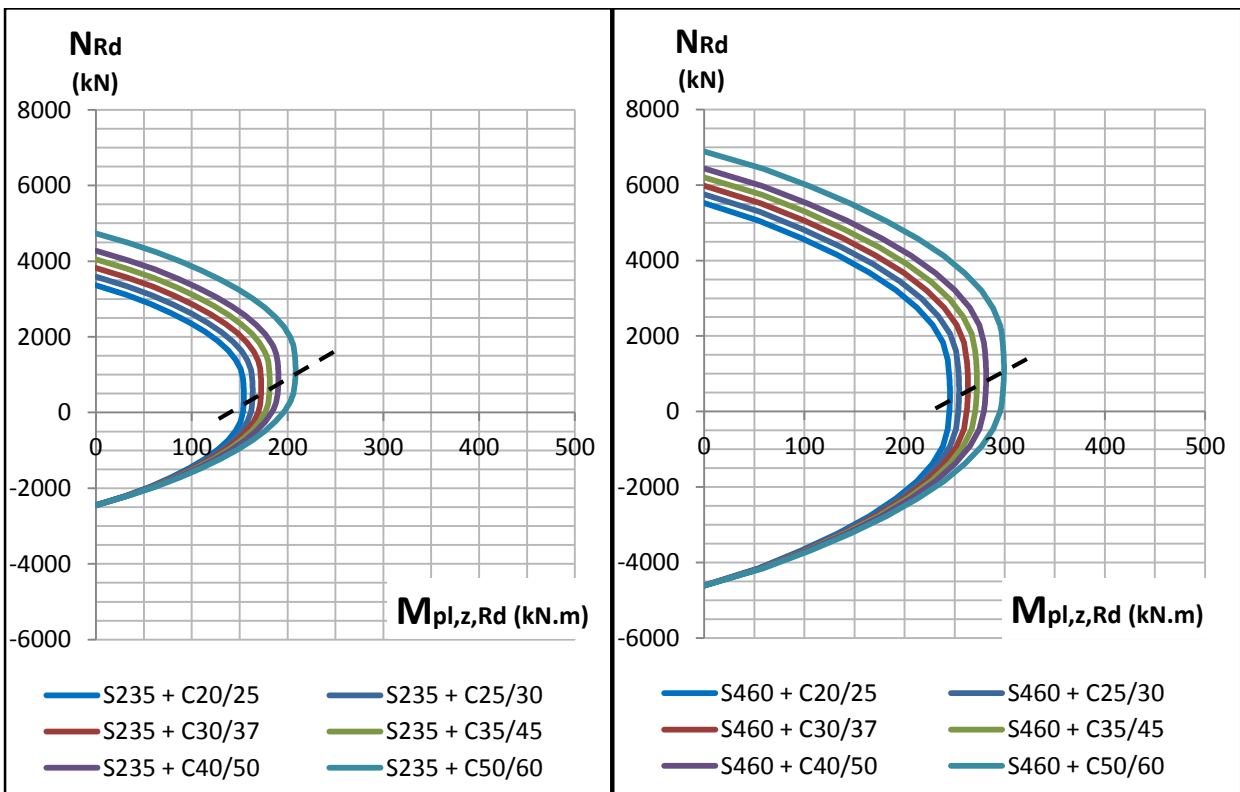


FIGURA 9.11 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO Mz-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.9, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

9.2.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

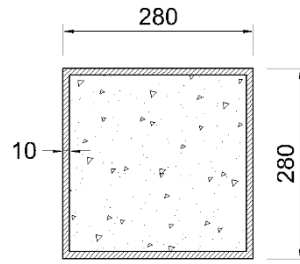


FIGURA 9.12 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

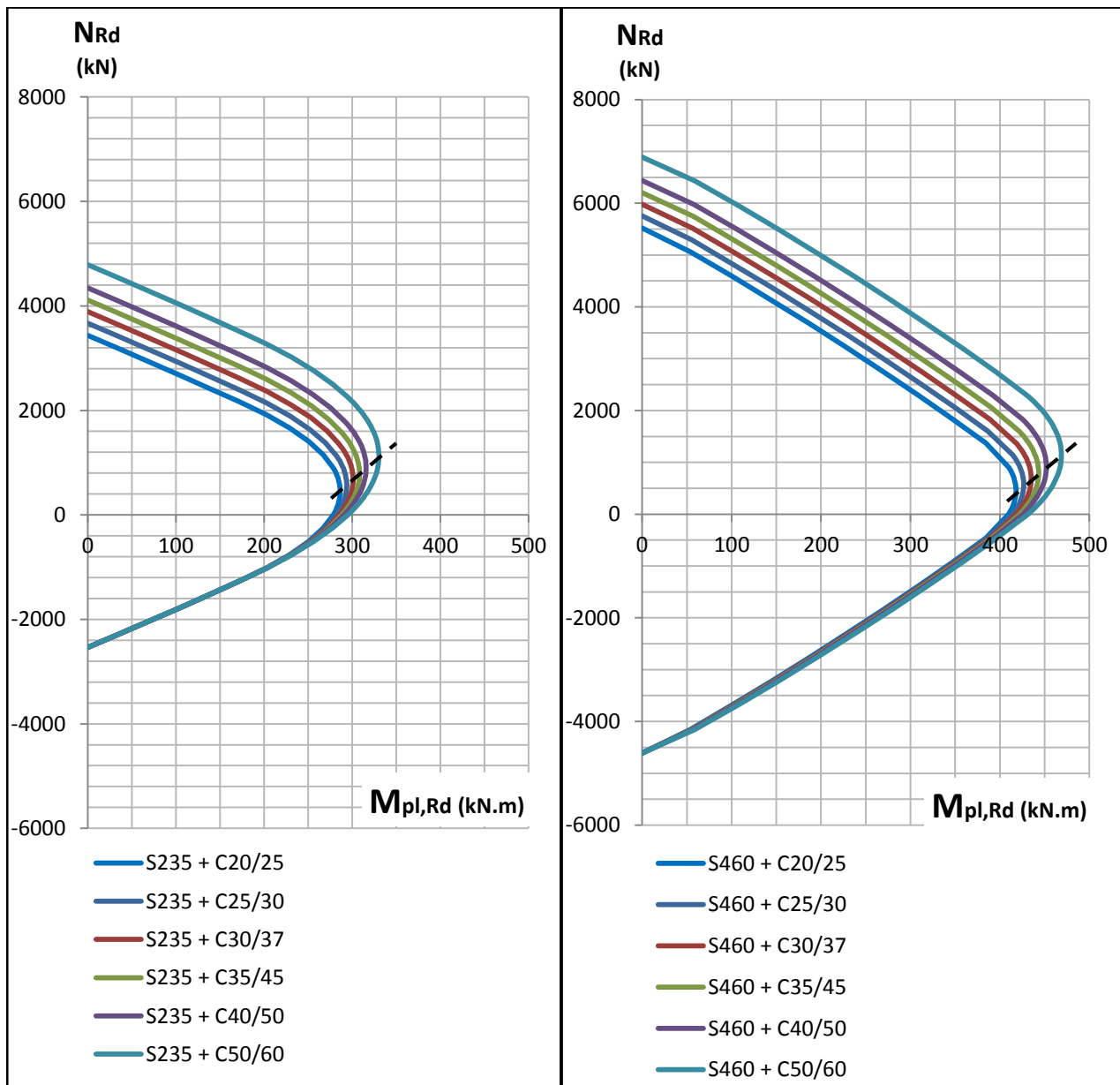


FIGURA 9.13 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

9.2.3 SECÇÃO CIRCULAR

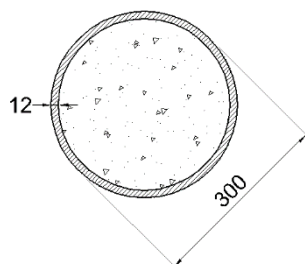


FIGURA 9.14 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

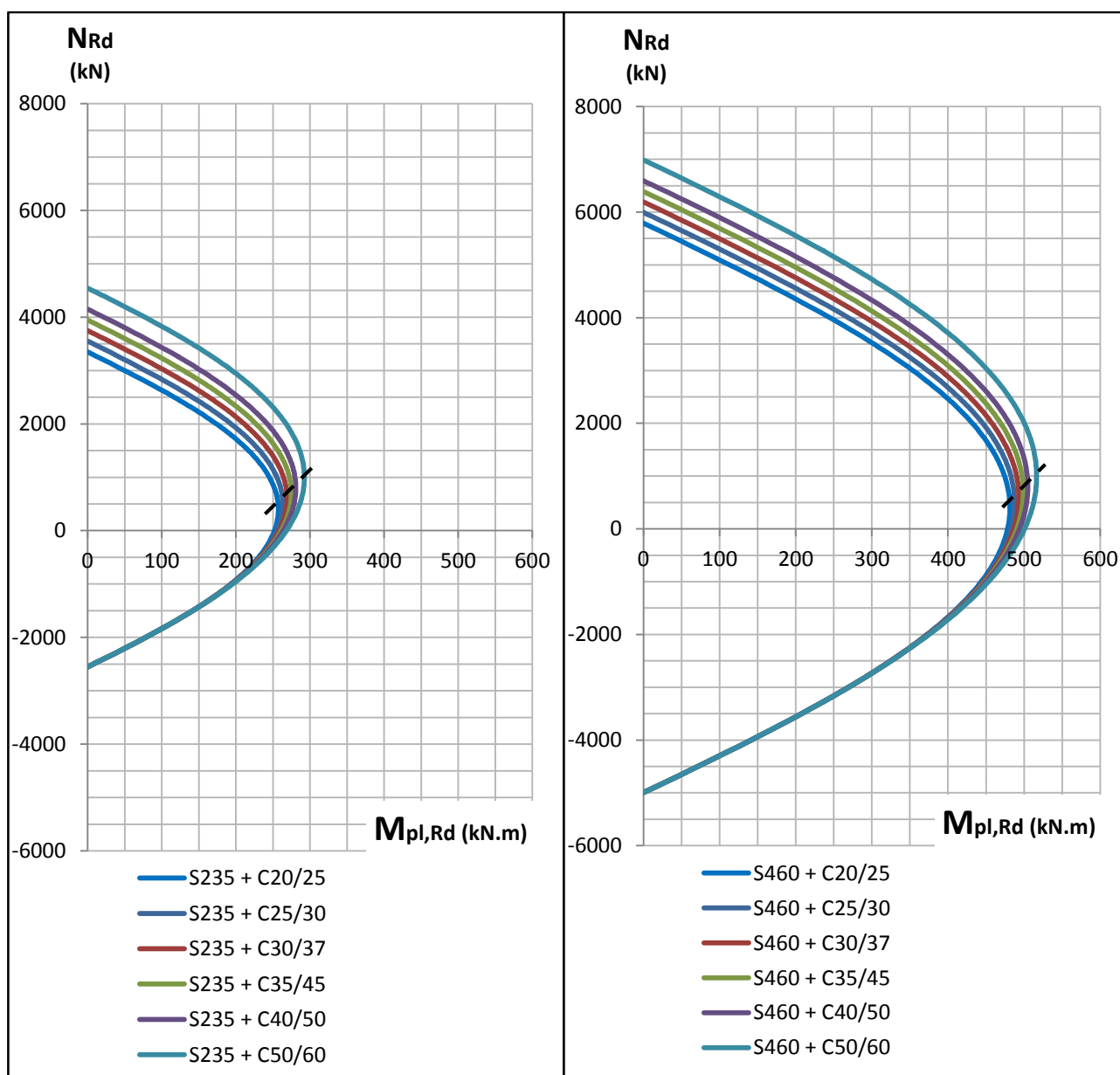


FIGURA 9.15 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS CLASSES DE RESISTÊNCIA DO BETÃO

9.3 VARIÁVEL: PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL

Nas diversas secções transversais analisadas (Figura 9.16 a Figura 9.22) a posição e número dos varões de aço manteve-se inalterada e os incrementos de percentagem de armadura são constantes ($\Delta\rho = 1\%$) através da variação do diâmetro do varão, utilizando um diâmetro fictício. Nos diagramas de interacção apresentados nas Figura 9.17 a Figura 9.22 observa-se que a variação do esforço normal de compressão e de tracção é constante, já que se admite que a armadura longitudinal resiste tanto à compressão como à tracção, e é dada por:

$$\Delta N_{pl,Rd} = \Delta A_s \times f_{sd}$$

Por outro lado, a variação do momento resistente também é constante já que a distância ao centro de massa (centro da secção) também o é, variando apenas a força resultante do aumento da área das armaduras. Deste modo, a variação do momento resistente é dada por:

$$\Delta M_{pl,Rd} = d \times f_{sd} \times \Delta A_s$$

Adicionalmente, quanto maior for a classe de resistência do aço estrutural, a percentagem de armadura tem menor preponderância na resistência da secção. Com efeito, para uma determinada área de aço estrutural, a resistência da secção transversal (ao esforço normal e momento flector) aumenta com a classe de resistência do aço, porém verifica-se que o incremento de resistência proveniente da variação da percentagem de armadura diminui, em termos percentuais, com o aumento da classe de resistência do aço estrutural.

9.3.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

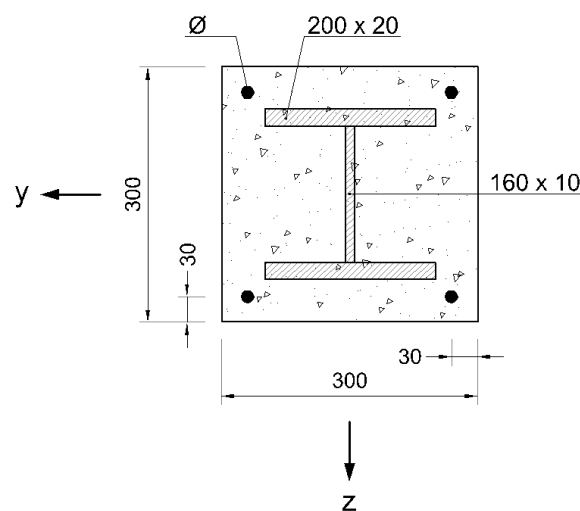


FIGURA 9.16 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

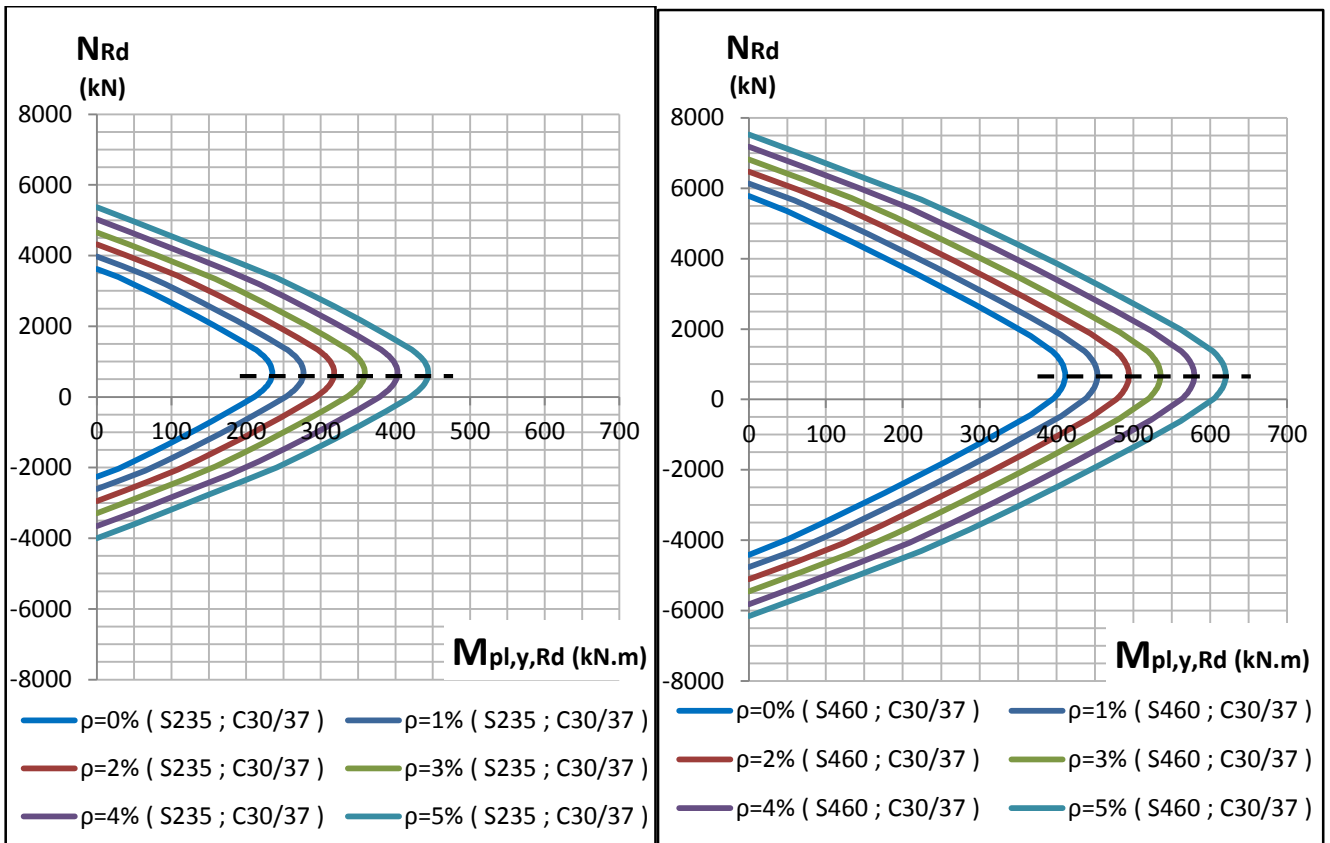


FIGURA 9.17 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO MY-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.16, PARA AS DIVERSAS PERCENTAGENS DE ARMADURA

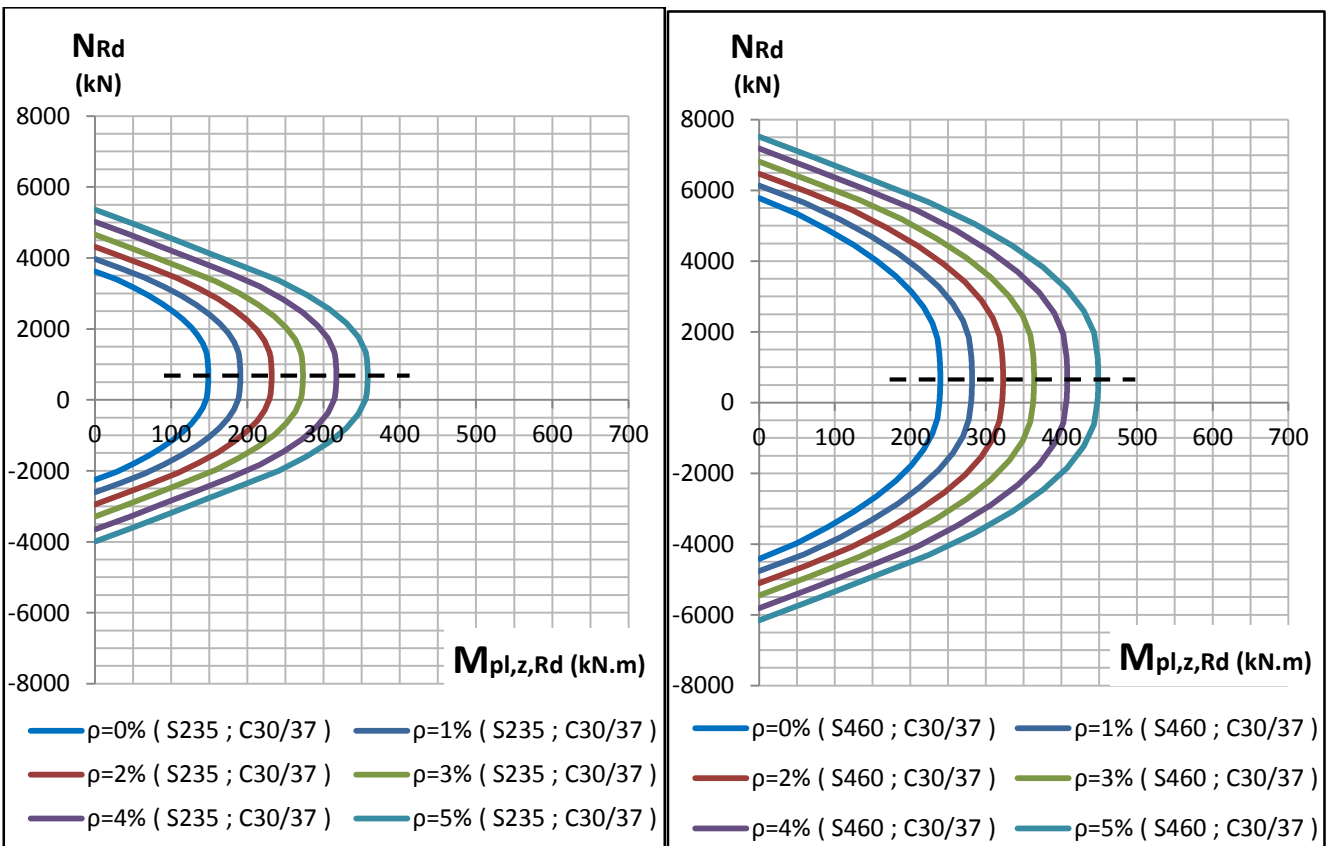


FIGURA 9.18 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO Mz-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.16, PARA AS DIVERSAS PERCENTAGENS DE ARMADURA

9.3.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

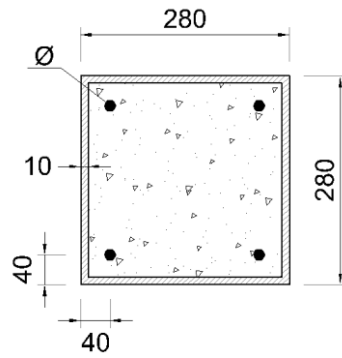


FIGURA 9.19 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

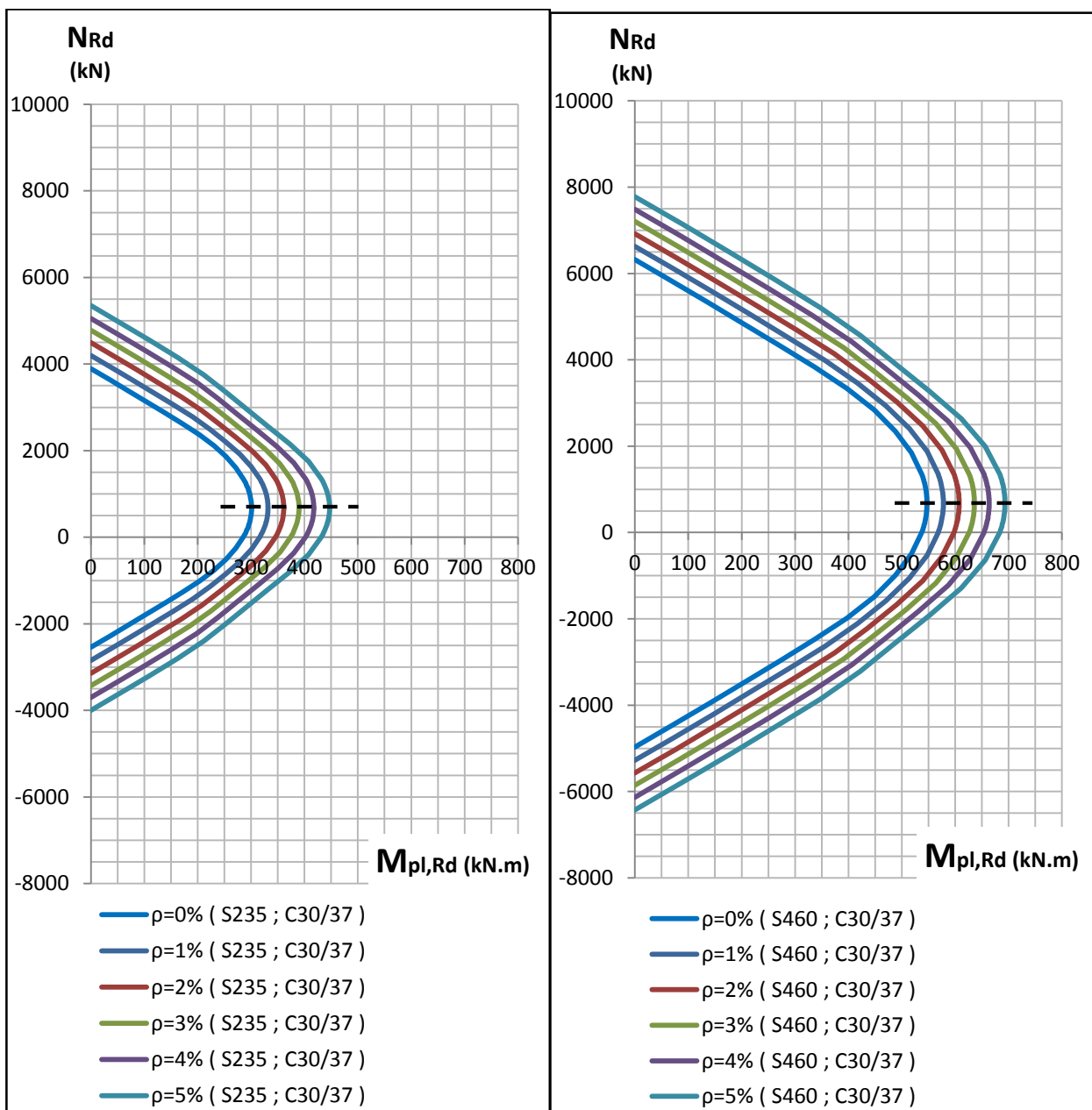


FIGURA 9.20 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS PERCENTAGENS DE ARMADURA

9.3.3 SECÇÃO CIRCULAR

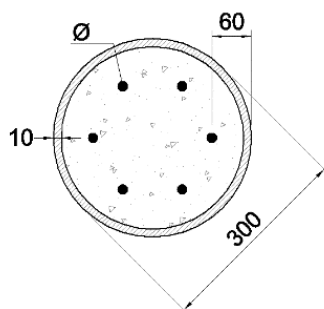


FIGURA 9.21 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

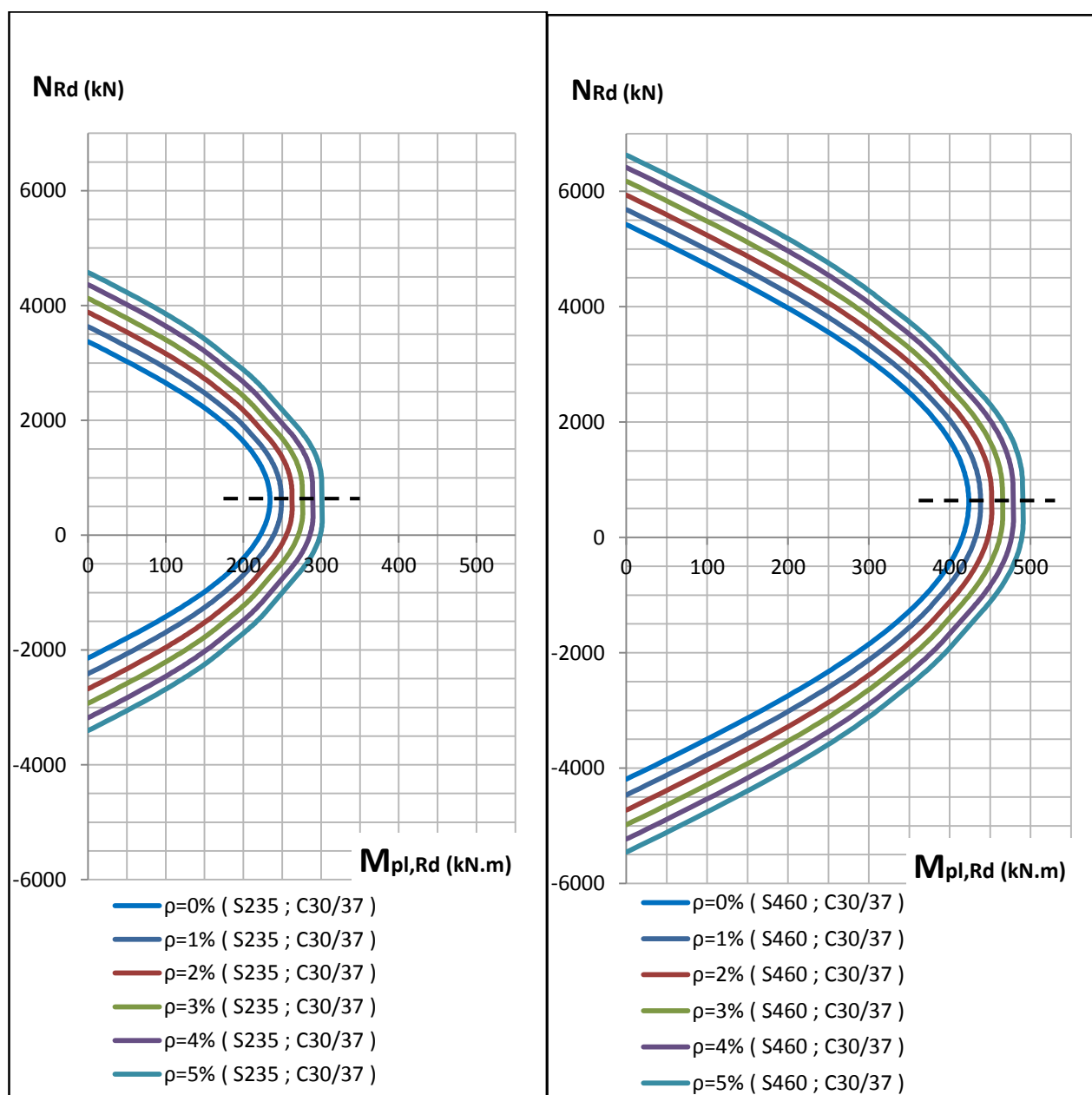


FIGURA 9.22 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS PERCENTAGENS DE ARMADURA

9.4 VARIÁVEL: ESPESSURA DO TUBO

O aumento da espessura do tubo, t , para valor constante do diâmetro exterior ou para valor constante da base e altura da secção, está directamente relacionado com o aumento da área de aço e com a diminuição da área de betão. O valor de cálculo da tensão de cedência do aço, f_{yd} , é aproximadamente 10 vezes superior ao valor de cálculo da tensão de rotura por compressão do betão, f_{cd} , e a diminuição da área de betão em relação à área total é inferior ao aumento da área do aço, $\left| \frac{\Delta A_s}{A_s} \right| \gg \left| \frac{\Delta A_c}{A_c} \right|$. Conclui-se assim que o aumento do esforço normal resistente plástico de compressão depende, neste caso, maioritariamente do aumento da área de aço. Com efeito, a resistência ao esforço normal de tracção, provem apenas do tubo de aço. Tal como se pode observar na Figuras 9.24 e 9.26, a variação do esforço normal resistente de tracção é semelhante à de compressão, o que corrobora com o referido anteriormente.

O momento flector resistente aumenta também linearmente com a espessura do tubo de aço. Observando as Figuras 9.24 e 9.26, conclui-se que a variação de momento resistente é aproximadamente constante para uma determinado incremento da espessura do tubo ($\Delta t = 5\text{mm}$, no caso em estudo). A variação da espessura do tubo apresenta então semelhanças à variação da percentagem de armadura, visto que em ambos os casos se fixa (aproximadamente) a posição dos materiais (armadura longitudinal e aço estrutural) e apenas se faz variar a sua área, isto é, a força aí resultante.

Esta análise é muito importante face às exigências e limitações de área da secção transversal de colunas em edifícios, visto que, para um determinado diâmetro exterior (ou base e altura), a espessura do tubo é preponderante para a resistência da coluna mista.

9.4.1 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

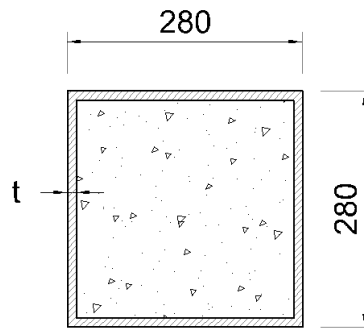


FIGURA 9.23 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

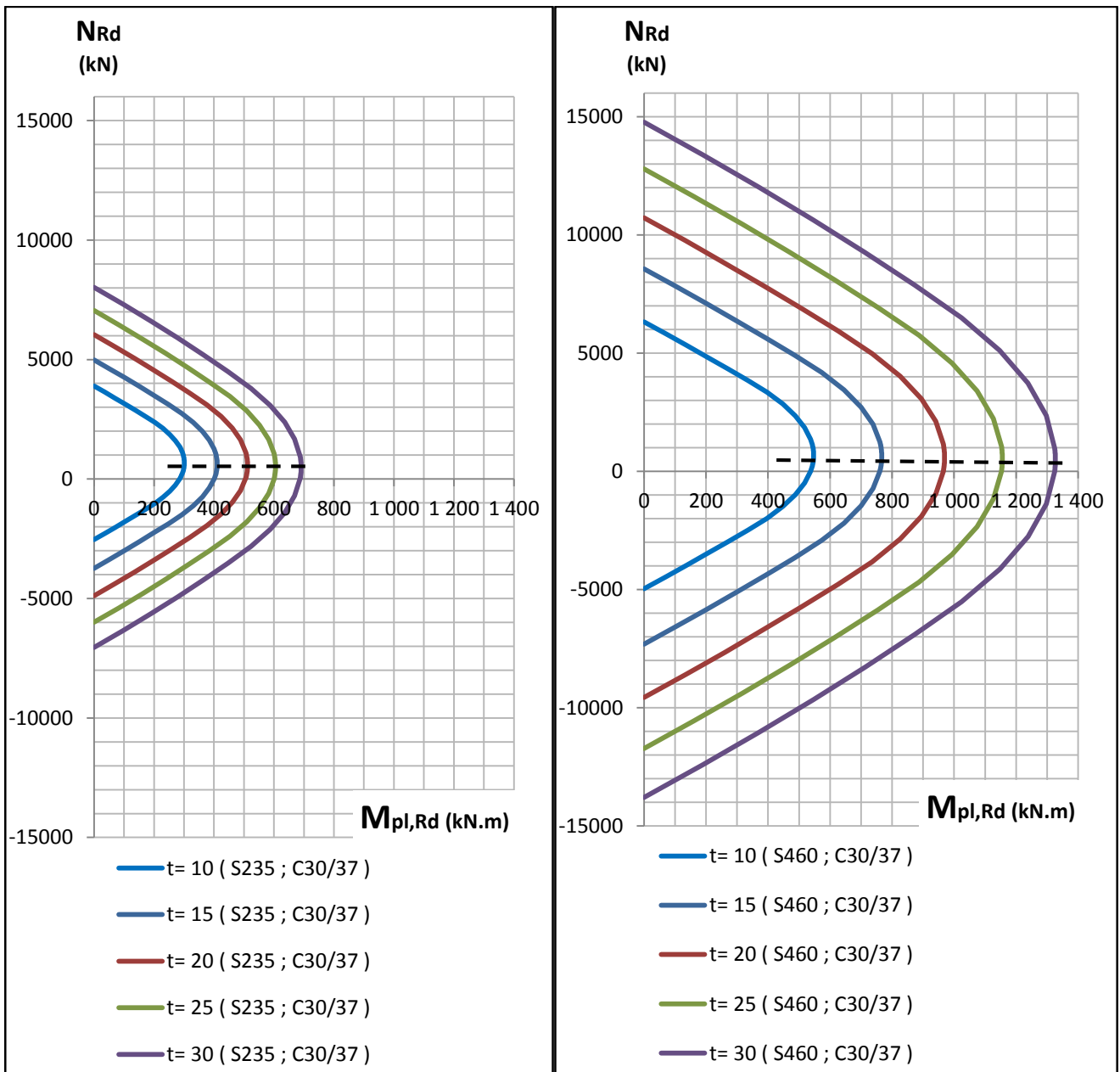


FIGURA 9.24 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA, PARA AS DIVERSAS ESPESURAS DO TUBO DE AÇO

9.4.2 SECÇÃO CIRCULAR

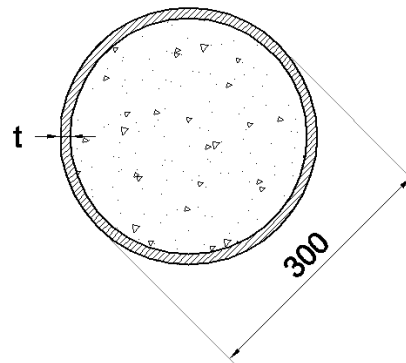


FIGURA 9.25 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

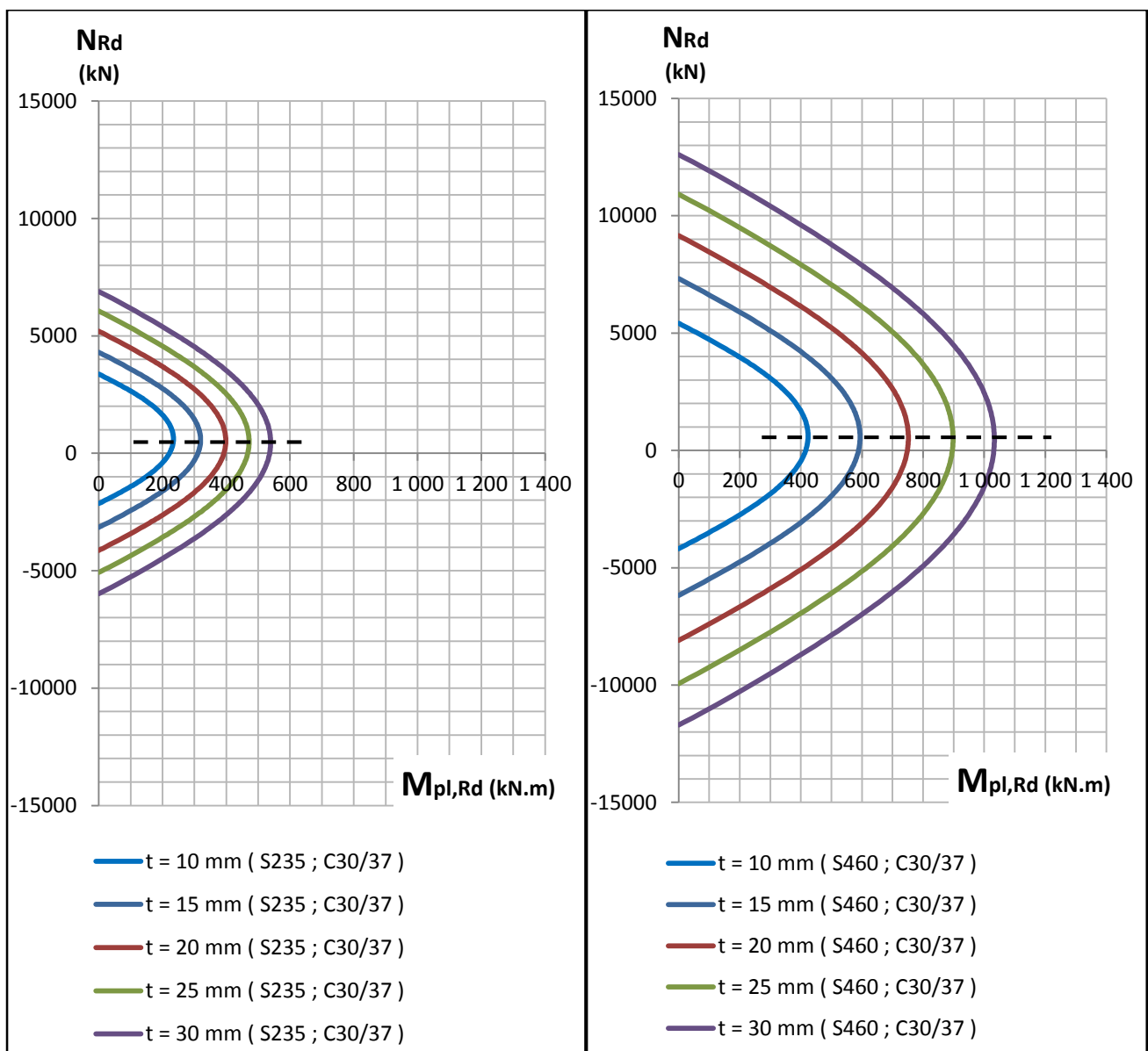


FIGURA 9.26 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.25, PARA DIVERSAS ESPESSURAS DO TUBO DE AÇO

9.5 VARIÁVEL: DIÂMETRO DO TUBO

A variação do diâmetro exterior do tubo, D , para uma determinada espessura, implica uma variação da área de betão e da área de aço.

Comparando os resultados da variação da espessura e do diâmetro, conclui-se que no primeiro caso a variação do esforço normal e do momento resistentes é aproximadamente constante para uma variação constante da espessura do tubo (Figura 9.26). Em relação ao diâmetro, verifica-se que a variação do momento resistente não é constante (Figura 9.28).

No caso de se aumentar somente a espessura do tubo, dado que a distância do tubo ao centro de massa se mantém aproximadamente constante e que o momento resistente é obtido através do produto dessa distância com a força normal aí desenvolvida, apenas se varia uma das parcelas do produto que resulta o momento resistente.

No caso de se aumentar o diâmetro exterior em incrementos constantes ($\Delta D = 25\text{mm}$, para o caso em análise), tanto a força como a distância aumentam, logo a variação do produto de que resulta o momento resistente não é constante e aumenta com o diâmetro.

Por outro lado, a variação da área de betão implica uma variação do esforço normal do Ponto D ($\frac{1}{2}N_{pm,Rd}$) do diagrama de interacção M-N.

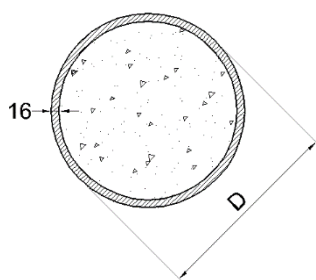


FIGURA 9.27 - SECÇÃO TRANSVERSAL EM ANÁLISE

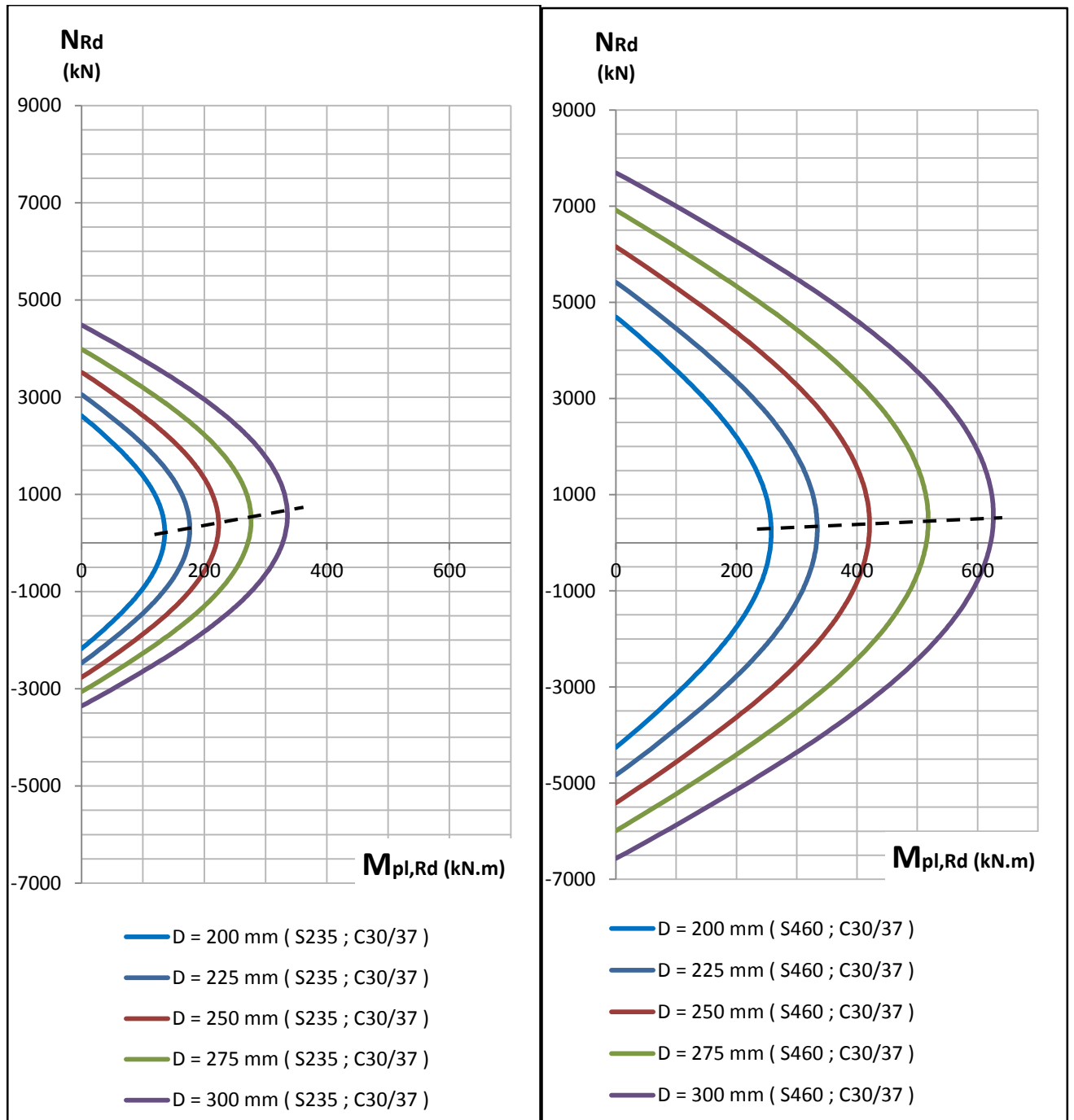


FIGURA 9.28 - DIAGRAMAS DE INTERACÇÃO M-N DA SECÇÃO APRESENTADA NA FIGURA 9.27, PARA DIVERSOS DIÂMETROS DO TUBO DE AÇO

9.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De forma a avaliar a influência dos parâmetros analisados (ponto 9.1 a 9.5) na resistência da secção ao esforço normal e momento flector, apresenta-se graficamente os valores resistentes em função dos parâmetros analisados e determina-se para cada parâmetro (e por tipologia) a variação máxima de resistência. Salienta-se que os valores apresentados dizem respeito às secções transversais analisadas no presente capítulo.

9.6.1 CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

Os valores máximos de variação da resistência para cada parâmetro (e tipologia de secção) são obtidos tendo em conta os restantes parâmetros envolvidos. Por exemplo, a variação da classe do aço estrutural é mais preponderante caso a classe do betão seja mais baixa. Com efeito, nas figuras 9.290 a 9.31 pode-se observar que o aumento de resistência é, em termos absolutos, constante entre cada classe de aço. Em termos percentuais, esse aumento é superior caso a classe de betão seja mais baixa. Deste modo, obtém-se o valor mínimo e máximo da variação dos esforços resistentes (devido à variação da classe do aço estrutural) para as classes do betão mais alta e mais baixa, respectivamente.

Assim, a máxima variação do esforço normal resistente plástico, $\Delta N_{pl,Rd}$, é determinada de acordo com a expressão seguinte:

$$\Delta N_{pl,Rd} = \left[\frac{N_{pl,Rd}^{S460} - N_{pl,Rd}^{S235}}{N_{pl,Rd}^{S235}} \right]_{C20/25 ; C50/60} \quad (9.1)$$

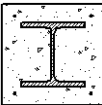
Os valores $N_{pl,Rd}$, correspondem ao valor do esforço normal resistente plástico para a classe de aço S460 e S235. Por outro lado, para a classe de betão C20/25, obtém-se os valores máximos de variação (64%, 71% e 73% - Quadro 9.3), e para a classe de betão C50/60, obtém-se os valores mínimos (46%, 51%, 54%). A variação do momento flector resistente plástico, é determinada de acordo com a expressão seguinte:

$$\Delta M_{max,Rd} = \left[\frac{M_{max,Rd}^{S460} - M_{max,Rd}^{S235}}{M_{max,Rd}^{S235}} \right]_{C20/25 ; C50/60} \quad (9.2)$$

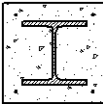
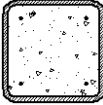
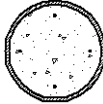
De forma análoga, registam-se os valores máximos e mínimos do momento flector resistente plástico máximo, $M_{max,Rd}$, para a classe de aço S460 e S235, respectivamente. Através da aplicação das expressões (9.1) e (9.2) aos valores apresentados nas figuras 9.290 a 9.31, determina-se para uma determinada secção a variação de resistência (devido ao aumento da classe de aço) para cada classe de betão (ver Quadro 9.2), e destaca-se no Quadro 9.3 o valor máximo e mínimo dessa variação por tipologia de secção. Os valores correspondentes às restantes tipologias são obtidos dos gráficos disponíveis no Anexo D.6.1.

A análise do Quadro 9.3 permite concluir que dependendo da classe de betão (alta-baixa), o aumento máximo de resistência que se pode obter devido à variação (aumento) da classe de aço estrutural é de 46–73% para o esforço normal resistente plástico, e de 44–87% para o momento flector resistente plástico. Salienta-se que estes valores dependem da relação entre a área de aço e betão e portanto apenas auxiliam a comparação da influência dos diversos parâmetros.

QUADRO 9.2 – AUMENTO DE RESISTÊNCIA, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL, DE S235 PARA S460, EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO

	$\Delta N_{pl,Rd}$ (eq. 9.1)	$\Delta M_{max,y,Rd}$ (eq. 9.2)	$\Delta M_{max,z,Rd}$ (eq. 9.2)
C20/25	64%	73%	59%
C25/30	60%	71%	56%
C30/37	57%	68%	53%
C35/45	53%	66%	50%
C40/50	50%	64%	48%
C50/60	46%	60%	44%

QUADRO 9.3 – AUMENTO (MÍNIMO E MÁXIMO) DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL, DE S235 PARA S460

Classe do Aço Estrutural			
Tipologia da Secção	$\Delta N_{pl,Rd}$	$\Delta M_{max,y,Rd}$	$\Delta M_{max,z,Rd}$
	46 %	60 %	44 %
	64 %	73 %	59 %
	51 %	75 %	
	71 %	86 %	
	54 %	77 %	
	73 %	87 %	
C50/60	46 %	44 %	
C20/25	73 %	87 %	

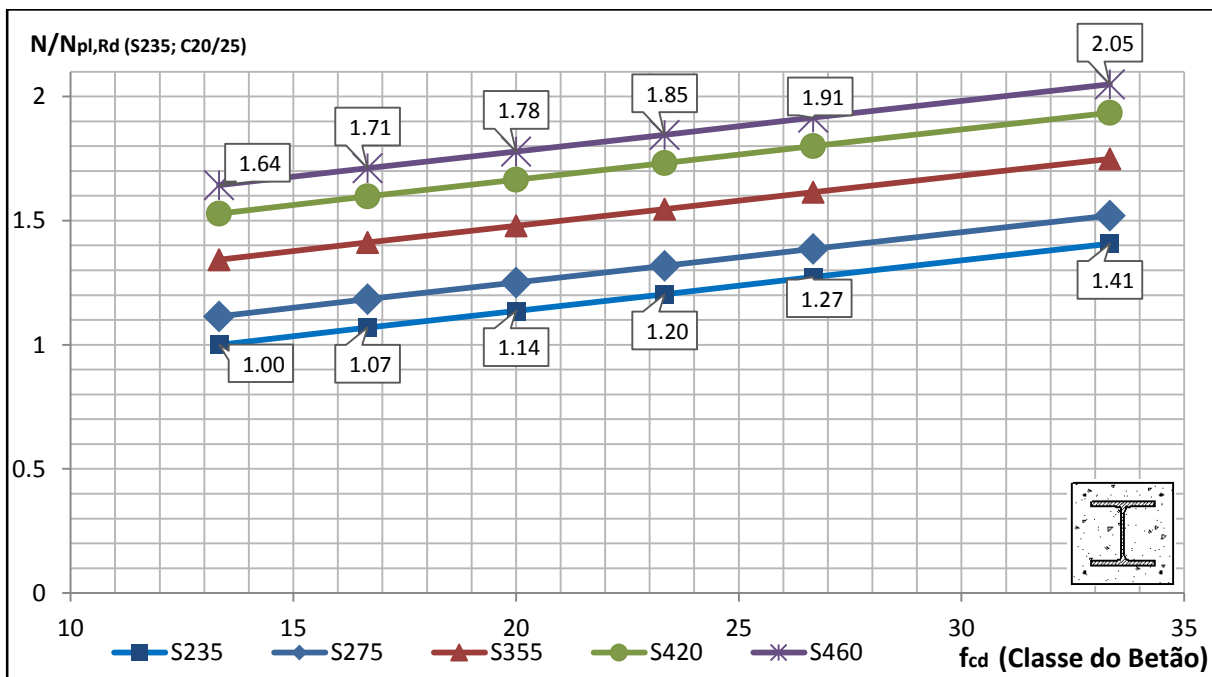


FIGURA 9.29 – ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO

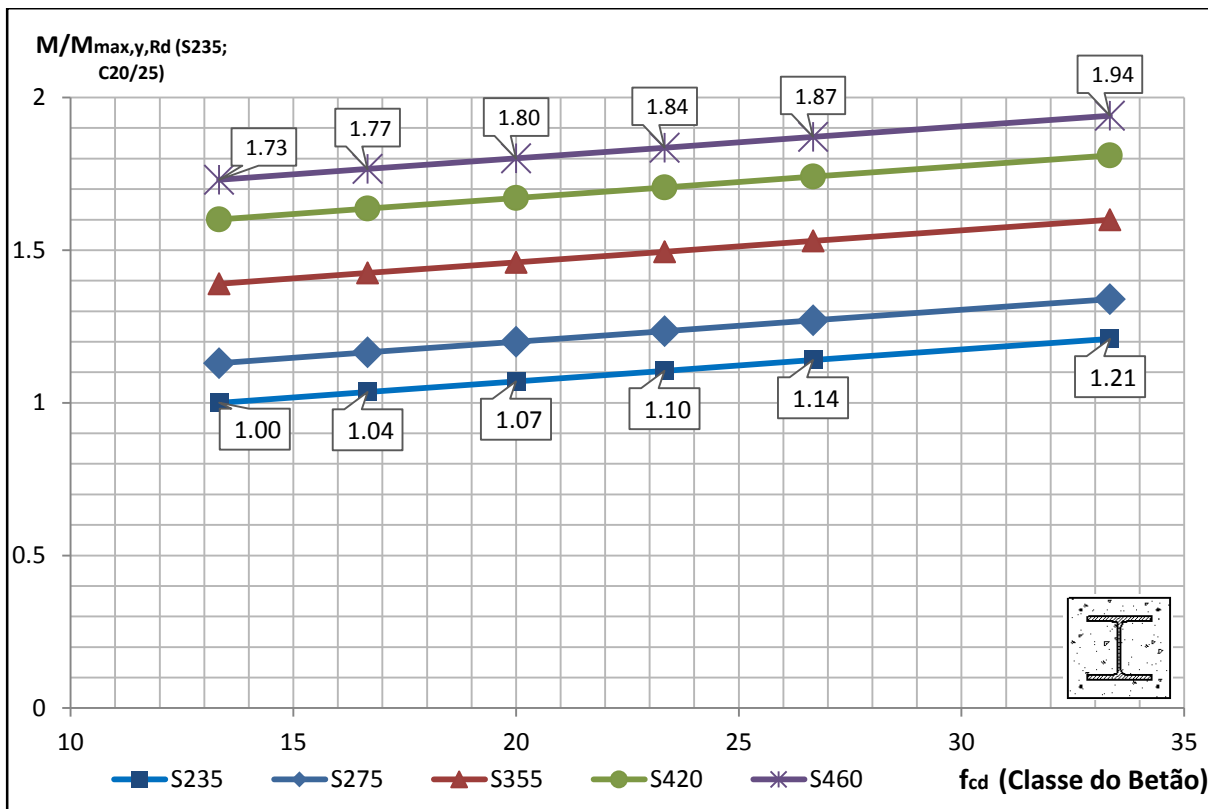


FIGURA 9.30 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA, Y-Y) EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO

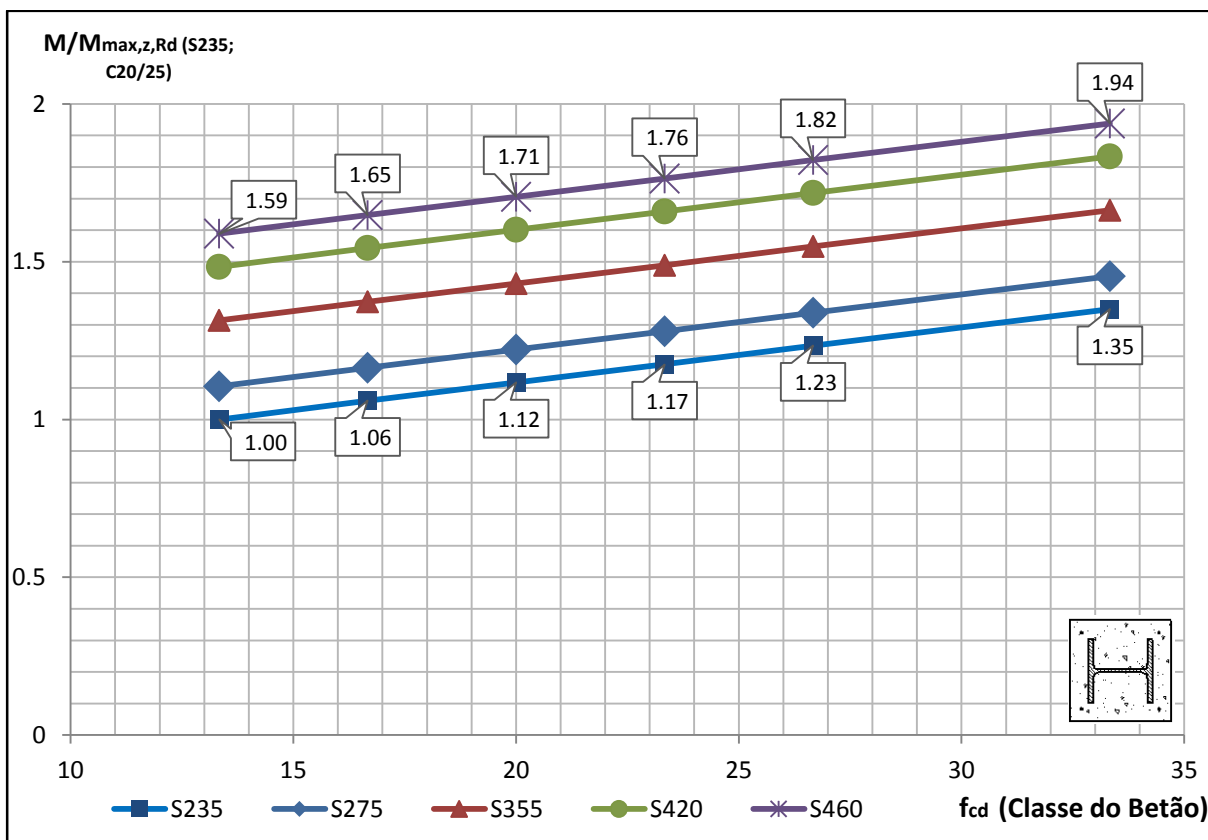


FIGURA 9.31 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA, Z-Z) EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO


9.6.2 CLASSE DO BETÃO

Em relação à classe do betão, a variação da resistência da secção é determinada de forma análoga, através das expressões (9.3) e (9.4).

$$\Delta N_{pl,Rd} = \left[\frac{N_{pl,Rd}^{C50/60} - N_{pl,Rd}^{C20/25}}{N_{pl,Rd}^{C20/25}} \right]_{S235; S460} \quad (9.3)$$

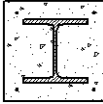

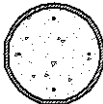
$$\Delta M_{max,Rd} = \left[\frac{M_{max,Rd}^{C50/60} - M_{max,Rd}^{C20/25}}{M_{max,Rd}^{C20/25}} \right]_{S235; S460} \quad (9.4)$$

QUADRO 9.4 – AUMENTO DE RESISTÊNCIA, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA CLASSE DO BETÃO DE C20/25 PARA C50/60, EM FUNÇÃO DA CLASSE DO AÇO

	$\Delta N_{pl,Rd}$ (eq. 9.3)	$\Delta M_{max,y,Rd}$ (eq. 9.4)	$\Delta M_{max,z,Rd}$ (eq. 9.4)
S235	41%	21%	35%
S275	36%	19%	32%
S355	30%	15%	27%
S420	27%	13%	24%
S460	25%	12%	22%

Os valores apresentados no Quadro 9.4 são obtidos através das Figuras 9.32 a 9.33. Os gráficos correspondentes às restantes tipologias, a partir dos quais se determina os valores apresentados no Quadro 9.5, encontram-se no Anexo D.6.2.

QUADRO 9.5 – AUMENTO (MÍNIMO E MÁXIMO) DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA CLASSE DO BETÃO, DE C20/25 PARA C50/60

Classe do Betão			
Tipologia da Secção	$\Delta N_{pl,Rd}$	$\Delta M_{pl,y,Rd}$	$\Delta M_{pl,z,Rd}$
	25 %	12 %	22 %
	41 %	21 %	35 %
	23 %	8 %	
	39 %	15 %	
	21 %	7 %	
	36 %	14 %	
S460	21 %	7 %	
S235	41 %	35 %	

A análise do Quadro 9.5 permite concluir que dependendo da classe de aço (alta-baixa), o aumento máximo de resistência que se pode obter devido à variação (aumento) da classe de betão é de 21–41% para o esforço normal resistente plástico, e de 7–35% para o momento flector resistente plástico.

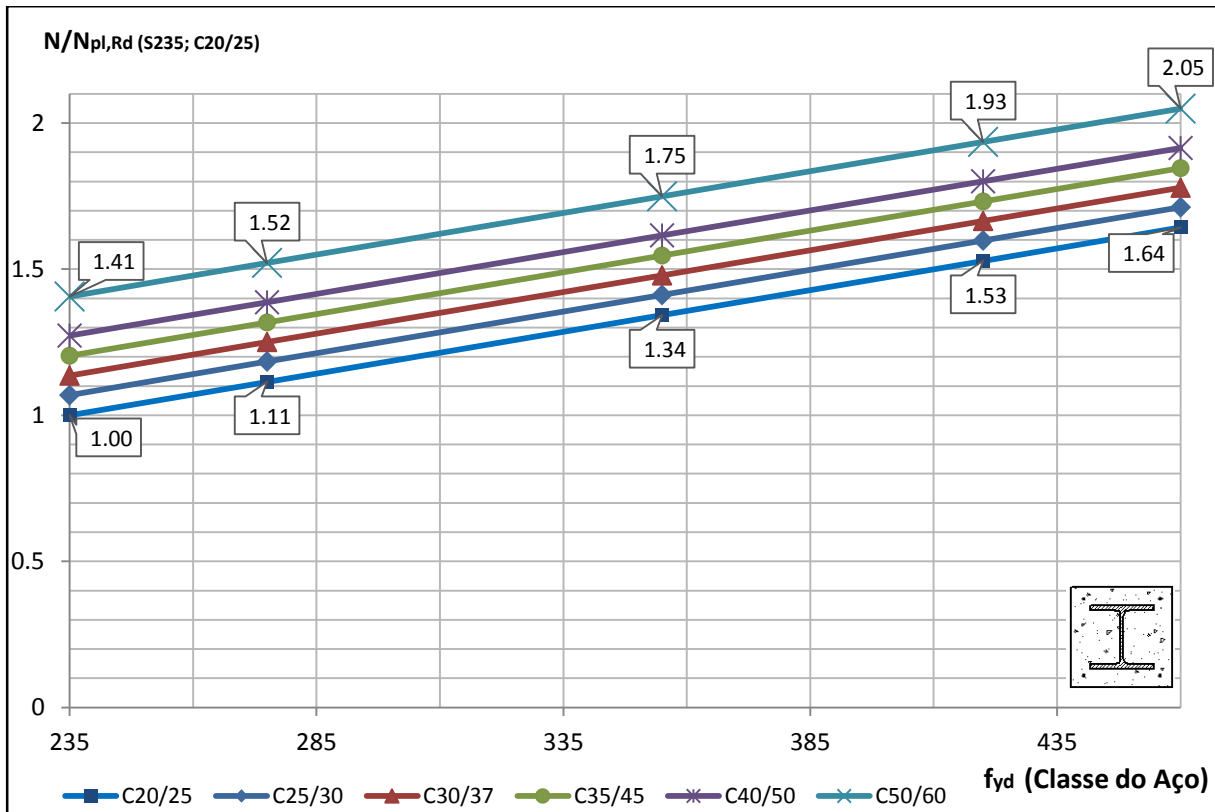


FIGURA 9.32 – ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO

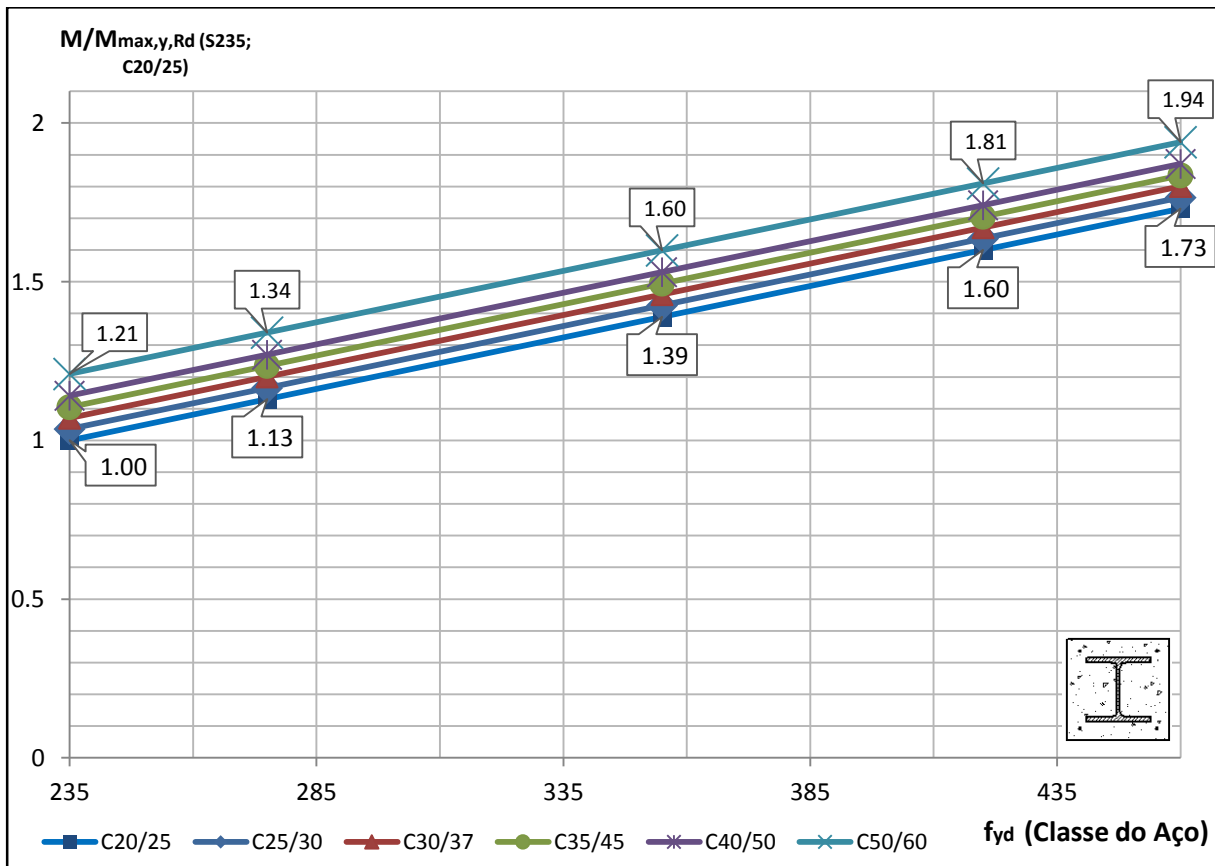


FIGURA 9.33 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA, Y-Y) EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO

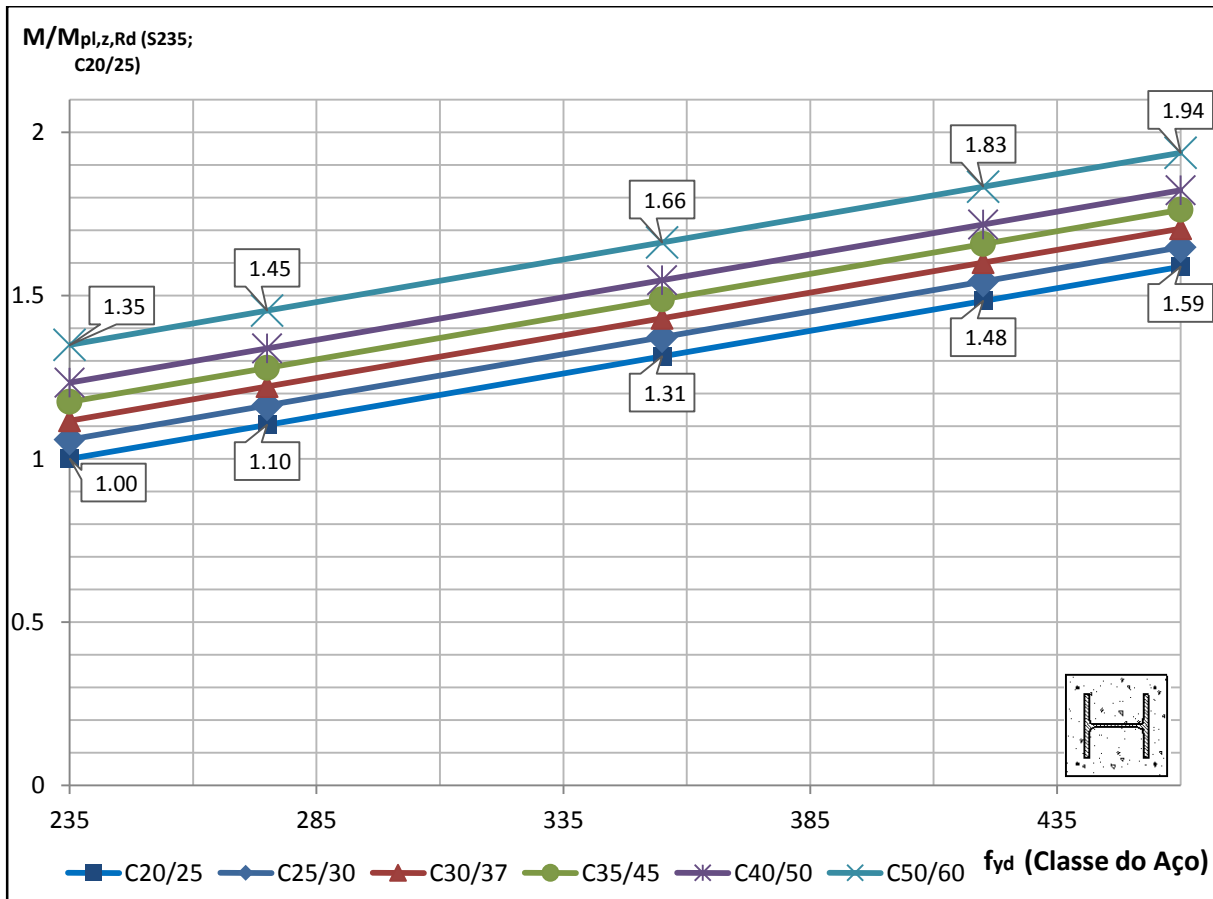


FIGURA 9.34 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA, Z-Z) EM FUNÇÃO DA CLASSE DO BETÃO E DA CLASSE DO AÇO

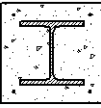
9.6.3 PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL

A variação máxima da resistência da secção proveniente da variação da percentagem de armadura é determinada através das expressões (9.5) e (9.6).

$$\Delta N_{pl,Rd} = \left[\frac{N_{pl,Rd}^{\rho=6\%} - N_{pl,Rd}^{\rho=0\%}}{N_{pl,Rd}^{\rho=0\%}} \right]_{S235; S460} \quad (9.5)$$

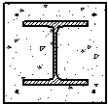

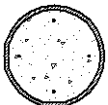
$$\Delta M_{max,Rd} = \left[\frac{M_{max,Rd}^{\rho=6\%} - M_{max,Rd}^{\rho=0\%}}{M_{max,Rd}^{\rho=0\%}} \right]_{S235; S460} \quad (9.6)$$

QUADRO 9.6 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL, DE $\rho = 0\%$ PARA $\rho = 6\%$, EM FUNÇÃO DA CLASSE DO AÇO

	$\Delta N_{pl,Rd}$ (eq. 9.5)	$\Delta M_{max,y,Rd}$ (eq. 9.6)	$\Delta M_{max,z,Rd}$ (eq. 9.6)
S235	58%	106%	168%
S275	52%	94%	152%
S355	44%	76%	127%
S420	39%	66%	112%
S460	36%	61%	104%

Os valores correspondentes às restantes tipologias são obtidos de forma análoga a partir dos gráficos disponíveis no Anexo D.6.3.

QUADRO 9.7 – AUMENTO (MÍNIMO E MÁXIMO) DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO) DA PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL, DE $\rho = 0\%$ PARA $\rho = 6\%$

Percentagem de Armadura Longitudinal			
Tipologia da Secção	$\Delta N_{pl,Rd}$	$\Delta M_{max,y,Rd}$	$\Delta M_{max,z,Rd}$
	36 %	61 %	168 %
	58 %	106 %	104 %
	28 %	32 %	
	45 %	58 %	
	26 %	19 %	
	42 %	34 %	
S460	26 %		19 %
S235	58 %		168 %

A análise do Quadro 9.7 permite concluir que dependendo da classe de aço (alta-baixa), o aumento máximo de resistência que se pode obter devido à variação (aumento) da percentagem de armadura é de 26–58% para o esforço normal resistente plástico, e de 19–168% para o momento flector resistente plástico.

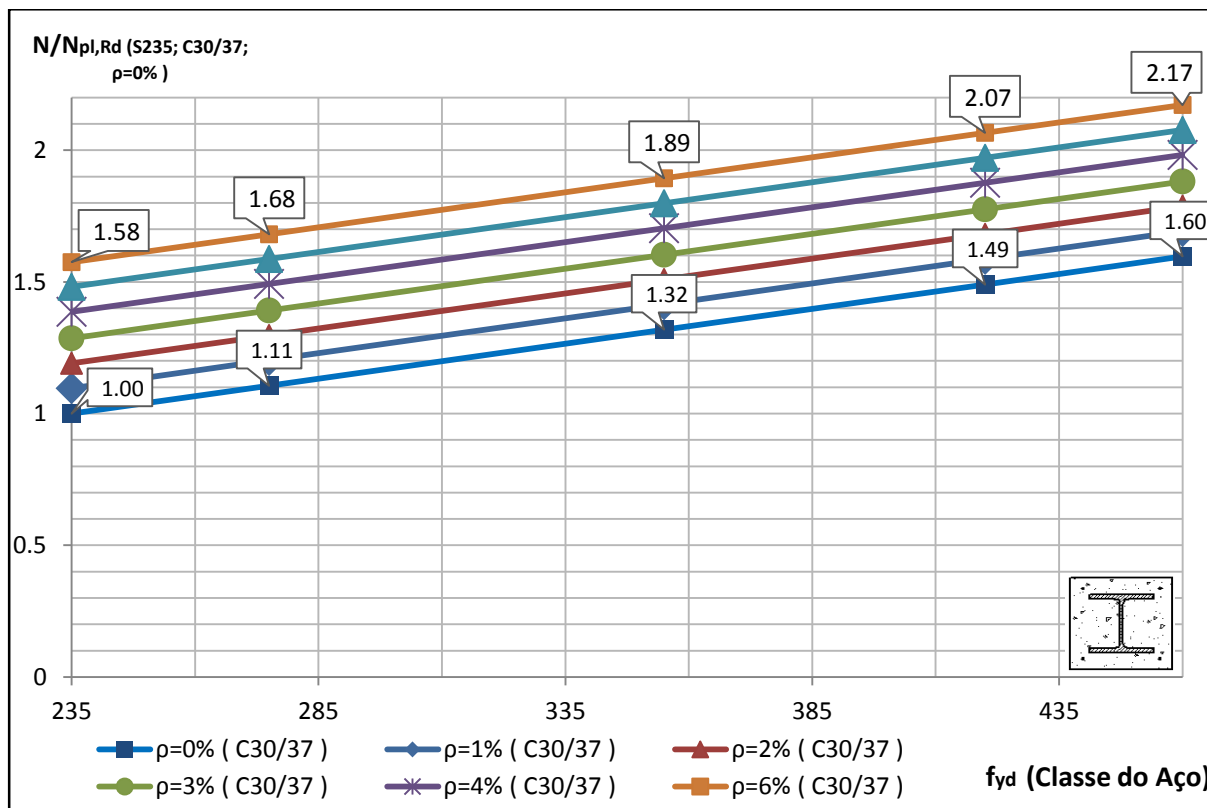


FIGURA 9.35 – ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE ARMADURA E DA CLASSE DO AÇO

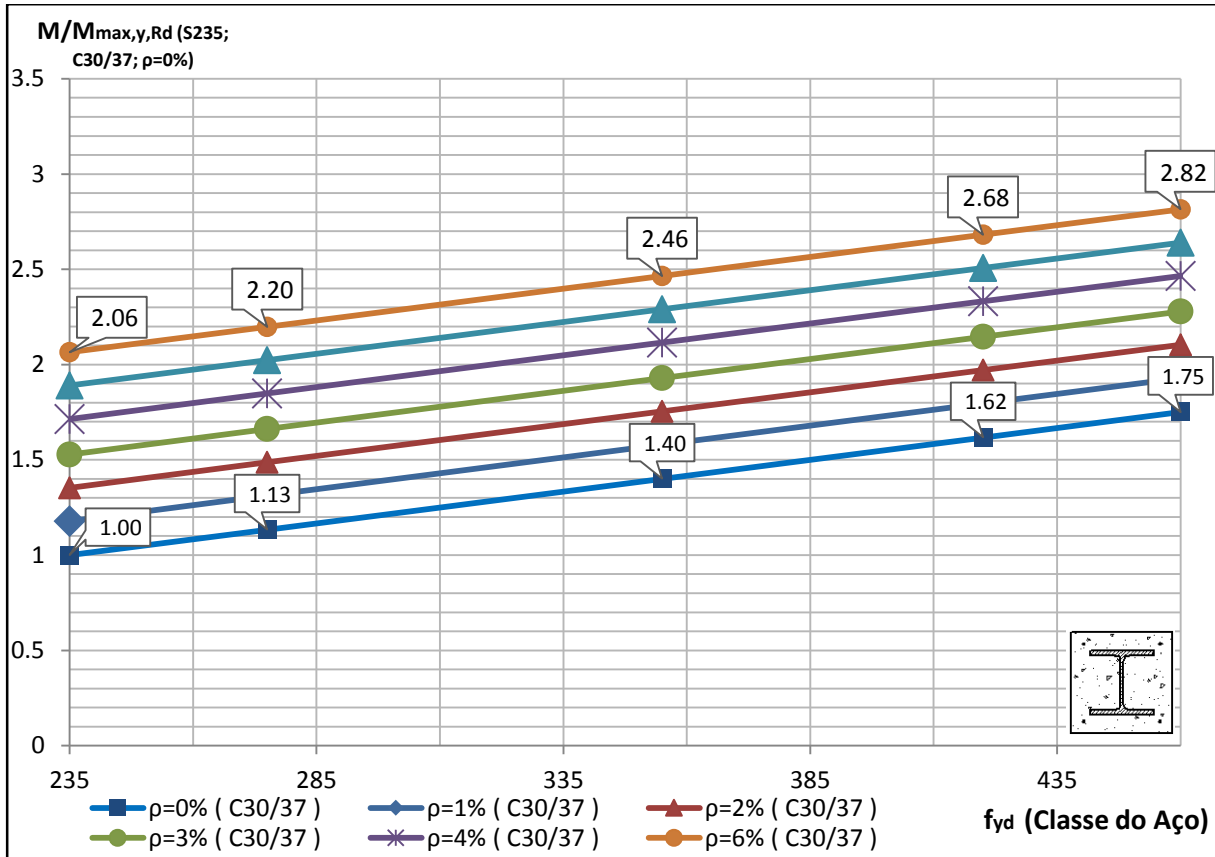


FIGURA 9.36 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MAIOR INÉRCIA, Y-Y) EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE ARMADURA E DA CLASSE DO AÇO

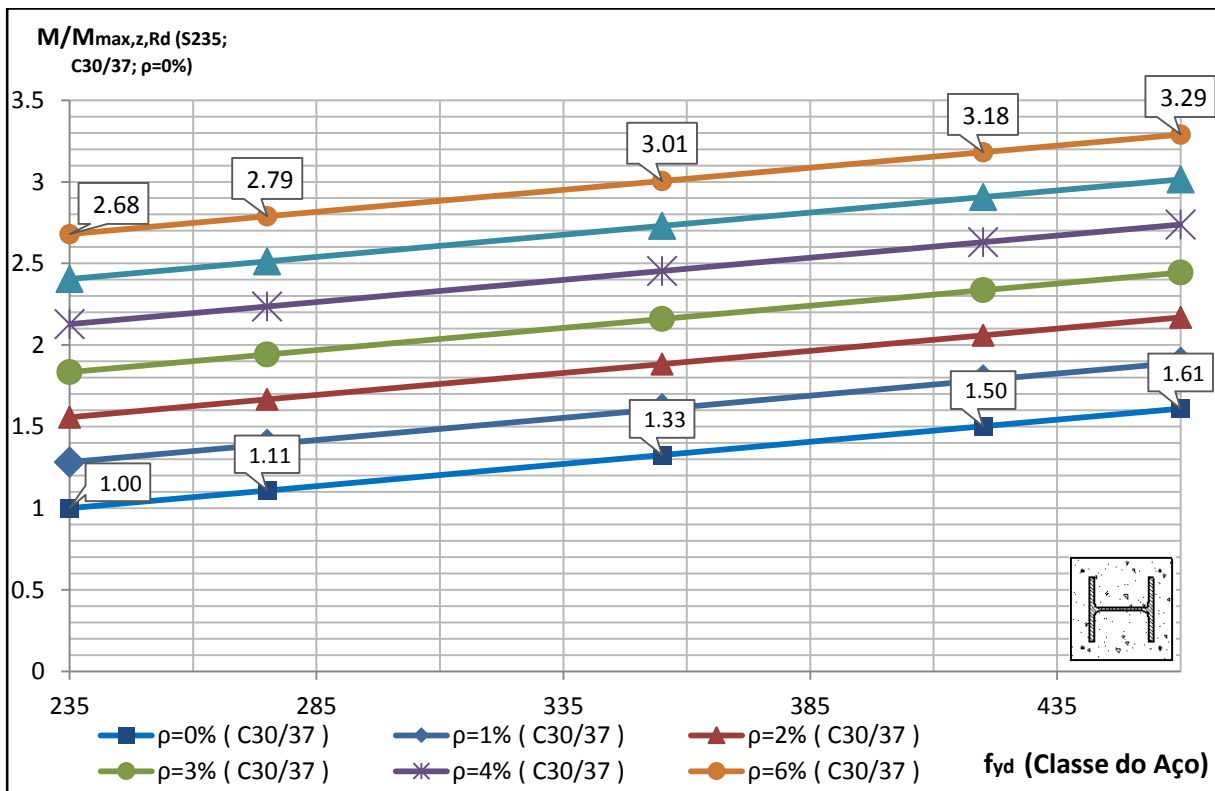


FIGURA 9.37 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO (EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA, Z-Z) EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE ARMADURA E DA CLASSE DO AÇO


9.6.4 ESPESSURA DO TUBO

Em relação à variação da espessura do tubo, t , não existe um limite máximo estabelecido. Assim, optou-se por apresentar a variação da resistência por aumento de milímetro de chapa, de acordo com as expressões (9.7) e (9.8).

$$\Delta N_{pl,Rd}/mm = \left[\frac{N_{pl,Rd}^{t=t_j} - N_{pl,Rd}^{t=t_i}}{N_{pl,Rd}^{t=t_i} \times (t_j - t_i)} \right]_{S235; S460} \quad (9.7)$$

$$\Delta M_{max,Rd}/mm = \left[\frac{M_{max,Rd}^{t=t_j} - M_{max,Rd}^{t=t_i}}{M_{max,Rd}^{t=t_i} \times (t_j - t_i)} \right]_{S235; S460} \quad (9.8)$$

QUADRO 9.8 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO DE 1 MM) DA ESPESSURA DO TUBO, EM FUNÇÃO DA CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

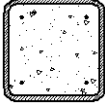
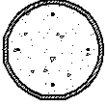
 b = 260mm (C30/37)	$t_j = 15$ $t_i = 10$		$t_j = 20$ $t_i = 15$		$t_j = 25$ $t_i = 20$		$t_j = 30$ $t_i = 25$	
	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$
S235	5.6%	7.3%	4.2%	4.9%	3.3%	3.6%	2.7%	2.8%
S275	6.0%	7.5%	4.4%	5.0%	3.5%	3.7%	2.8%	2.9%
S355	6.6%	7.8%	4.8%	5.2%	3.7%	3.8%	3.0%	2.9%
S420	6.9%	7.9%	4.9%	5.2%	3.8%	3.8%	3.1%	2.9%
S460	7.1%	8.0%	5.0%	5.3%	3.9%	3.8%	3.1%	3.0%

Ao contrário das restantes variáveis já analisadas (classe de resistência dos materiais e percentagem de armadura) a espessura do tubo está directamente relacionado com a classe do aço estrutural. Com efeito, verifica-se neste caso que os valores máximos de variação da resistência se obtêm para a classe do aço mais alta.

Por outro lado, a variação da resistência também depende do valor inicial de espessura, t_i , registando-se valores mais baixos de variação caso a espessura inicial aumente. Nesse caso, o aumento de um milímetro de espessura corresponde, em termos relativos, a um aumento inferior de resistência. Adicionalmente, o diâmetro exterior é constante e a espessura do tubo aumenta para o seu interior. Consequentemente, em termos absolutos, um milímetro adicional de espessura corresponde a uma área inferior de aço caso a espessura inicial seja superior. Obtém-se assim uma variação superior de resistência caso a espessura inicial seja inferior.

Deste modo, através da análise do Quadro 9.9 conclui-se que dependendo da classe de aço (baixa-alta) e da espessura inicial do tubo (alta-baixa), a variação (aumento de um milímetro) da espessura do tubo permite um aumento de 3–7% do esforço normal resistente plástico, e de 6–8% do momento flector resistente plástico.

QUADRO 9.9 – AUMENTO (MÍNIMO E MÁXIMO) DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO DE 1 MM) DA ESPESSURA DO TUBO

Espessura do Tubo		
Tipologia da Secção	$\Delta N_{pl,Rd}/mm$	$\Delta M_{max,Rd}/mm$
	3 %	3 %
	7 %	8 %
	3 %	3 %
	7 %	8 %
$t_i = 25mm$ S235	3 %	3 %
$t_i = 10mm$ S460	7 %	8 %

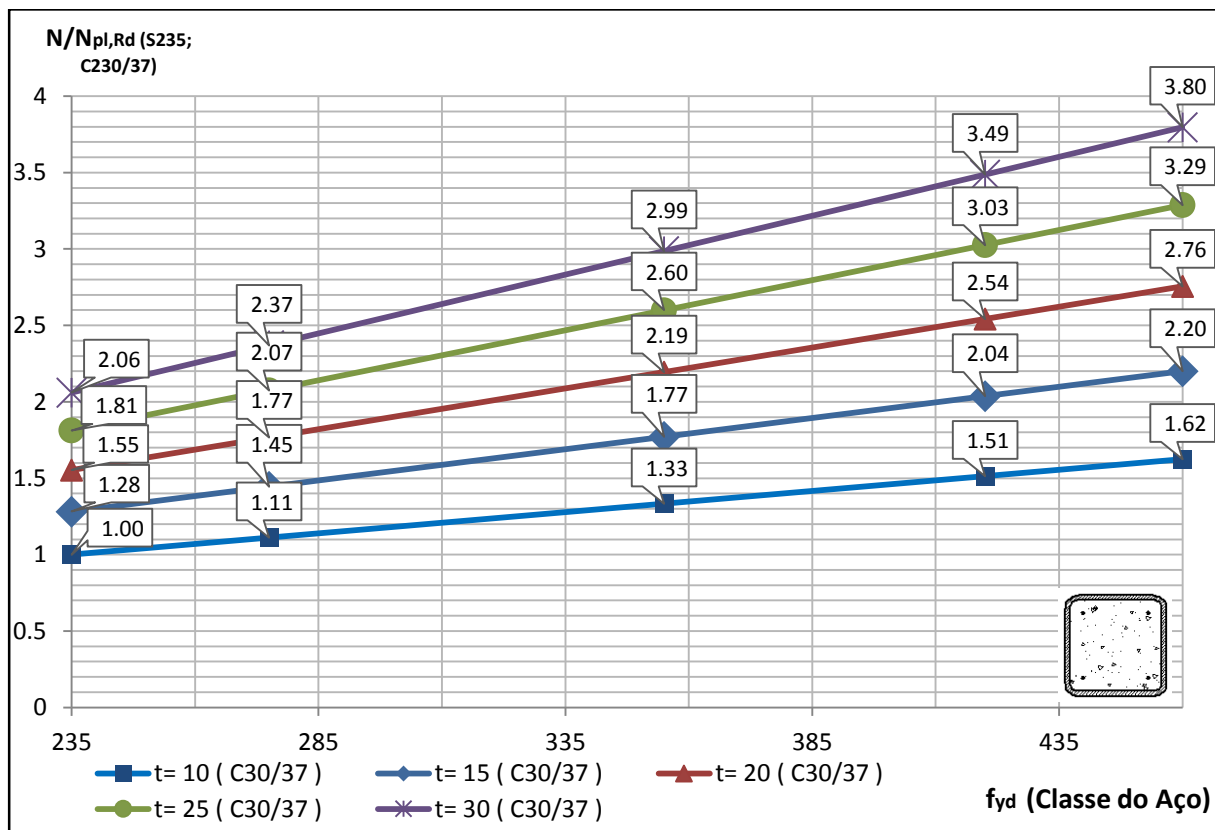


FIGURA 9.38 – ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO TUBO E DA CLASSE DO AÇO

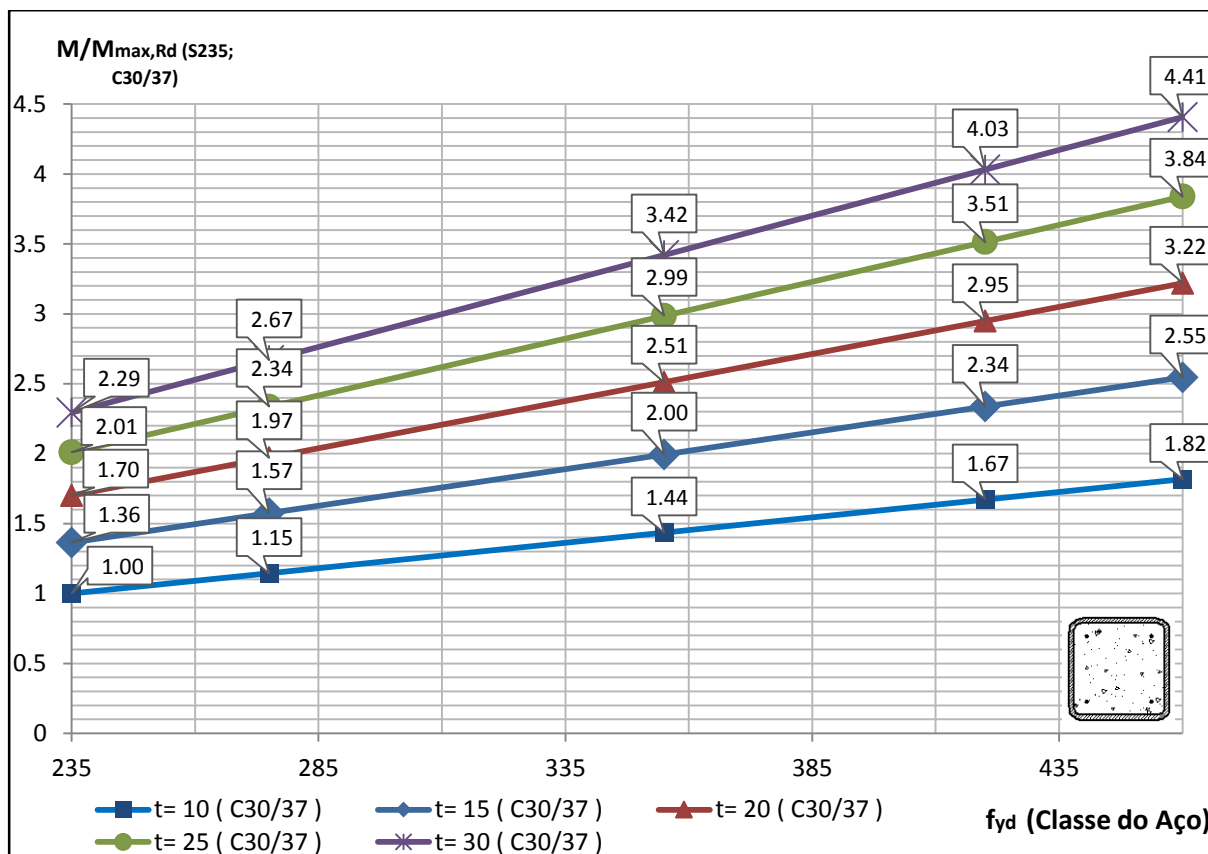


FIGURA 9.39 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE ARMADURA E DA CLASSE DO AÇO

9.6.5 DIÂMETRO DO TUBO

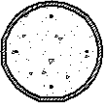
Na Figura 9.40, pode-se observar que para cada classe de aço, o aumento registado do esforço normal resistente plástico é aproximadamente constante. Por outro lado, visto que não existe um limite máximo de diâmetro, d , determinou-se, de forma análoga à espessura do tubo, a variação da resistência por aumento de um milímetro do diâmetro, de acordo com as expressões (9.9) e (9.10).

$$\Delta N_{pl,Rd} / mm = \left[\frac{N_{pl,Rd}^{d=d_j} - N_{pl,Rd}^{d=d_i}}{N_{pl,Rd}^{d=d_i} \times (d_j - d_i)} \right]_{S235; S460} \quad (9.9)$$

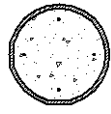
$$\Delta M_{max,Rd} / mm = \left[\frac{M_{max,Rd}^{d=d_j} - M_{max,Rd}^{d=d_i}}{M_{max,Rd}^{d=d_i} \times (d_j - d_i)} \right]_{S235; S460} \quad (9.10)$$

Analogamente à influência da espessura do tubo, o aumento de resistência devido à variação de diâmetro depende do seu valor inicial. Com efeito, o aumento de um milímetro de diâmetro é mais preponderante caso o diâmetro inicial seja inferior, pois em termos relativos esse aumento é superior. Por outro lado, o aumento de resistência proveniente da classe de aço mais S460 é inferior ao da classe S235, e apresenta menor influência na variação da resistência do que o diâmetro inicial. No Quadro 9.10 pode-se observar uma maior diferença entre diâmetros do que entre classes de aço.

QUADRO 9.10 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO DE 1 MM) DO DIÂMETRO DO TUBO, EM FUNÇÃO DA CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

 t = 16 C30/37	$d_j = 300 \quad d_i = 200$		$d_j = 225 \quad d_i = 200$		$d_j = 250 \quad d_i = 225$		$d_j = 275 \quad d_i = 250$		$d_j = 300 \quad d_i = 275$	
	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta N_{pl,Rd}}{mm}$	$\frac{\Delta M_{max,Rd}}{mm}$
S235	0.7%	1.5%	0.7%	1.2%	0.6%	1.1%	0.5%	0.9%	0.5%	0.9%
S275	0.7%	1.5%	0.7%	1.2%	0.6%	1.1%	0.5%	0.9%	0.5%	0.9%
S355	0.7%	1.4%	0.6%	1.2%	0.6%	1.0%	0.5%	0.9%	0.5%	0.8%
S420	0.6%	1.4%	0.6%	1.2%	0.6%	1.0%	0.5%	0.9%	0.5%	0.8%
S460	0.6%	1.4%	0.6%	1.2%	0.5%	1.0%	0.5%	0.9%	0.5%	0.8%

QUADRO 9.11 – AUMENTO (MÍNIMO E MÁXIMO) DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO, PROVENIENTE DA VARIAÇÃO (AUMENTO DE 1 MM) DO DIÂMETRO DO TUBO

Diâmetro do Tubo			
Tipologia da Secção	$\Delta N_{pl,Rd}/mm$	$\Delta M_{max,Rd}/mm$	
	$d_i = 275mm$ S460	0.5 %	0.8 %
	$d_i = 200mm$ S235	0.7 %	1.5 %

Através do Quadro 9.11 conclui-se que dependendo do diâmetro inicial (alto-baixo), a variação (aumento de um milímetro) do diâmetro do tubo permite um aumento de 0.5–0.7% do esforço normal resistente plástico. Em relação ao aumento do momento flector resistente plástico máximo registou-se um aumento de 0.8% e de 1.5% por aumento de um milímetro, para diâmetros iniciais, d_i , iguais a 200mm e 275mm, respectivamente.

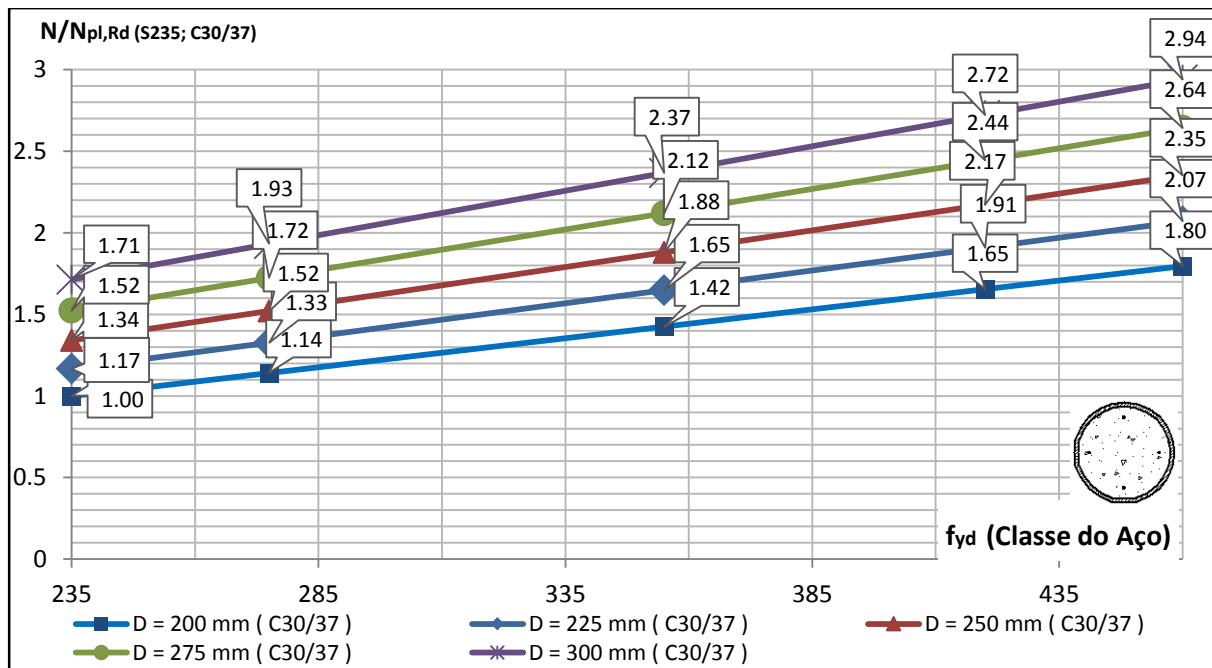


FIGURA 9.40 – ESFORÇO NORMAL RESISTENTE PLÁSTICO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO TUBO E DA CLASSE DO AÇO

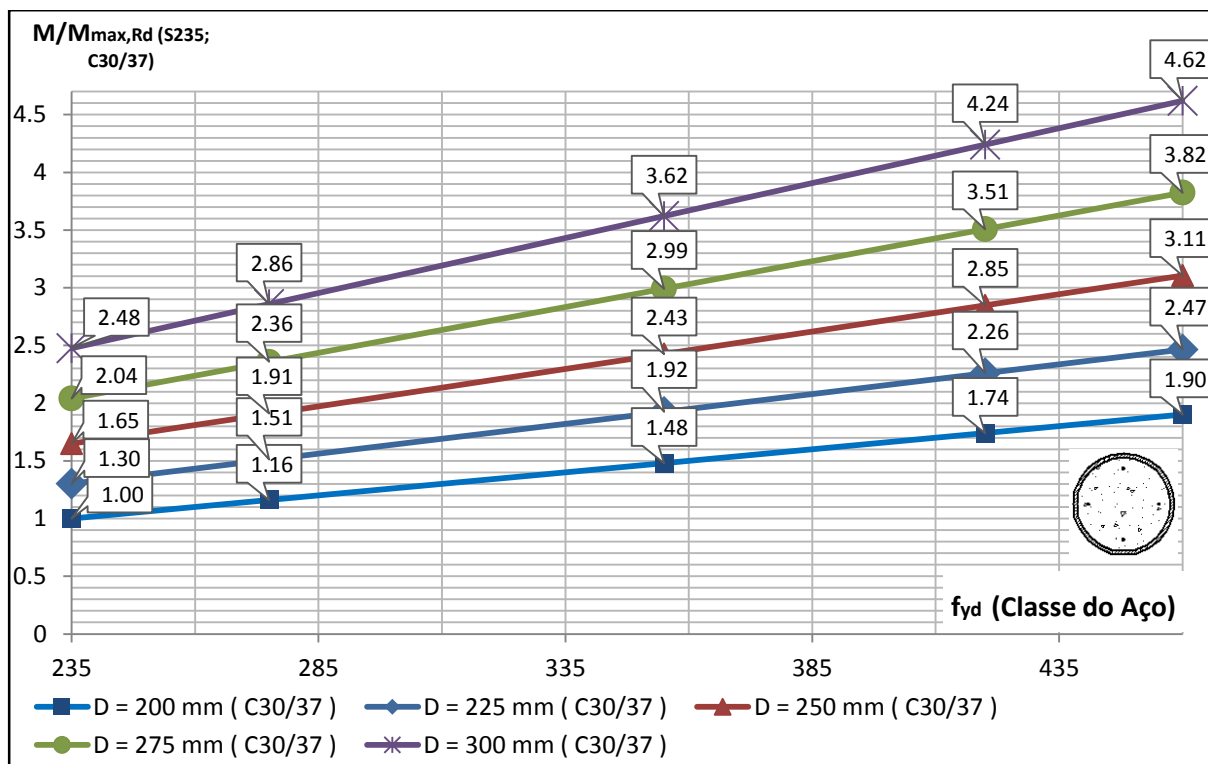


FIGURA 9.41 – MOMENTO FLECTOR RESISTENTE PLÁSTICO MÁXIMO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO TUBO E DA CLASSE DO AÇO

10. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

10 CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Em comparação às expressões definidas na *EN1994, Anexo C*, o *toolkit* determina um número muito superior de pares (M; N) definindo uma curva de interacção ao invés do polígono BDCEA (curva de interacção simplificada), o que conduz à determinação de um valor de momento resistente até 7% superior (Figura 10.1). Lembra-se que a *EN1994-1-1* prevê, para as secções total e parcialmente betonadas (flexão em torno do eixo de menor inércia) e para as secções tubulares rectangulares, a determinação de um ponto adicional, E, localizado entre A e C, de forma a minimizar a diferença entre o valor do momento resistente obtido através do polígono e através da curva de interacção.

Materiais: Aço estrutural da classe S355; Aço das armaduras longitudinais da classe A500; Betão da classe C25/30 com um coeficiente de fluência de 2,5.

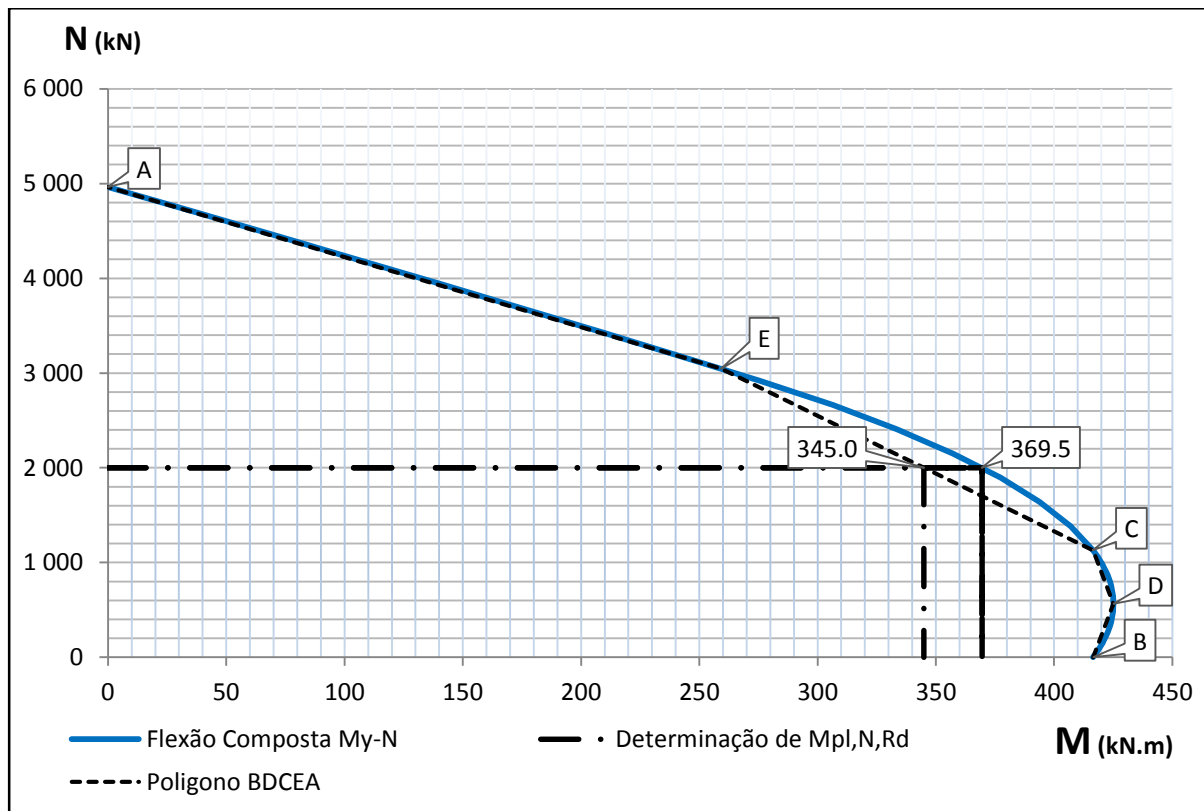


FIGURA 10.1 – COMPARAÇÃO DA CURVA DE INTERACÇÃO COM O POLÍGONO BDCEA, CORRESPONDENTE À SECÇÃO TRANSVERSAL APRESENTADA NA FIGURA 9.5

Através da análise dos resultados obtidos dos diversos estudos paramétricos realizados conclui-se que o aumento da classe de resistência do aço e do betão implica naturalmente um aumento da resistência ao esforço normal e à flexão. Esse aumento de resistência depende dos restantes parâmetros envolvidos. Em geral, a preponderância da variação de um determinado parâmetro na resistência da secção, aumenta com a diminuição da contribuição dos restantes parâmetros. Por exemplo, quando a classe de resistência do aço estrutural diminui, a resistência proveniente do betão aumenta relativamente à resistência total da secção.

No Quadro 10.1 apresenta-se um resumo da variação máxima da resistência que se pode obter através da variação dos diversos parâmetros analisados, dependendo da contribuição das restantes variáveis.

QUADRO 10.1 – SÍNTESE DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO PARA CADA VARIÁVEL EM ESTUDO

Parâmetro a variar	Variação da resistência	
	$\Delta N_{pl,Rd}$	$\Delta M_{max,Rd}$
Classe do Aço Estrutural ($\Delta f_{yd} = 460 - 235 = 225 MPa$)	46–73 %	44–87 %
Classe do Betão ($\Delta f_{cd} = 33.3 - 13.3 = 20 MPa$)	21–41 %	7–35 %
Percentagem de armadura ($\Delta \rho = 6\%$)	26–58 %	19–168 %
Parâmetro a variar	$\Delta N_{pl,Rd}/mm$	$\Delta M_{max,Rd}/mm$
Espessura do Tubo	3–7 %	3–8 %
Diâmetro do tubo	0.5–0.7 %	0.8–1.5 % ($d_i = 275mm$) – ($d_i = 200mm$)

Face à elevada resistência do aço em comparação com o betão, o aumento da classe do aço estrutural apresenta maior influência no aumento da resistência, e a maior diferença regista-se entre as classes S275 e S355.

Embora a variação da classe de resistência dos materiais apresente valores aparentemente elevados de aumento de resistência, relembra-se que os valores apresentados correspondem à máxima variação possível (de S235 para S460; e de C20/25 para C50/60) o que não se verifica na generalidade dos casos práticos. Deste modo, a classe de resistência dos materiais não é uma variável preferencial na obtenção de uma resistência superior.

Em relação à percentagem de armadura, registou-se uma elevada variação na resistência à flexão da coluna totalmente betonada analisada (168 %) em torno do eixo de menor inércia. Neste caso, a posição dos varões tem maior influência na resistência à flexão em comparação com a posição do perfil de aço. Relembra-se que esta variação diz respeito à máxima percentagem de armadura ($\Delta \rho = 6\%$) cuja área corresponde, para o caso em estudo, a aproximadamente metade da área do perfil aço. Por outro lado, o valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras (A500, $f_{sd} = 435 MPa$) é aproximadamente o dobro do valor de cálculo do aço estrutural (S235, $f_{yd} = 235 MPa$). Conclui-se assim que a área de armadura é preponderante para a flexão em torno do eixo de menor inércia de colunas totalmente betonadas. No caso das colunas parcialmente betonadas a mesma análise conduziria a conclusões idênticas, tendo em conta que a posição relativa dos materiais na secção transversal é semelhante.

No caso das colunas tubulares cheias de betão, as armaduras encontram-se no interior do tubo de aço estrutural, tendo por isso menor braço (na determinação da resistência à flexão) e conseqüentemente menor preponderância na variação da resistência à flexão em comparação com as restantes tipologias.

Em relação ao esforço normal resistente, nos casos em que a contribuição do aço estrutural para a resistência da secção é semelhante, o aumento da área de armadura longitudinal implica um aumento de resistência que não depende da tipologia da secção.

A espessura do tubo apresenta-se como uma variável com elevada preponderância no aumento de resistência. Com efeito, em média o aumento de 6 milímetros de espessura é equivalente ao aumento da classe de betão de C20/25 para C50/60, sendo assim preferível aumentar a espessura em detrimento de aumentar a classe de resistência dos materiais.

É importante mencionar que a variação de um só parâmetro implica (à excepção do diâmetro) uma variação linear da resistência. Por outro lado, a variação de dois parâmetros directamente relacionados (aumento da espessura das chapas, e classe do aço estrutural, p.e.) provoca um aumento de resistência “exponencial”, que se apresenta como uma boa solução face a uma resistência à flexão insuficiente.

Em relação ao esforço transversal, a sua influência é mais preponderante para a resistência de flexão em torno do eixo de menor inércia. Por outro lado, as secções tubulares apresentam maior resistência ao esforço transversal e portanto não se verifica, geralmente, uma redução na tensão de cedência do aço estrutural (na área resistente ao esforço transversal).

O gráfico $M_{Ed} - N_{Ed}$ (Figura 7.3) permite analisar graficamente qual o valor do esforço normal actuante a partir do qual é necessário realizar uma análise de 2ª ordem, e qual o aumento do momento obtido de uma análise global. Adicionalmente, a sobreposição da curva de interacção $M_{Rd} - N_{Rd}$ com o gráfico $M_{Ed} - N_{Ed}$ permite concluir se a resistência da secção transversal se adequa às características da coluna mista (comprimento da coluna, rigidez e diagrama de momentos flectores). Com efeito, caso o gráfico $M_{Ed} - N_{Ed}$ apresente uma inclinação pouco acentuada (Figura 7.3, $L = 6m$), o aumento do momento poderá ser condicionante para a verificação da segurança.

Adicionalmente, destaca-se que a descontinuidade que se observa no gráfico $M_{Ed} - N_{Ed}$ (Figura 7.3) de um determinado comprimento da coluna (para o valor de esforço normal actuante a partir do qual se deve realizar uma análise de 2ª ordem), não contém um significado físico.

Em futuros desenvolvimentos propõe-se a elaboração de um programa numérico que permita analisar e verificar colunas mistas de geometria variável ou com secção não bissimétrica, tendo em conta os efeitos de segunda ordem preconizados pelo método geral de cálculo. A análise não-linear do comportamento dos materiais tem especial importância nos casos em que a tensão de cedência do aço estrutural é elevada, e portanto muito superior à tensão de rotura do betão por compressão. Nesse caso a utilização do método simplificado de cálculo contabilizaria uma deformação do aço antes da rotura muito superior à deformação do betão, correspondente ao valor de cálculo das respectivas tensões. Porém na realidade a secção mantém-se plana e a deformação de ambos os materiais é semelhante, sendo necessário determinar qual a deformação no momento da rotura.

Salienta-se ainda que as metodologias desenvolvidas nesta dissertação têm aplicação na análise plástica de vigas mistas de classe 1, 2 e 3. Com efeito, devido à sua geometria, permitem a utilização de blocos rectangulares de tensões tendo em conta a adequada decomposição da secção.

11. BIBLIOGRAFIA

11 BIBLIOGRAFIA

Bergmann, R et al. 1995. *Design Guide For Concrete filled Hollow Section Columns under Static and Siesmic Loading*. 1ª Edição. Germany : CIDECT - Comité Internaional pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire.

Calado, L e Santos, J. 2010. *Estruturas Mistas de Aço e Betão*. 1ª Edição. Lisboa : IST Press.

Eggemann, H. 2006. Simplified Design of Composite Columns, Based on a Comparative Study of Building Regulations in Germany and the United States. *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Queens' College, Cambridge University : Short Run Press, 2006, Vol. I, pp. 1023-1042.

Elremaily, A e Azizinamini, A. 2002. Behavior of Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns. [ed.] J F Hajjar, et al. *Proceedings of Composite Construction in Steel and Concrete IV*. Banff, Alberta : American Society of Civil Engineers, 2002, pp. 573-583.

EN 1990: 2002. *Basis of Structural Design*. CEN – European Committee for Standardization.

EN 1991-1-1: 2002. *Actions on Structures – Part 1-1: General Actions: Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings*. CEN – European Committee for Standardization.

EN 1992-1-1: 2004. *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. CEN – European Committee for Standardization.

EN 1993-1-1: 2005. *Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. CEN – European Committee for Standardization.

EN 1994-1-1: 2005. *Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. CEN – European Committee for Standardization.

Hicks, S J. et al. 2002. *Design Guide for Concrete Filled Columns*. Berkshire : Corus Tubes, 2002.

ISO 690: 1987. *Documentation - Bibliographic references: content, form and structure*. ISO – International Organization for Standardization.

Johnson, R P. 2004. *Composite Structures of Steel and Concrete*. 2ª Edição. Oxford : Blackwell Scientific Publications, Volume I: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings.

Jonhson, R P e Anderson, D. 2004. *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*. Thomas Telford Ltd.

Liu, J. CE591 Lecture 13. Composite Columns. [Online] [Citação: 5 de Março de 2014.] https://engineering.purdue.edu/~jliu/courses/CE591/PDF/CE591compcol_F13.pdf.

Reis, A e Camotim, D. 2001. *Estabilidade Estrutural*. 1ª Edição. Portugal : McGraw-Hill.

ANEXOS

Anexo A – CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A.1 BETÃO

QUADRO A 1 – CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO, EN1992-1-1, QUADRO 3.1.

Classes de Resistência	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ (MPa)	13.3	16.7	20.0	23.3	26.7	30.0	33.3
E_{cm} (GPa)	30	31	33	34	35	36	37

Em que,

f_{ck} – valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

f_{cd} – valor de cálculo da tensão de rotura à compressão;

γ_c – coeficiente parcial relativo ao betão de 1,5, definido na EN1992-1-1, 2.4.2.4.

E_{cm} – módulo de elasticidade secante do betão, EN1992-1-1, 3.1.3(2).

A.2 AÇO ESTRUTURAL

QUADRO A 2 – CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO AÇO ESTRUTURAL, EN 1993-1-1, QUADRO 3.1.

Características	Espessura Nominal do Elemento t (mm)	Classes de Resistência				
		S235	S275	S355	S420	S460
f_y (MPa)	$t \leq 40$	235	375	355	420	460
	$40 < t \leq 80$	215	255	335	390	430
E_a (GPa)		210				

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_a}$$

Em que,

f_y – valor nominal da tensão de cedência do aço estrutural;

f_{yd} – valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural (tracção e compressão);

γ_a – coeficiente parcial relativo ao aço estrutural de 1,0, definido na EN1993-1-1, 6.1.

E_a – módulo de elasticidade, EN1993-1-1, 3.2.6(1).

A.3 AÇO DAS ARMADURAS LONGITUDINAIS

QUADRO A 3 – CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DO BETÃO, EN1992-1-1, QUADRO 3.1.

Classes de Resistência	A400NR	A500NR
$f_{sk} \text{ (MPa)}$	400	500
$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \text{ (MPa)}$	348	435
$E_s \text{ (GPa)}$	210	

Em que,

f_{sk} – valor característico da tensão de cedência do aço das armaduras.

f_{sd} – valor de cálculo da tensão de cedência do aço das armaduras (tração e compressão).

γ_s – coeficiente parcial relativo ao aço das armaduras de 1,15, EN1992-1-1, 2.4.2.4.

E_s – módulo de elasticidade do aço das armaduras, EN1994-1-1, 3.2(2).

Anexo B – CARACTERÍSTICAS DA SECÇÃO TRANSVERSAL

B.1 SECÇÕES RECTANGULARES

B.1.1 DEFINIÇÃO DOS BLOCOS RECTANGULARES DE TENSÃO PARA CADA TIPOLOGIA

Secção totalmente betonada			
Perfil em I ou H soldado Flexão em torno do eixo de maior inércia, y-y		<u>Aço</u>	<u>Betão</u>
		Base	Altura
	0	$\frac{h_c - 2t_f - h_w}{2}$	b_c
	b_f	t_f	$b_c - b_f$
	t_w	h_w	$b_c - t_w$
	b_f	t_f	$b_c - b_f$
	0	$\frac{h_c - 2t_f - h_w}{2}$	b_c

Perfil em I ou H soldado Flexão em torno do eixo de menor inércia, z-z		<u>Aço</u>	<u>Betão</u>
		Base	Altura
	0	$\frac{b_c - b_f}{2}$	h_c
	$2t_f$	$\frac{b_f - t_w}{2}$	$h_c - 2t_f$
	$h_w + 2t_f$	t_w	$h_c - h_w - 2t_f$
	$2t_f$	$\frac{b_f - t_w}{2}$	$h_c - 2t_f$
	0	$\frac{b_c - b_f}{2}$	h_c

Perfil em I ou H laminado (IPE; HEA, HEB, HEM) Flexão em torno do eixo de maior inércia, y-y		Aço	Altura	Betão
		Base		Base
		0	$\frac{h_c - 2t_f - h_w}{2}$	b_c
		b_f	t_f	$b_c - b_f$
		b_1	$f/2$	$b_c - b_1$
		b_2	$f/2$	$b_c - b_2$
		t_w	d	$b_c - t_w$
		b_2	$f/2$	$b_c - b_2$
		b_1	$f/2$	$b_c - b_1$
		b_f	t_f	$b_c - b_f$
		0	$\frac{h_c - 2t_f - h_w}{2}$	b_c

Perfil em I ou H laminado (IPE; HEA, HEB, HEM) Flexão em torno do eixo de menor inércia, z-z		Aço	Altura	Betão
		Base		Base
		0	$\frac{b_c - b_f}{2}$	h_c
		$2 t_f$	$\frac{b_f - b_1}{2}$	$h_c - 2 t_f$
		$2 t_f + f$	$\frac{b_1 - b_2}{2}$	$h_c - 2 t_f - f$
		$2 t_f + 2 f$	$\frac{b_2 - t_w}{2}$	$h_c - 2 t_f - 2 f$
		$2 t_f + h_w$	t_w	$h_c - 2 t_f - h_w$
		$2 t_f + 2 f$	$\frac{b_2 - t_w}{2}$	$h_c - 2 t_f - 2 f$
		$2 t_f + f$	$\frac{b_1 - b_2}{2}$	$h_c - 2 t_f - f$
		$2 t_f$	$\frac{b_f - b_1}{2}$	$h_c - 2 t_f$
		0	$\frac{b_c - b_f}{2}$	h_c

$$f = \frac{d - h_w}{2}$$

$$b_1 = t_w + 2 f [1 - \cos(30) \times 0.67]$$

$$b_2 = t_w + 2 f [1 - \cos(30)] \times 0.07$$

Secção parcialmente betonada

Perfil em I ou H soldado Flexão em torno do eixo de maior inércia, y-y	<u>Aço</u>	Altura	<u>Betão</u>
	Base		Base
	b_f	t_f	0
	t_w	h_w	$b_f - t_w$
	b_f	t_f	0

Perfil em I ou H soldado Flexão em torno do eixo de menor inércia, z-z	<u>Aço</u>	Altura	<u>Betão</u>
	Base		Base
	$2t_f$	$\frac{b_f - t_w}{2}$	h_w
	$h_w + 2t_f$	t_w	0
	$2t_f$	$\frac{b_f - t_w}{2}$	h_w

Perfil em I ou H laminado (IPE; HEA, HEB, HEM)
Flexão em torno do eixo de maior inércia, y-y

Aço	Altura	Betão
		Base
b_f	t_f	0
b_1	$f/2$	$b_f - b_1$
b_2	$f/2$	$b_f - b_2$
t_w	d	$b_f - t_w$
b_2	$f/2$	$b_f - b_2$
b_1	$f/2$	$b_f - b_1$
b_f	t_f	0

Perfil em I ou H laminado (IPE; HEA, HEB, HEM)
Flexão em torno do eixo de menor inércia, z-z

Aço	Altura	Betão
		Base
$2 t_f$	$\frac{b_f - b_1}{2}$	h_w
$2 t_f + f$	$\frac{b_1 - b_2}{2}$	$h_w - f$
$2 t_f + 2 f$	$\frac{b_2 - t_w}{2}$	$h_w - 2 f$
$2 t_f + h_w$	t_w	0
$2 t_f + 2 f$	$\frac{b_2 - t_w}{2}$	$h_w - 2 f$
$2 t_f + f$	$\frac{b_1 - b_2}{2}$	$h_w - f$
$2 t_f$	$\frac{b_f - b_1}{2}$	h_w

$$f = \frac{d - h_w}{2}$$

$$b_1 = t_w + 2 f [1 - \cos(30) \times 0.67]$$

$$b_2 = t_w + 2 f [1 - \cos(30)] \times 0.07$$

Secção tubular rectangular/quadrangular cheia de betão

Perfil tubular rectangular Flexão em torno do eixo de maior inércia, y-y b	<u>Aço</u>	Altura	<u>Betão</u>
	Base		Base
	b	t_f	0
	$2 t_w$	$h - 2 t_f$	$b - 2 t_w$
	b	t_f	0

Perfil tubular rectangular Flexão em torno do eixo de menor inércia, z-z h	<u>Aço</u>	Altura	<u>Betão</u>
	Base		Base
	h	t_w	0
	$2 t_f$	$b - 2 t_w$	$h - 2 t_f$
	h	t_w	0

B.1.2 ÁREA, INÉRCIA E CENTRO DE MASSA DE BLOCOS RECTANGULARES

QUADRO A 4 – DETERMINAÇÃO DA ÁREA, INÉRCIA E CENTRO DE MASSA DE UMA DETERMINADA SECÇÃO (BETÃO OU PERFIL DE AÇO) COMPOSTA POR BLOCOS RECTANGULARES.

Bloco Rectangular (i)	Base (b _i)	Altura (h _i)	Centro de Massa do Bloco (z _{CM,i})	Área do Bloco	$z_i b_i h_i$	Inércia do Bloco	$b_i h_i (z_{CM} - z_{CM,i})^2$
1	b ₁	h ₁	h ₁ /2	b ₁ h ₁	z ₁ b ₁ h ₁	$\frac{b_1 h_1^3}{12}$	b ₁ h ₁ (z _{CM} - z _{CM,1}) ²
2	b ₂	h ₂	h ₁ + h ₂ /2	b ₂ h ₂	z ₂ b ₂ h ₂	$\frac{b_2 h_2^3}{12}$	b ₂ h ₂ (z _{CM} - z _{CM,2}) ²
...
...
n	b _n	h _n	$z_{CM,n} = \left(\sum_{i=1}^{n-1} h_i \right) + \frac{h_n}{2}$	b _n h _n	z _n b _n h _n	$\frac{b_n h_n^3}{12}$	b _n h _n (z _{CM} - z _{CM,n}) ²
				$A = \sum_{i=1}^n b_i h_i$	$\sum_{i=1}^n z_i b_i h_i$	$\sum_{i=1}^n \frac{b_i h_i^3}{12}$	$\sum_{i=1}^n b_i h_i (z_{CM} - z_{CM,i})^2$
				Centro de Massa		Inércia	
				$z_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i h_i}{\sum_{i=1}^n z_i b_i h_i}$		$I = \sum_{i=1}^n \frac{b_i h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n b_i h_i (z_{CM} - z_{CM,i})^2$	

Nota:

O centro de massa, z_{CM}, é medido em relação ao topo da secção e refere-se à secção de betão ou ao perfil de aço. A inércia é determinada em relação ao centro de massa desse mesmo elemento (aço ou betão).

QUADRO A 5 – DETERMINAÇÃO DA INÉRCIA E CENTRO DE MASSA DAS ARMADURAS LONGITUDINAIS.

Armaduras (i)	Nível das Armaduras (z _i)	Área (A)	$z_i A_i$	Inércia $A_i(z_{CM} - z_{CM,i})^2$
1	z ₁	A ₁	z ₁ A ₁	$A_1(z_{CM} - z_{CM,1})^2$
...
n	z _n	A _n	z _n A _n	$b_n h_n (z_{CM} - z_{CM,n})^2$
		$A_s = \sum_{i=1}^n A_i$	$\sum_{i=1}^n z_i A_i$	$I = \sum_{i=1}^n b_i h_i (z_{CM} - z_{CM,i})^2$
Centro de Massa				
$z_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n z_i A_i}$				

O centro de massa da secção mista é determinado com base nos valores da área e centro de massa de cada elemento, de acordo com as expressões seguintes:

$$z_{CM,secção\ mista} = \frac{A_a \cdot z_{CM,a} + A_c \cdot z_{CM,c} + A_s \cdot z_{CM,s}}{A_a + A_c + A_s}$$

De forma a determinar a Inércia da secção mista, determina-se novamente a inércia de cada elemento da secção (Aço, Betão e Armaduras) em relação ao centro de massa da secção mista, $z_{CM,secção\ mista}$. A inércia da secção mista é obtida através da soma das inércias dos diversos elementos.

$$I_{secção\ mista} = I_a + I_c + I_s$$

Em que,

A_a ; $z_{CM,a}$; I_a – Área, Centro de Massa e Inércia da secção de aço.

A_c ; $z_{CM,c}$; I_c – Área, Centro de Massa e Inércia da secção de betão homogeneizada.

A_s ; $z_{CM,s}$; I_s – Área, Centro de Massa e Inércia das armaduras longitudinais.

Nota:

Na hipótese da secção ser simétrica o centro de massa de cada elemento é coincidente com o centro de massa da secção, logo o valor da inércia determinado em relação ao centro de massa de cada elemento é igual ao valor determinado em relação ao centro de massa da secção mista.

B.1.3 ÁREA DE CORTE

De acordo com a EN1993-1-1, artigo 6.2.6, a área resistente ao esforço transversal, A_v , é determinada através das seguintes expressões:

Secções laminadas em I e H

Carga paralela à alma, $V_{z,Ed}$

$$A_{v,z} = \max \{ A - 2 b t_f + (t_w + 2r)t_f ; \eta h_w t_w \}$$

Carga paralela aos banzos, $V_{y,Ed}$

$$A_{v,y} = A - \sum h_w t_w$$

Secções soldadas em I e H

Carga paralela à alma, $V_{z,Ed}$

$$A_{v,z} = \eta \sum h_w t_w$$

Carga paralela aos banzos, $V_{y,Ed}$

$$A_{v,y} = A - \sum h_w t_w$$

Secções laminadas rectangulares tubulares de espessura uniforme

Carga paralela à altura, $V_{z,Ed}$

$$A_{v,z} = A h / (b + h)$$

Carga paralela à largura, $V_{y,Ed}$

$$A_{v,y} = A b / (b + h)$$

Em que,

A – área da secção transversal de aço;

b – largura total;

h – altura total;

h_w – altura da alma;

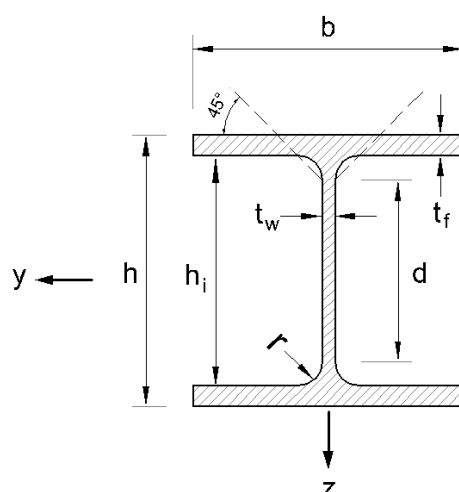
t_w – espessura da alma;

t_f – espessura dos banzos;

r – raio de concordância;

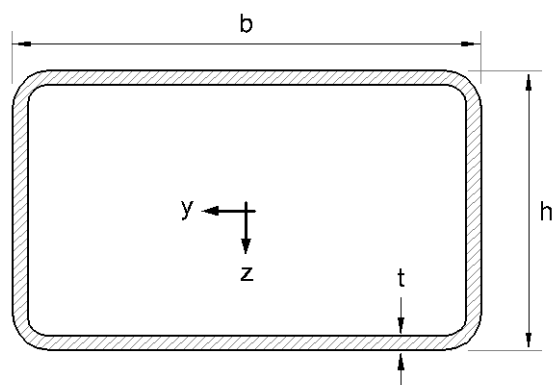
η – parâmetro definido na EN1993-1-5. De forma conservativa poderá ser considerado igual a 1,0.

B.1.4 PERFIS COMERCIAIS – DIMENSÕES E PROPRIEDADES RELEVANTES PARA O CÁLCULO



Designação	Dimensões								Propriedades da Secção				
	h mm	b mm	t_w mm	t_f mm	r mm	A mm ² x10 ²	h_i mm	d mm	I_y mm ⁴ x10 ⁴	$W_{pl,y}$ mm ³ x10 ³	$A_{v,z}$ mm ² x10 ²	I_z mm ⁴ x10 ⁴	$W_{pl,z}$ mm ³ x10 ³
IPE													
IPE 80	80	46	3.8	5.2	5	7.64	69.6	59.6	80	23	3.6	8.5	5.8
IPE 100	100	55	4.1	5.7	7	10.3	88.6	74.6	171	39	5.1	15.9	9.2
IPE 120	120	64	4.4	6.3	7	13.2	107.4	93.4	318	61	6.3	27.7	13.6
IPE 140	140	73	4.7	6.9	7	16.4	126.2	112.2	541	88	7.7	44.9	19.3
IPE 160	160	82	5.0	7.4	9	20.1	145.2	127.2	869	124	9.7	68.3	26.1
IPE 180	180	91	5.3	8.0	9	23.9	164.0	146.0	1317	166	11.3	101	34.6
IPE 200	200	100	5.6	8.5	12	28.5	183.0	159.0	1943	221	14.0	142	44.6
IPE 220	220	110	5.9	9.2	12	33.4	201.6	177.6	2772	285	15.9	205	58.1
IPE 240	240	120	6.2	9.8	15	39.1	220.4	190.4	3892	367	19.1	284	73.9
IPE 270	270	135	6.6	10.2	15	45.9	249.6	219.6	5790	484	22.1	420	97.0
IPE 300	300	150	7.1	10.7	15	53.8	278.6	248.6	8356	628	25.7	604	125.0
IPE 330	330	160	7.5	11.5	18	62.6	307.0	271.0	11770	804	30.8	788	154.0
IPE 360	360	170	8.0	12.7	18	72.7	334.6	298.6	16270	1019	35.1	1043	191.0
IPE 400	400	180	8.6	13.5	21	84.5	373.0	331.0	23130	1307	42.7	1318	229.0
IPE 450	450	190	9.4	14.6	21	98.8	420.8	378.8	33740	1702	50.9	1676	276.0
IPE 500	500	200	10.2	16.0	21	116.0	468.0	426.0	48200	2194	59.9	2142	336.0
IPE 550	550	210	11.1	17.2	24	134.0	515.6	467.6	67120	2787	72.3	2668	401.0
IPE 600	600	220	12.0	19.0	24	156.0	562.0	514.0	92080	3512	83.8	3387	486.0
HE													
HE 100 A	96	100	5.0	8.0	12	21.2	80	56	349	83.0	7.56	134	41.1
B	100	100	6.0	10.0	12	26.0	80	56	450	104.2	9.04	167	51.4
M	120	106	12.0	20.0	12	53.2	80	56	1143	235.8	18.04	399	116.3
HE 120 A	114	120	5.0	8.0	12	25.3	98	74	606	119.5	8.46	231	58.9
B	120	120	6.5	11.0	12	34.0	98	74	864	165.2	10.96	318	81.0
M	140	126	12.5	21.0	12	66.4	98	74	2018	350.6	21.15	703	171.6
HE 140 A	133	140	5.5	8.5	12	31.4	116	92	1033	173.5	10.12	389	84.9
B	140	140	7.0	12.0	12	43.0	116	92	1509	245.4	13.08	550	119.8
M	160	146	13.0	22.0	12	80.6	116	92	3291	493.8	24.46	1144	240.5

Designação	Dimensões								Propriedades da Secção				
	<i>h</i> mm	<i>b</i> mm	<i>t_w</i> mm	<i>t_f</i> mm	<i>r</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>h_i</i> mm	<i>d</i> mm	<i>I_y</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,y}</i> mm ³ x10 ³	<i>A_{v,z}</i> mm ² x10 ²	<i>I_z</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,z}</i> mm ³ x10 ³
HE 160 A B M	152	160	6.0	9.0	15	38.8	134	104	1673	245	13.2	616	117.6
	160	160	8.0	13.0	15	54.3	134	104	2492	354	17.6	889	170.0
	180	166	14.0	23.0	15	97.1	134	104	5098	675	30.8	1759	325.5
HE 180 A B M	171	180	6.0	9.5	15	45.3	152	122	2510	325	14.5	925	156.5
	180	180	8.5	14.0	15	65.3	152	122	3831	481	20.2	1363	231.0
	200	186	14.5	24.0	15	113.3	152	122	7483	883	34.7	2580	425.2
HE 200 A B M	190	200	6.5	10.0	18	53.8	170	134	3692	430	18.1	1336	203.8
	200	200	9.0	15.0	18	78.1	170	134	5696	643	24.8	2003	305.8
	220	206	15.0	25.0	18	131.3	170	134	10640	1135	41.0	3651	543.2
HE 220 A B M	210	220	7.0	11.0	18	64.3	188	152	5410	569	20.7	1955	270.6
	220	220	9.5	16.0	18	91.0	188	152	8091	827	27.9	2843	393.9
	240	226	15.5	26.0	18	149.4	188	152	14600	1419	45.3	5012	678.6
HE 240 A B M	230	240	7.5	12.0	21	76.8	206	164	7763	745	25.2	2769	351.7
	240	240	10.0	17.0	21	106.0	206	164	11260	1053	33.2	3923	498.4
	270	248	18.0	32.0	21	199.6	206	164	24290	2117	60.1	8153	1006.0
HE 260 A B M	250	260	7.5	12.5	24	86.8	225	177	10450	920	28.8	3668	430.2
	260	260	10.0	17.5	24	118.4	225	177	14920	1283	37.6	5135	602.2
	290	268	18.0	32.5	24	219.6	225	177	31310	2524	66.9	10450	1192.0
HE 280 A B M	270	280	8.0	13.0	24	97.3	244	196	13670	1112	31.7	4763	518.1
	280	280	10.5	18.0	24	131.4	244	196	19270	1534	41.1	6595	717.6
	310	288	18.5	33.0	24	240.2	244	196	39550	2966	72.0	13160	1397.0
HE 300 A B M	290	300	8.5	14.0	27	112.5	262	208	18260	1383	37.3	6310	641.2
	300	300	11.0	19.0	27	149.1	262	208	25170	1869	47.4	8563	870.1
	340	310	21.0	39.0	27	303.1	262	208	59200	4078	90.5	19400	1913.0
HE 320 A B M	310	300	9.0	15.5	27	124.4	279	225	22930	1628	41.1	6985	709.7
	320	300	11.5	20.5	27	161.3	279	225	30820	2149	51.8	9239	939.1
	359	309	21.0	40.0	27	312.0	279	225	68130	4435	94.9	19710	1951.0
HE 340 A B M	330	300	9.5	16.5	27	133.5	297	243	27690	1850	45.0	7436	755.9
	340	300	12.0	21.5	27	170.9	297	243	36660	2408	56.1	9690	985.7
	377	309	21.0	40.0	27	315.8	297	243	76370	4718	98.6	19710	1953.0
HE 360 A B M	350	300	10.0	17.5	27	142.8	315	261	33090	2088	49.0	7887	802.3
	360	300	12.5	22.5	27	180.6	315	261	43190	2683	60.6	10140	1032.0
	395	308	21.0	40.0	27	318.8	315	261	84870	4989	102.4	19520	1942.0
HE 400 A B M	390	300	11.0	19.0	27	159.0	352	298	45070	2562	57.3	8564	872.9
	400	300	13.5	24.0	27	197.8	352	298	57680	3232	70.0	10820	1104.0
	432	307	21.0	40.0	27	325.8	352	298	104100	5571	110.2	19340	1934.0
HE 450 A B M	440	300	11.5	21.0	27	178.0	398	344	63720	3216	65.8	9465	965.5
	450	300	14.0	26.0	27	218.0	398	344	79890	3982	79.7	11720	1198.0
	478	307	21.0	40.0	27	335.4	398	344	131500	6331	119.8	19340	1939.0
HE 500 A B M	490	300	12.0	23.0	27	197.5	444	390	86970	3949	74.7	10370	1059.0
	500	300	14.5	28.0	27	238.6	444	390	107200	4815	89.8	12620	1292.0
	524	306	21.0	40.0	27	344.3	444	390	161900	7094	129.5	19150	1932.0
HE 550 A B M	540	300	12.5	24.0	27	211.8	492	438	111900	4622	83.7	10820	1107.0
	550	300	15.0	29.0	27	254.1	492	438	136700	5591	100.1	13080	1341.0
	572	306	21.0	40.0	27	354.4	492	438	198000	7933	139.6	19160	1937.0
HE 600 A B M	590	300	13.0	25.0	27	226.5	540	486	141200	5350	93.2	11270	1156.0
	600	300	15.5	30.0	27	270.0	540	486	171000	6425	110.8	13530	1391.0
	620	305	21.0	40.0	27	363.7	540	486	237400	8772	149.7	18980	1930.0

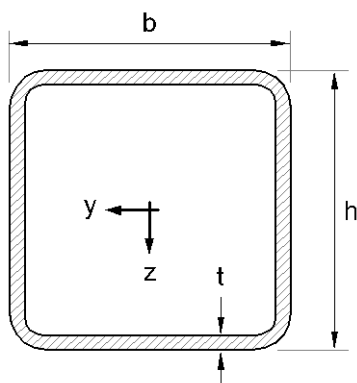


RHS – Rectangular Hollow Section								
Designação $h \times b$ mm	Dimensões		Propriedades da Secção				Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas	
	t mm	A mm^2 $\times 10^2$	I_y mm^4 $\times 10^4$	$W_{pl,y}$ mm^3 $\times 10^3$	I_z mm^4 $\times 10^4$	$W_{pl,z}$ mm^3 $\times 10^3$	b/t	d/t
50x30	2.5	3.7	11.8	5.9	5.2	4.1	9.0	17.0
	3.0	4.3	13.6	6.9	5.9	4.8	7.0	13.7
	3.2	4.6	14.2	7.3	6.2	5.0	6.4	12.6
	3.6	5.1	15.4	7.9	6.7	5.5	5.3	10.9
	4.0	5.6	16.5	8.6	7.1	5.9	4.5	9.5
	5.0	6.7	18.7	10.0	7.9	6.8	3.0	7.0
60x40	2.5	4.7	22.8	9.3	12.1	7.0	13.0	21.0
	3.0	5.5	26.5	10.9	13.9	8.2	10.3	17.0
	3.2	5.9	27.8	11.5	14.6	8.6	9.5	15.7
	3.6	6.5	30.4	12.7	15.9	9.5	8.1	13.7
	4.0	7.2	32.8	13.8	17.0	10.3	7.0	12.0
	5.0	8.7	38.1	16.4	19.5	12.2	5.0	9.0
	6.0	10.2	42.3	18.6	21.4	13.7	3.7	7.0
	6.3	10.6	43.4	19.2	21.9	14.2	3.4	6.5
80x40	3.0	6.7	54.2	17.1	18.0	10.4	10.3	23.7
	3.2	7.2	57.2	18.0	18.9	11.0	9.5	22.0
	3.6	8.0	62.8	20.0	20.6	12.1	8.1	19.2
	4.0	8.8	68.2	21.8	22.2	13.2	7.0	17.0
	5.0	10.7	80.3	26.1	25.7	15.7	5.0	13.0
	6.0	12.6	90.5	30.0	28.5	17.8	3.7	10.3
	6.3	13.1	93.3	31.1	29.2	18.4	3.4	9.7
	8.0	16.0	106.0	36.5	32.1	21.2	2.0	7.0
76.2x50.8	3.0	7.2	56.7	18.2	30.0	13.7	13.9	22.4
	3.2	7.6	59.8	19.2	31.6	14.5	12.9	20.8
	3.6	8.5	65.8	21.3	34.6	16.0	11.1	18.2
	4.0	9.4	71.5	23.3	37.5	17.5	9.7	16.1
	5.0	11.4	84.4	28.0	43.9	20.9	7.2	12.2
	6.0	13.4	95.6	32.2	49.2	23.9	5.5	9.7
	6.3	14.0	98.6	33.4	50.6	24.8	5.1	9.1
	8.0	17.1	113.0	39.4	57.0	29.0	3.4	6.5

RHS – Rectangular Hollow Section								
Designação <i>h × b</i> mm	Dimensões		Propriedades da Secção				Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas	
	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I_y</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,y}</i> mm ³ x10 ³	<i>I_z</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,z}</i> mm ³ x10 ³	<i>b/t</i>	<i>d/t</i>
90x50	3.0	7.9	84	23.2	34	15.3	13.7	27.0
	3.2	8.4	89	24.6	35	16.2	12.6	25.1
	3.6	9.4	98	27.2	39	18.0	10.9	22.0
	4.0	10.4	107	29.8	42	19.6	9.5	19.5
	5.0	12.7	127	36.0	49	23.5	7.0	15.0
	6.0	15.0	145	41.6	55	27.0	5.3	12.0
	6.3	15.6	150	43.2	57	28.0	4.9	11.3
	8.0	19.2	174	51.4	65	32.9	3.3	8.3
100x50	3.0	8.5	110	27.3	37	16.8	13.7	30.3
	3.2	9.1	116	28.9	39	17.7	12.6	28.3
	3.6	10.1	128	32.1	43	19.6	10.9	24.8
	4.0	11.2	140	35.2	46	21.5	9.5	22.0
	5.0	13.7	167	42.6	54	25.8	7.0	17.0
	6.0	16.2	190	49.4	61	29.7	5.3	13.7
	6.3	16.9	197	51.3	63	30.8	4.9	12.9
	8.0	20.8	230	61.4	72	36.3	3.3	9.5
100x60	3.0	9.1	124	30.2	56	21.2	17.0	30.3
	3.2	9.7	131	32.0	59	22.4	15.7	28.3
	3.6	10.9	145	35.6	65	24.9	13.7	24.8
	4.0	12.0	158	39.1	71	27.3	12.0	22.0
	5.0	14.7	189	47.4	84	32.9	9.0	17.0
	6.0	17.4	217	55.1	95	38.1	7.0	13.7
	6.3	18.1	225	57.3	98	39.5	6.5	12.9
	8.0	22.4	264	68.7	113	47.1	4.5	9.5
120x60	3.6	12.3	227	47.2	76	28.9	13.7	30.3
	4.0	13.6	249	51.9	83	31.7	12.0	27.0
	5.0	16.7	299	63.1	99	38.4	9.0	21.0
	6.0	19.8	345	73.6	113	44.5	7.0	17.0
	6.3	20.7	358	76.7	116	46.3	6.5	16.0
	8.0	25.6	425	92.7	135	55.4	4.5	12.0
120x80	3.6	13.7	276	55.6	147	42.0	19.2	30.3
	4.0	15.2	303	61.2	161	46.1	17.0	27.0
	5.0	18.7	365	74.6	193	56.1	13.0	21.0
	6.0	22.2	423	87.3	222	65.5	10.3	17.0
	6.3	23.2	440	91.0	230	68.2	9.7	16.0
	8.0	28.8	525	111.0	273	82.6	7.0	12.0
	10.0	34.9	609	131.0	313	97.3	5.0	9.0
150x100	4.0	19.2	607	97.4	324	73.6	22.0	34.5
	5.0	23.7	739	119.0	392	90.1	17.0	27.0
	6.0	28.2	862	141.0	456	106.0	13.7	22.0
	6.3	29.5	898	147.0	474	110.0	12.9	20.8
	8.0	36.8	1087	180.0	569	135.0	9.5	15.8
	10.0	44.9	1282	216.0	665	161.0	7.0	12.0
	12.0	52.7	1450	249.0	745	185.0	5.3	9.5
	12.5	54.6	1488	256.0	763	190.0	5.0	9.0

RHS – Rectangular Hollow Section								
Designação <i>h × b</i> mm	Dimensões		Propriedades da Secção				Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas	
	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I_y</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,y}</i> mm ³ x10 ³	<i>I_z</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl,z}</i> mm ³ x10 ³	<i>b/t</i>	<i>d/t</i>
160x80	4.0	18.4	612	95	207	58	17.0	37.0
	5.0	22.7	744	116	249	71	13.0	29.0
	6.0	27.0	868	136	288	83	10.3	23.7
	6.3	28.2	903	142	299	87	9.7	22.4
	8.0	35.2	1091	175	356	106	7.0	17.0
	10.0	42.9	1284	209	411	125	5.0	13.0
	12.0	50.3	1449	240	455	142	3.7	10.3
	12.5	52.1	1485	247	465	146	3.4	9.8
200x100	5.0	28.7	1495	185	505	114	17.0	37.0
	6.0	34.2	1754	218	589	134	13.7	30.3
	6.3	35.8	1829	228	613	140	12.9	28.7
	8.0	44.8	2234	282	739	172	9.5	22.0
	10.0	54.9	2664	341	869	206	7.0	17.0
	12.0	64.7	3047	395	979	237	5.3	13.7
	12.5	67.1	3136	408	1004	245	5.0	13.0
	16.0	83.0	3678	491	1147	290	3.3	9.5
200x120	5.0	30.7	1685	205	762	144	21.0	37.0
	6.3	38.3	2065	253	929	177	16.1	28.8
	8.0	48.0	2529	313	1128	218	12.0	22.0
	10.0	58.9	3026	379	1337	263	9.0	17.0
	12.5	72.1	3576	455	1562	314	6.6	13.0
	16.0	89.4	4221	550	1813	377	4.5	9.5
200x150	5.0	33.7	1970	234	1265	192	27.0	37.0
	6.3	42.1	2420	289	1549	237	20.8	28.8
	8.0	52.8	2971	359	1894	294	15.8	22.0
	10.0	64.9	3568	436	2264	356	12.0	17.0
	12.5	79.6	4236	525	2673	428	9.0	13.0
	16.0	99.0	5036	638	3152	518	6.4	9.5
250x100	5.0	33.7	2610	263	618	138	17.0	47.0
	6.3	42.1	3207	326	751	169	12.9	36.7
	8.0	52.8	3940	404	909	209	9.5	28.3
	10.0	64.9	4733	491	1072	251	7.0	22.0
	12.5	79.6	5622	592	1245	299	5.0	17.0
	16.0	99.0	6686	719	1433	358	3.3	12.6
250x150	5.0	38.7	3360	324	1527	228	27.0	47.0
	6.0	46.2	3965	385	1796	270	22.0	38.7
	6.3	48.4	4143	402	1874	283	20.8	36.7
	8.0	60.8	5111	501	2298	350	15.8	28.3
	10.0	74.9	6174	611	2755	426	12.0	22.0
	12.0	88.7	7154	715	3168	497	9.5	17.8
	12.5	92.1	7387	740	3265	514	9.0	17.0
	16.0	115.0	8879	906	3873	625	6.4	12.6

RHS – Rectangular Hollow Section								
Designação $h \times b$ mm	Dimensões		Propriedades da Secção				Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas	
	t mm	A mm ² x10 ²	I_y mm ⁴ x10 ⁴	$W_{pl,y}$ mm ³ x10 ³	I_z mm ⁴ x10 ⁴	$W_{pl,z}$ mm ³ x10 ³	b/t	d/t
300x200	5.0	48.7	6322	501	3396	380	37.0	57.0
	6.0	58.2	7486	596	4013	451	30.3	47.0
	6.3	61.0	7829	624	4193	472	28.7	44.6
	8.0	76.8	9717	779	5184	589	22.0	34.5
	10.0	94.9	11820	956	6278	721	17.0	27.0
	12.0	113.0	13800	1124	7294	847	13.7	22.0
	12.5	117.0	14270	1165	7537	877	13.0	21.0
	16.0	147.0	17390	1441	9109	1080	9.5	15.8
400x200	6.0	70.2	15000	917	5142	568	30.3	63.7
	6.3	73.6	15700	960	5376	594	28.7	60.5
	8.0	92.8	19560	1203	6660	743	22.0	47.0
	10.0	115.0	23910	1480	8084	911	17.0	37.0
	12.0	137.0	28060	1748	9418	1072	13.7	30.3
	12.5	142.0	29060	1813	9738	1111	13.0	29.0
	16.0	179.0	35740	2256	11820	1374	9.5	22.0
450x250	8.0	109.0	30080	1622	12140	1081	28.3	53.3
	10.0	135.0	36890	2000	14820	1331	22.0	42.0
	12.0	161.0	43430	2367	17360	1572	17.8	34.5
	12.5	167.0	45030	2458	17970	1631	17.0	33.0
	16.0	211.0	55710	3070	22040	2029	12.6	25.1
500x300	8.0	125.0	43730	2100	19950	1480	34.5	59.5
	10.0	155.0	53760	2595	24440	1826	27.0	47.0
	12.0	185.0	63450	3077	28740	2161	22.0	38.7
	12.5	192.0	65810	3196	29780	2244	21.0	37.0
	16.0	243.0	81780	4005	36770	2804	15.8	28.3
	20.0	300.0	98780	4885	44080	3408	12.0	22.0



SHS – Square Hollow Section					
Designação $h \times b$ mm	Dimensões		Propriedades da Secção		Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas
	t mm	A mm ² $\times 10^2$	I mm ⁴ $\times 10^4$	W_{pl} mm ³ $\times 10^3$	$b/t = d/t$
40x40	2.5	3.68	8.5	5.1	13.0
	3.0	4.34	9.8	6.0	10.3
	3.2	4.60	10.2	6.3	9.5
	3.6	5.10	11.1	6.9	8.1
	4.0	5.59	11.8	7.4	7.0
	5.0	6.73	13.4	8.7	5.0
50x50	2.5	4.68	17.5	8.3	17.0
	3.0	5.54	20.2	9.7	13.7
	3.2	5.88	21.2	10.2	12.6
	3.6	6.54	23.2	11.3	10.9
	4.0	7.19	25.0	12.3	9.5
	5.0	8.73	28.9	14.5	7.0
	6.0	10.20	32.0	16.5	5.3
	6.3	10.60	32.8	17.0	4.9
60x60	3.0	6.74	36.2	14.3	17.0
	3.2	7.16	38.2	15.2	15.7
	3.6	7.98	41.9	16.8	13.7
	4.0	8.79	45.4	18.3	12.0
	5.0	10.70	53.3	21.9	9.0
	6.0	12.60	59.9	25.1	7.0
	6.3	13.10	61.6	26.0	6.5
	8.0	16.00	69.7	30.4	4.5
70x70	3.0	7.94	59.0	19.9	20.3
	3.2	8.44	62.3	21.0	18.9
	3.6	9.42	68.6	23.3	16.4
	4.0	10.40	74.7	25.5	14.5
	5.0	12.70	88.5	30.8	11.0
	6.0	15.00	101.0	35.5	8.7
	6.3	15.60	104.0	36.9	8.1
	8.0	19.20	120.0	43.8	5.8

SHS – Square Hollow Section					
Designação $h \times b$ mm	Dimensões		Propriedades da Secção		Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas
	t mm	A mm ² x10 ²	I mm ⁴ x10 ⁴	W_{pl} mm ³ x10 ³	$b/t = d/t$
80x80	3.2	9.7	95	27.9	22.0
	3.6	10.9	105	31.0	19.2
	4.0	12.0	114	34.0	17.0
	5.0	14.7	137	41.1	13.0
	6.0	17.4	156	47.8	10.3
	6.3	18.1	162	49.7	9.7
	8.0	22.4	189	59.5	7.0
90x90	3.6	12.3	152	39.7	22.0
	4.0	13.6	166	43.6	19.5
	5.0	16.7	200	53.0	15.0
	6.0	19.8	230	61.8	12.0
	6.3	20.7	238	64.3	11.3
	8.0	25.6	281	77.6	8.3
100x100	3.6	13.7	212	49.5	24.8
	4.0	15.2	232	54.4	22.0
	5.0	18.7	279	66.4	17.0
	6.0	22.2	323	77.6	13.7
	6.3	23.2	336	80.9	12.9
	8.0	28.8	400	98.2	9.5
	10.0	34.9	462	116.0	7.0
120x120	4.0	18.4	410	79.7	27.0
	5.0	22.7	498	97.6	21.0
	6.0	27.0	579	115.0	17.0
	6.3	28.2	603	120.0	16.0
	8.0	35.2	726	146.0	12.0
	10.0	42.9	852	175.0	9.0
	12.0	50.3	958	201.0	7.0
	12.5	52.1	982	207.0	6.6
140x140	5.0	26.7	807	135.0	25.0
	6.0	31.8	944	159.0	20.3
	6.3	33.3	984	166.0	19.2
	8.0	41.6	1195	204.0	14.5
	10.0	50.9	1416	246.0	11.0
	12.0	59.9	1609	284.0	8.7
	12.5	62.1	1653	293.0	8.2
150x150	5.0	28.7	1002	156.0	27.0
	6.0	34.2	1174	184.0	22.0
	6.3	35.8	1223	192.0	20.8
	8.0	44.8	1491	237.0	15.8
	10.0	54.9	1773	286.0	12.0
	12.0	64.7	2023	331.0	9.5
	12.5	67.1	2080	342.0	9.0
	16.0	83.0	2430	411.0	6.4

SHS – Square Hollow Section					
Designação $h \times b$ mm	Dimensões		Propriedades da Secção		Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas
	t mm	A mm ² $\times 10^2$	I mm ⁴ $\times 10^4$	W_{pl} mm ³ $\times 10^3$	$b/t = d/t$
160x160	5.0	30.7	1225	178	29.0
	6.0	36.6	1437	210	23.7
	6.3	38.3	1499	220	22.4
	8.0	48.0	1831	272	17.0
	10.0	58.9	2186	329	13.0
	12.0	69.5	2502	382	10.3
	12.5	72.1	2576	395	9.8
	16.0	89.4	3028	476	7.0
180x180	5.0	34.7	1765	227	33.0
	6.0	41.4	2077	269	27.0
	6.3	43.3	2168	281	25.6
	8.0	54.4	2661	349	19.5
	10.0	66.9	3193	424	15.0
	12.0	79.1	3677	494	12.0
	12.5	82.1	3790	511	11.4
	16.0	102.0	4504	621	8.25
200x200	5.0	38.7	2445	283	37.0
	6.0	46.2	2883	335	30.3
	6.3	48.4	3011	350	28.7
	8.0	60.8	3709	436	22.0
	10.0	74.9	4471	531	17.0
	12.0	88.7	5171	621	13.7
	12.5	92.1	5336	643	13.0
	16.0	115.0	6394	785	9.5
250x250	5.0	48.7	4861	447	47.0
	6.0	58.2	5752	531	38.7
	6.3	61.0	6014	556	36.7
	8.0	76.8	7455	694	28.3
	10.0	94.9	9055	851	22.0
	12.0	113.0	10560	1000	17.8
	12.5	117.0	10920	1037	17.0
	16.0	147.0	13270	1280	12.6
300x300	6.0	70.2	10080	772	47.0
	6.3	73.6	10550	809	44.6
	8.0	92.8	13130	1013	34.5
	10.0	115.0	16030	1246	27.0
	12.0	137.0	18780	1470	22.0
	12.5	142.0	19440	1525	21.0
	16.0	179.0	23850	1895	15.8

SHS – Square Hollow Section					
Designação <i>h × b</i> mm	Dimensões		Propriedades da Secção		Esbelteza – Encurvadura Local das Chapas
	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl}</i> mm ³ x10 ³	<i>b/t = d/t</i>
350x350	8.0	109	21130	1392	40.8
	10.0	135	25880	1715	32.0
	12.0	161	30430	2030	26.2
	12.5	167	31540	2107	25.0
	16.0	211	38940	2630	18.9
400x400	8.0	125	31860	1830	47.0
	10.0	155	39130	2260	37.0
	12.0	185	46130	2679	30.3
	12.5	192	47840	2782	29.0
	16.0	243	59340	3484	22.0
	20.0	300	71530	4247	17.0

B.2 SECÇÕES CIRCULARES

B.2.1 ÁREA E INÉRCIA

Betão

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_{INT}^2$$

$$I_c = \frac{\pi}{64} D_{INT}^4$$

Aço estrutural

$$A_a = \frac{\pi}{4} (D_{EXT}^2 - D_{INT}^2)$$

$$I_a = \frac{\pi}{64} (D_{EXT}^4 - D_{INT}^4)$$

Armaduras longitudinais

$$A_s = n \times \frac{\pi}{4} \phi_{real/ficticio}^2$$

$$I_a = n \times \frac{\pi}{64} \phi_{real}^4 + \frac{\pi}{4} \phi_{real}^2 \sum_{i=1}^n z_i^2 \approx \frac{\pi}{4} \phi_{real}^2 \sum_{i=1}^n z_i^2$$

Em que,

n – nº total de varões.

$\phi_{real/ficticio}$ – diâmetro real/fictício dos varões.

z_i – distância vertical do centro do varão ao centro da secção.

B.2.2 ÁREA DE CORTE

De acordo com a EN1993-1-1, artigo 6.2.6, a área de corte, A_v , é determinada através da seguinte expressão:

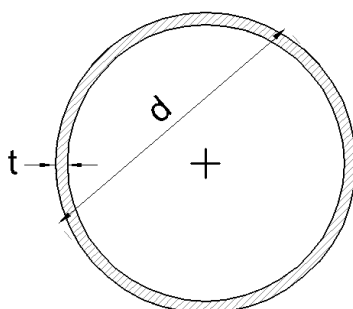
Secções circulares tubulares de espessura uniforme

$$A_v = \frac{2 A}{\pi}$$

Em que,

A – área da secção transversal do tubo circular de aço.

B.2.3 PERFIS COMERCIAIS – DIMENSÕES E PROPRIEDADES RELEVANTES PARA O CÁLCULO



CHS – Circular Hollow Section					
Dimensões		Propriedades da Secção			Encurvadura Local da Chapa
<i>d</i> mm	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl}</i> mm ³ x10 ³	<i>d/t</i>
21.3	3.2	1.82	0.768	1.06	6.7
26.9	3.2	2.38	1.7	1.81	8.4
33.7	3.0	2.89	3.4	2.84	11.2
	3.2	3.07	3.6	2.99	10.5
	3.6	3.40	3.9	3.28	9.4
	4.0	3.73	4.2	3.55	8.4
42.4	3.0	3.71	7.3	4.67	14.1
	3.2	3.94	7.6	4.93	13.3
	3.6	4.39	8.3	5.44	11.8
48.3	4.0	4.83	9.0	5.92	10.6
	2.5	3.60	9.5	5.25	19.3
	3.0	4.27	11.0	6.17	16.1
	3.2	4.53	11.6	6.52	15.1
	3.6	5.06	12.7	7.21	13.4
60.3	4.0	5.57	13.8	7.87	12.1
	5.0	6.80	16.2	9.42	9.7
	2.5	4.54	19.0	8.36	24.1
	3.0	5.40	22.2	9.86	20.1
	3.2	5.74	23.5	10.4	18.8
	3.6	6.41	25.9	11.6	16.8
76.1	4.0	7.07	28.2	12.7	15.1
	5.0	8.69	33.5	15.3	12.1
	2.5	5.78	39.2	13.5	30.4
	3.0	6.89	46.1	16	25.4
	3.2	7.33	48.8	17	23.8
	3.6	8.20	54.0	18.9	21.1
	4.0	9.06	59.1	20.8	19.0
	5.0	11.20	70.9	25.3	15.2
6.0	13.20	81.8	29.6	12.7	
6.3	13.80	84.8	30.8	12.1	

CHS – Circular Hollow Section						
Dimensões		Propriedades da Secção			Encurvadura Local da Chapa	
<i>d</i> mm	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl}</i> mm ³ x10 ³	<i>d/t</i>	
88.9	2.5	6.8	63.4	18.7	35.6	
	3.0	8.1	74.8	22.1	29.6	
	3.2	8.6	79.2	23.5	27.8	
	3.6	9.7	87.9	26.2	24.7	
	4.0	10.7	96.3	28.9	22.2	
	5.0	13.2	116	35.2	17.8	
	6.0	15.6	135	41.3	14.8	
	6.3	16.3	140	43.1	14.1	
114.3	3.0	10.5	163	37.2	38.1	
	3.2	11.2	172	39.5	35.7	
	3.6	12.5	192	44.1	31.8	
	4.0	13.9	211	48.7	28.6	
	5.0	17.2	257	59.8	22.9	
	6.0	20.4	300	70.4	19.1	
	6.3	21.4	313	73.6	18.1	
139.7	3.2	13.7	320	59.6	43.7	
	3.6	15.4	357	66.7	38.8	
	4.0	17.1	393	73.7	34.9	
	5.0	21.2	481	90.8	27.9	
	6.0	25.2	564	107.0	23.3	
	6.3	26.4	589	112.0	22.2	
	8.0	33.1	720	139.0	17.5	
	10.0	40.7	862	169.0	14.0	
	168.3	3.2	16.6	566	87.2	52.6
		3.6	18.6	632	97.7	46.8
4.0		20.6	697	108.0	42.1	
5.0		25.7	856	133.0	33.7	
6.0		30.6	1009	158.0	28.1	
6.3		32.1	1053	165.0	26.7	
8.0		40.3	1297	206.0	21.0	
10.0		49.7	1564	251.0	16.8	
12.0		58.9	1810	294.0	14.0	
12.5		61.2	1868	304.0	13.5	

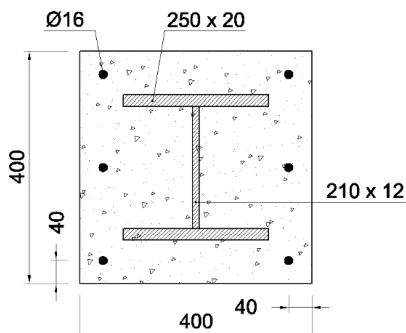
CHS – Circular Hollow Section					
Dimensões		Propriedades da Secção			Encurvadura Local da Chapa
<i>d</i> mm	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl}</i> mm ³ x10 ³	<i>d/t</i>
193.7	5.0	29.6	1320	178	38.7
	6.0	35.4	1560	211	32.3
	6.3	37.1	1630	221	30.7
	8.0	46.7	2016	276	24.2
	10.0	57.7	2442	338	19.4
	12.0	68.5	2839	397	16.1
	12.5	71.2	2934	411	15.5
219.1	5.0	33.6	1928	229	43.8
	6.0	40.2	2282	273	36.5
	6.3	42.1	2386	285	34.8
	8.0	53.1	2960	357	27.4
	10.0	65.7	3598	438	21.9
	12.0	78.1	4200	515	18.3
	12.5	81.1	4345	534	17.5
	16.0	102	5297	661	13.7
244.5	5.0	37.6	2699	287	48.9
	6.0	45.0	3199	341	40.8
	6.3	47.1	3346	358	38.8
	8.0	59.4	4160	448	30.6
	10.0	73.7	5073	550	24.5
	12.0	87.7	5938	649	20.4
	12.5	91.1	6147	673	19.6
	16.0	115.0	7533	837	15.3
273	5.0	42.1	3781	359	54.6
	6.0	50.3	4487	428	45.5
	6.3	52.8	4696	448	43.3
	8.0	66.6	5852	562	34.1
	10.0	82.6	7154	692	27.3
	12.0	98.4	8396	818	22.8
	12.5	102.0	8697	849	21.8
323.9	5.0	50.1	6369	509	64.8
	6.0	59.9	7572	606	54
	6.3	62.9	7929	636	51.4
	8.0	79.4	9910	799	40.5
	10.0	98.6	12160	986	32.4
	12.0	118.0	14320	1168	27
	12.5	122.0	14850	1213	25.9
	16.0	155.0	18390	1518	20.2
355.6	6.3	69.1	10550	769	56.4
	8.0	87.4	13200	967	44.5
	10.0	109.0	16220	1195	35.6
	12.0	130.0	19140	1417	29.6
	12.5	135.0	19850	1472	28.4
	16.0	171.0	24660	1847	22.2

CHS – Circular Hollow Section					
Dimensões		Propriedades da Secção			Encurvadura Local da Chapa
<i>d</i> mm	<i>t</i> mm	<i>A</i> mm ² x10 ²	<i>I</i> mm ⁴ x10 ⁴	<i>W_{pl}</i> mm ³ x10 ³	<i>d/t</i>
406.4	6.3	79	15850	1009	64.5
	8.0	100	19870	1270	50.8
	10.0	125	24480	1572	40.6
	12.0	149	28940	1867	33.9
	12.5	155	30030	1940	32.5
	16.0	196	37450	2440	25.4
	457	6.3	89	22650	1280	72.5
8.0		113	28450	1613	57.1
10.0		140	35090	1998	45.7
12.0		168	41560	2377	38.1
12.5		175	43140	2470	36.6
16.0		222	53960	3113	28.6
508	6.3	99	31250	1586	80.6
	8.0	126	39280	2000	63.5
	10.0	156	48520	2480	50.8
	12.0	187	57540	2953	42.3
	12.5	195	59760	3070	40.6
16.0	247	74910	3874	31.8	

Anexo C – EXEMPLOS DE CÁLCULO

C.1 SECÇÃO RECTANGULAR

Em seguida apresenta-se os relatórios exportados do *toolkit* referentes ao enunciado do exemplo apresentado no ponto 8.1.



RESUMO da verificação da segurança da coluna mista		rácio = 0.943
<p>1 - Verificação das disposições construtivas e do campo de aplicação --- Verificado.</p> <p><i>Área de armadura longitudinal dentro dos limites.</i> <i>Elemento estrutural misto (aço-betão).</i> <i>Relação altura/largura dentro dos limites. Evitada possível encurvadura lateral da coluna.</i> <i>Verifica o recobrimento mínimo dos banzos da secção de aço.</i> <i>Verifica o recobrimento máximo do perfil de aço.</i></p>		
2 - Verificação da segurança - Compressão		0.636
<p><i>$\chi = 0.844$, condicionado pela encurvadura em torno do eixo z-z.</i></p>		
3 - Influência do Esforço Transverso		Sem influência
4 - Verificação da segurança - Flexão Composta N-My		0.604
<p><i>Análise de 1ª ordem ($\alpha_{cr,y} = 11.33$)</i></p>		
5 - Verificação da segurança - Flexão Composta N-Mz		0.473
<p><i>Análise de 2ª ordem ($\alpha_{cr,z} = 7.34$)</i></p>		
6 - Verificação da segurança - Flexão Desviada Composta		0.943
<p><i>Condicionado pela rotura em torno de z-z</i></p>		

Verificação da segurança em relação aos estados limites últimos de colunas mistas (EN1994-1-1)

Materiais:

Aço estrutural:	S355	$f_{yd} = 355 \text{ MPa}$	$E_a = 210 \text{ GPa}$
Betão:	C30/37	$f_{cd} = 20.0 \text{ MPa}$	$E_{cm} = 33 \text{ GPa}$
Aço das armaduras:	A500NR	$f_{sd} = 435 \text{ MPa}$	$E_s = 210 \text{ GPa}$

Geometria:

$$L = 3.0 \text{ m}$$

$$(6 \text{ } \phi 16)$$

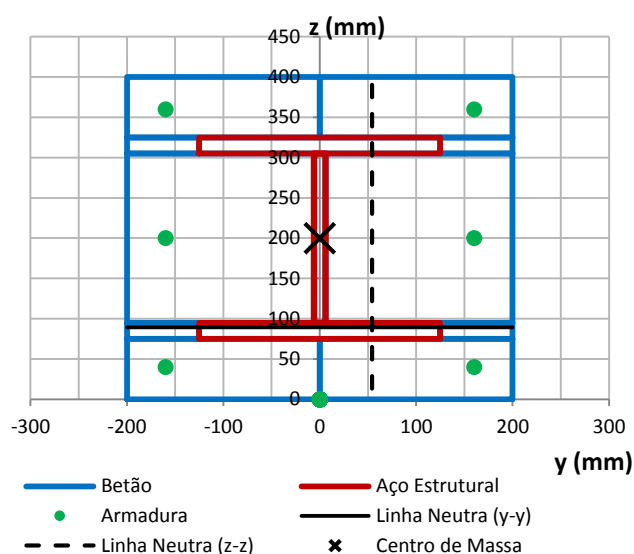
$$A_s = 1\,206 \text{ mm}^2 \quad (\rho = 0.8\%)$$

$$A_a = 12\,520 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 146\,274 \text{ mm}^2$$

Tipologia da secção:

Perfil em I totalmente betonado
(Secção soldada)



Ações:

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$M_{1,y,Ed} = 210.0 \text{ kN.m}$$

$$M_{1,z,Ed} = 90.0 \text{ kN.m}$$

$$N_{G,Ed} = 2\,800.0 \text{ kN}$$

$$M_{2,y,Ed} = 0.0 \text{ kN.m}$$

$$M_{2,z,Ed} = 0.0 \text{ kN.m}$$

$$N_{Q,Ed} = 1\,200.0 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 70.0 \text{ kN}$$

$$V_{y,Ed} = 30.0 \text{ kN}$$

Verificação das disposições construtivas e do campo de aplicação:

Verificado.

- Área de armadura longitudinal:

[6.7.3.1(3)]

$$A_{s,max} = 6\% A_c = 88.49 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = 0.03\% A_c = 4.42 \text{ cm}^2$$

Área de armadura longitudinal dentro dos limites.

- Relação da contribuição da secção de aço, δ , para a resistência da secção transversal:

$$\begin{aligned}
 N_{pl,Rd} &= A_c \alpha_{cc} f_{cd} + A_a f_y + A_s f_{sd} \\
 &= 2486.7 + 4444.6 + 524.8 = 7456 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{cc} &= 0.85 \\
 &\text{(Sem confinamento)}
 \end{aligned}$$

[6.30]

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{4444.6}{7456.0} = 0.59 \quad [6.38]$$

0.2 ≤ δ ≤ 0.9 Elemento estrutural misto (aço-betão).

- Relação entre largura e altura: [6.7.3.1(4)]

$h_c = 400 \text{ mm}$ $0.2 \leq h_c / b_c \leq 5$ $h_c / b_c = 1$
 $b_c = 400 \text{ mm}$ Relação altura/largura dentro dos limites. Evitada possível encurvadura lateral da coluna.

- Recobrimento dos banzos e da secção de aço: [6.7.3.1(2)]

$c_z = 75 \text{ mm}$ $c_y = 75 \text{ mm}$

Recobrimento mínimo dos banzos, para que a encurvadura local possa ser desprezada:

$$c_z \geq \max \{ 40 ; b / 6 \} = \max \{ 40 ; 250 / 6 \} = 41.7 \text{ mm}$$

Verifica o recobrimento mínimo dos banzos da secção de aço.

Recobrimento máximo do perfil de aço a considerar nos cálculos:

$c_z \leq 0.3 h = 75 \text{ mm}$
 $c_y \leq 0.4 b = 100 \text{ mm}$

Verifica o recobrimento máximo do perfil de aço.

Verificação da segurança - Compressão	rácio = 0.636
<i>Verifica a segurança da coluna mista à compressão.</i>	
<i>χ = 0.844, condicionado pela encurvadura em torno do eixo z-z.</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Módulo de elasticidade efectivo do betão: 	
$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right) \varphi_t} = 12.0 \text{ GPa}$	<div style="text-align: right;">[6.41]</div> <div style="text-align: right;">[EN 1992-1-1, 3.1.4]</div>
<div style="text-align: right; margin-right: 50px;">$\varphi_t = 2.5$</div>	

A - Propriedades da coluna mista para encurvadura em torno do eixo de maior inércia (y-y)

- Rigidez de flexão efectiva:

$$(EI)_{\text{eff},y} = E_a I_{a,y} + E_s I_{s,y} + K_e E_c \text{eff} I_{c,y} \quad [6.40]$$

$$= 48\,301.4 \quad \text{kN.m}^2$$

$$I_{a,y} = 1.42 \text{ E}+08 \quad \text{mm}^4$$

$$I_{s,y} = 2.06 \text{ E}+07 \quad \text{mm}^4$$

$$K_e = 0.6$$

[6.7.3.3(3)]

$$I_{c,y} = 1.97 \text{ E}+09 \quad \text{mm}^4$$

- Valor crítico do esforço normal:

$$N_{\text{cr},y} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{\text{eff},y}}{L^2}$$

$$= 52\,968.4 \text{ kN}$$

- Valor característico do esforço normal resistente:

$$N_{\text{pl,Rk}} = \frac{A_c \alpha_{\text{cc}} f_{\text{ck}} + A_a f_y + A_s f_{\text{sk}}}{\alpha_{\text{cc}}} \quad [6.30]$$

$$= \frac{3730 + 4444.6 + 603.2}{0.85}$$

(Sem confinamento)

$$= 8\,777.8 \text{ kN}$$

- Determinação da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{\text{pl,Rk}}}{N_{\text{cr},y}}} \quad [6.39]$$

$$= 0.407$$

Valor inferior a 2,0. Verifica o campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

- Coeficiente de redução:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \leq 1 \quad \text{EN 1993-1-1} \quad [6.49]$$

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$$

curva de encurvadura: b

[Quadro 6.5]

$$\alpha = 0.34$$

[Quadro 6.1]

$$\phi_y = 0.618$$

$$\chi_y = 0.923 \leq 1$$

B - Propriedades da coluna mista para encurvadura em torno do eixo de menor inércia (z-z)

- Rigidez de flexão efectiva:

$$(EI)_{\text{eff},z} = E_a I_{a,z} + E_s I_{s,z} + K_e E_{c,\text{eff}} I_{c,z} \quad [6.40]$$

$$= 32\,191.7 \quad \text{kN.m}^2$$

$$I_{a,z} = 5.21 \text{ E}+07 \quad \text{mm}^4$$

$$I_{s,z} = 3.09 \text{ E}+07 \quad \text{mm}^4$$

$$K_e = 0.6 \quad [6.7.3.3(3)]$$

$$I_{c,z} = 2.05 \text{ E}+09 \quad \text{mm}^4$$

- Valor crítico do esforço normal:

$$N_{\text{cr},z} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{\text{eff},z}}{L^2}$$

$$= 35\,302.2 \text{ kN}$$

- Valor característico do esforço normal resistente:

$$N_{\text{pl,Rk}} = \frac{A_c \alpha_{\text{cc}} f_{\text{ck}} + A_a f_y + A_s f_{\text{sk}}}{f_{\text{sk}}} \quad \alpha_{\text{cc}} = 0.85 \quad [6.30]$$

$$= \frac{3730 + 4444.6 + 603.2}{603.2} \quad (\text{Sem confinamento})$$

$$= 8\,777.8 \text{ kN}$$

- Determinação da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{\text{pl,Rk}}}{N_{\text{cr},z}}} \quad [6.39]$$

$$= 0.499$$

Valor inferior a 2,0. Verifica o campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

- Coeficiente de redução:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \leq 1 \quad \text{EN 1993-1-1} \quad [6.49]$$

$$\phi_z = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2]$$

curva de encurvadura: c [Quadro 6.5]

$$\alpha = 0.49 \quad [6.1] \quad \text{[Quadro 6.1]}$$

$$\phi_z = 0.697$$

$$\chi_z = 0.844 \leq 1$$

Verificação da Segurança

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \chi &= \min \{ \chi_y ; \chi_z \} \\ &= \min \{ 0.923 ; 0.844 \} \\ &= 0.844 \quad \text{condicionado pela encurvadura em torno do eixo z-z.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{pl,Rd} &= \frac{A_c \alpha_{cc} f_{cd} + A_a f_y + A_s}{f_{sd}} & \alpha_{cc} &= 0.85 & [6.30] \\ &= \frac{2486.7 + 4444.6 +}{524.8} & & & \text{(Sem} \\ &= 7\,456.0 \text{ kN} & & & \text{confinamento)} \end{aligned}$$

- Condição de segurança:

$$1 \geq \frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} = \mathbf{0.636} \quad [6.44]$$

Verifica a segurança da coluna mista à compressão.

Influência do Esforço Transverso	Sem influência
Eixo (z-z) - Flexão em torno do eixo de maior inércia (y-y)	
<ul style="list-style-type: none"> • Esforço transversal resistente 	
$V_{pl,a,z,Rd} = 516.5 \text{ kN}$	$A_{v,z} = 2520 \text{ mm}^2$
	EN 1993-1-1 [6.18] [EN 1993-1-1 6.2.6]
<ul style="list-style-type: none"> • Hipótese inicial - Esforço transversal resistido apenas pela secção de aço 	
$V_{a,z,Ed} = V_{z,Ed}$ $= 70.0 \text{ kN}$	$V_{a,z,Ed} \leq 50\% V_{pl,a,z,Rd}$
<p>Não é necessário considerar influência do esforço transversal.</p>	

Eixo (y-y) - Flexão em torno do eixo de menor inércia (z-z)

- Esforço transversal resistente

$$V_{pl,a,y,Rd} = 2\,049.6 \text{ kN} \quad A_{v,y} = 10\,000 \text{ mm}^2 \quad \begin{array}{l} \text{EN 1993-1-1 [6.18]} \\ \text{[EN 1993-1-1 6.2.6]} \end{array}$$

- Hipótese inicial - Esforço transversal resistido apenas pela secção de aço

$$V_{a,y,Ed} = V_{y,Ed} = 30.0 \text{ kN} \quad V_{a,y,Ed} \leq 50\% V_{pl,a,y,Rd}$$

Não é necessário considerar influência do esforço transversal.

Verificação da segurança - Flexão Composta N-M_y

rácio = **0.604**

*Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.
Análise de 1ª ordem (acr,y = 11.33)*

- Momento flector devido à imperfeição inicial equivalente:

$$e_{0,z} = L \cdot 1/200 = 15 \text{ mm} \quad \text{[Quadro 6.5]}$$

$$N_{Ed} e_{0,z} = 60.0 \text{ kN.m}$$

Averiguação da necessidade de realização de uma análise de 2ª ordem

- Módulo de elasticidade efectivo do betão:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}}\right) \varphi_t} \quad \text{[6.41]}$$

$$= 12.0 \text{ GPa} \quad \varphi_t = 2.5 \quad \text{EN 1992-1-1 [3.1.4]}$$

- Rigidez de flexão efectiva:

$$(EI)_{eff,y,II} = K_0 (E_a I_{a,y} + E_s I_{s,y} + K_{e,II} E_{c,eff} I_{c,y}) \quad \text{[6.42]}$$

$$= 41\,342.7 \text{ kN.m}^2$$

$$K_0 = 0.9 \quad \text{[6.7.3.4 (2)]}$$

$$I_{a,y} = 1.42 \text{ E+08 mm}^4$$

$$I_{s,y} = 2.06 \text{ E+07 mm}^4$$

$$K_{e,II} = 0.5 \quad \text{[6.7.3.4 (2)]}$$

$$I_{c,y} = 1.97 \text{ E+09 mm}^4$$

- Valor crítico do esforço normal:

$$N_{cr,y,eff} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff,y,II}}{L^2}$$

$$= 45\,337.4 \text{ kN}$$

- Relação entre o valor crítico do esforço normal e o esforço normal actuante:

$$\alpha_{cr,y} = \frac{N_{cr,y,eff}}{N_{Ed}} = 11.33 \quad [5.2.1(3)]$$

Realizar análise de primeira ordem.

Análise de 1ª ordem

- Momento de dimensionamento:

$$M_{y,Ed} = k_{glob} M_{1,y,Ed} + k_{imp} N_{Ed} e_{0,z}$$

$$= 270.0 \text{ kN.m}$$

$$M_{1,y,Ed} = 210.0 \text{ kN.m}$$

$$k_{glob} = 1.000$$

$$\beta_{glob} = 1.00$$

$$r_{glob} = 1.00$$

$$k_{imp} = 1.000$$

$$\beta_{imp} = 1.00$$

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1,0 \quad [6.43]$$

[Quadro 6.4]

$$\beta_{glob} = 0.66 + 0.44 r_{glob} \geq 0.44$$

$$r_{glob} = M_{1,y,Ed} / M_{2,y,Ed}$$

$$M_{1/2} \rightarrow \text{Momentos flectores}$$

nas extremidades da coluna

Verificação da Segurança

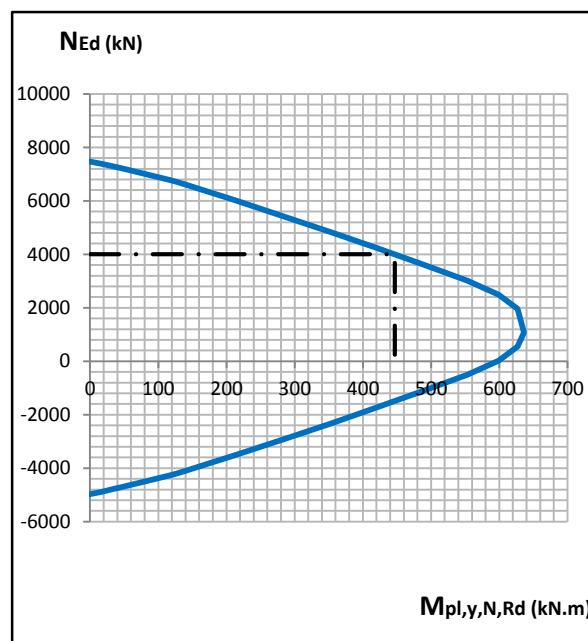
- Momento flector resistente associado a N_{Ed} :

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$M_{pl,y,N,Rd} = 446.9 \text{ kN.m}$$

- Condição de segurança: [6.45]

$$0.604 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} \leq \alpha_M = 0.9$$



Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.

Verificação da segurança - Flexão Composta N-M_z	rácio = 0.473
<p><i>Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.</i> <i>Análise de 2ª ordem (acr,z = 7.34)</i></p>	
<ul style="list-style-type: none"> Momento flector devido à imperfeição inicial equivalente: $e_{0,y} = L \cdot 1/150 = 20 \text{ mm} \quad \text{[Quadro 6.5]}$ $N_{Ed} e_{0,y} = 80.0 \text{ kN.m}$ 	
<p>Averiguação da necessidade de realização de uma análise de 2ª ordem</p>	
<ul style="list-style-type: none"> Módulo de elasticidade efectivo do betão: $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}}\right) \varphi_t} \quad \text{[6.41]}$ $= 12.0 \text{ GPa} \quad \varphi_t = 2.5 \quad \text{EN 1992-1-1 [3.1.4]}$ 	
<ul style="list-style-type: none"> Rigidez de flexão efectiva: $(EI)_{eff,z,II} = K_0 (E_a I_{a,z} + E_s I_{s,z} + K_{e,II} E_{c,eff} I_{c,z}) \quad \text{[6.42]}$ $= 26\,758.2 \text{ kN.m}^2$ $K_0 = 0.9 \quad \text{[6.7.3.4 (2)]}$ $I_{a,y} = 5.211 \text{ E}+07 \text{ mm}^4$ $I_{s,y} = 3.088 \text{ E}+07 \text{ mm}^4$ $K_{e,II} = 0.5 \quad \text{[6.7.3.4 (2)]}$ $I_{c,y} = 2.050 \text{ E}+09 \text{ mm}^4$ 	
<ul style="list-style-type: none"> Valor crítico do esforço normal: $N_{cr,z,eff} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff,z,II}}{L^2}$ $= 29\,343.6 \text{ kN}$ 	
<ul style="list-style-type: none"> Relação entre o valor crítico do esforço normal e o esforço normal actuante: $\alpha_{cr,z} = \frac{N_{cr,z,eff}}{N_{Ed}} = 7.34 \quad \text{[5.2.1(3)]}$ <p style="text-align: right;">Necessário realizar análise de segunda ordem.</p> 	

Análise de 2ª ordem

- Momento de dimensionamento:

$$M_{z,Ed} = k_{glob} M_{1,z,Ed} + k_{imp} N_{Ed} e_{0,y}$$

$$= 182.6 \text{ kN.m}$$

$$M_{1,z,Ed} = 90.0 \text{ kN.m} \quad [6.43]$$

$$k_{glob} = 1.000 \quad [\text{Quadro 6.4}]$$

$$\beta_{glob} = 0.66$$

$$r_{glob} = 0.00$$

$$\beta_{glob} = 0.66 + 0.44 r_{glob} \geq 0.44$$

$$r_{glob} = M_{1,z,Ed} / M_{2,z,Ed}$$

$M_{1/2}$ → Momentos flectores nas extremidades da coluna

$$k_{imp} = 1.158$$

$$\beta_{imp} = 1.00$$

Verificação da Segurança

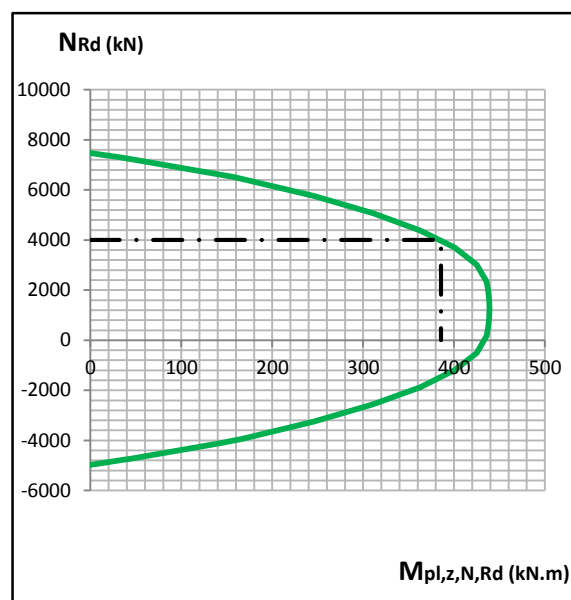
- Momento flector resistente associado a N_{Ed} :

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$M_{pl,z,N,Rd} = 385.7 \text{ kN.m}$$

- Condição de segurança: [6.45]

$$0.473 = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} \leq \alpha_M = 0.9$$



Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.

Verificação da segurança - Flexão Desviada Composta

ratio = 0.943

*Verifica a segurança à flexão desviada composta.
Condicionado pela rotura em torno de z-z*

Considerar imperfeição inicial equivalente apenas no plano de rotura:

- Rotura em torno de y-y: [6.7.3.7(1)]

$$e_{0,y} = 0.0 \text{ mm} \qquad e_{0,z} = 15 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{z,Ed} &= k_{glob} M_{1,z,Ed} & M_{y,Ed} &= k_{glob} M_{1,y,Ed} + k_{imp} N_{Ed} e_{0,z} \\ &= 90.0 \text{ kN.m} & &= 270.0 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

- Rotura em torno de z-z: [6.7.3.7(1)]

$$e_{0,y} = 20 \text{ mm} \qquad e_{0,z} = 0.0 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} M_{z,Ed} &= k_{glob} M_{1,z,Ed} + k_{imp} N_{Ed} e_{0,y} & M_{y,Ed} &= k_{glob} M_{1,y,Ed} \\ &= 182.6 \text{ kN.m} & &= 210.0 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Verificação da Segurança

- Momentos flectores resistentes associados a N_{Ed} :

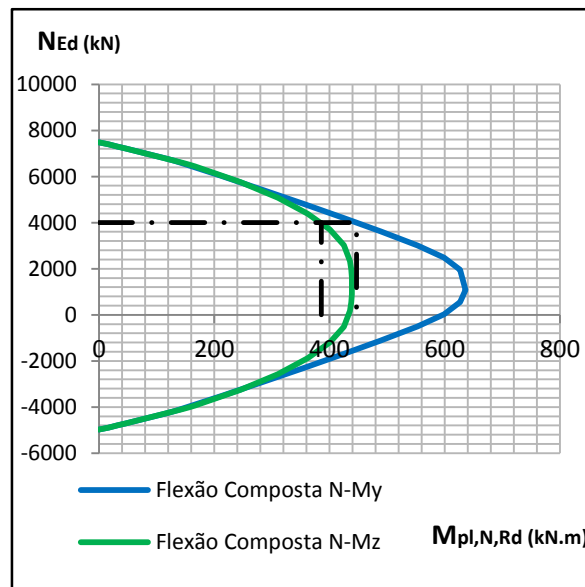
$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$M_{pl,y,N,Rd} = 446.9 \text{ kN.m}$$

$$M_{pl,z,N,Rd} = 385.7 \text{ kN.m}$$

- Condição de segurança: [6.47]

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,N,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,N,Rd}} \leq 1$$



- Rotura em torno de y-y:

$$\begin{aligned} 270 / 446.9 + 90 / 385.7 &\leq 1 \\ 0.604 + 0.233 &\leq 1 \\ 0.837 &\leq 1 \end{aligned}$$

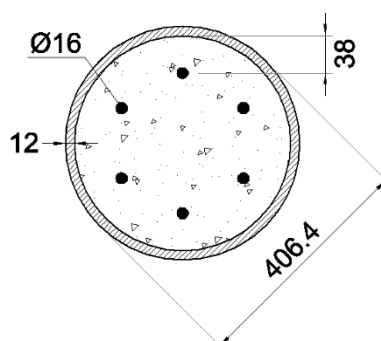
- Rotura em torno de z-z:

$$\begin{aligned} 210 / 446.9 + 182.6 / 385.7 &\leq 1 \\ 0.47 + 0.473 &\leq 1 \\ 0.943 &\leq 1 \end{aligned}$$

Verifica a segurança à flexão desviada composta com compressão.

C.2 SECÇÃO CIRCULAR

Em seguida apresenta-se os relatórios exportados do *toolkit* referentes ao enunciado do exemplo apresentado no ponto 8.2.



RESUMO da verificação da segurança da coluna mista	rácio = 0.845
<p>1 - Verificação das disposições construtivas e do campo de aplicação --- Verificado.</p> <p><i>Área de armadura longitudinal dentro dos limites. Elemento estrutural misto (aço-betão). Esbelteza dentro do limite admissível. Encurvadura local do tubo de aço pode ser desprezada.</i></p>	
<p>2 - Verificação da segurança - Compressão</p> <p>$\chi = 0.936$</p>	0.529
<p>2 - Influência do Esforço Transverso</p>	Sem influência
<p>3 - Verificação da segurança - Flexão Composta M-N</p> <p><i>Análise de 1ª ordem (acr = 10.75)</i></p>	0.845

Verificação da segurança em relação aos estados limites últimos de colunas mistas de aço-betão (EN1994-1-1)

Materiais:

Aço estrutural	S355	$f_{yd} = 355 \text{ MPa}$	$E_a = 210 \text{ GPa}$
Betão	C30/37	$f_{cd} = 20.0 \text{ MPa}$	$E_{cm} = 33 \text{ GPa}$
Aço das armaduras	A500NR	$f_{sd} = 435 \text{ MPa}$	$E_s = 210 \text{ GPa}$

Geometria:

$$L = 4.0 \text{ m}$$

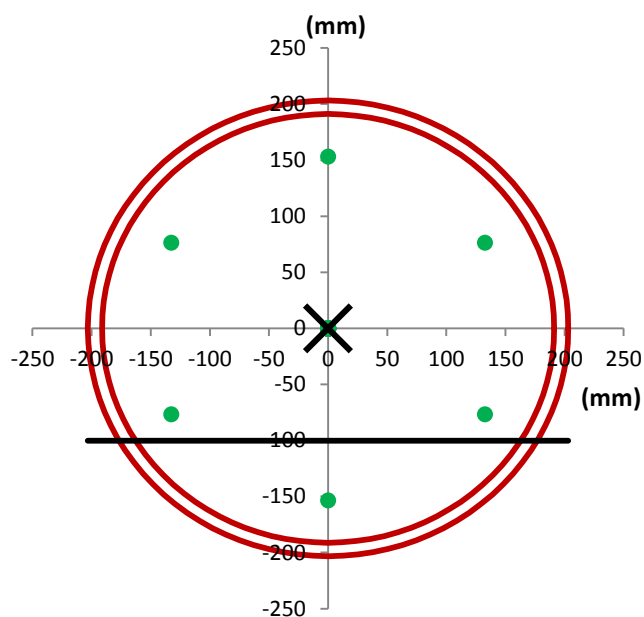
$$D_{\text{ext}} = 406.4 \text{ mm}$$

$$t = 12.0 \text{ mm}$$

$$A_s = 1\,206.0 \text{ mm}^2 \quad (6 \varnothing 16) \quad (\rho = 1.1 \%)$$

$$A_a = 14\,868.5 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 113\,642.6 \text{ mm}^2$$



— Aço Estrutural ● Armadura
— Linha Neutra ✕ Centro de Massa

Acções:

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN} \quad M_{1,y,Ed} = 500.0 \text{ kN.m}$$

$$N_{G,Ed} = 3\,000.0 \text{ kN} \quad M_{2,y,Ed} = 400.0 \text{ kN.m}$$

$$N_{Q,Ed} = 1\,000.0 \text{ kN} \quad V_{Ed} = 25.0 \text{ kN}$$

Verificação das disposições construtivas e do campo de aplicação:

Verificado.

- Área de armadura longitudinal:

[6.7.3.1(3)]

$$A_{s,\text{max}} = 0.6 A_c = 68.19 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,\text{min}} = 0 A_c = 0.00 \text{ cm}^2$$

Área de armadura longitudinal dentro dos limites.

- Relação da contribuição da secção de aço, δ , para a resistência da secção transversal:

$$N_{pl,Rd} = A_c \alpha_{cc} f_{cd} + A_a f_y + A_s f_{sd} \quad \alpha_{cc} = 1 \quad (\text{Com confinamento}) \quad [6.30]$$

$$= 2272.9 + 5278.3 + 524.6 = 8075.8 \text{ kN}$$

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{5278.3}{8075.8} = 0.65 \quad [6.38]$$

$$0.2 \leq \delta \leq 0.9 \quad \text{Elemento estrutural misto (aço-betão).}$$

- Esbelteza máxima da chapa:

[Quadro 6.3]

$$d/t = 33.9$$

$$\text{Esbelteza máxima} = 90 \cdot 235 / f_y = 59.05 \quad (235 / f_y = 0.66)$$

Esbelteza dentro do limite admissível. Encurvadura local do tubo de aço pode ser desprezada.

Verificação da segurança - Compressão

rácio = 0.529

Verifica a segurança da coluna mista à compressão.

$$\chi = 0.936$$

- Módulo de elasticidade efectivo do betão:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right) \varphi_t} \quad [6.41]$$

$$\varphi_t = 2.5 \quad [\text{EN 1992-1-1, 3.1.4}]$$

$$= 11.5 \text{ GPa}$$

Propriedades da coluna mista para encurvadura:

- Rigidez de flexão efectiva:

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{c,eff} I_c \quad [6.40]$$

$$= 70\,872.0 \quad \text{kN.m}^2$$

$$I_a = \pi (406.4^4 - 368^4) / 64 = 2.89 \text{ E}+08 \quad \text{mm}^4$$

$$I_s = 1.42 \text{ E}+07 \quad \text{mm}^4$$

$$K_e = 0.6 \quad [6.7.3.3(3)]$$

$$I_c = \pi 368^4 / 64 - \quad I_s = 1.04 \text{ E}+09 \quad \text{mm}^4$$

- Valor crítico do esforço normal:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff}}{L^2}$$

$$= 43\,717.4 \text{ kN}$$

- Valor característico do esforço normal resistente:

$$N_{pl,Rk} = A_c \alpha_{cc} f_{ck} + A_a f_y + A_s f_{sk} \quad \alpha_{cc} = 1.00 \quad [6.30]$$

$$= 3409.3 + 5278.3 + 603 \quad (\text{Com confinamento})$$

$$= 9\,290.6 \text{ kN}$$

- Determinação da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad [6.39]$$

$$= 0.461$$

Valor inferior a 2,0. Verifica o campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

Efeitos do confinamento:

$$\bar{\lambda} = 0.461 < 0,5 \Rightarrow \text{determinar os efeitos do confinamento;}$$

$$e = 125.0 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \eta_a = 1.000 \quad [6.36]$$

$$d = 406.4 \text{ mm}$$

$$e / d = 0.3076 \quad \eta_c = 0.000 \quad [6.37]$$

$$\eta_{a0} = 0,25 (3 + 2 \lambda) \leq 1,0 \quad [6.34]$$

$$= 0.980$$

$$\eta_{c0} = 0,49 - 18,5 \lambda + 17 \lambda^2 \geq 0 \quad [6.35]$$

$$= 0.000$$

- Valor característico do esforço normal resistente, considerando os efeitos do confinamento:

$$N_{pl,Rk} = [1 + \eta_c t f_y / (d f_{ck})] A_c f_{ck} + \eta_a A_a f_y + A_s f_{sk} \quad [6.33]$$

$$= 3409.3 + 5278.3 + 603 \quad \alpha_{cc} = 1 + \eta_c t f_y / (d f_{ck}) =$$

$$= 9\,290.6 \text{ kN} \quad = 1.000$$

- Esforço normal resistente plástico de compressão, considerando os efeitos do confinamento:

$$N_{pl,Rd} = [1 + \eta_c t f_y / (d f_{ck})] A_c f_{cd} + \eta_a A_a f_y + A_s f_{sd} \quad [6.33]$$

$$= 2272.9 + 5278.3 + 524.6 \quad \alpha_{cc} = 1 + \eta_c t f_y / (d f_{ck}) =$$

$$= 8\,075.8 \text{ kN} \quad = 1.000$$

- Determinação da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad [6.39]$$

$$= 0.461$$

Valor inferior a 2,0. Verifica o campo de aplicação do método simplificado de cálculo.

Verificação da Segurança

- Coeficiente de redução:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad \begin{array}{l} \text{EN 1993-1-1} \\ [6.49] \end{array}$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

curva de
encurvadura: a

$$\alpha = 0.21$$

$$\phi = 0.634$$

[Quadro 6.5]

[Quadro 6.1]

$$\chi = 0.936 \leq 1$$

- Condição de segurança:

$$N_{Ed} = 4\,000.0 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1 \Leftrightarrow \quad [6.44]$$

$$\Leftrightarrow \frac{4000}{0.936 \times 8075.8} = 0.529 \leq 1$$

Verifica a segurança da coluna mista à compressão.

Influência do Esforço Transverso	Sem influência
<ul style="list-style-type: none"> Esforço transversal resistente $V_{pl,a,Rd} = 3\,360.3 \text{ kN}$ $A_v = 9465.6 \text{ mm}^2$	EN 1993-1-1 [6.18] [EN 1993-1-1 6.2.6]
<ul style="list-style-type: none"> Hipótese inicial - Esforço transversal resistido apenas pela secção de aço $V_{a,Ed} = V_{Ed} = 25.0 \text{ kN}$ $V_{a,Ed} \leq 50\% V_{pl,a,Rd}$ <p>Não é necessário considerar influência do esforço transversal.</p>	

Verificação da segurança - Flexão Composta M-N	rácio = 0.845
<i>Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.</i> <i>Análise de 1ª ordem (acr = 10.75)</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Momento flector devido à imperfeição inicial equivalente: $e_0 = L \cdot 1/300$ $N_{Ed} \cdot e_0 = 53.3 \text{ kN.m}$	[Quadro 6.5]
Averiguação da necessidade de realização de uma análise de 2ª ordem	
<ul style="list-style-type: none"> Módulo de elasticidade efectivo do betão: $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}}\right) \varphi_t}$ $= 11.5 \text{ GPa}$	$\varphi_t = 2.5$ EN 1992-1-1 [3.1.4]
<ul style="list-style-type: none"> Rigidez de flexão efectiva: $(EI)_{eff,II} = K_0 (E_a I_a + E_s I_s + K_{e,II} E_{c,eff} I_c)$ $= 69\,684.4 \text{ kN.m}^2$	[6.40]
$K_0 = 0.9$ $I_a = \pi (406.4^4 - 368^4) / 64 = 2.89 \text{ E+08}$ $I_s = 1.42 \text{ E+07} \text{ mm}^4$ $K_{e,II} = 0.5$ $I_c = \pi 368^4 / 64 - I_s = 1.04 \text{ E+09}$	[6.7.3.4 (2)]

- Valor crítico do esforço normal:

$$N_{cr,eff} = \frac{\pi^2 \times (EI)_{eff,II}}{L^2} = 42\,984.8 \text{ kN}$$

- Relação entre o valor crítico do esforço normal e o esforço normal actuante:

$$\alpha_{cr} = \frac{N_{cr,eff}}{N_{Ed}} = 10.75 \quad \text{Realizar análise de primeira ordem.} \quad [5.2.1(3)]$$

Análise de 1ª ordem

- Momento de dimensionamento:

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= k_{glob} M_{1,Ed} + k_{imp} N_{Ed} e_0 \\ &= \mathbf{553.3 \text{ kN.m}} \end{aligned}$$

$$M_{1,Ed} = 500.0 \text{ kN.m}$$

$$k_{glob} = 1.000$$

$$\beta_{glob} = 1.00$$

$$r_{glob} = 1.00$$

$$k_{imp} = 1.000$$

$$\beta_{imp} = 1.00$$

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1,0 \quad [6.43]$$

$$\beta_{glob} = 0.66 + 0.44 r_{glob} \geq 0.44 \quad [\text{Quadro 6.4}]$$

$$r_{glob} = M_{1,Ed} / M_{2,Ed}$$

$M_{1/2} \rightarrow$ Momentos flectores nas extremidades da barra

Verificação da Segurança

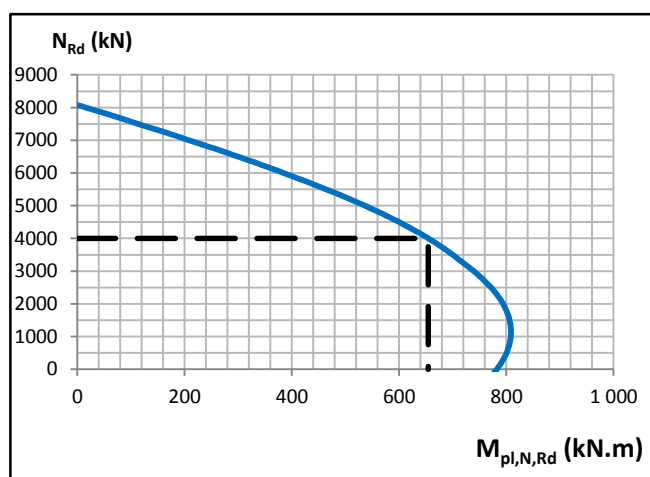
- Momento flector resistente associado a N_{Ed} :

$$N_{Ed} = \mathbf{4\,000.0 \text{ kN}}$$

$$M_{pl,N,Rd} = \mathbf{654.6 \text{ kN.m}}$$

- Condição de segurança: [6.45]

$$\mathbf{0.845} = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} \leq \alpha_M = 0.9$$

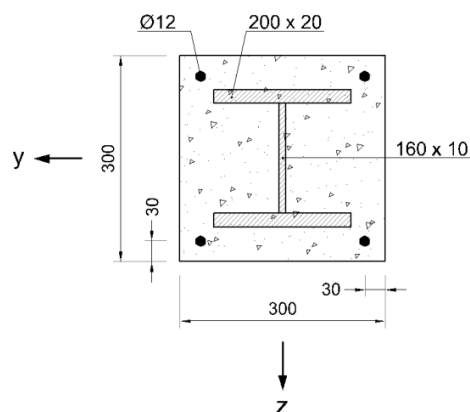


Verifica a segurança da coluna mista à flexão composta com compressão.

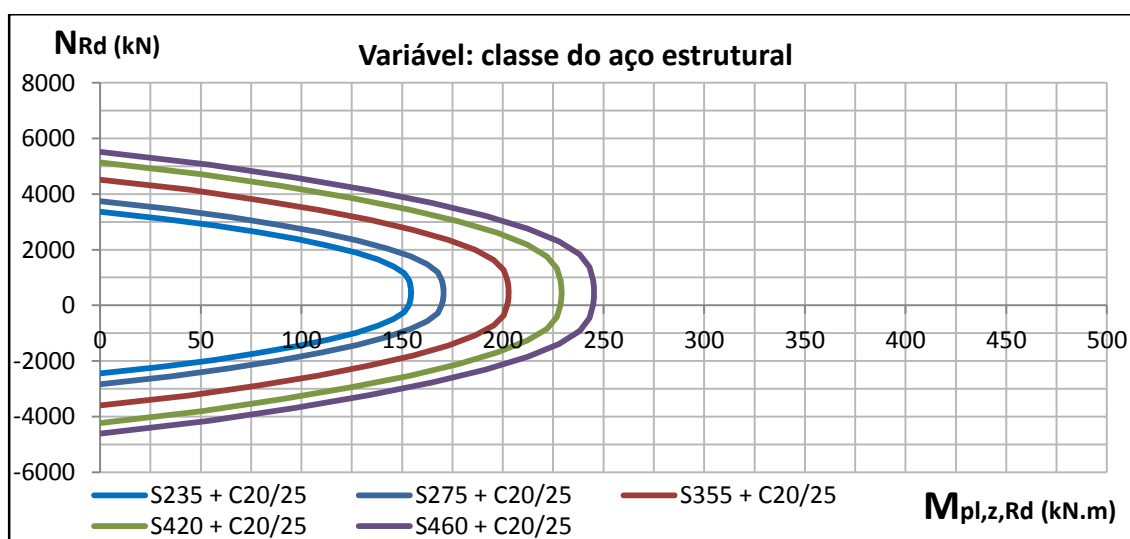
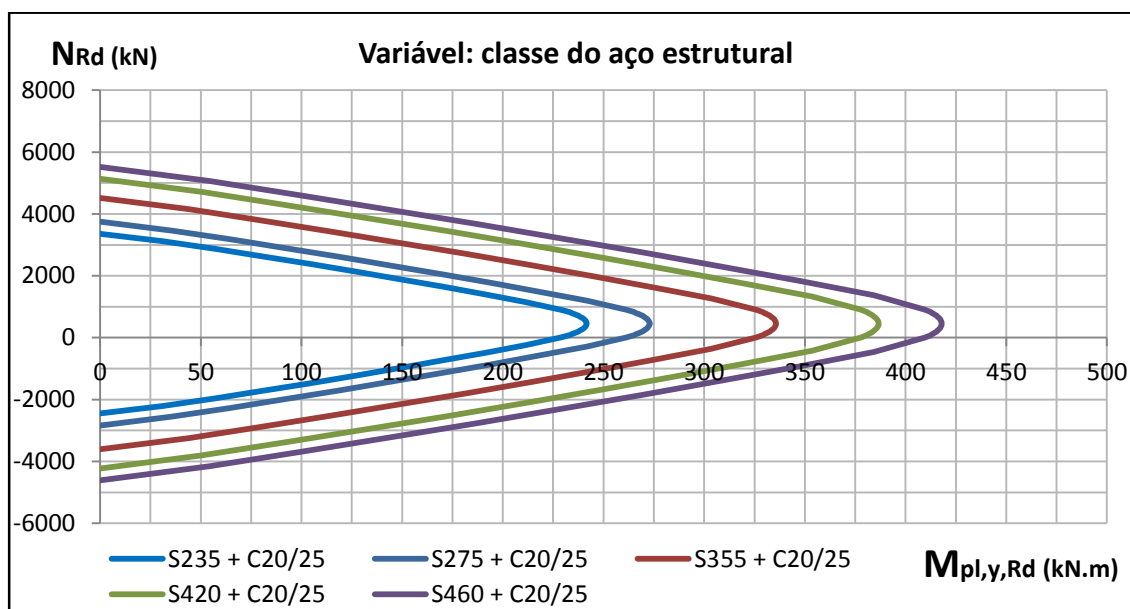
Anexo D – ESTUDO PARAMÉTRICO

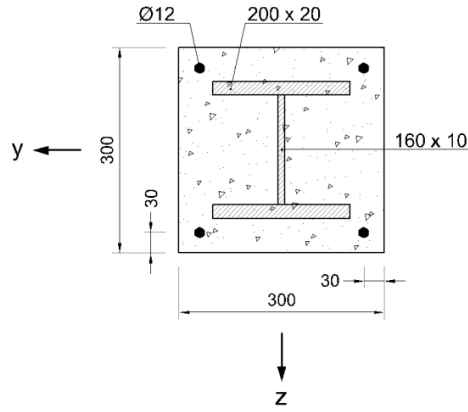
D.1 VARIÁVEL: CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

D.1.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

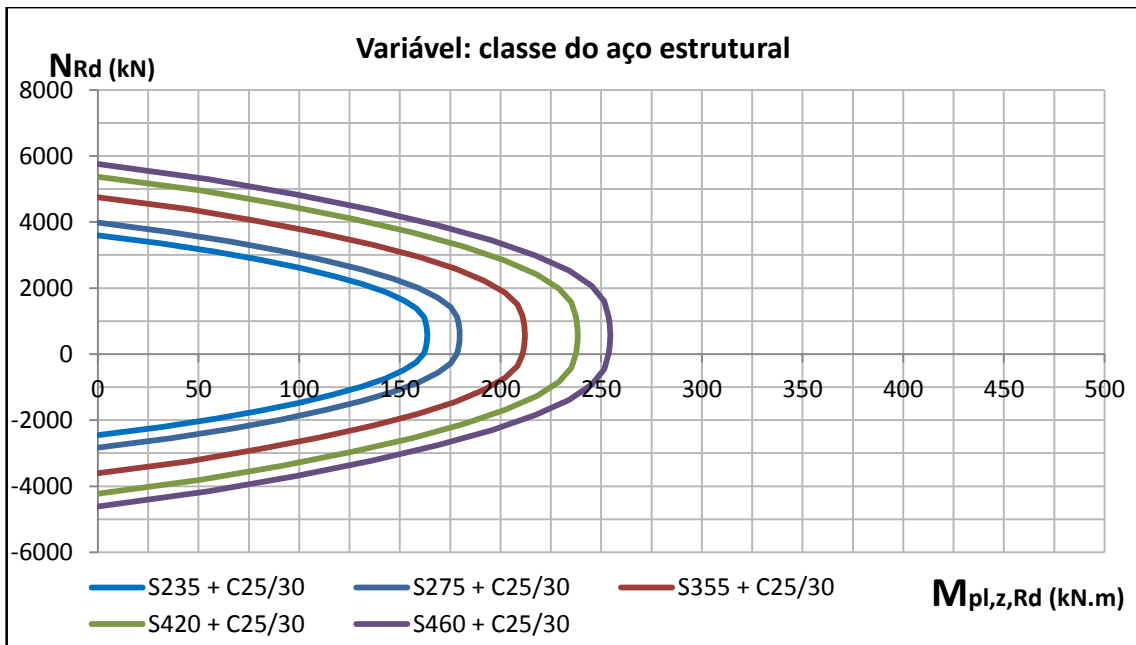
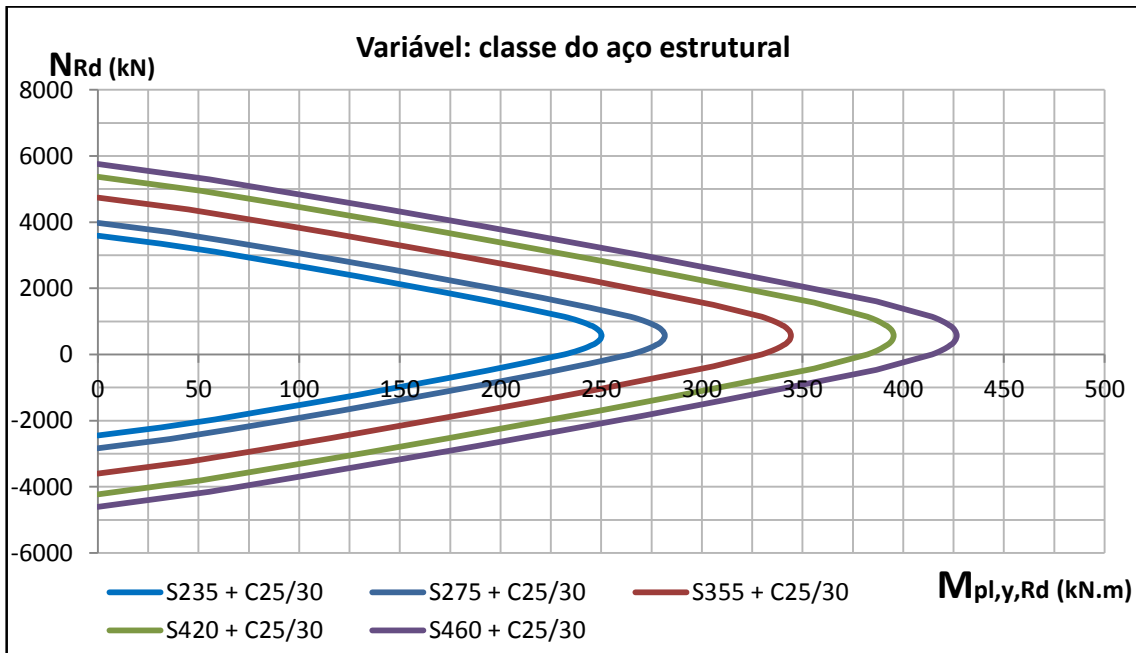


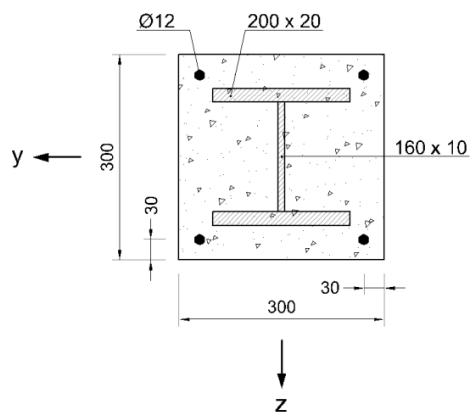
Materials: Betão C20/25 e Aço A500



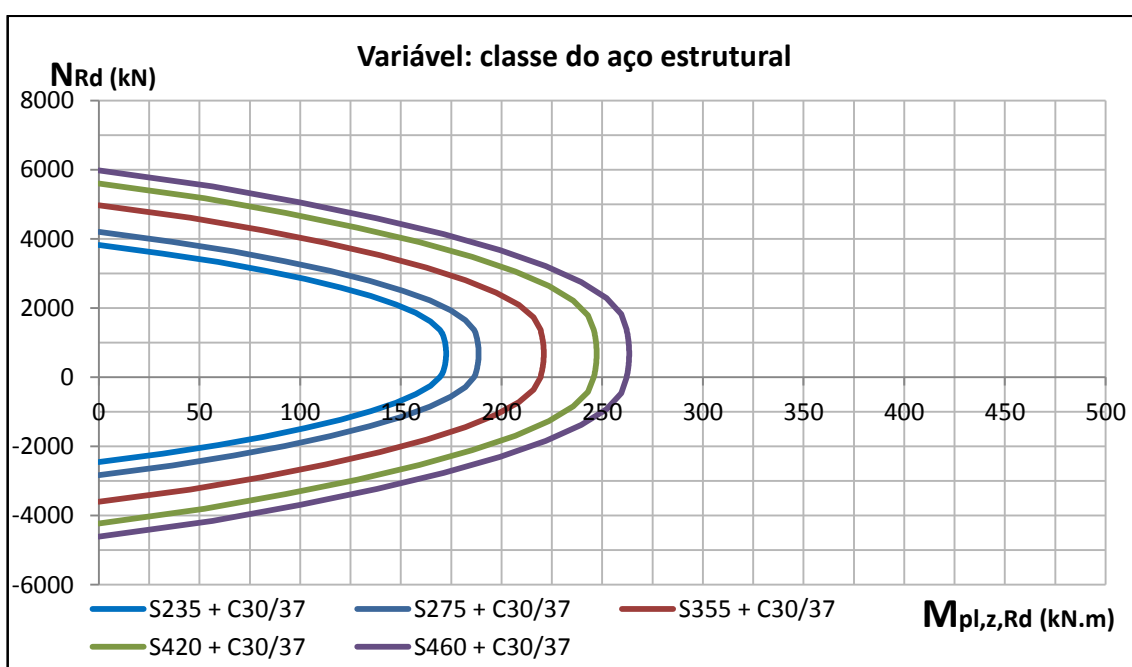
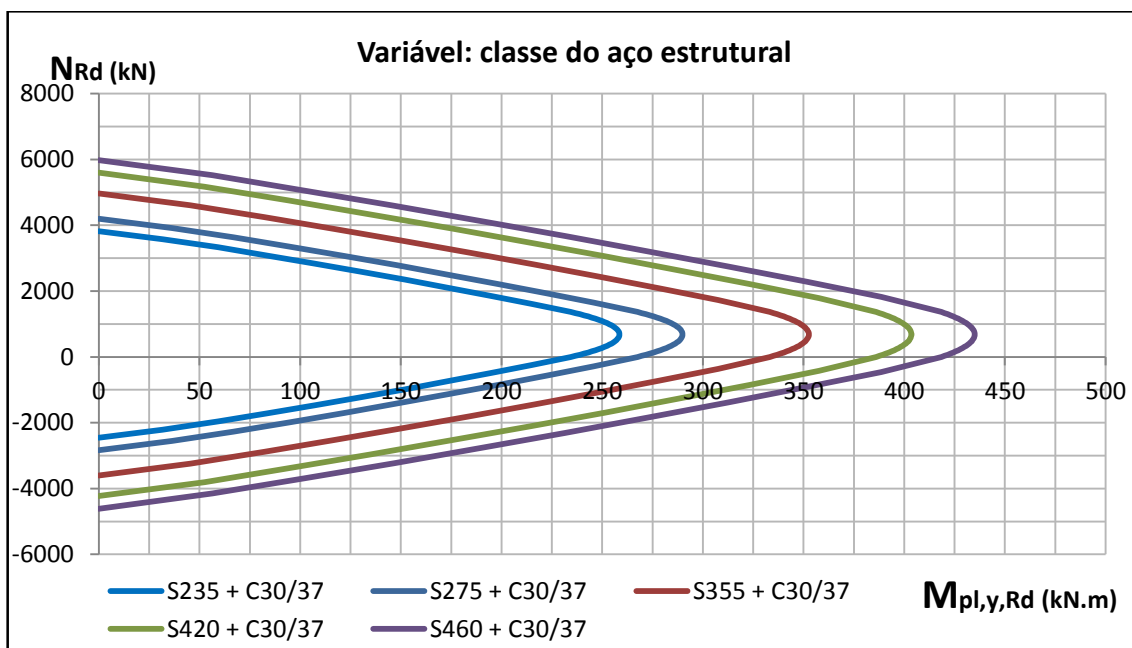


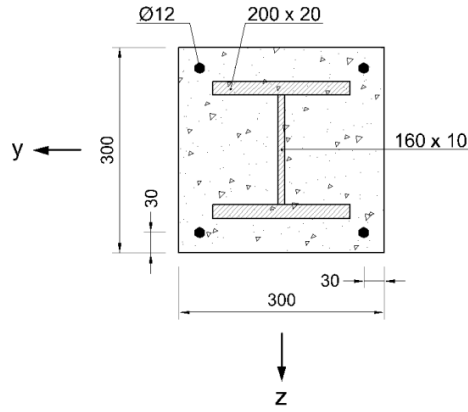
Materiais: Betão C25/30 e Aço A500



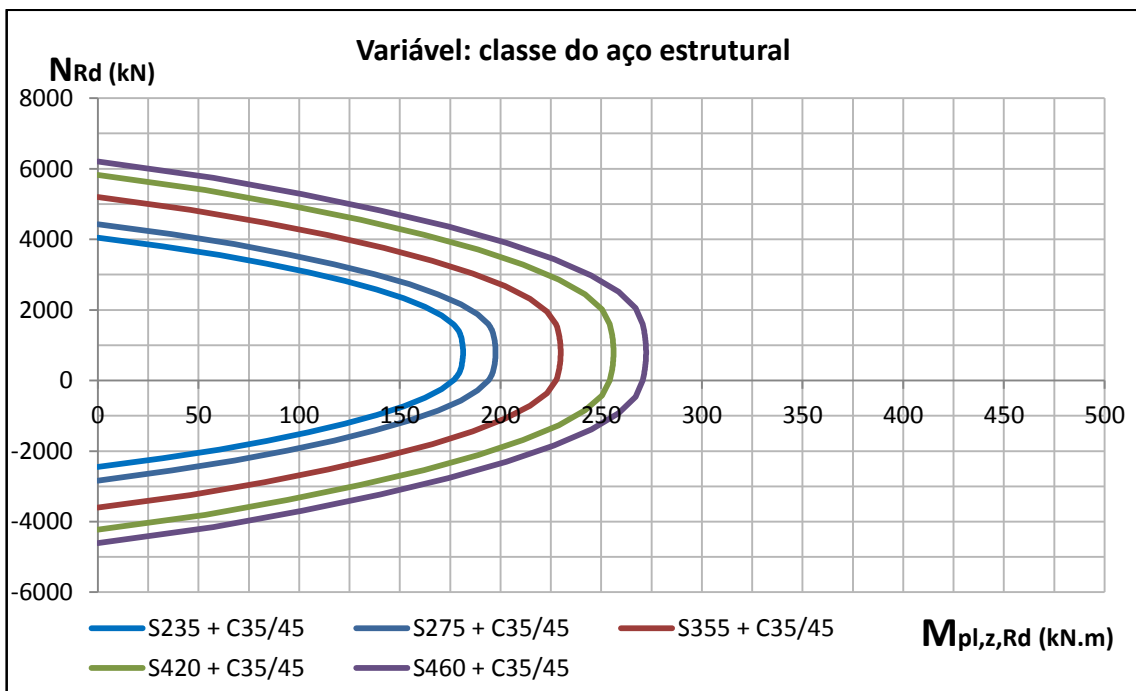
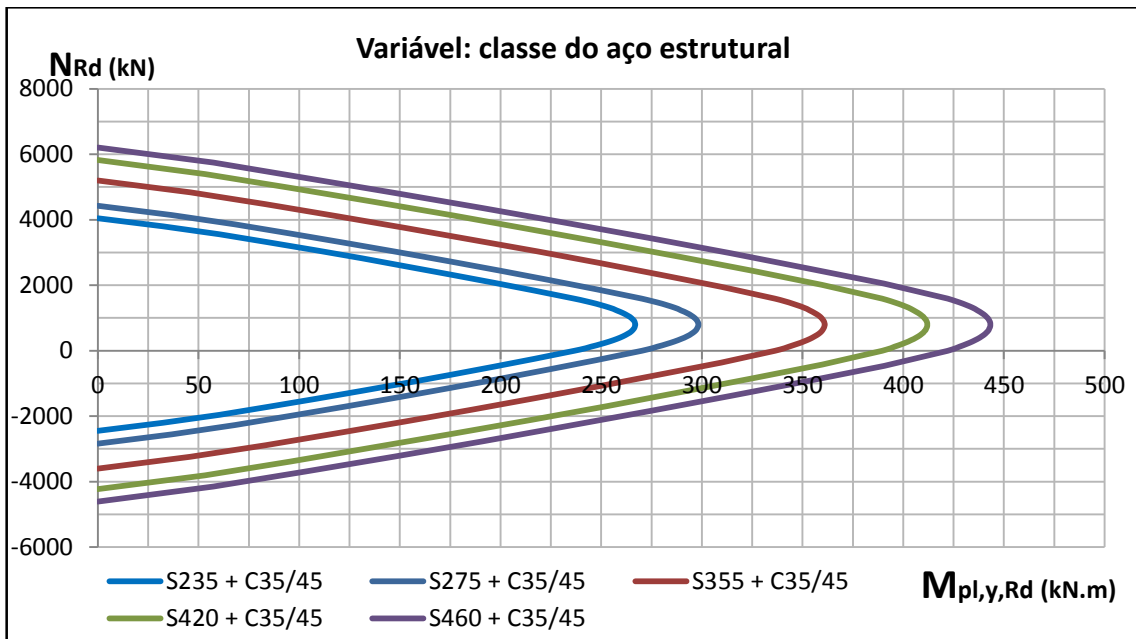


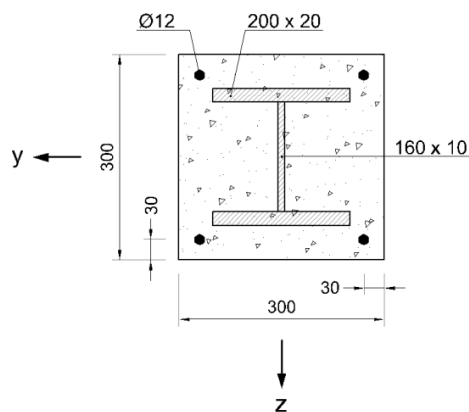
Materiais: Betão C30/37 e Aço A500



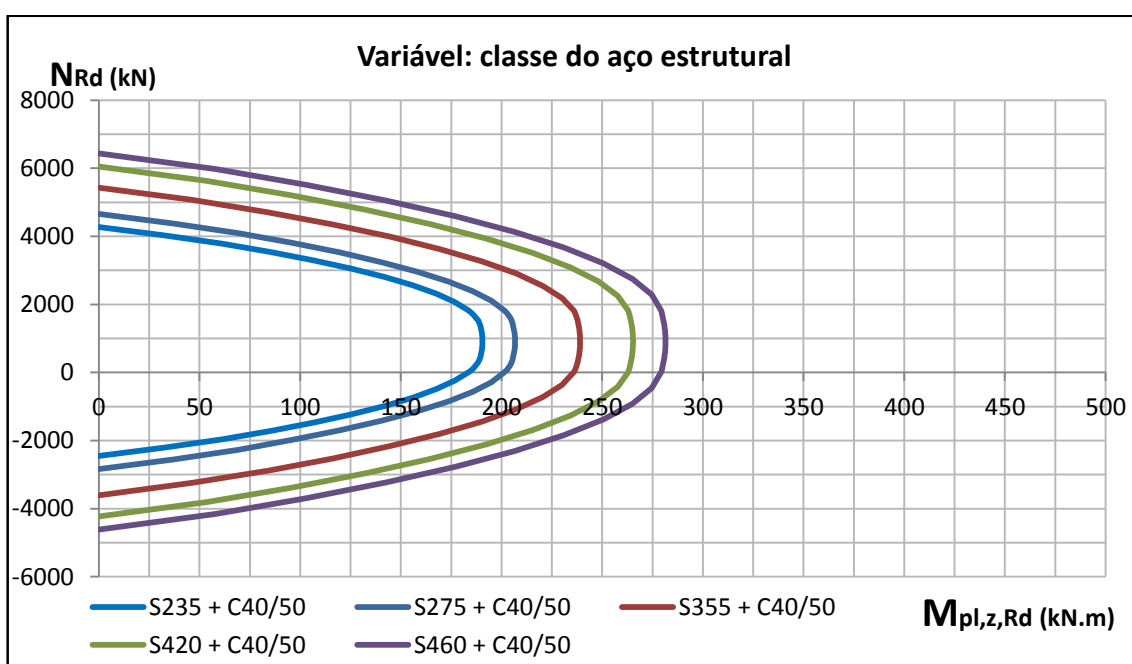
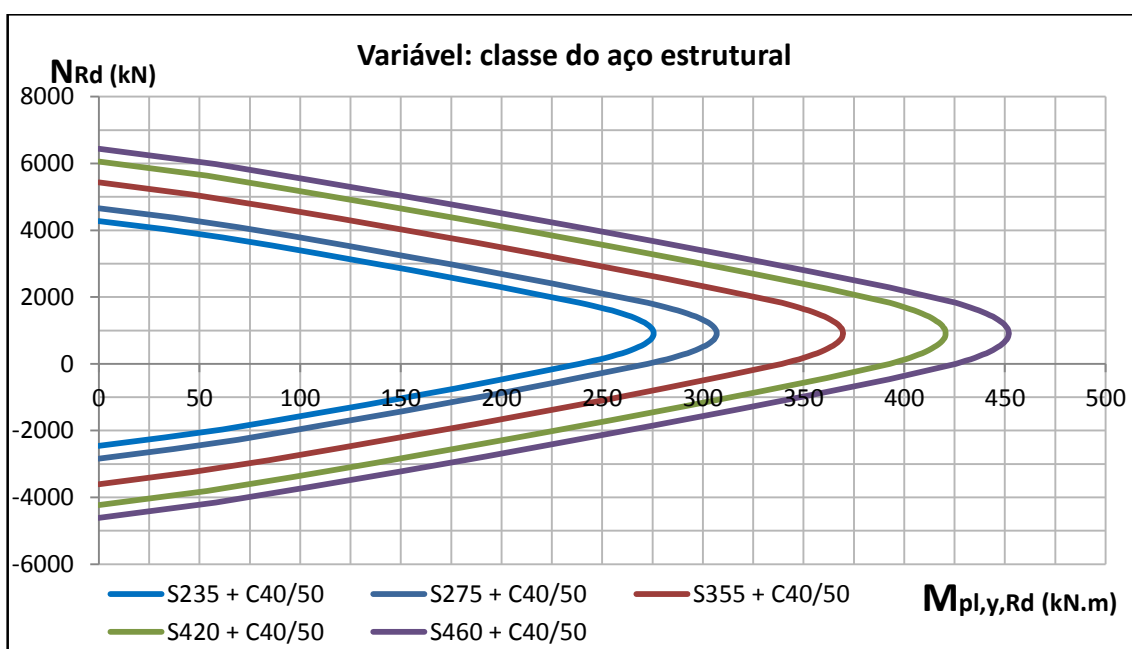


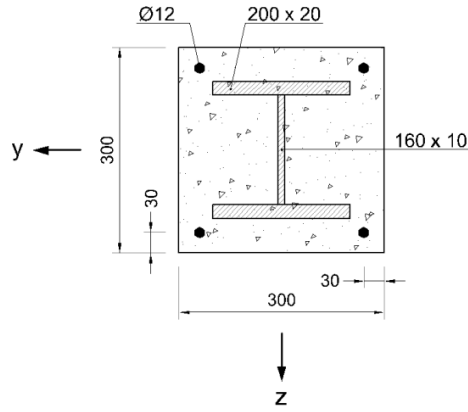
Materiais: Betão C35/45 e Aço A500



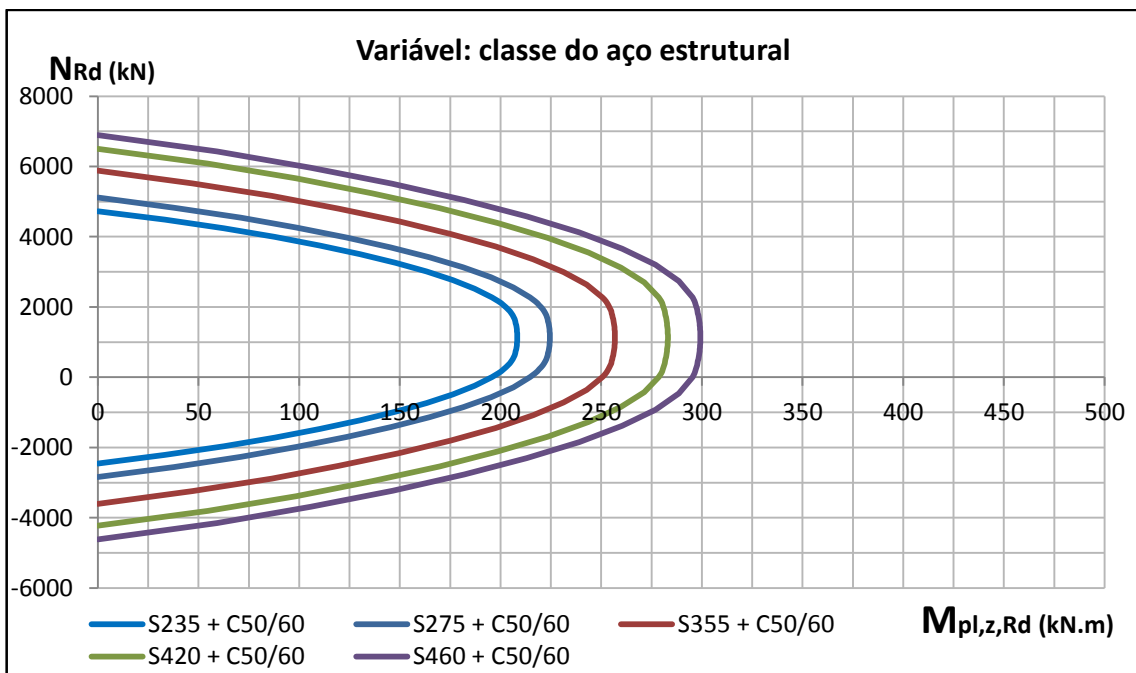
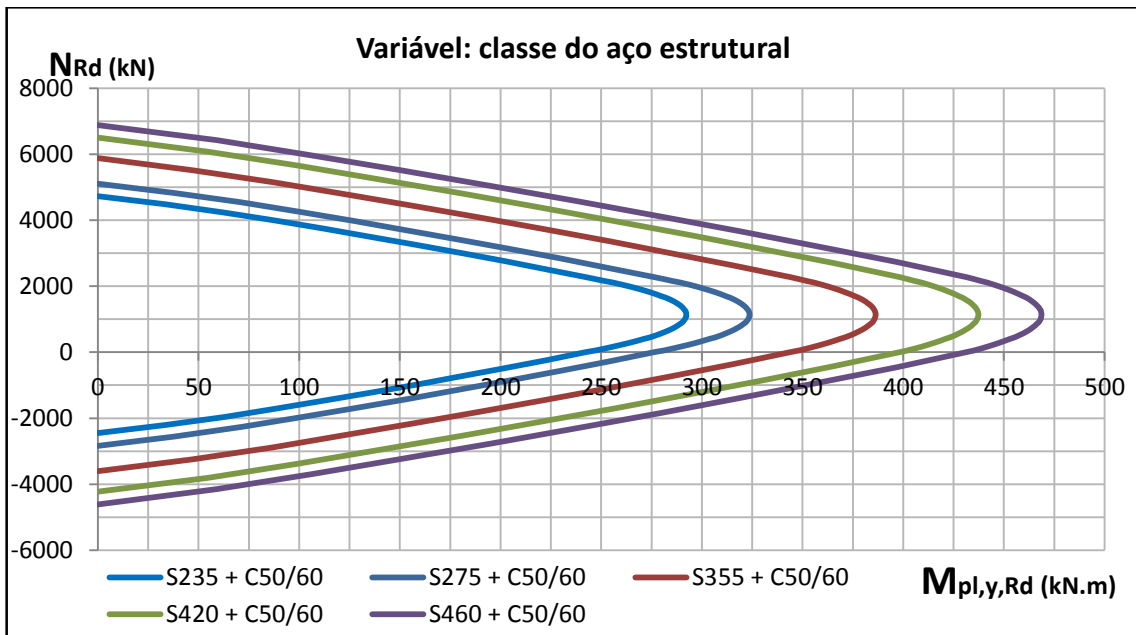


Materiais: Betão C40/50 e Aço A500

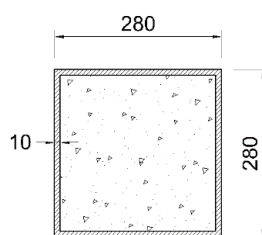




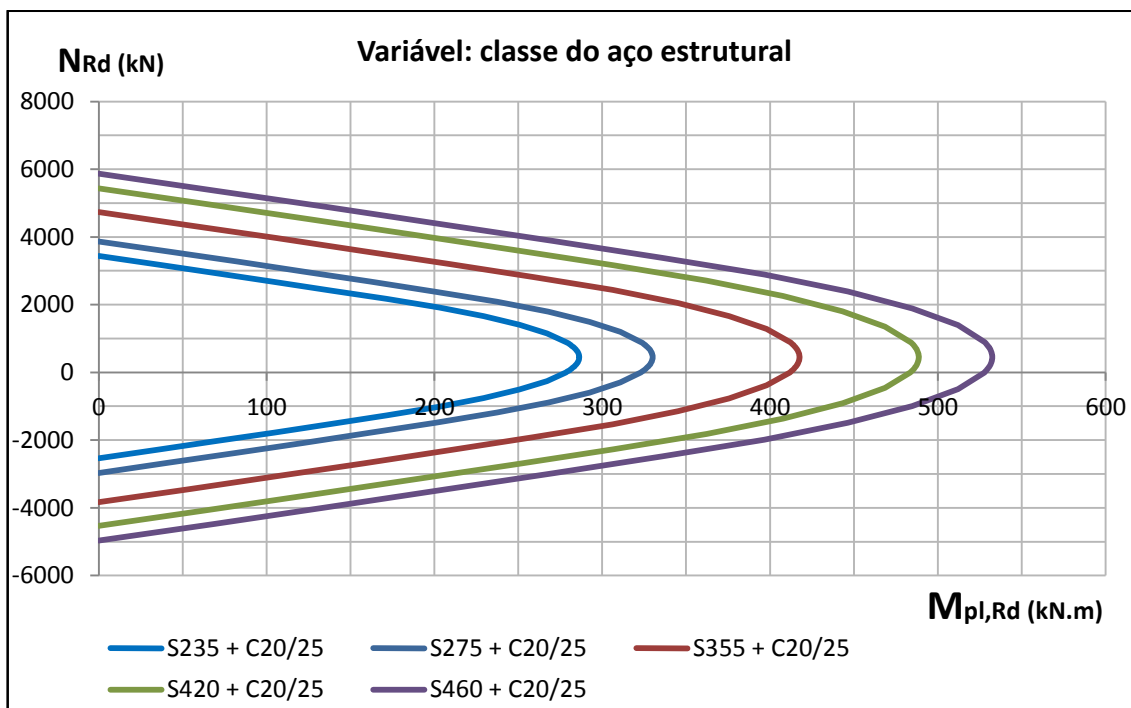
Materiais: Betão C50/60 e Aço A500



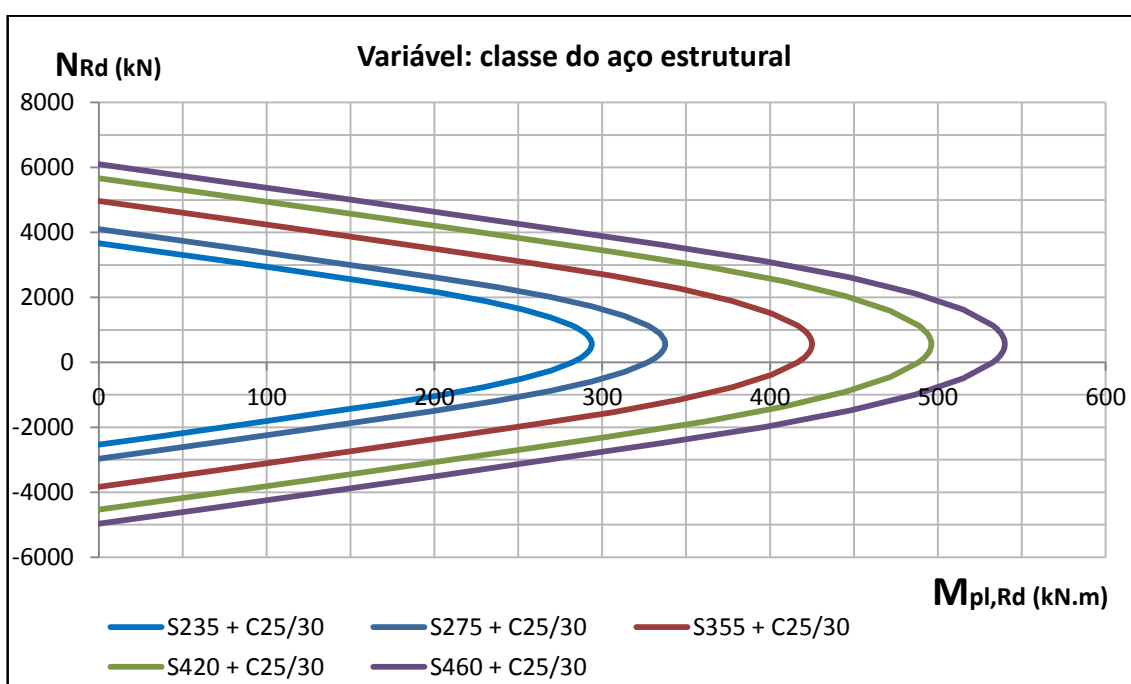
D.1.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

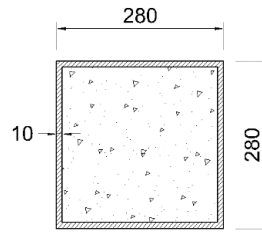


Materiais: Betão C20/25 e Aço A500

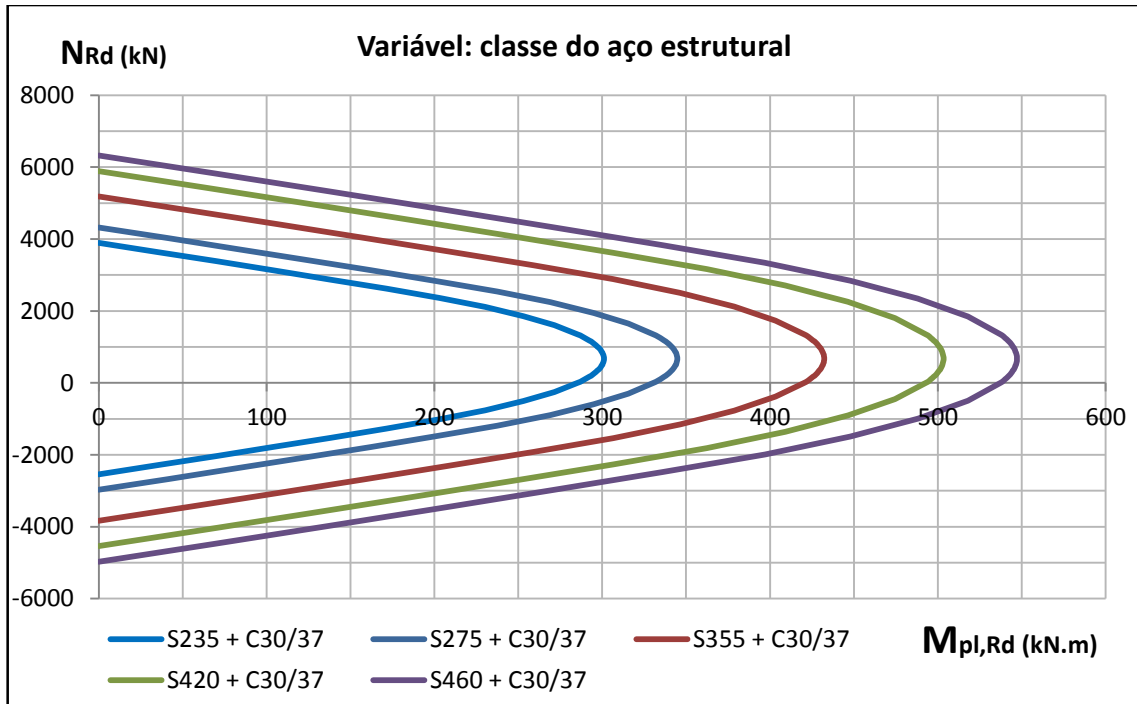


Materiais: Betão C25/30 e Aço A500

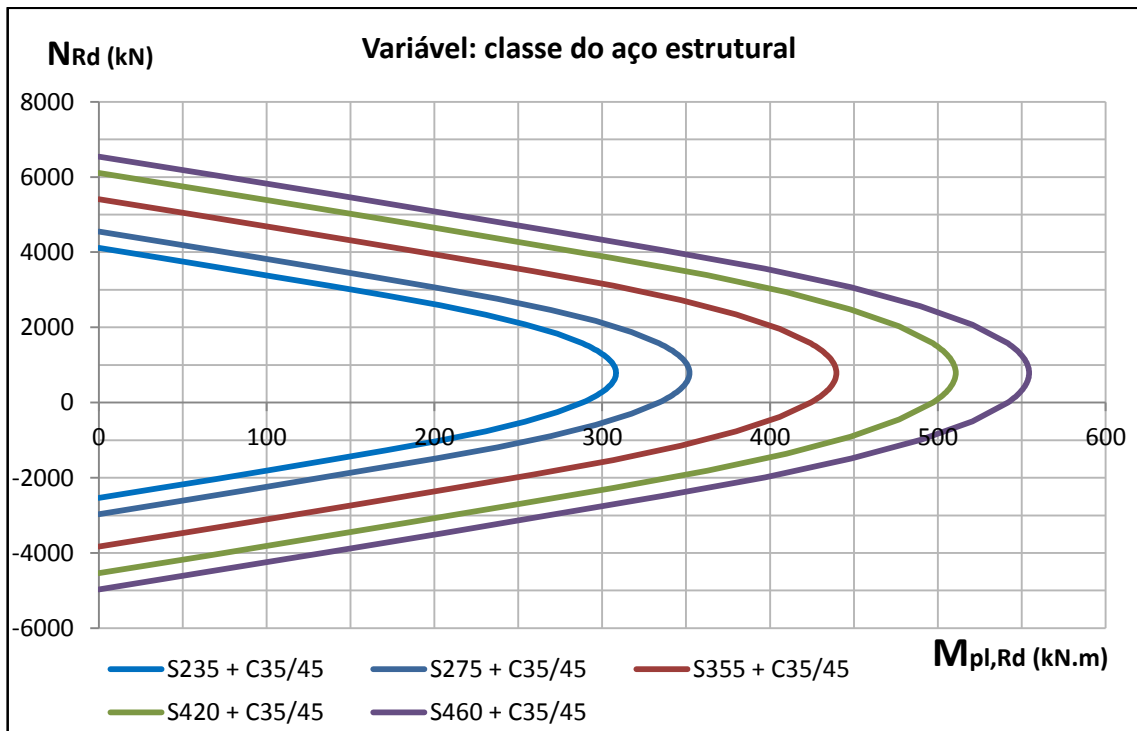


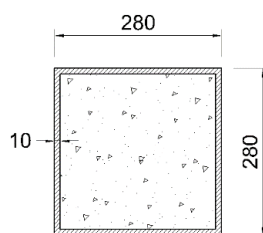


Materiais: Betão C30/37 e Aço A500

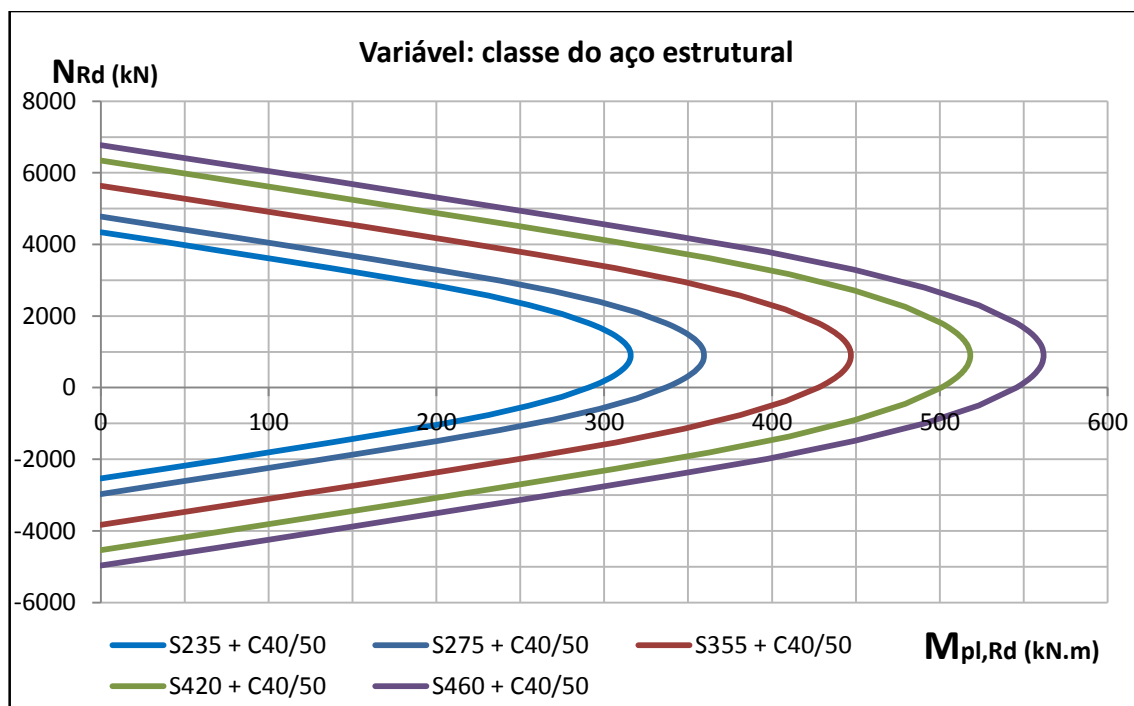


Materiais: Betão C35/45 e Aço A500

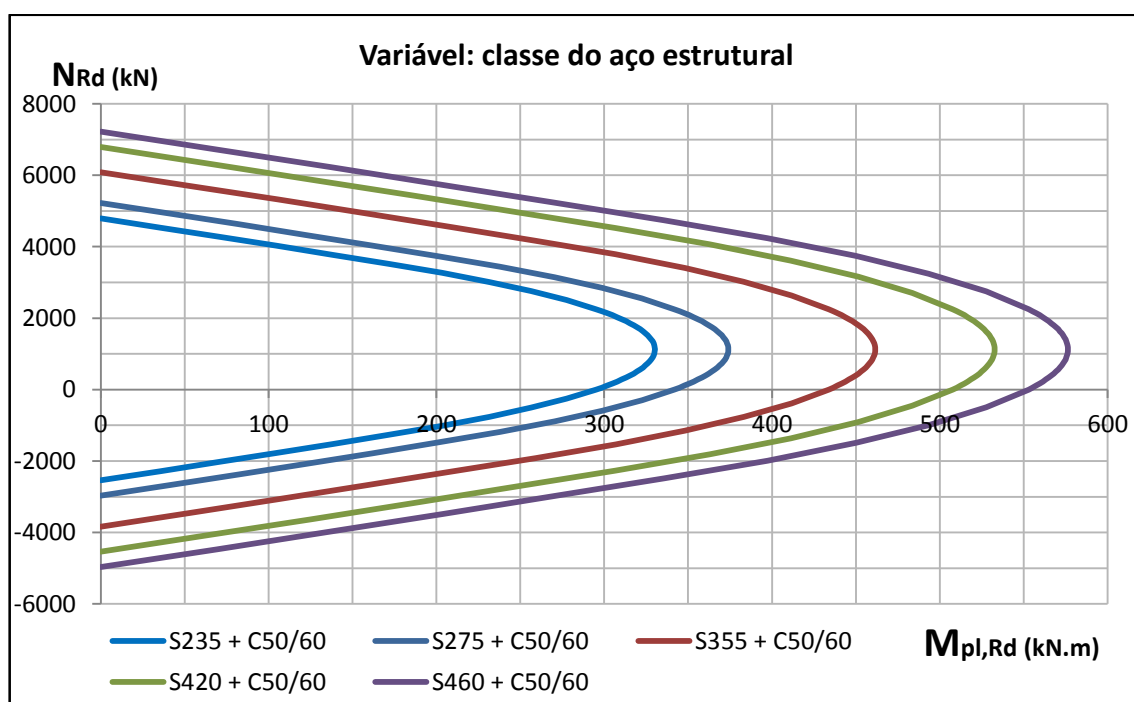




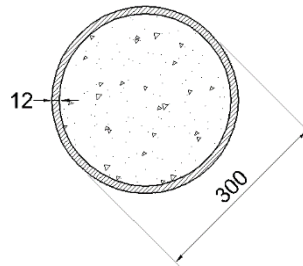
Materiais: Betão C40/50 e Aço A500



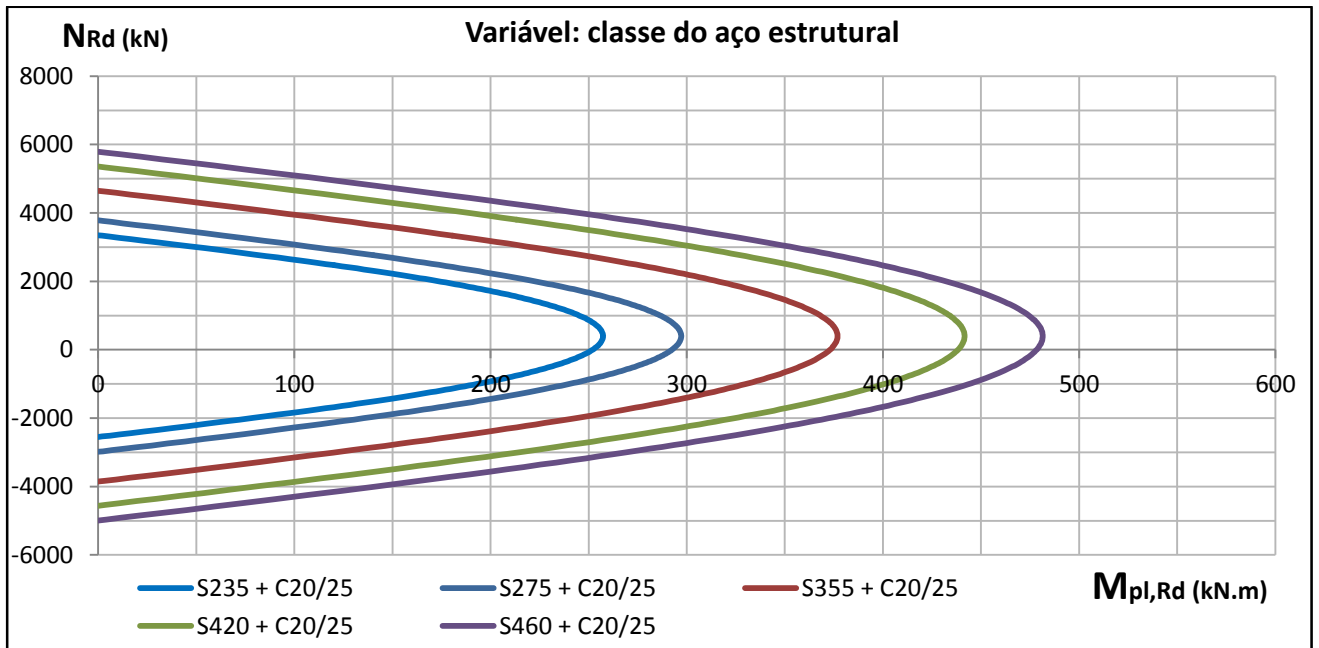
Materiais: Betão C35/45 e Aço A500



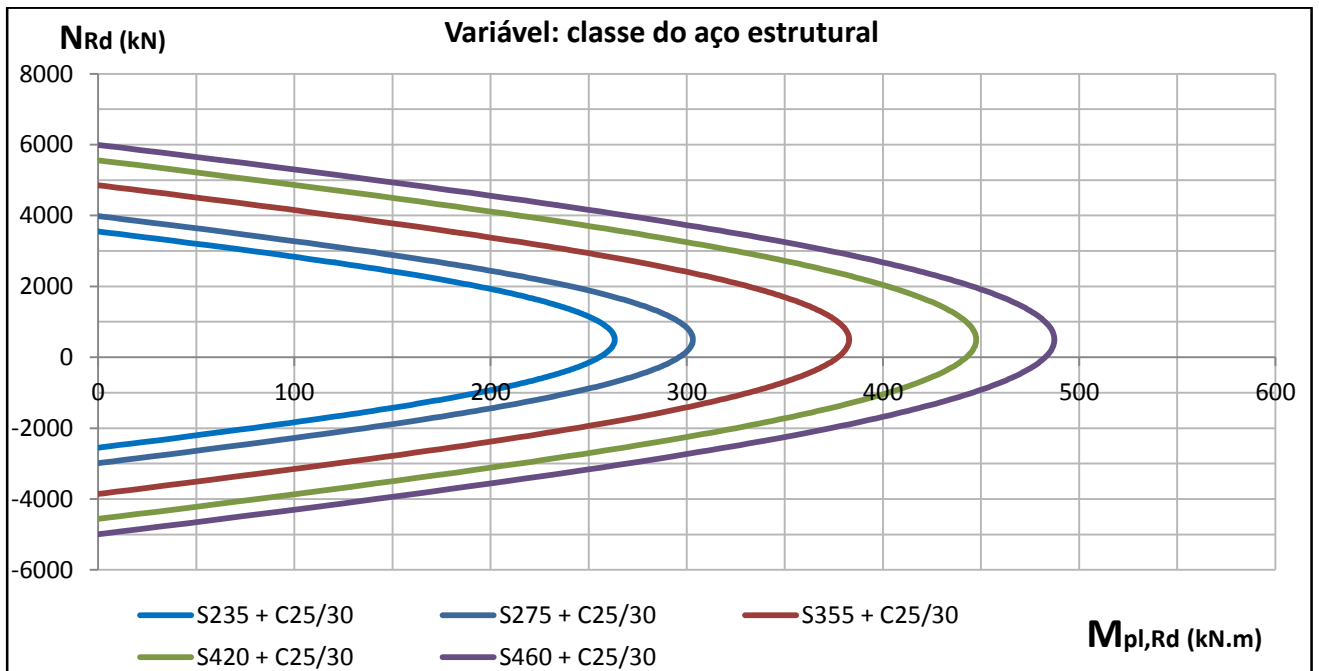
D.1.3 SECÇÃO CIRCULAR

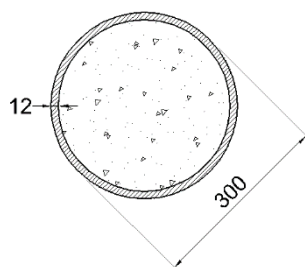


Materiais: Betão C20/25 e Aço A500

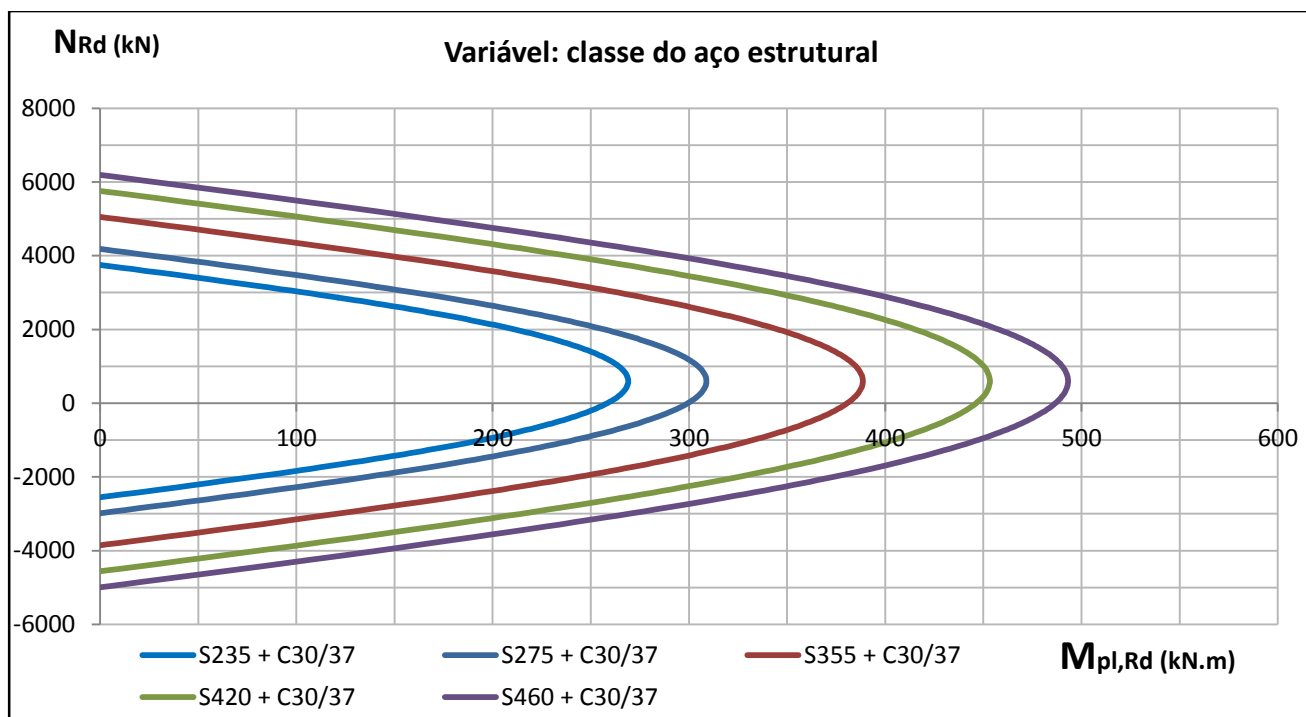


Materiais: Betão C25/30 e Aço A500

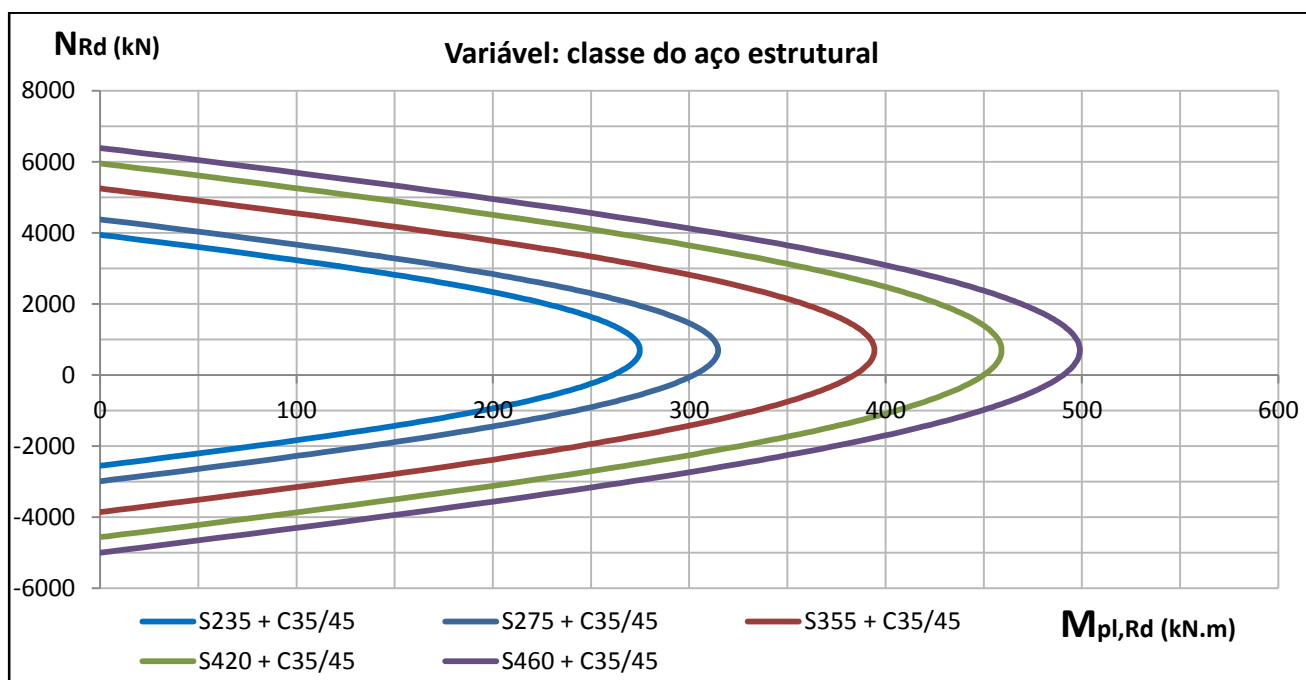


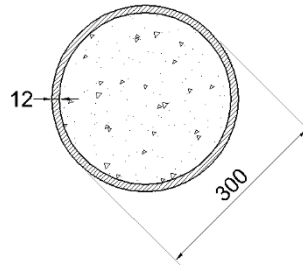


Materiais: Betão C30/37 e Aço A500

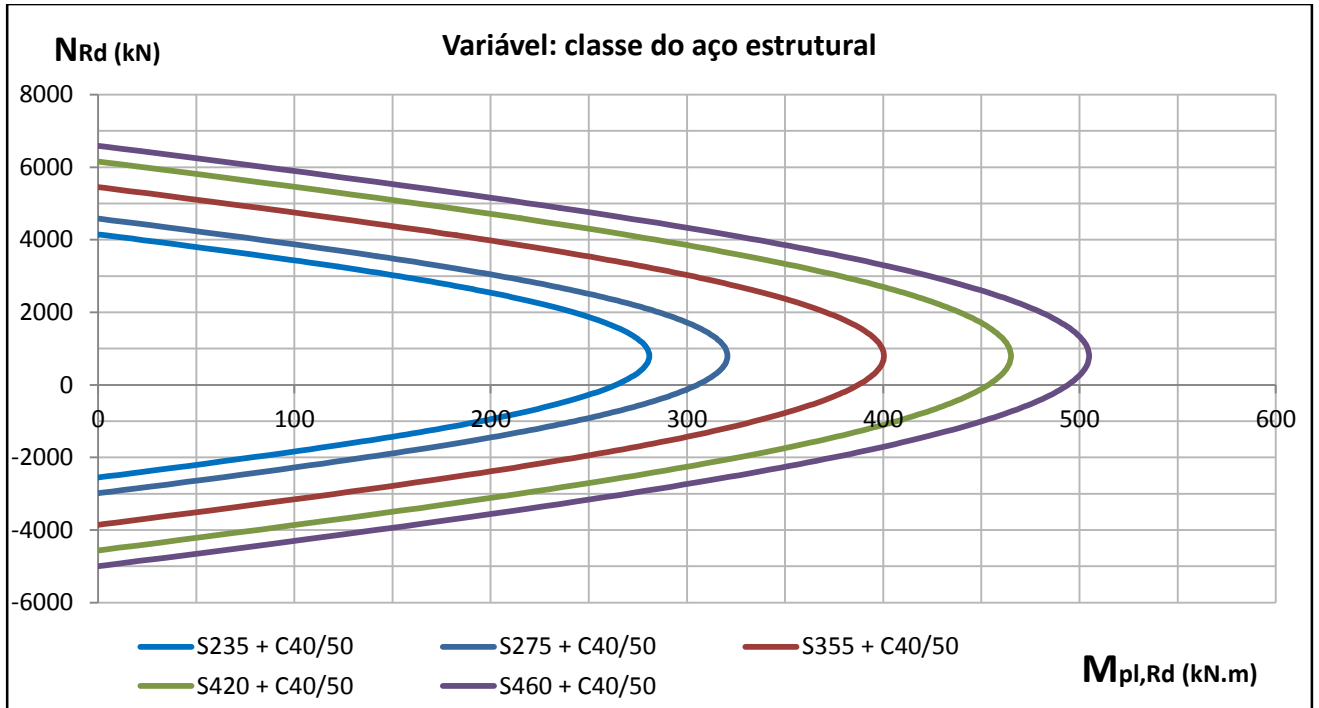


Materiais: Betão C35/45 e Aço A500

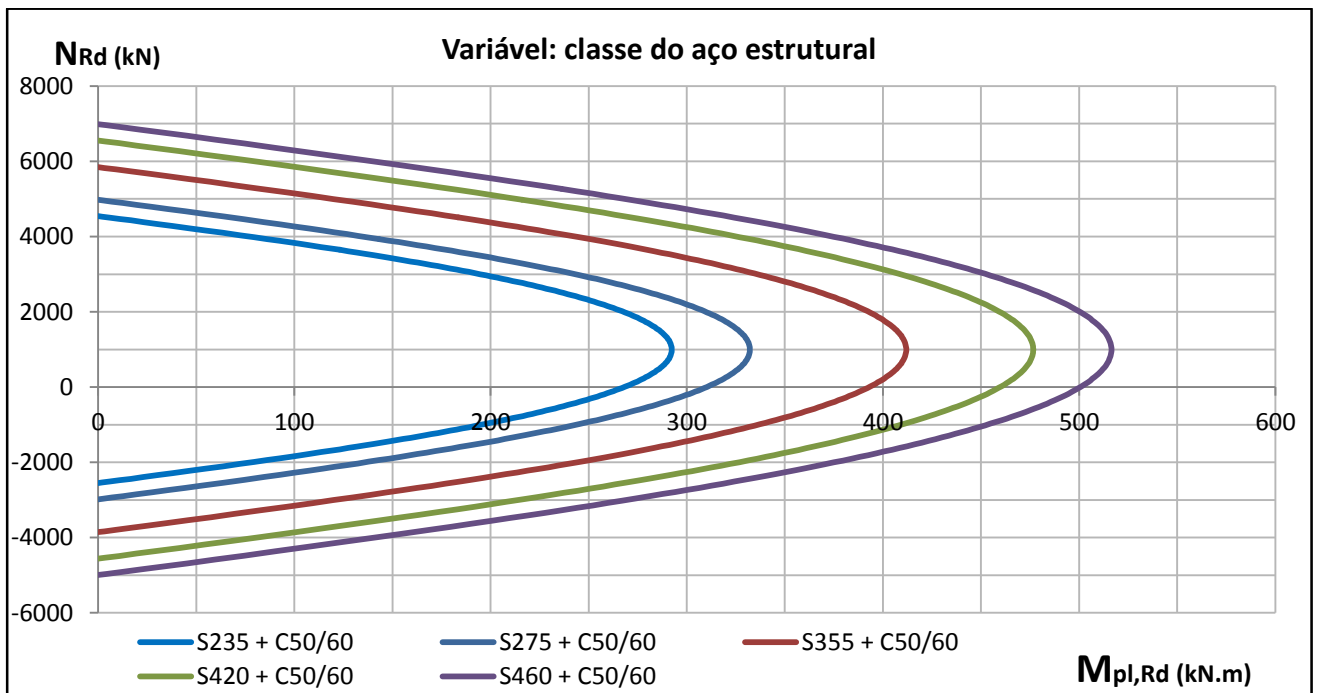




Materiais: Betão C40/50 e Aço A500

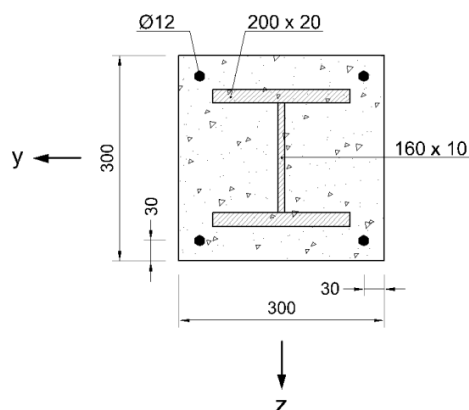


Materiais: Betão C50/60 e Aço A500

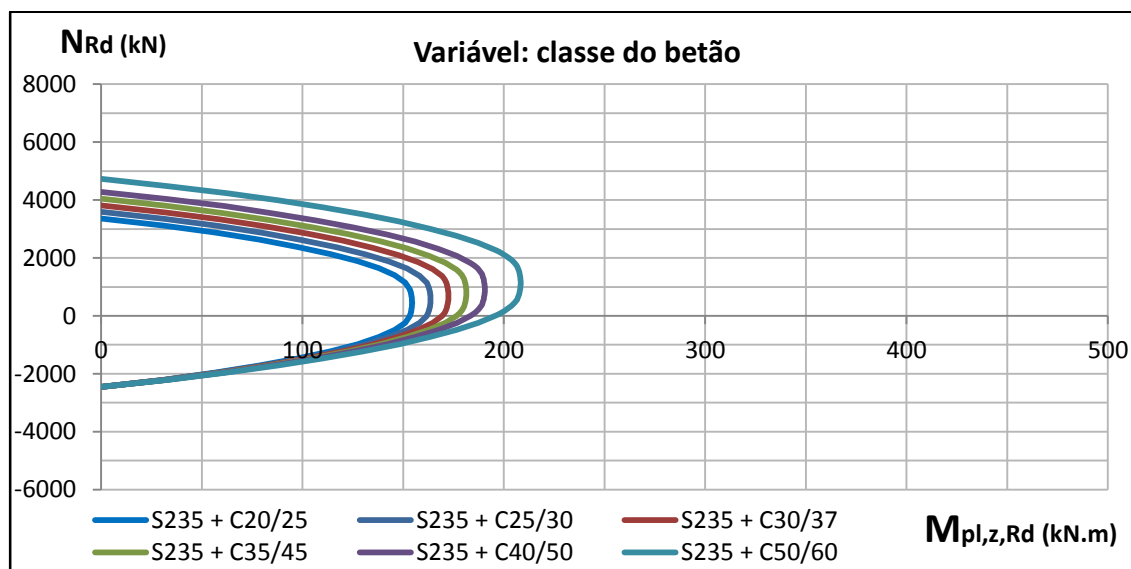
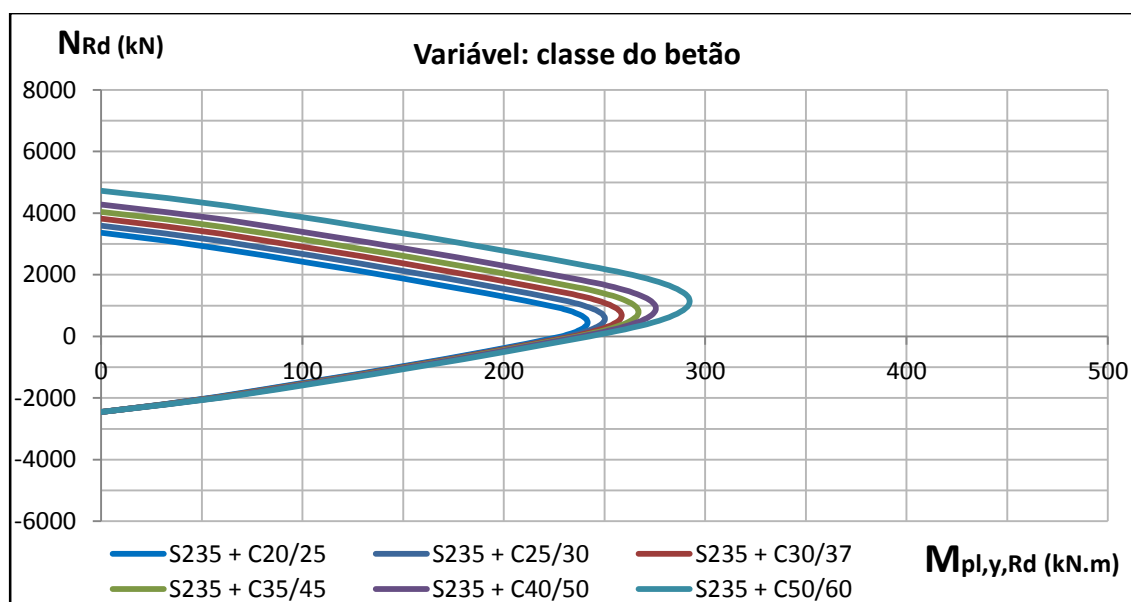


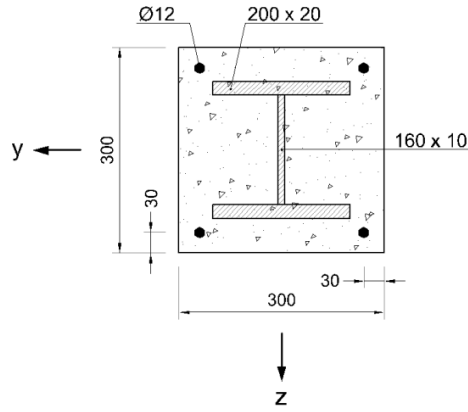
D.2 VARIÁVEL: CLASSE DO BETÃO

D.2.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

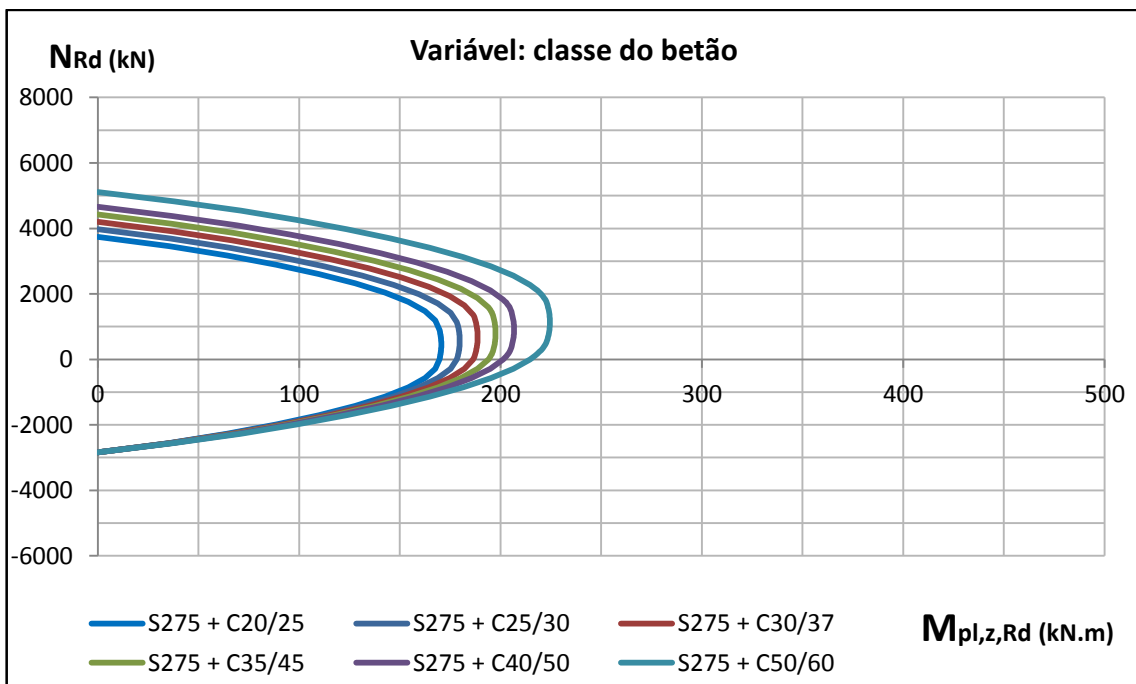
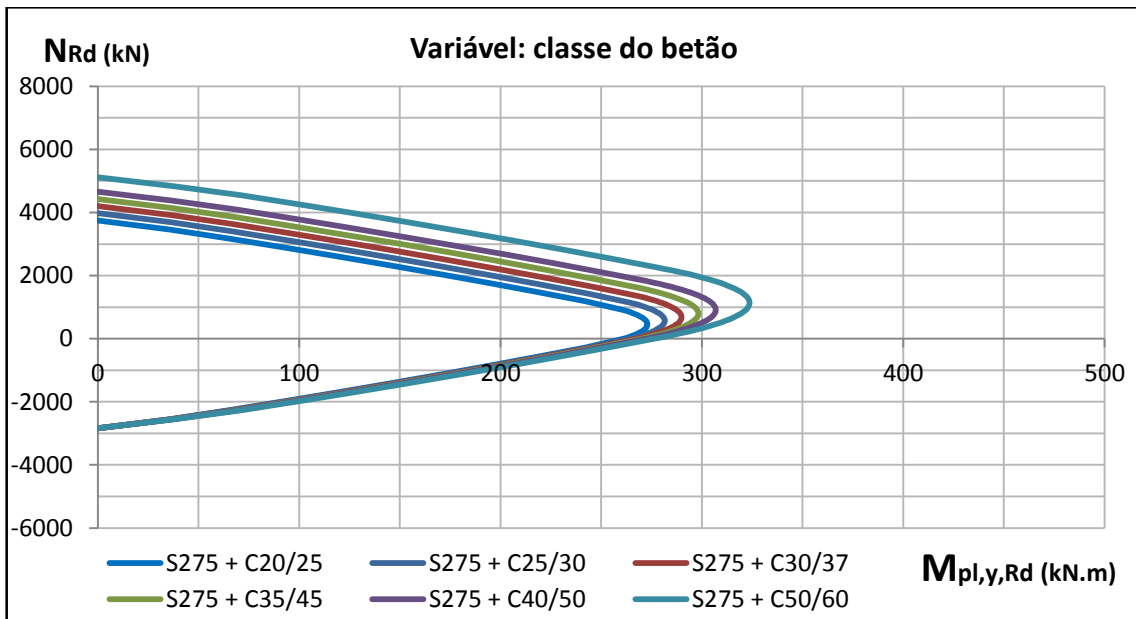


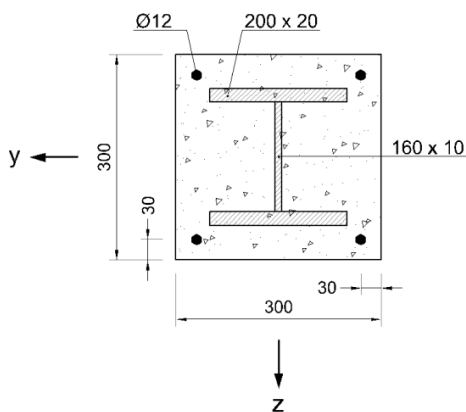
Materiais: Aço S235 e Aço A500



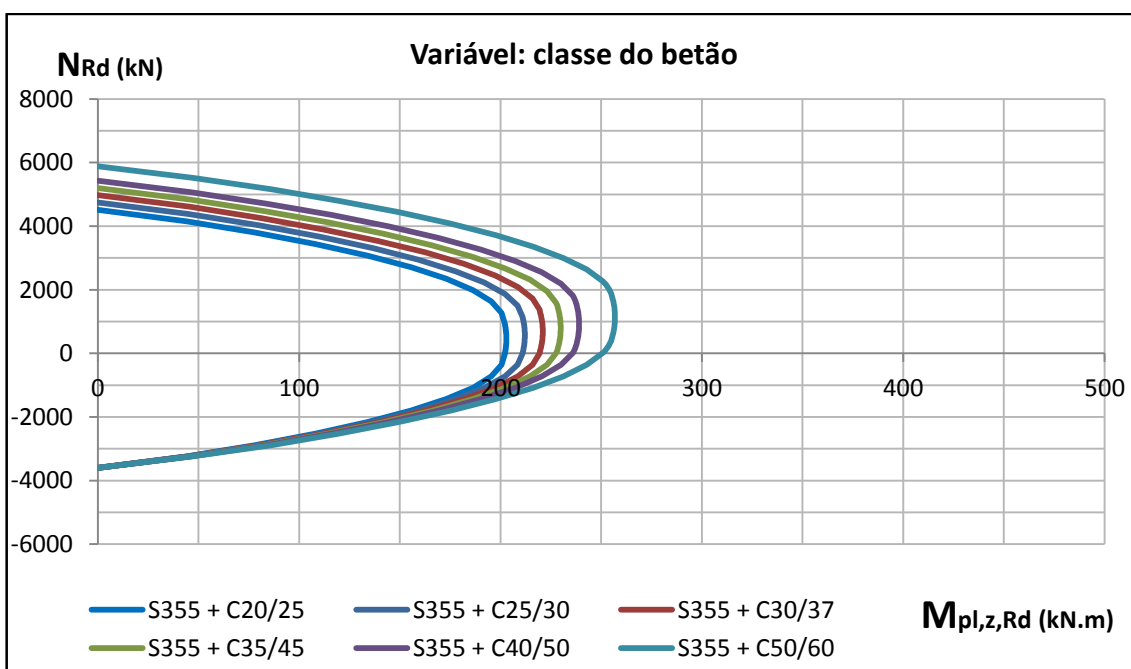
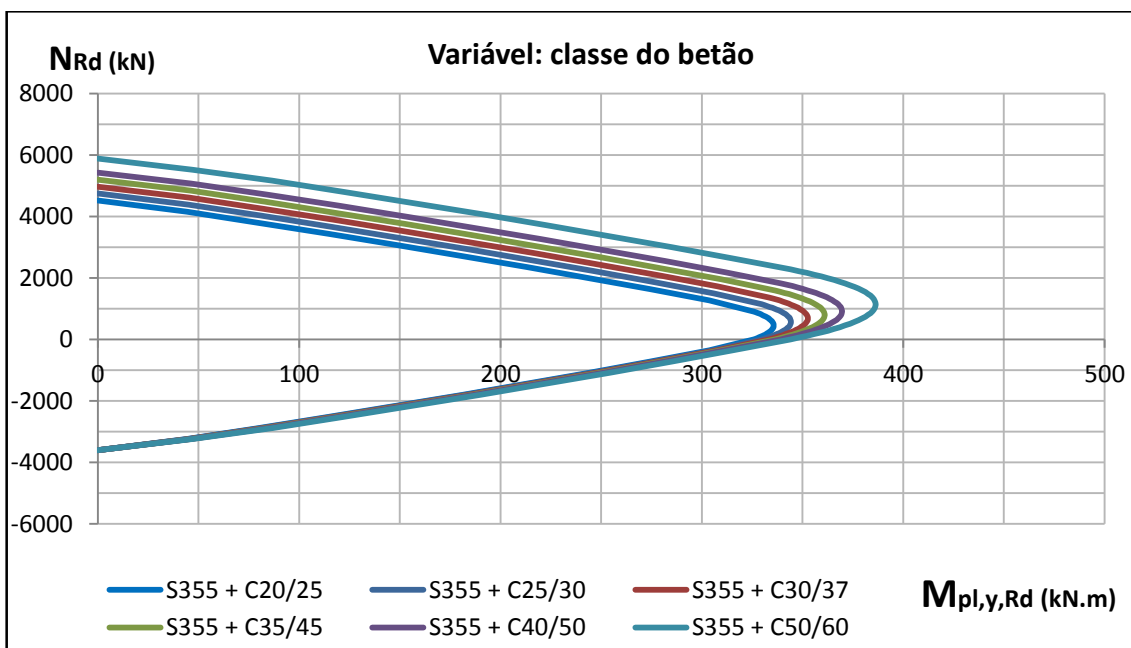


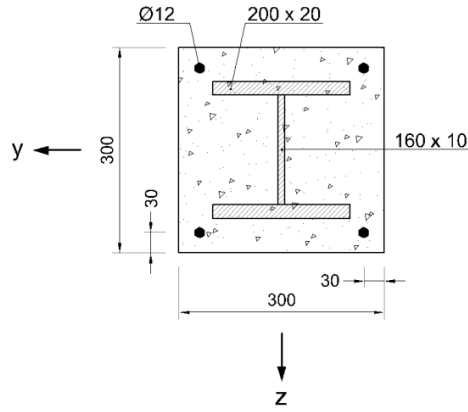
Materiais: Aço S275 e Aço A500



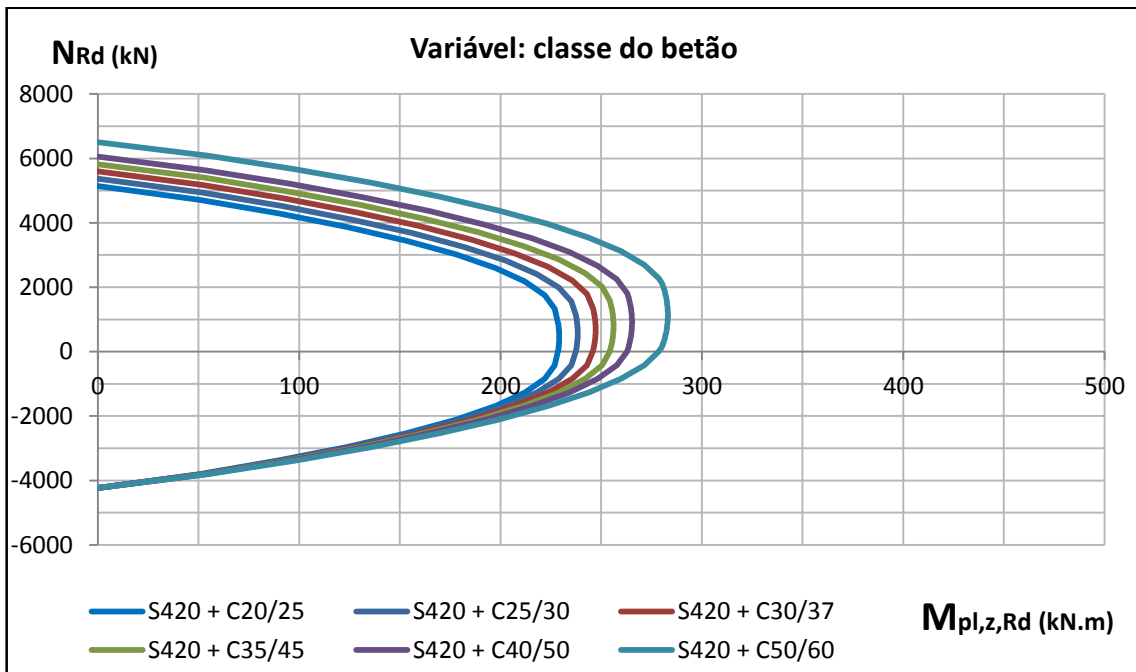
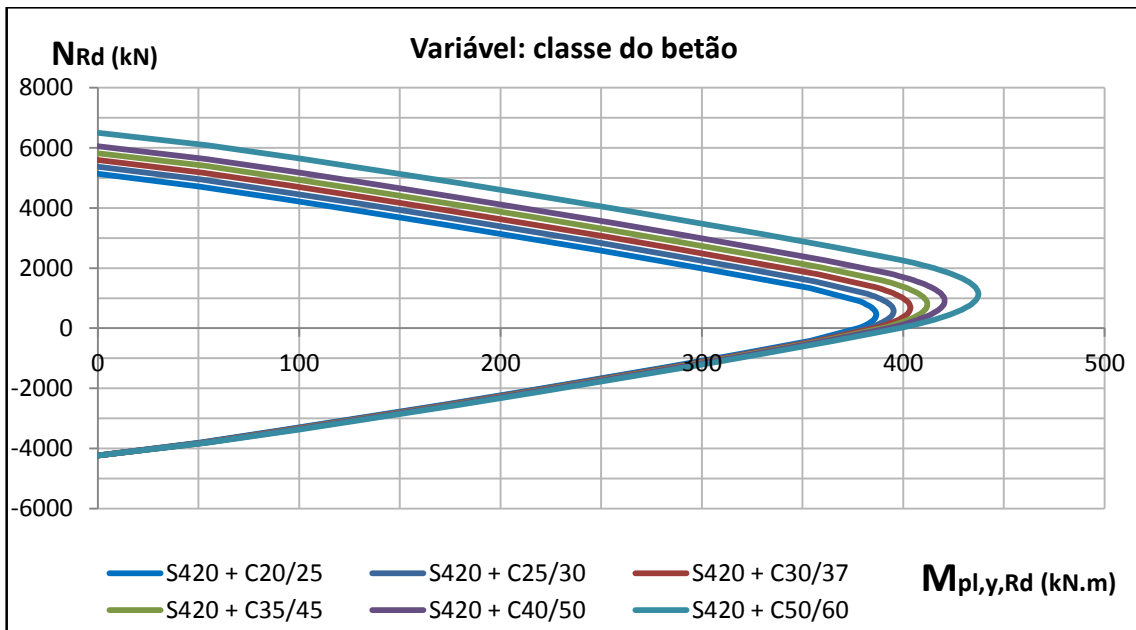


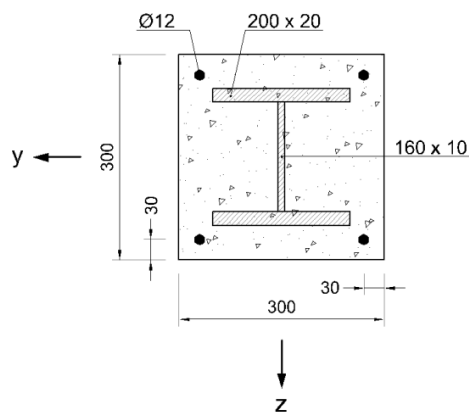
Materiais: Aço S355 e Aço A500



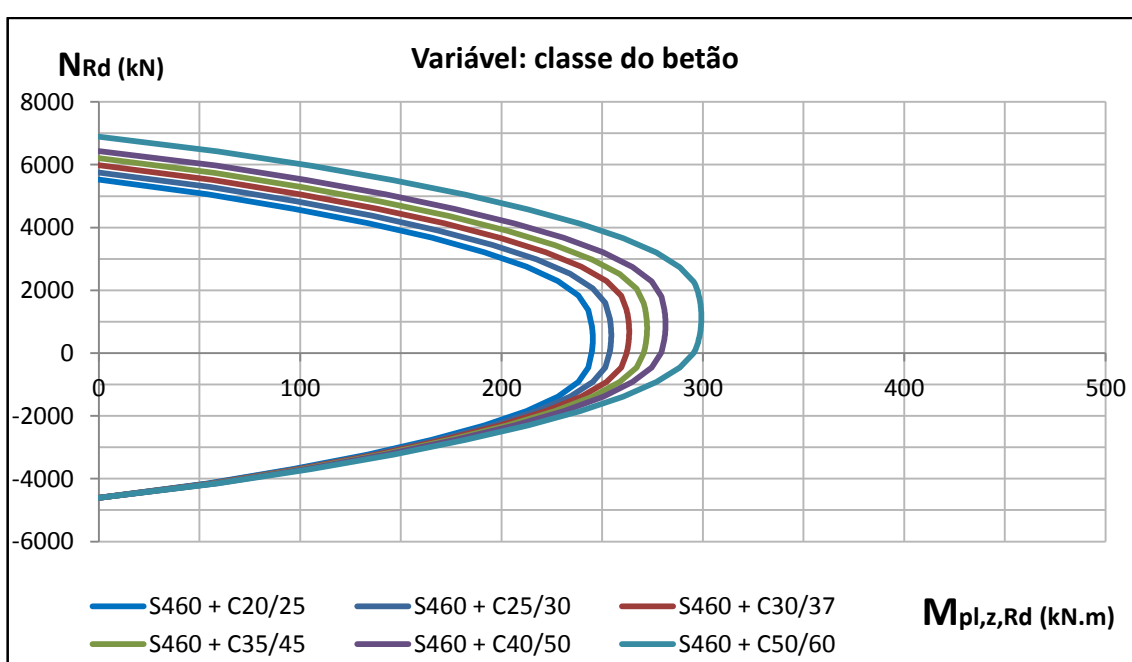
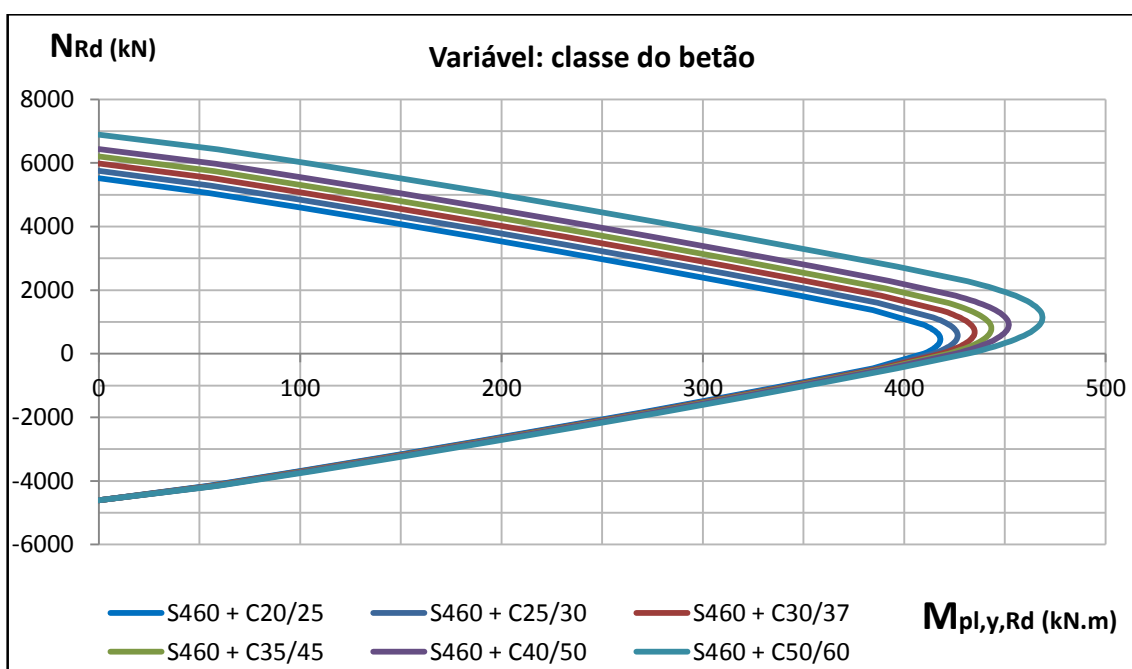


Materiais: Aço S420 e Aço A500

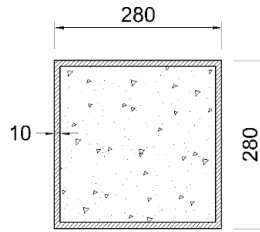




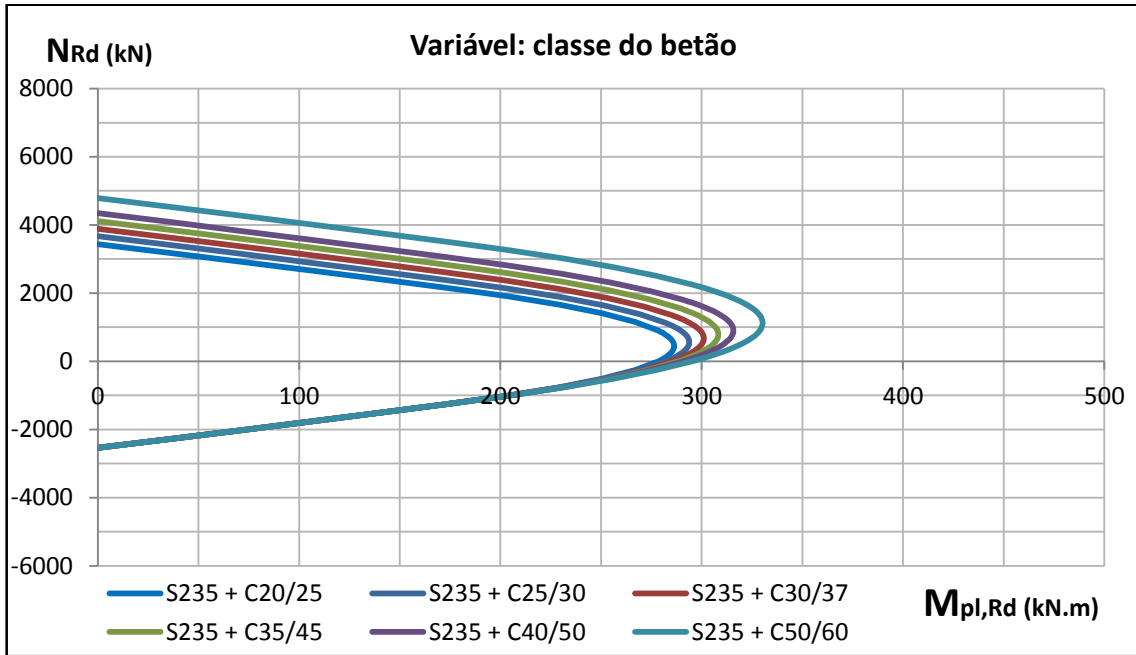
Materiais: Aço S460 e Aço A500



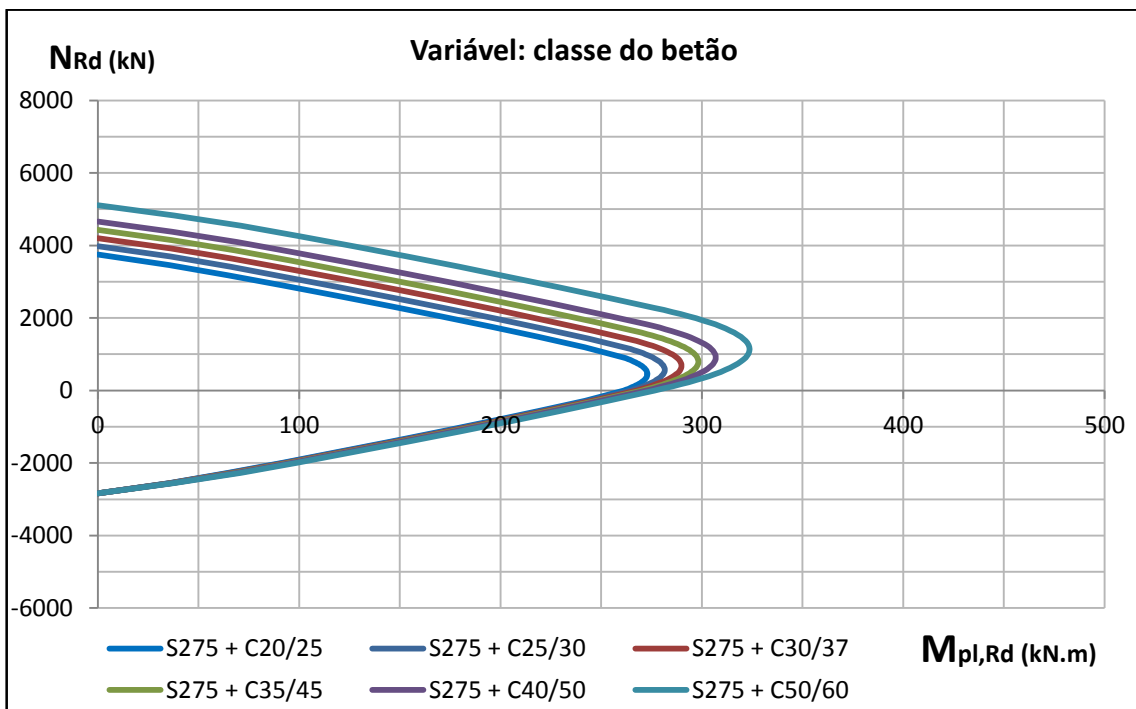
D.2.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

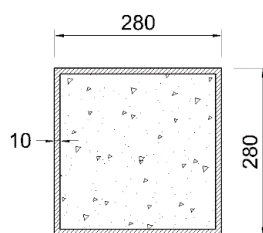


Materiais: Aço S235 e Aço A500

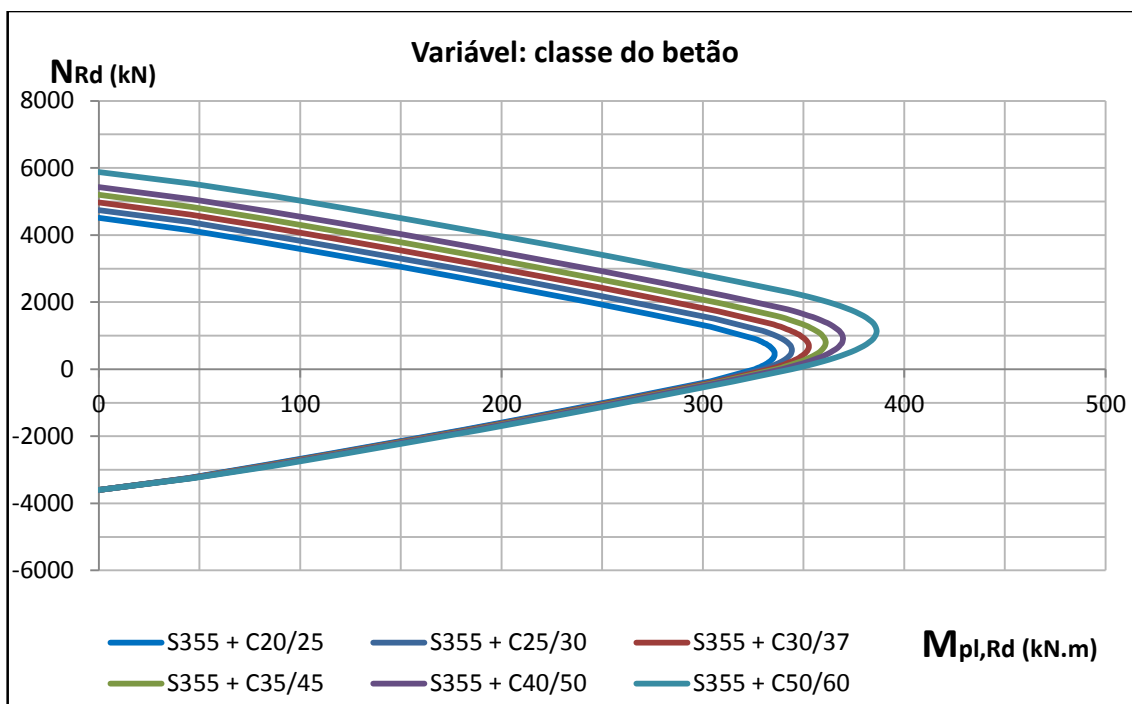


Materiais: Aço S275 e Aço A500

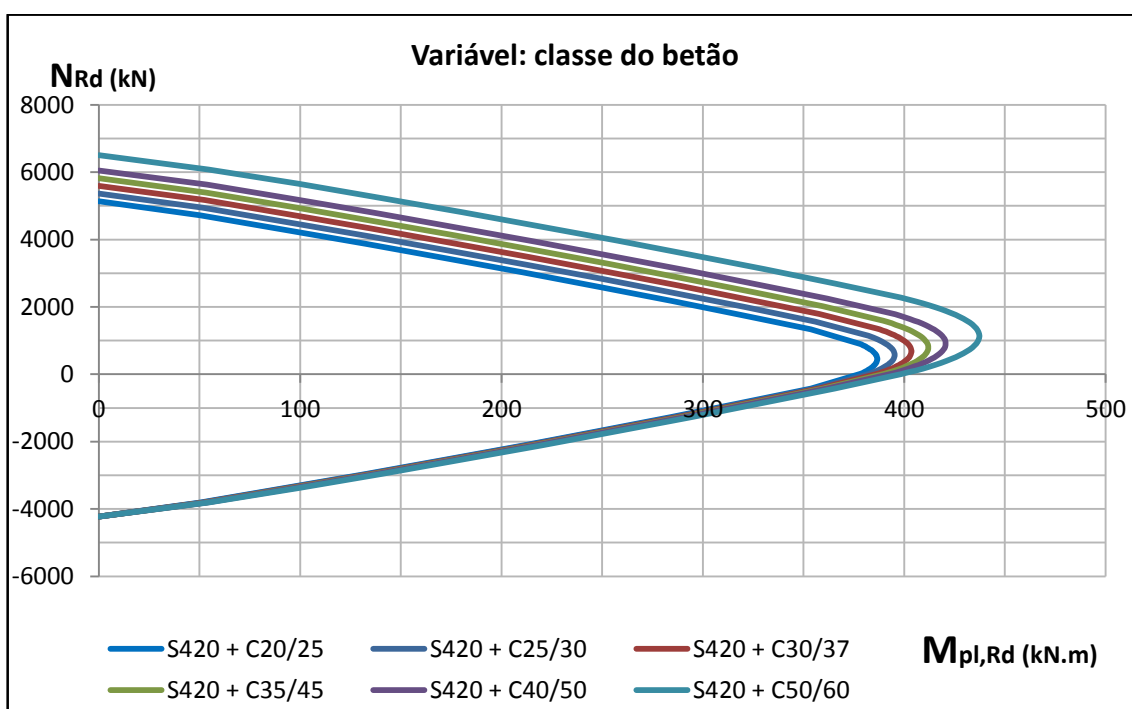


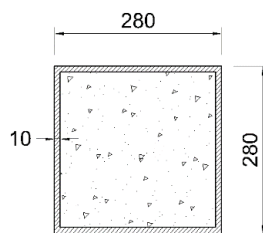


Materiais: Aço S355 e Aço A500

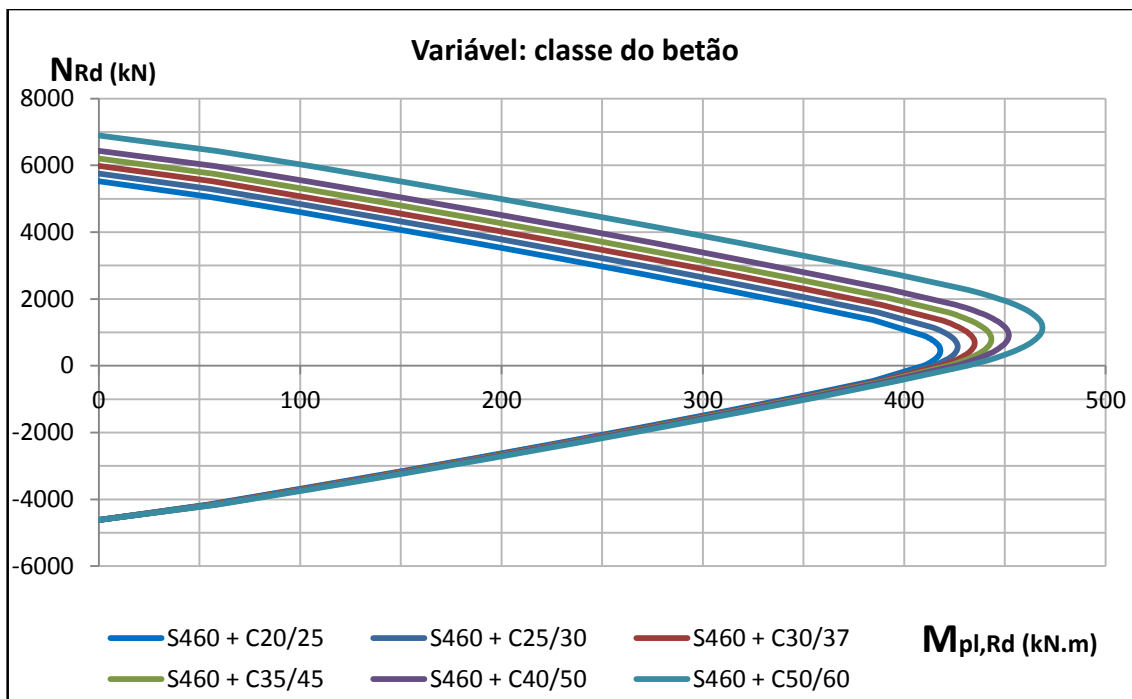


Materiais: Aço S420 e Aço A500

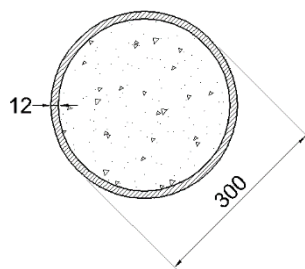




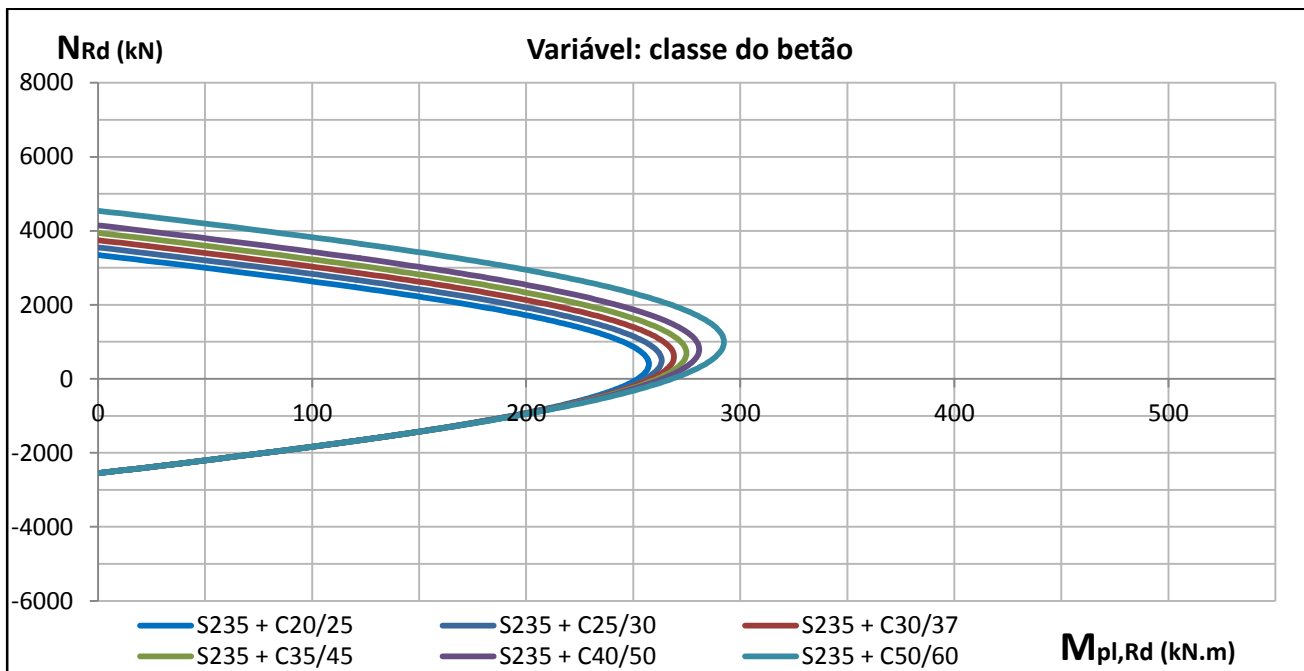
Materiais: Aço S460 e Aço A500



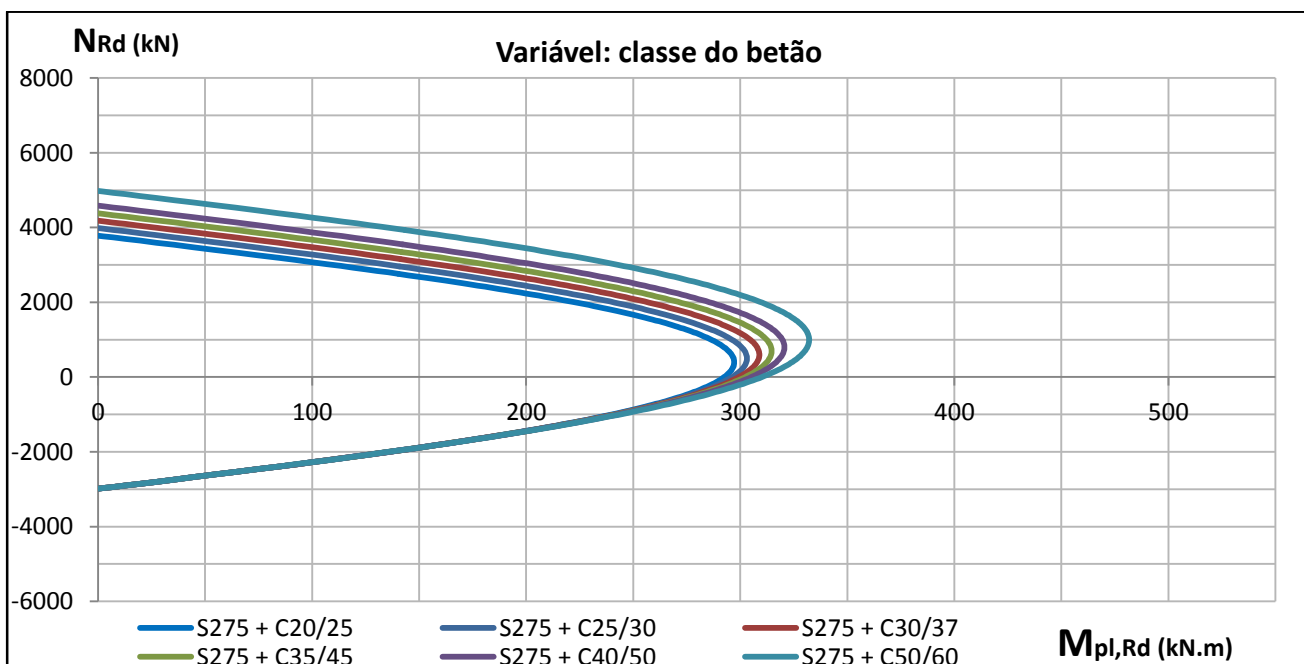
D.2.3 SECÇÃO CIRCULAR

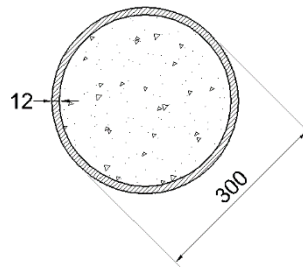


Materiais: Aço S235 e Aço A500

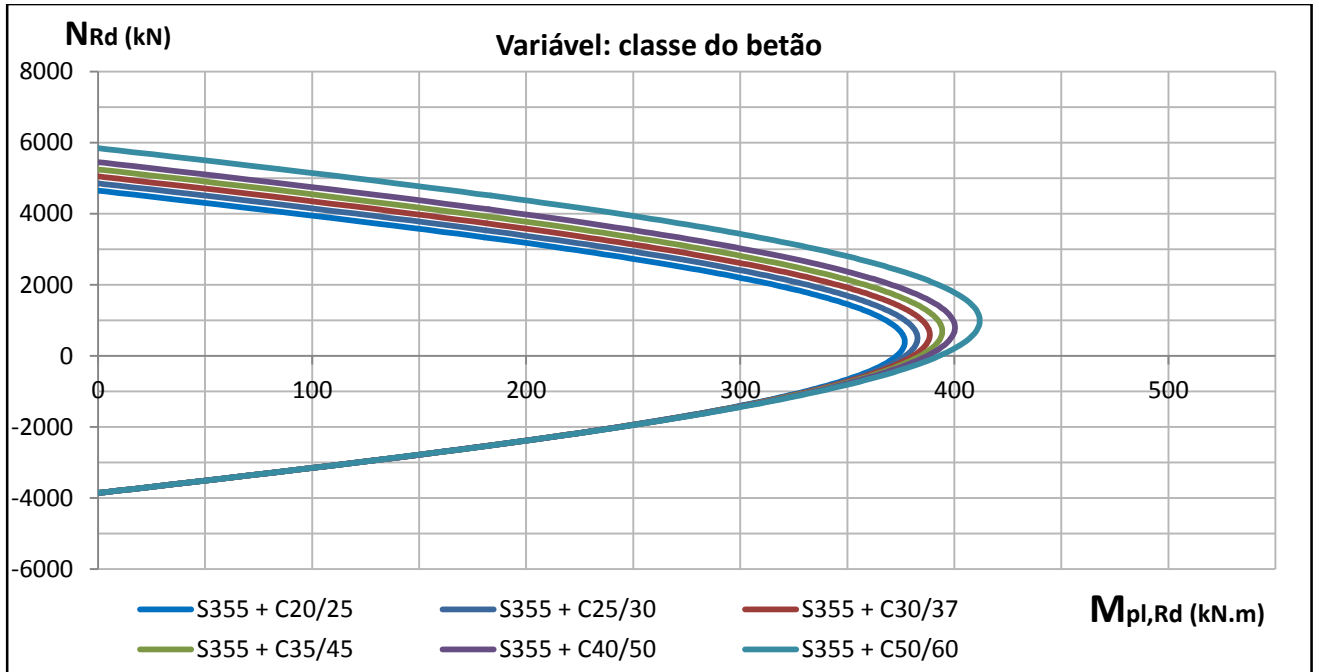


Materiais: Aço S275 e Aço A500

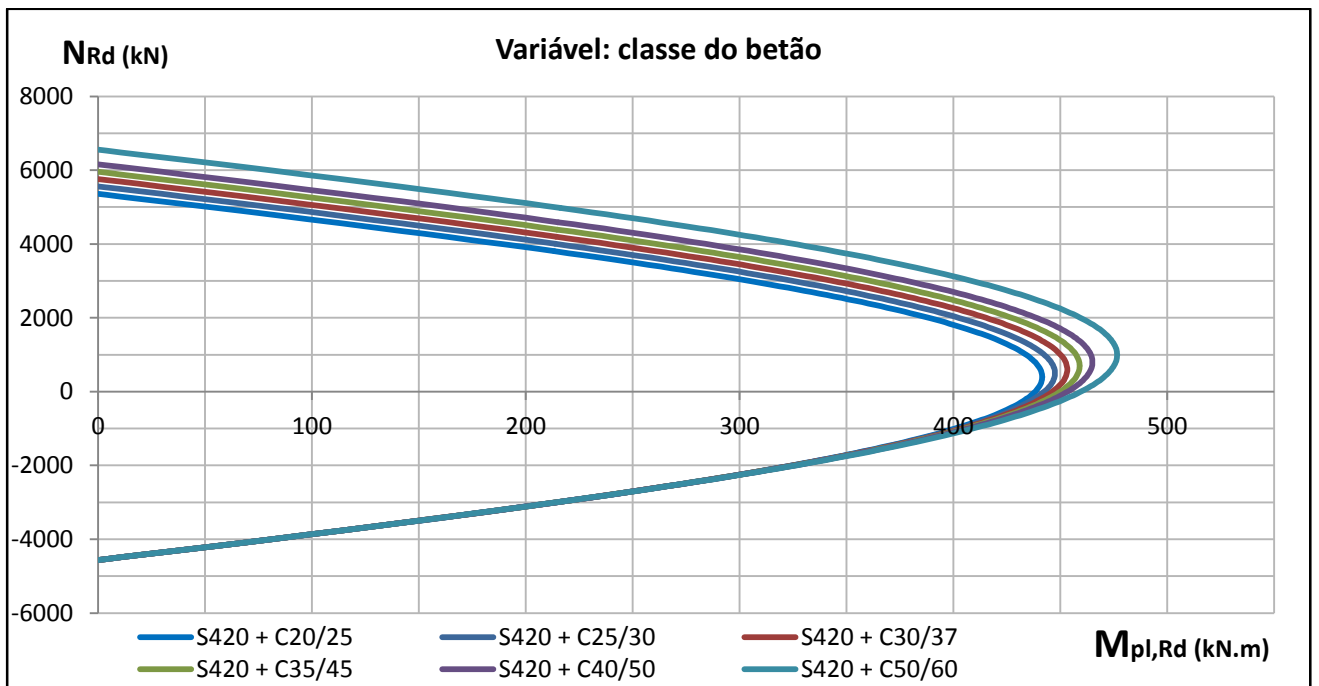


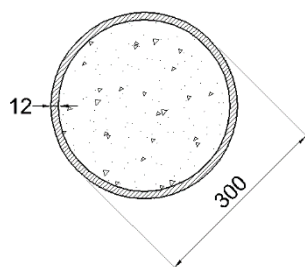


Materiais: Aço S355 e Aço A500

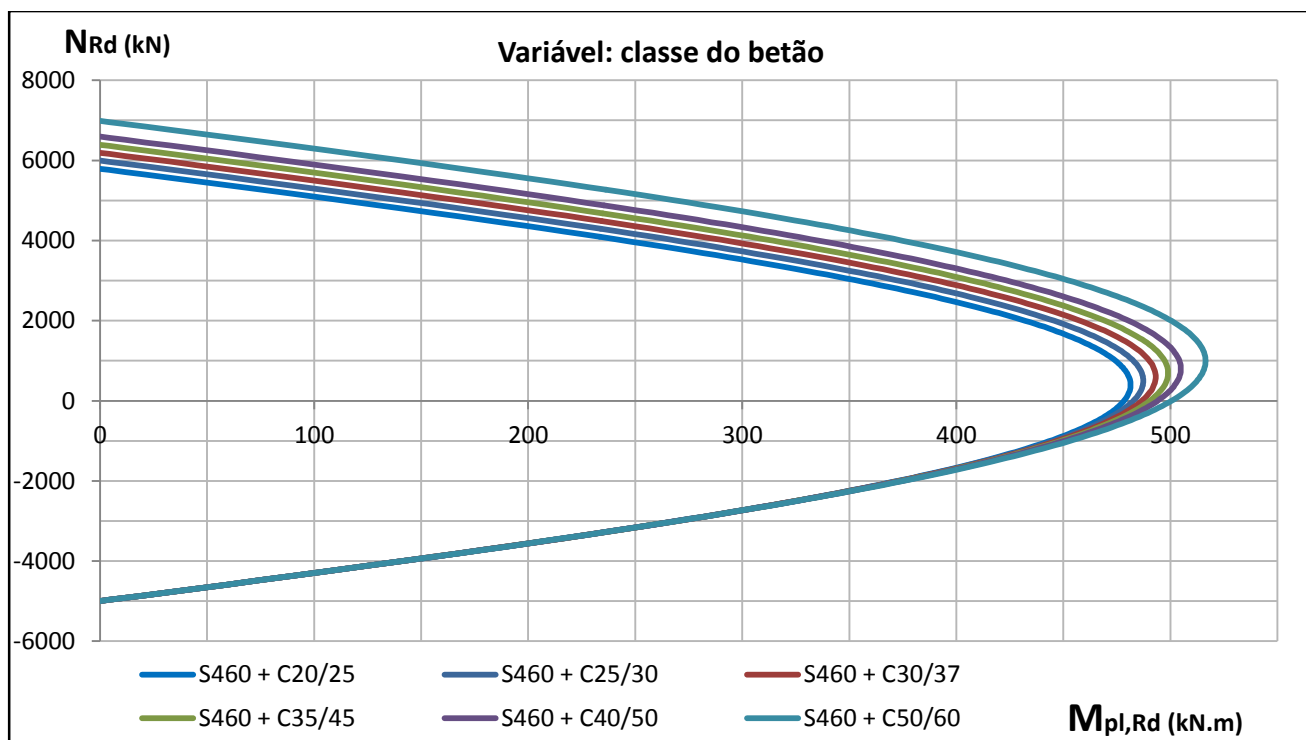


Materiais: Aço S420 e Aço A500



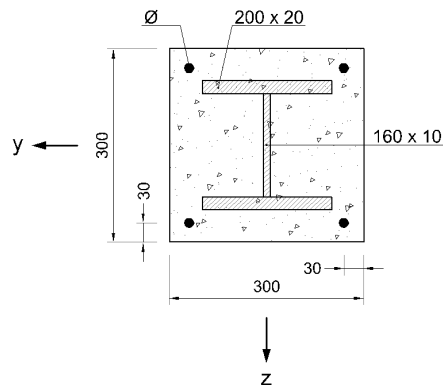


Materiais: Aço S460 e Aço A500

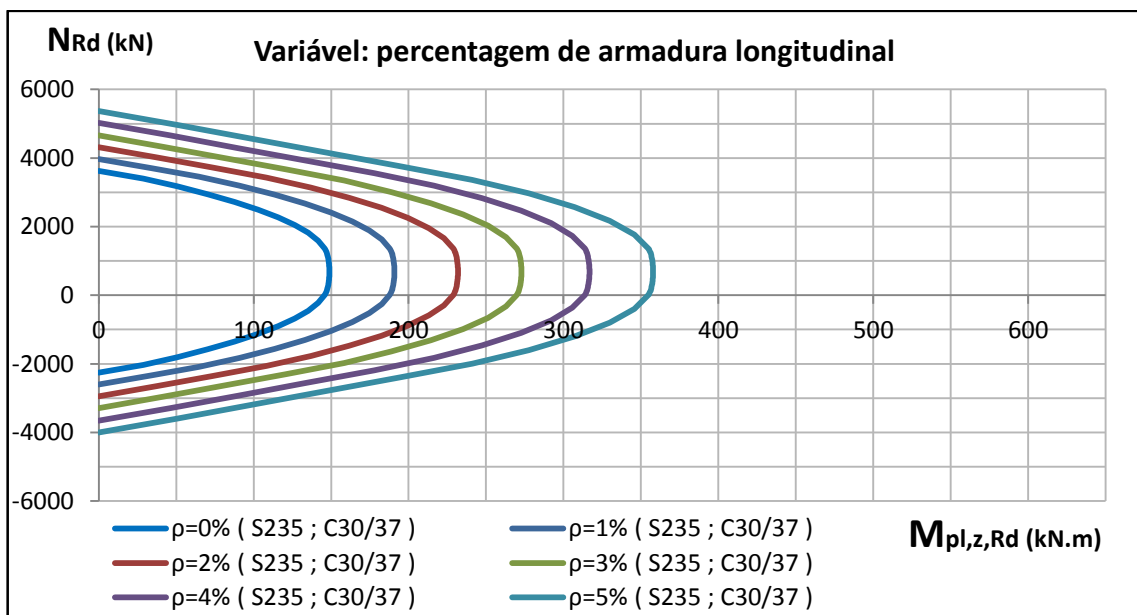
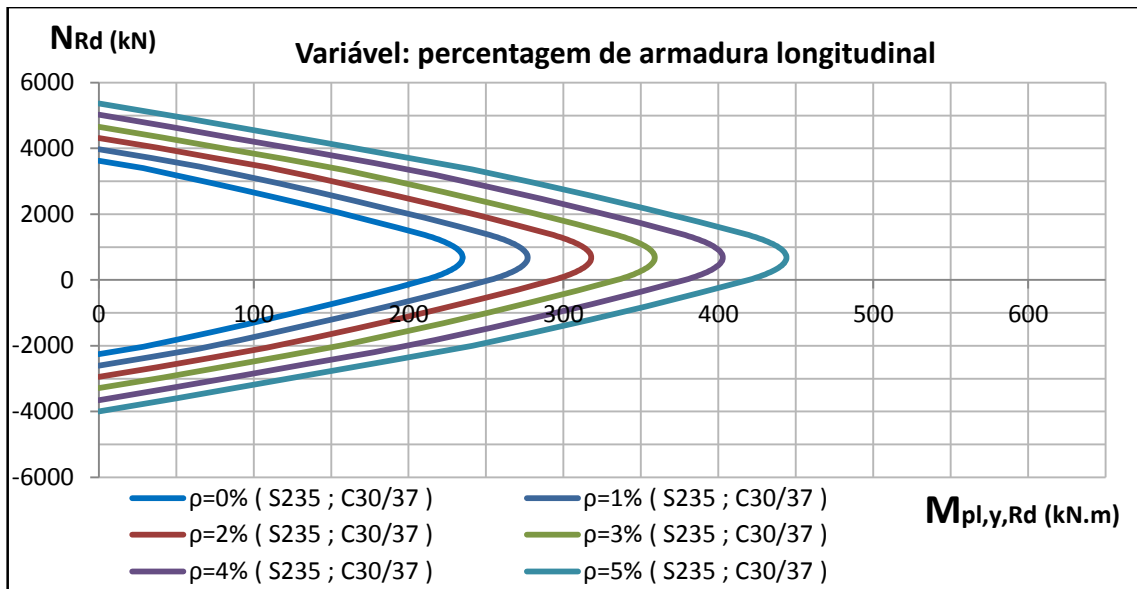


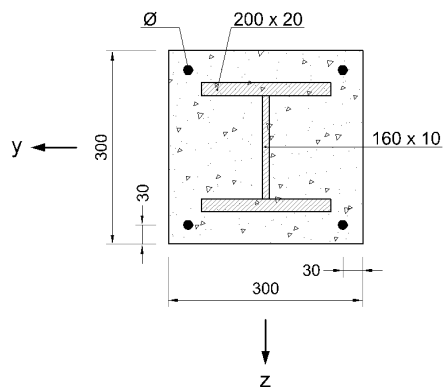
D.3 VARIÁVEL: PERCENTAGEM DE ARMADURA

D.3.1 SECÇÃO TOTALMENTE BETONADA

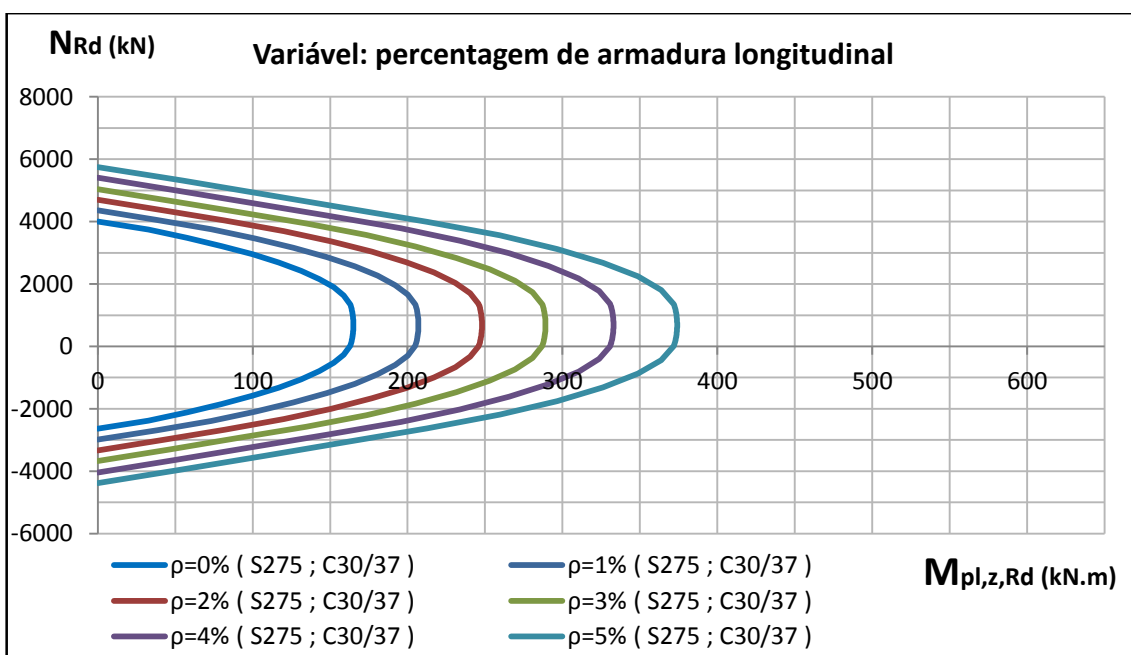
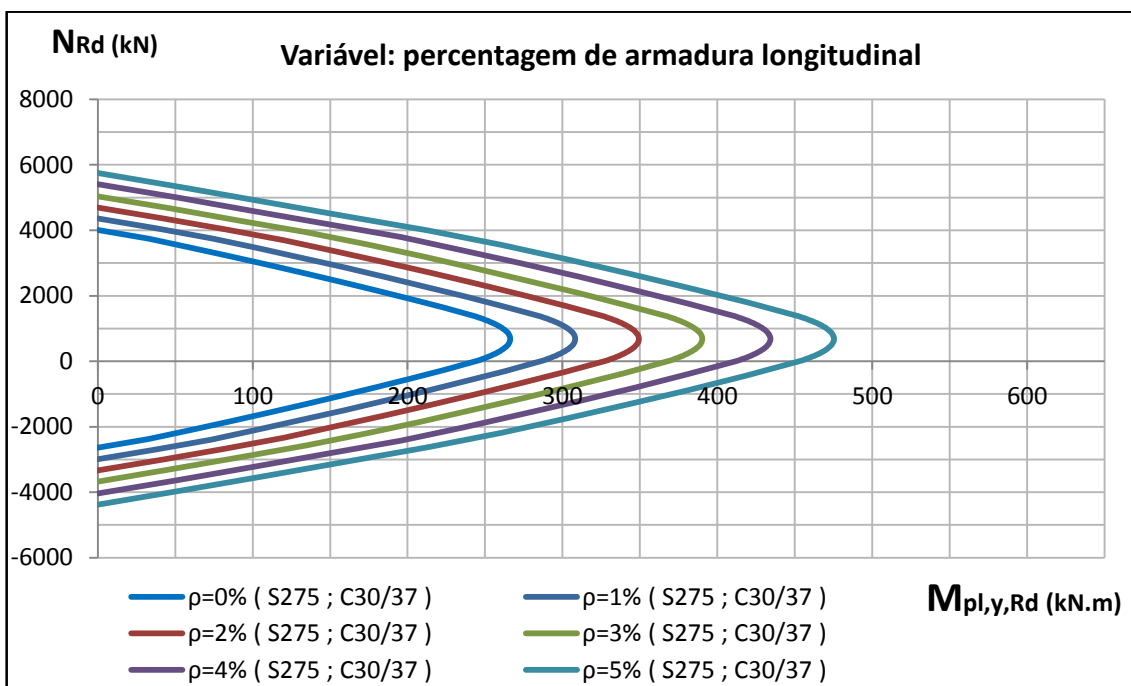


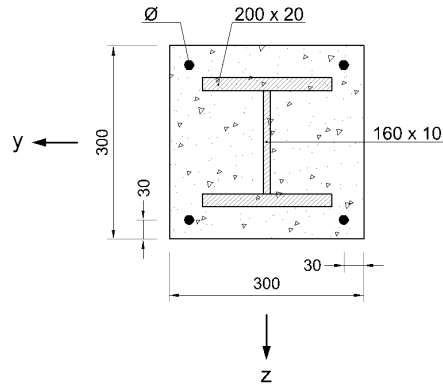
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235



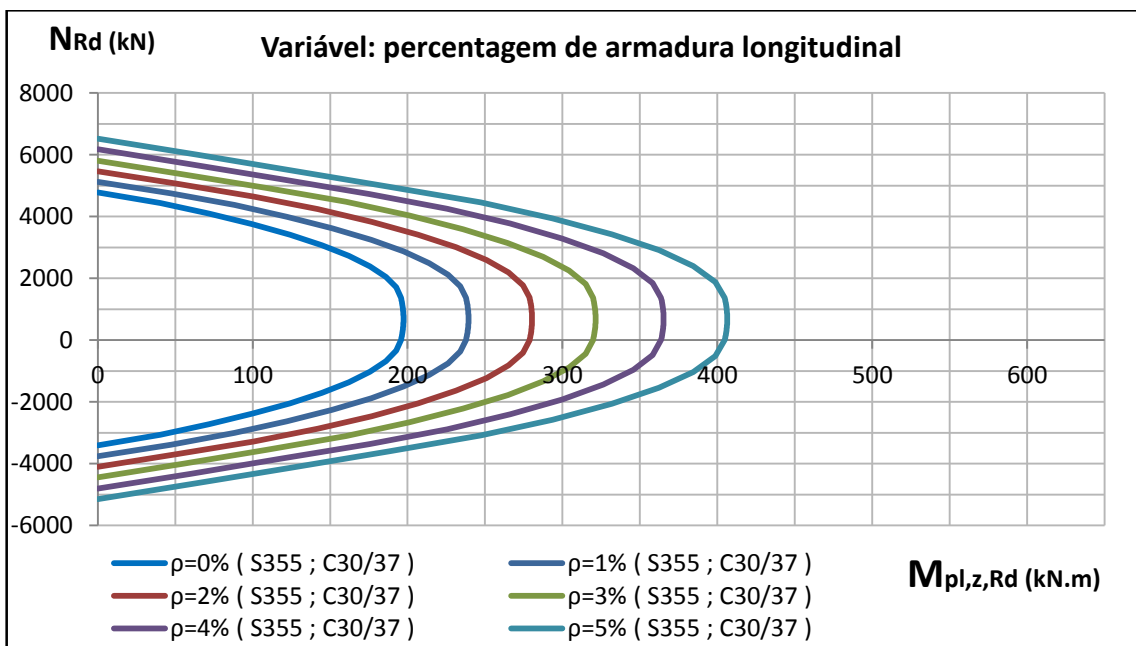
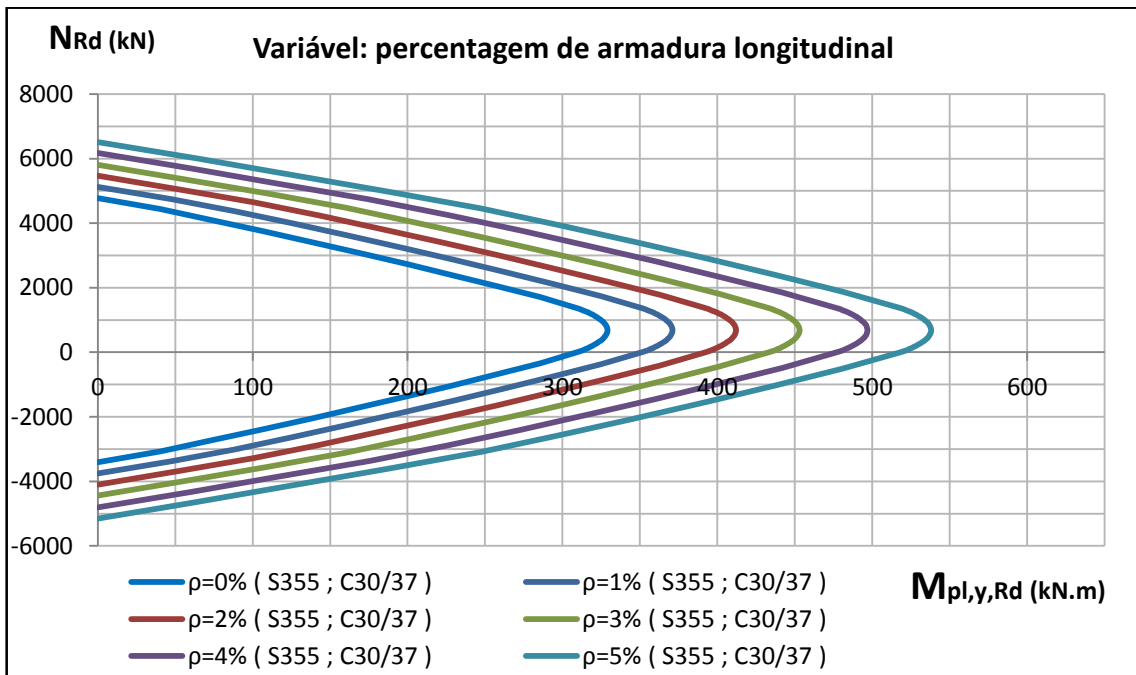


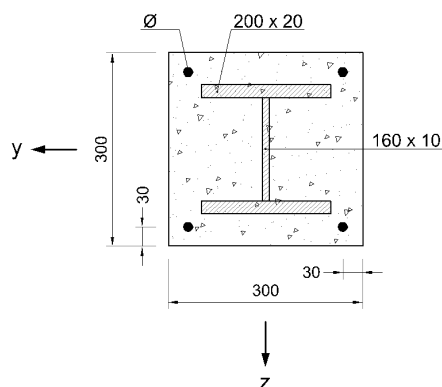
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275



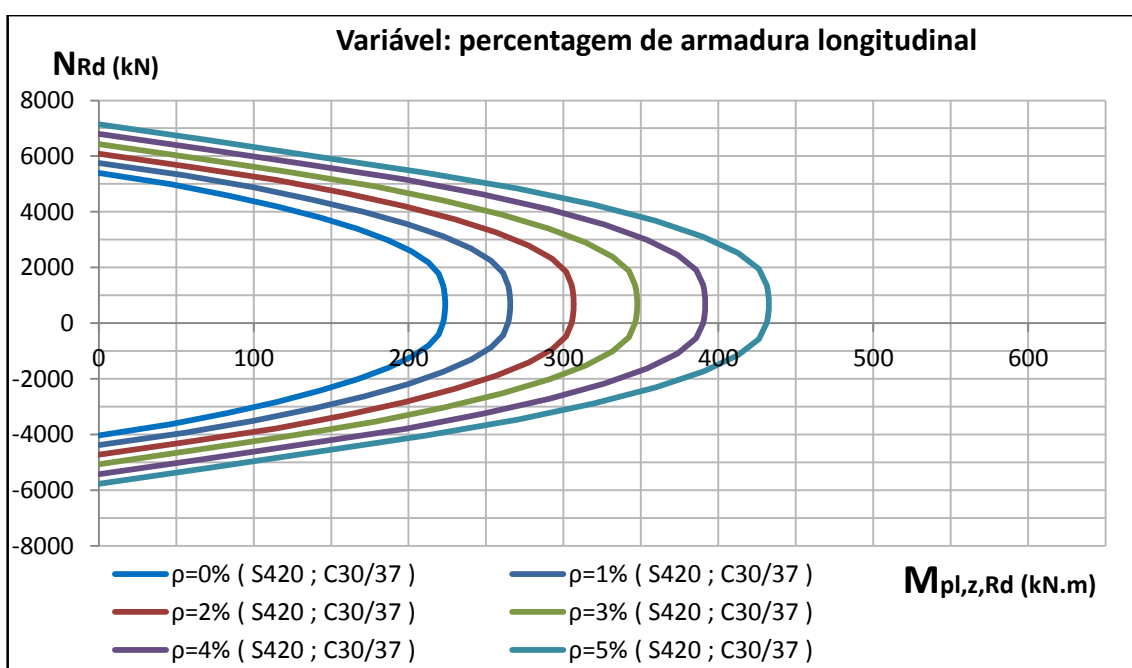
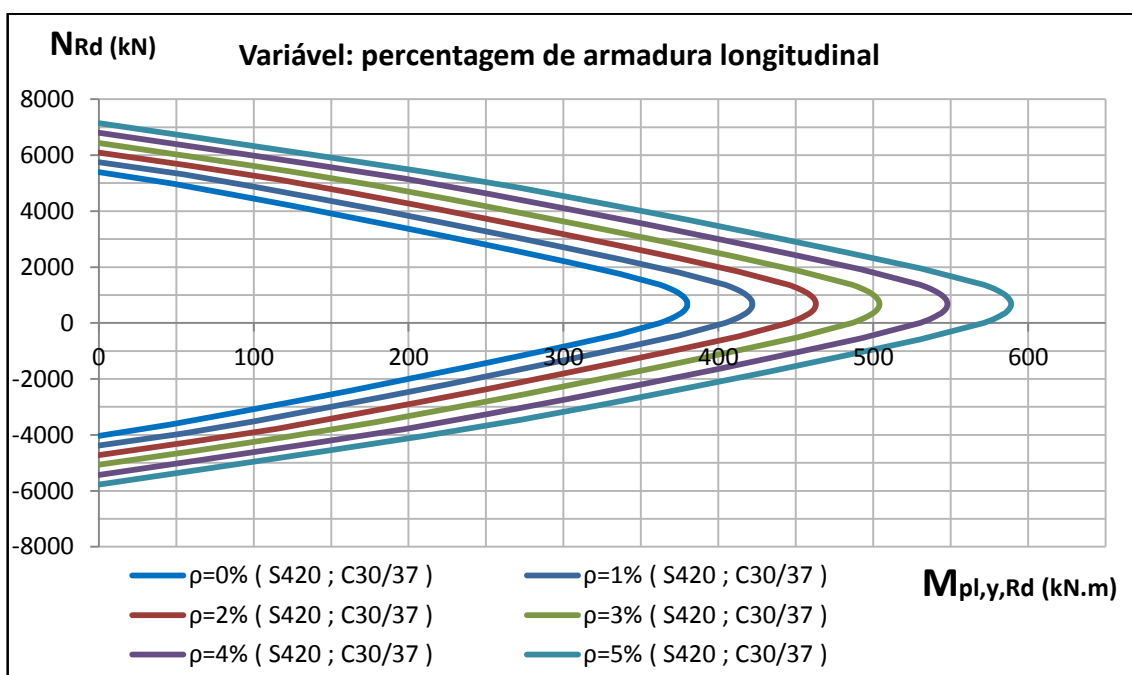


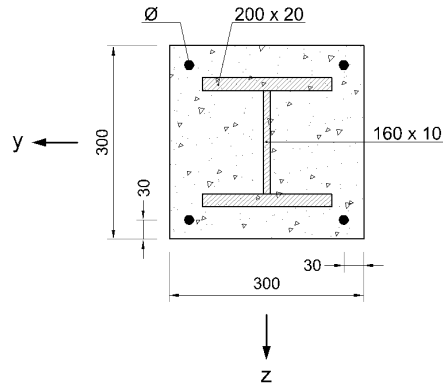
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355



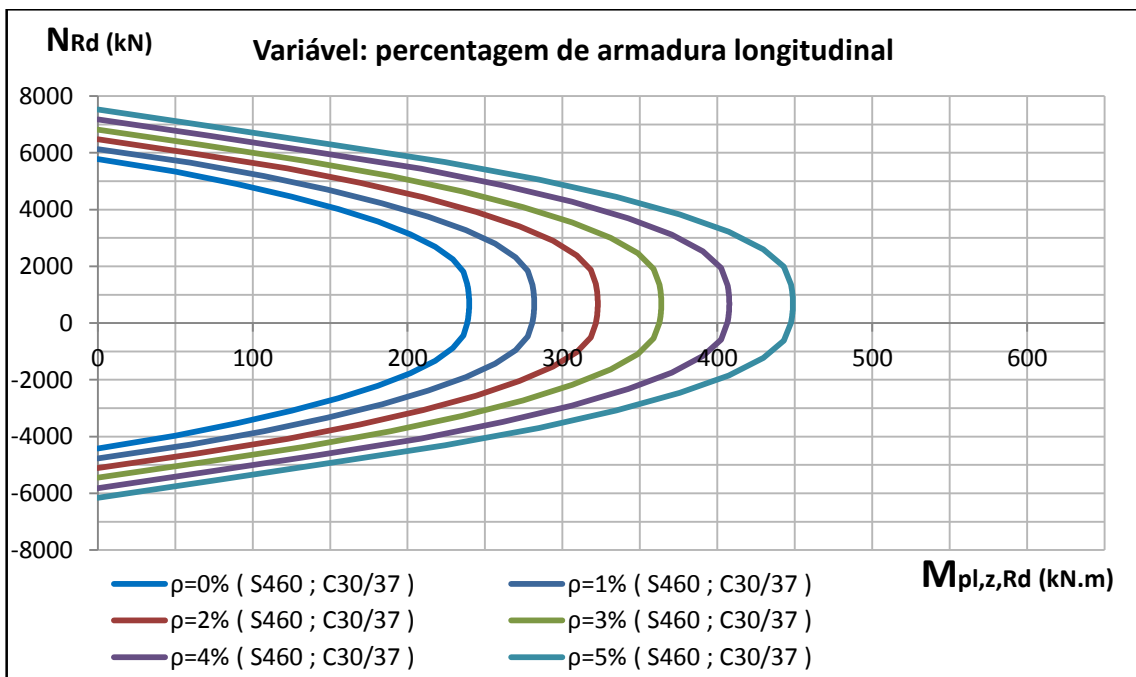
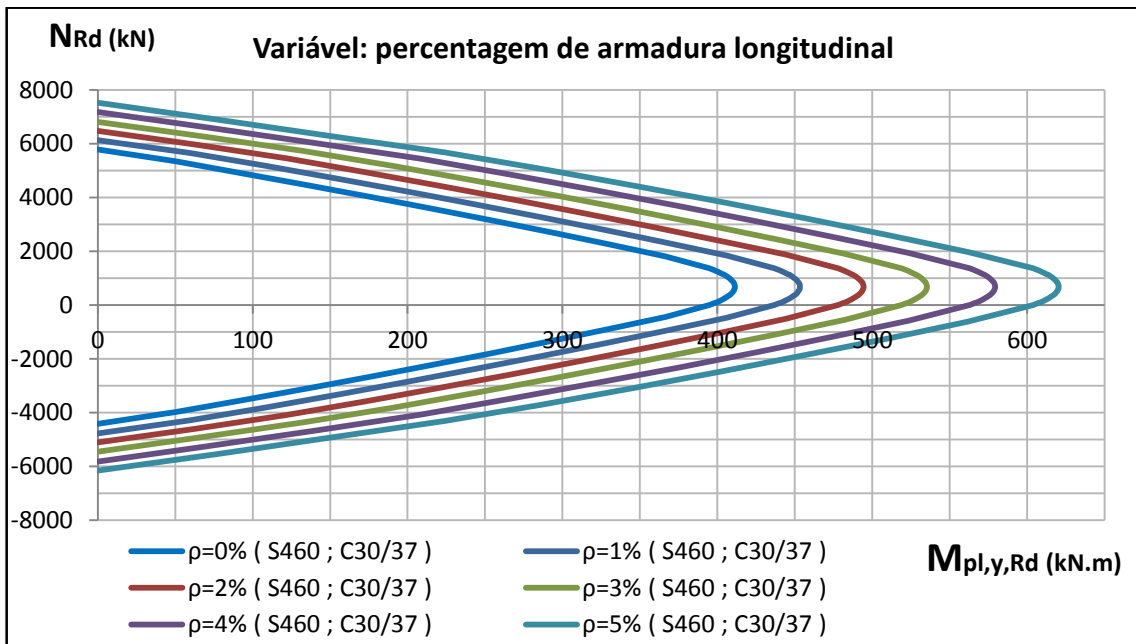


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420

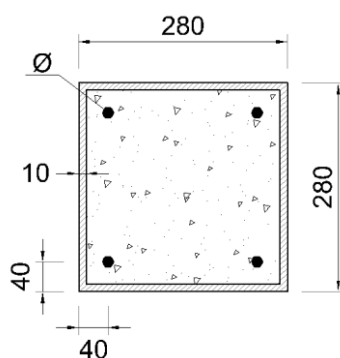




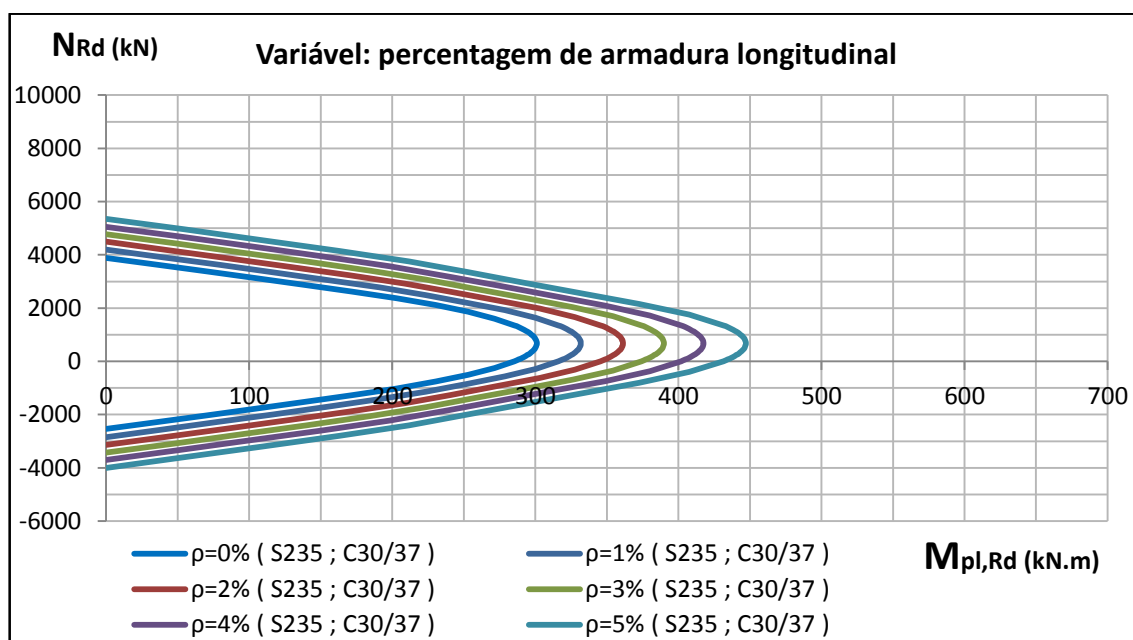
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460



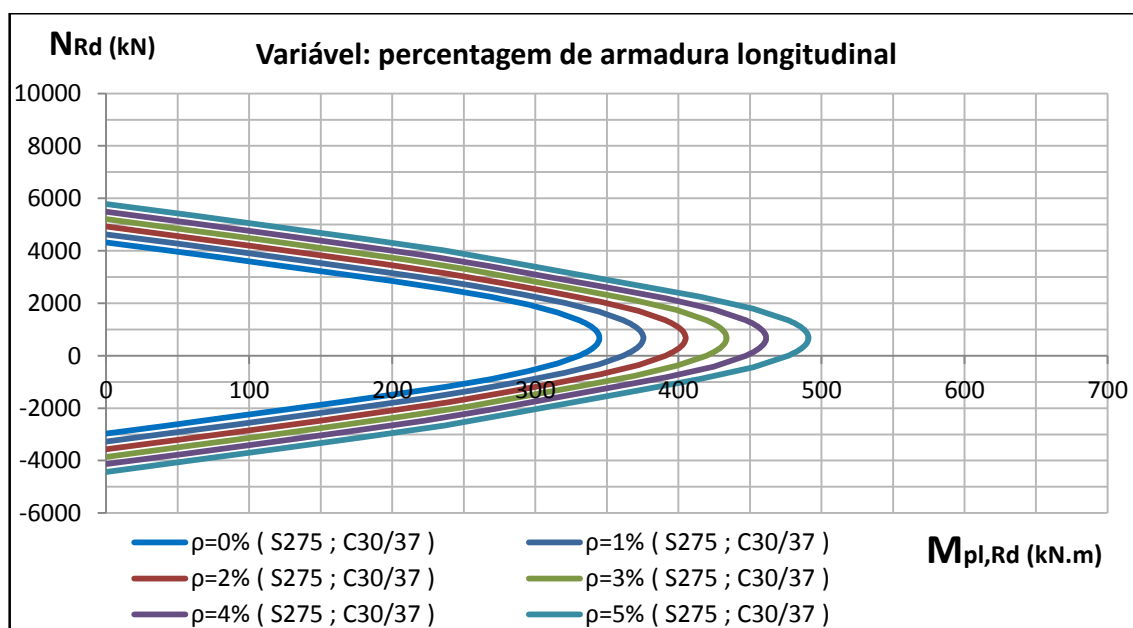
D.3.2 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

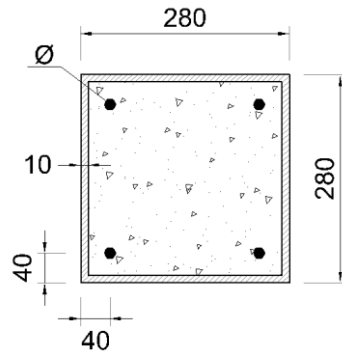


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235

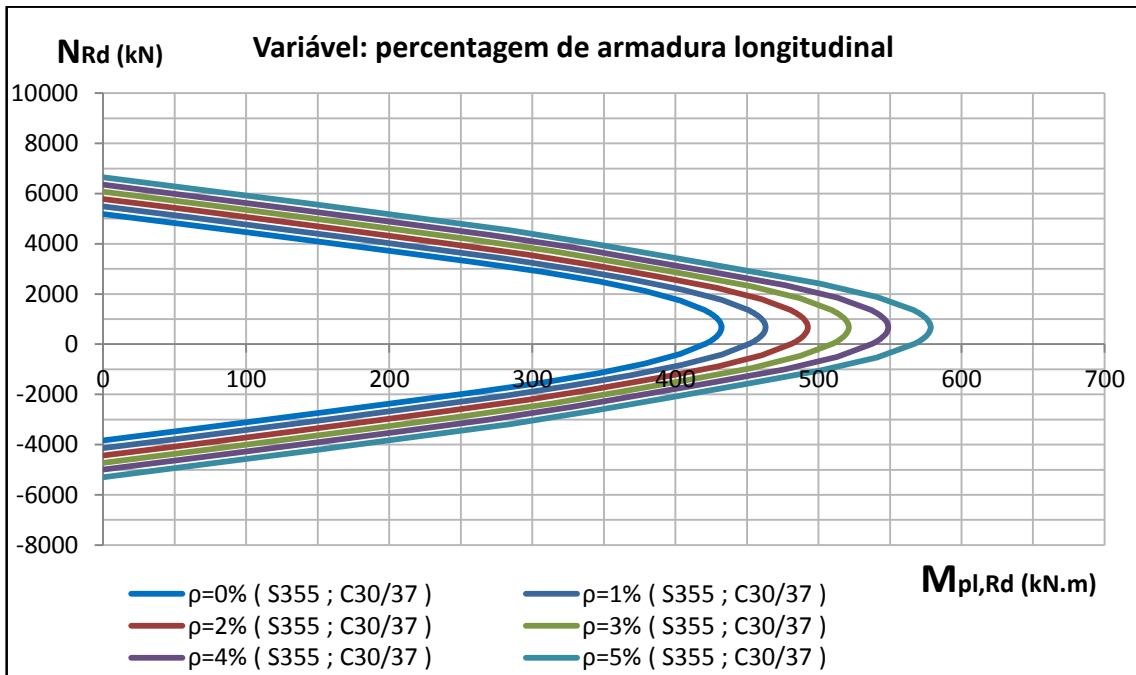


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275

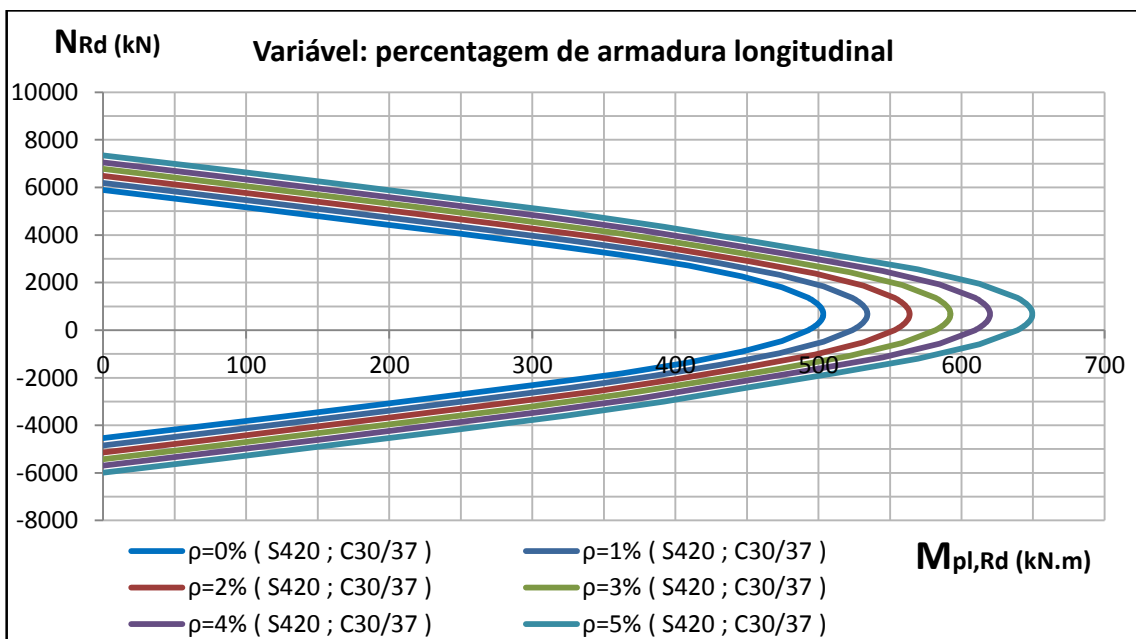


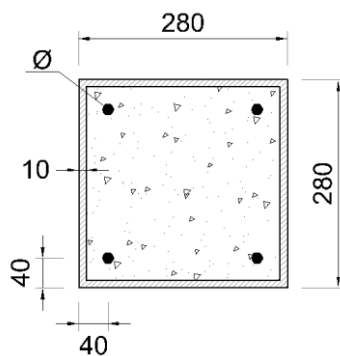


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355

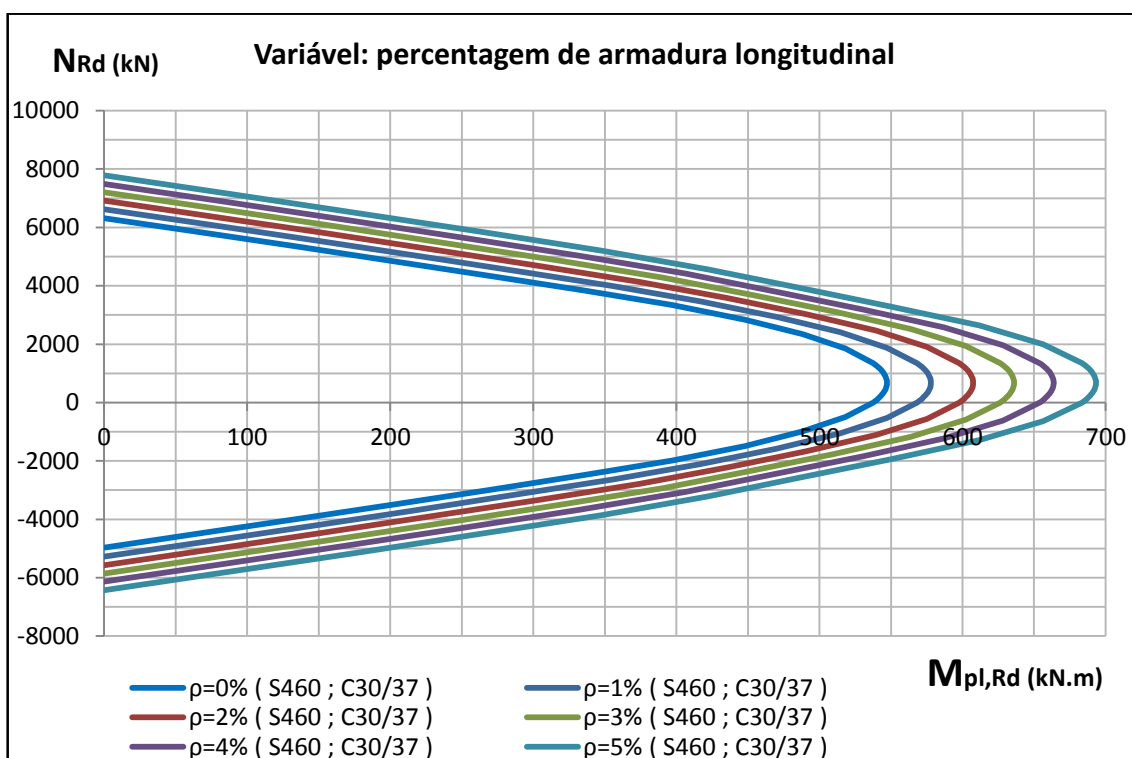


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420

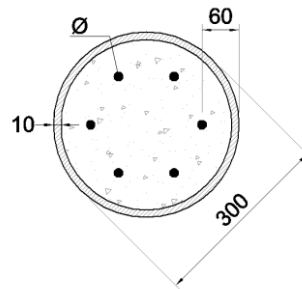




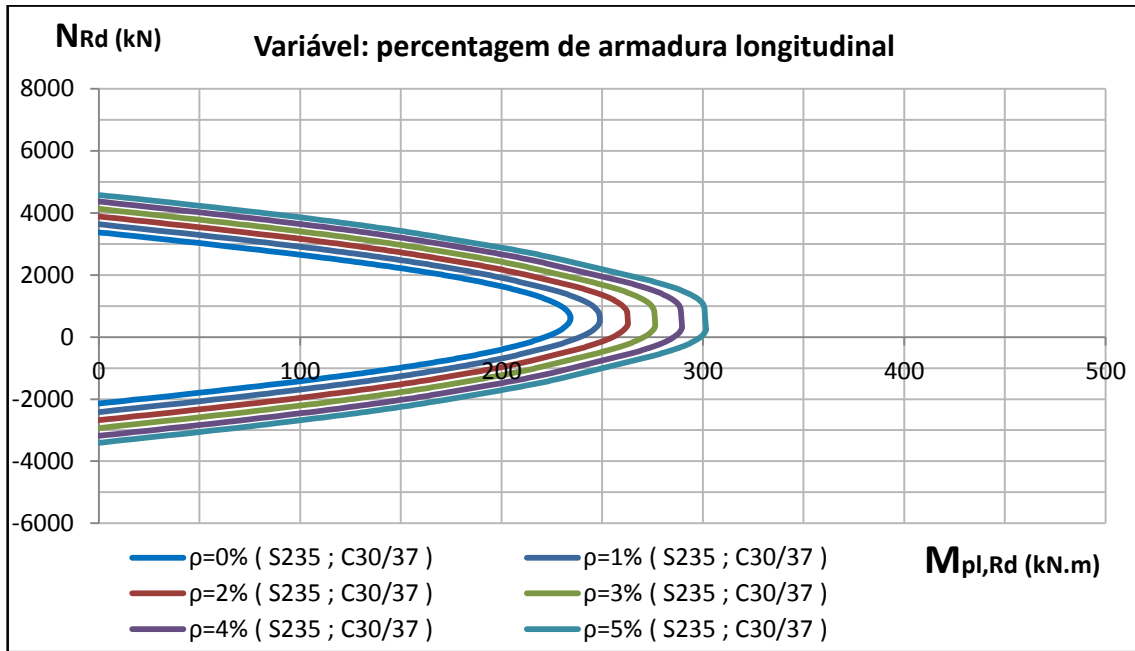
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460



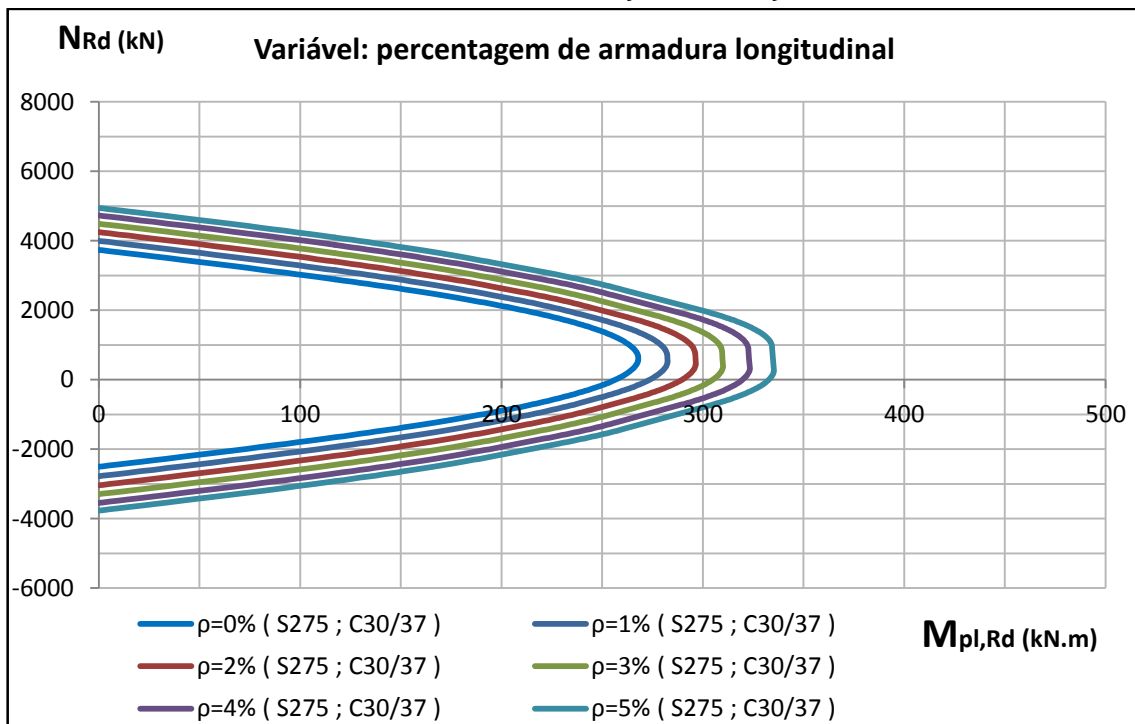
D.3.3 SECÇÃO CIRCULAR

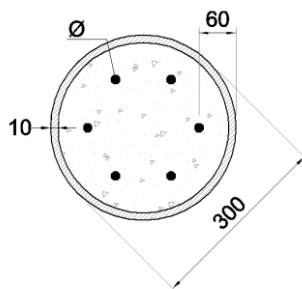


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235

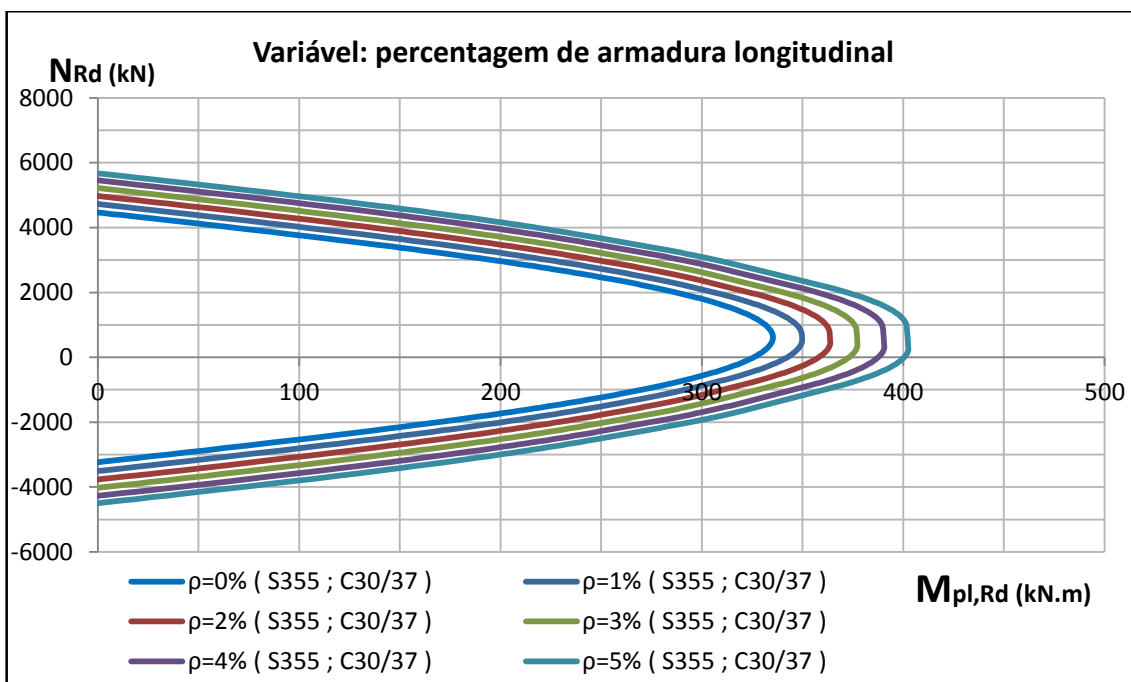


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275

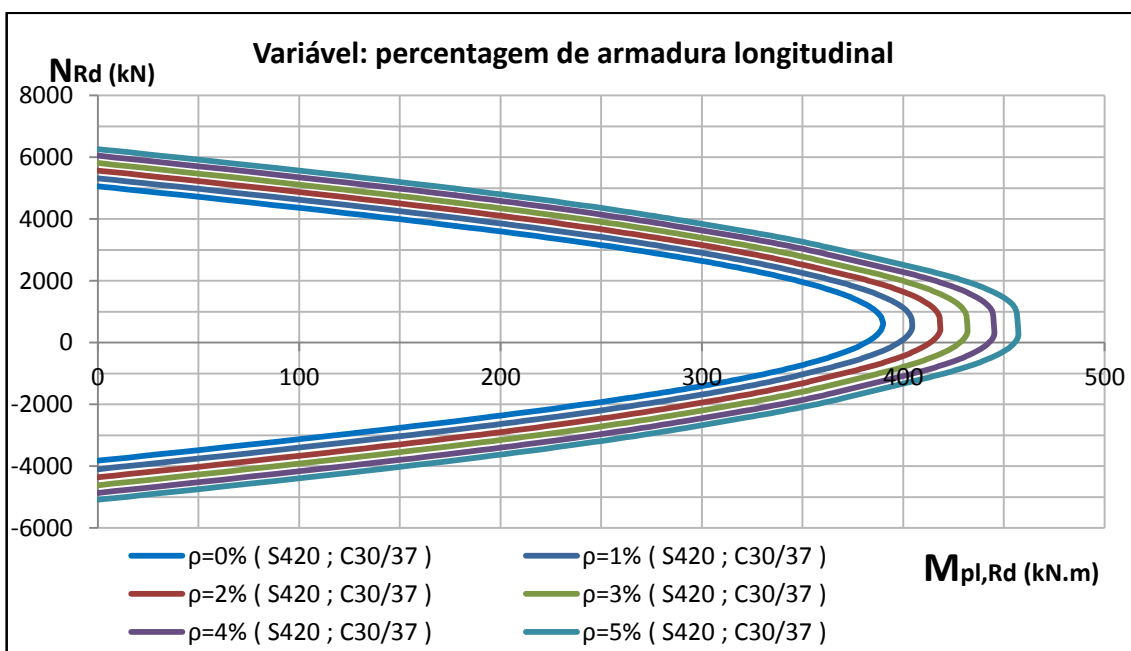


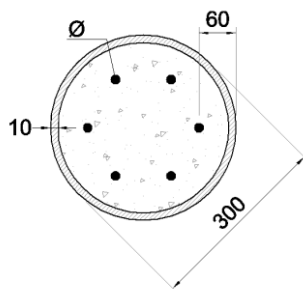


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355

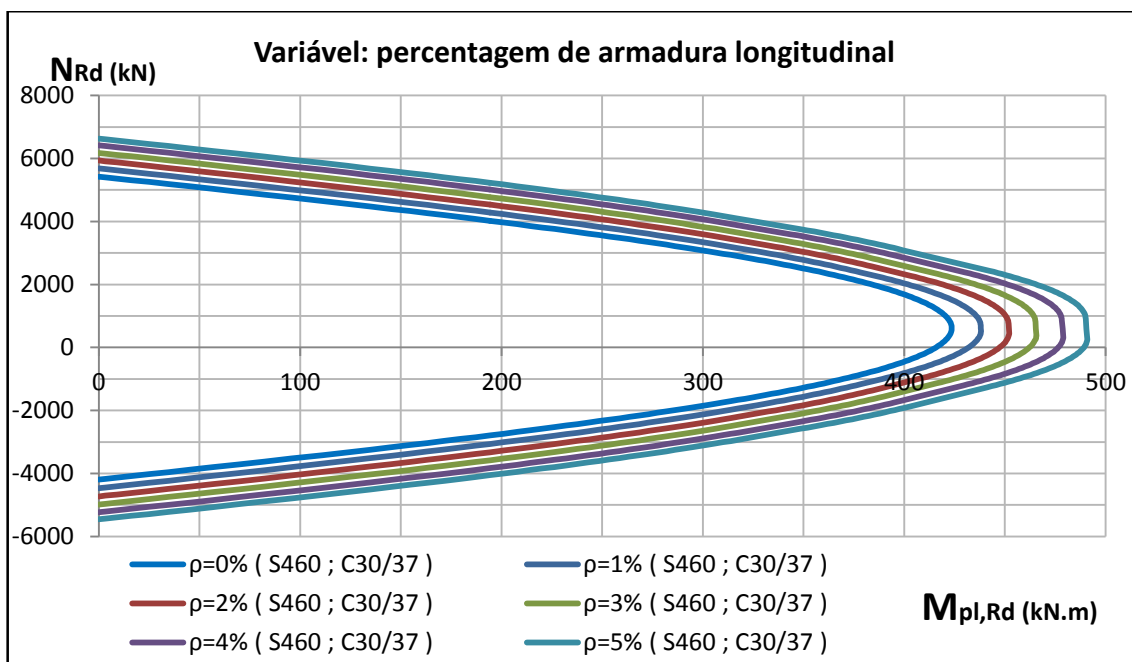


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420



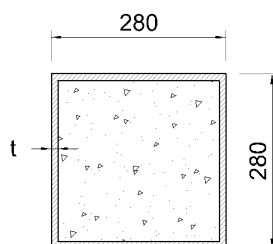


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460

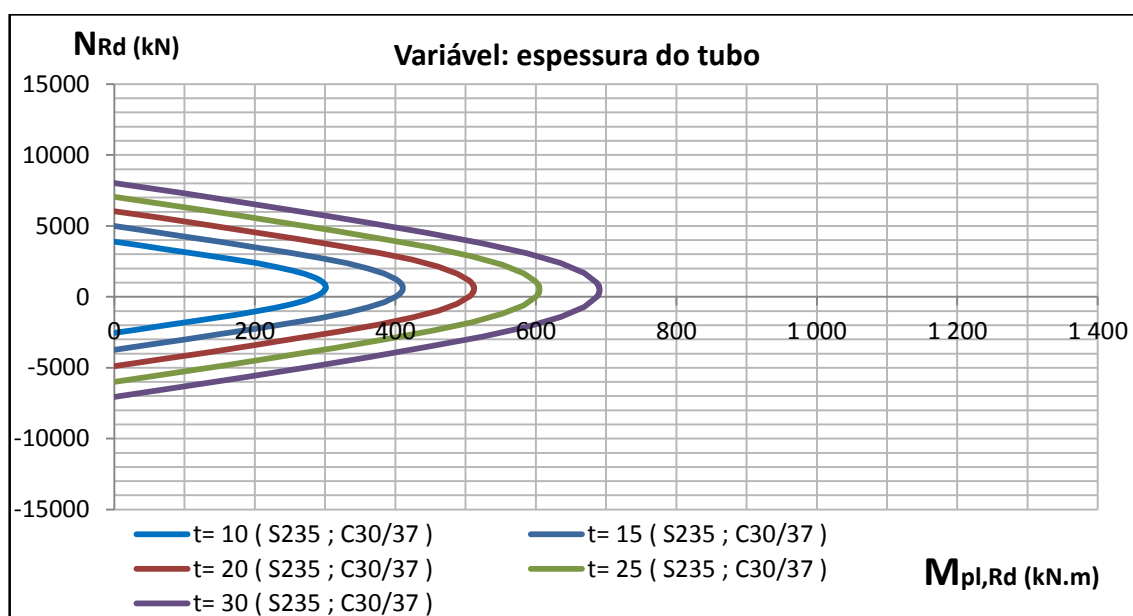


D.4 VARIÁVEL: ESPESSURA DO TUBO

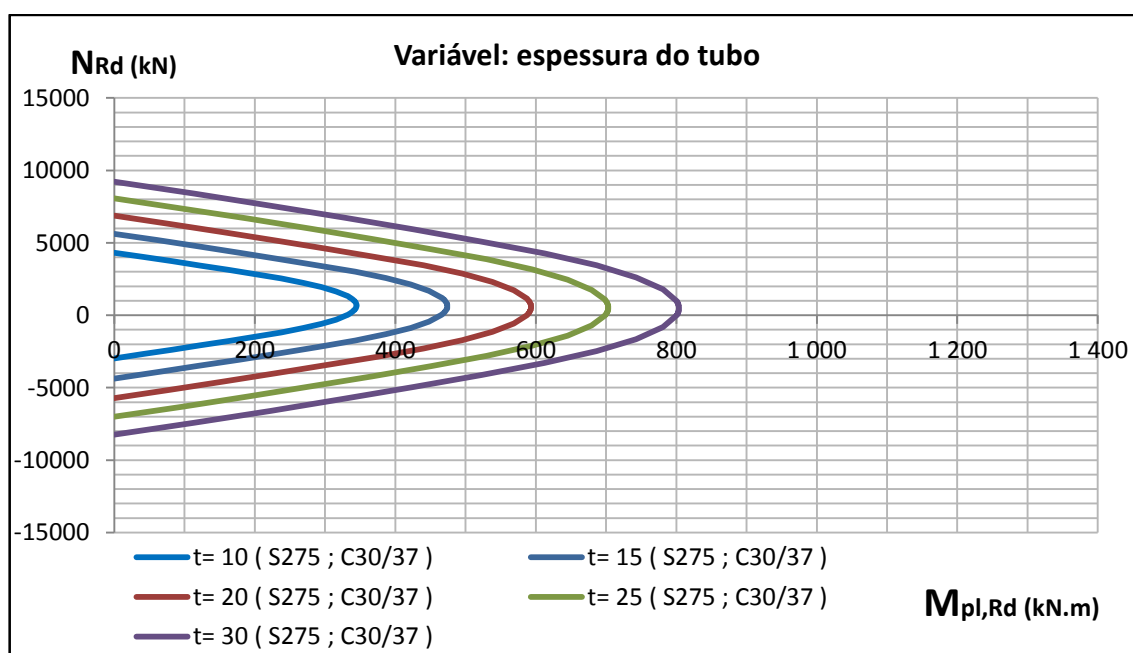
D.4.1 SECÇÃO QUADRADA CHEIA DE BETÃO

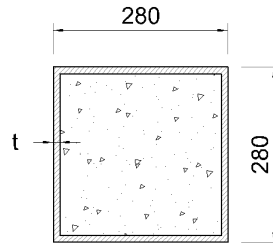


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235

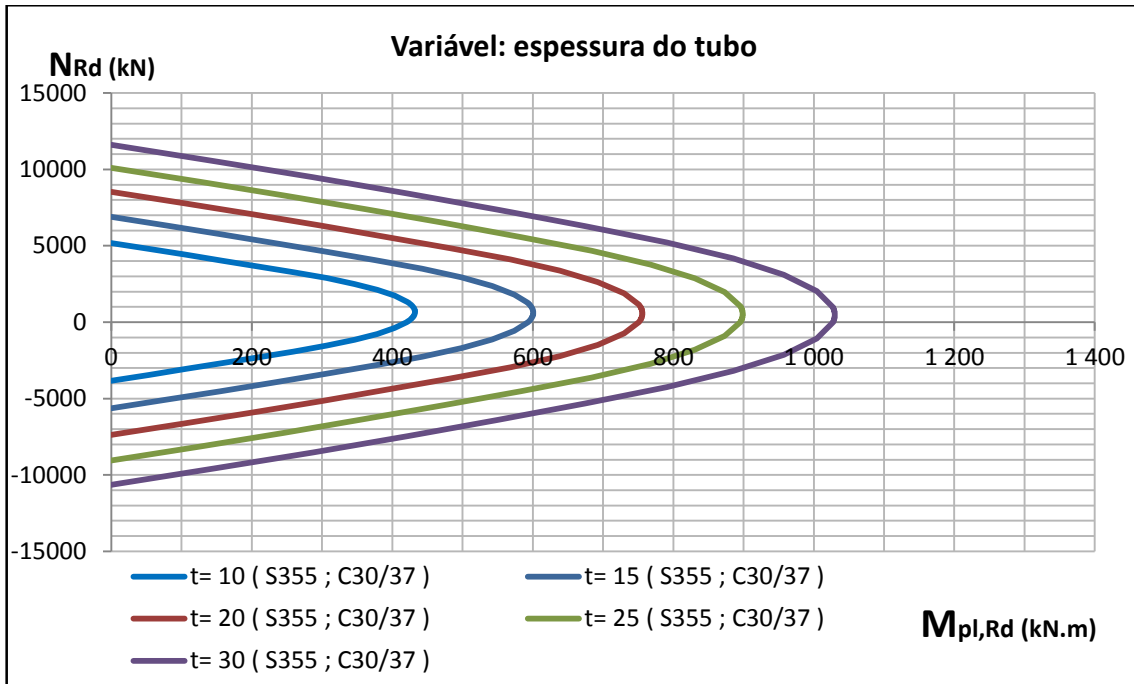


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275

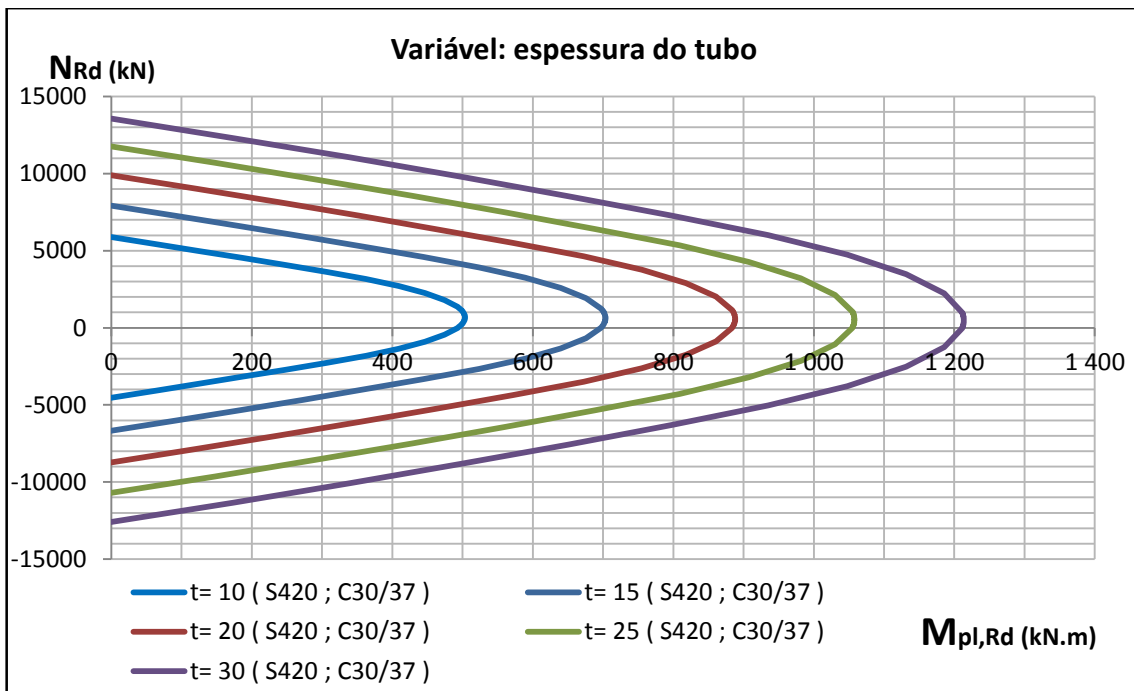


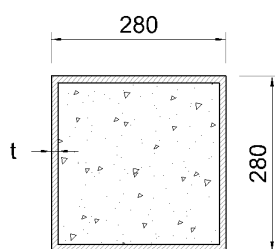


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355

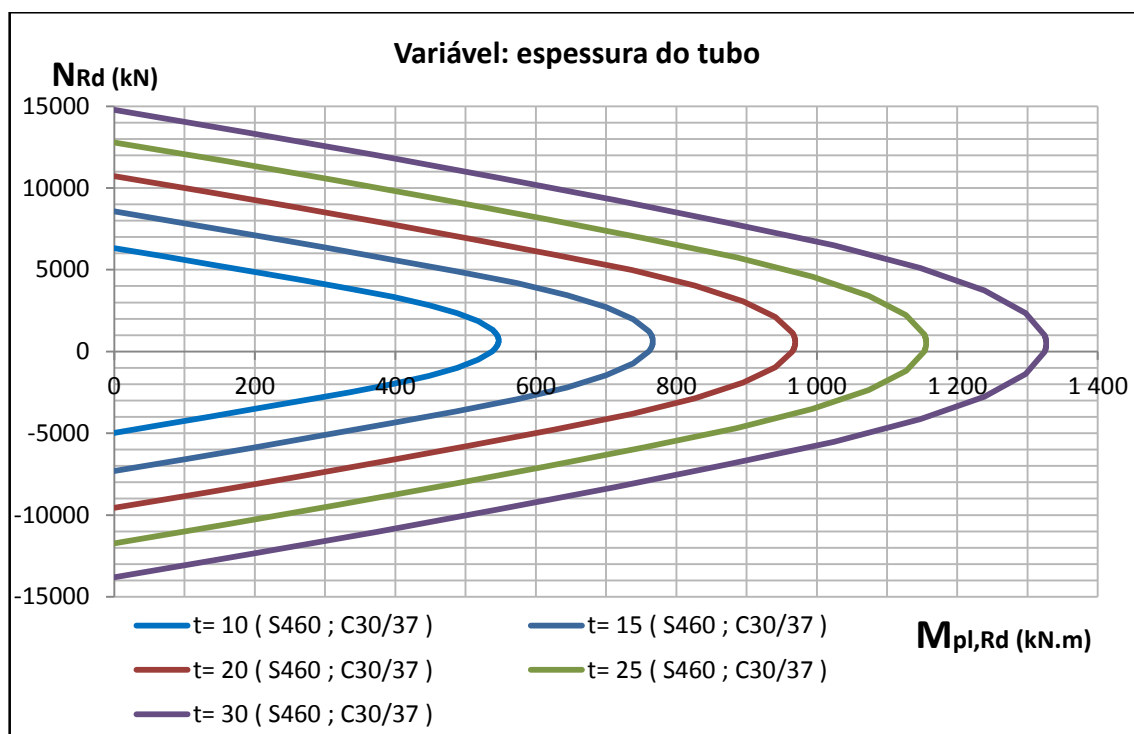


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420

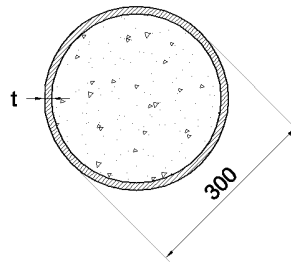




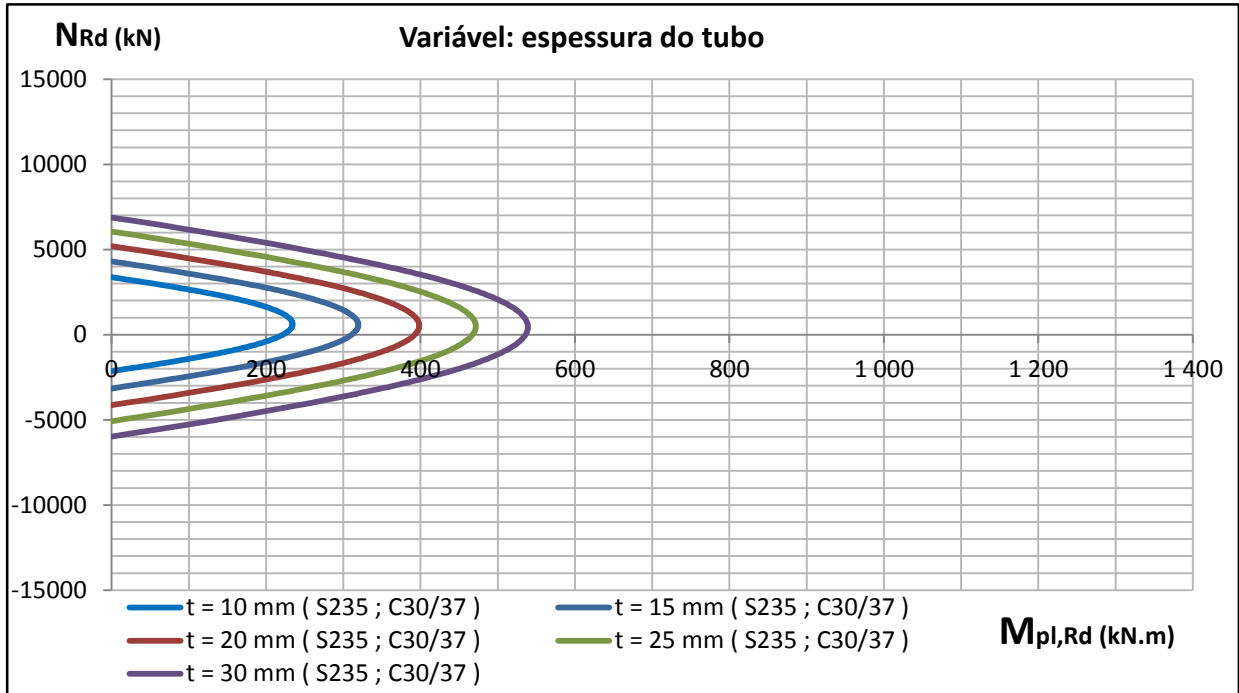
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460



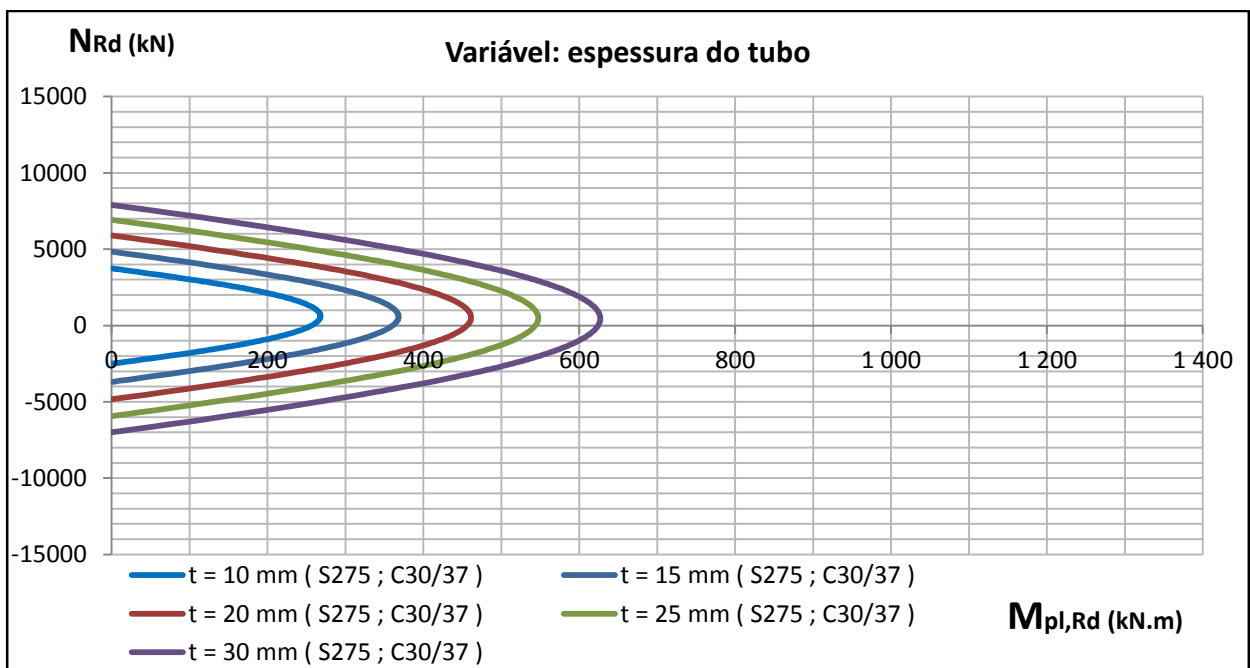
D.4.2 SECÇÃO CIRCULAR

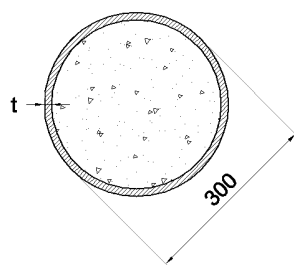


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235

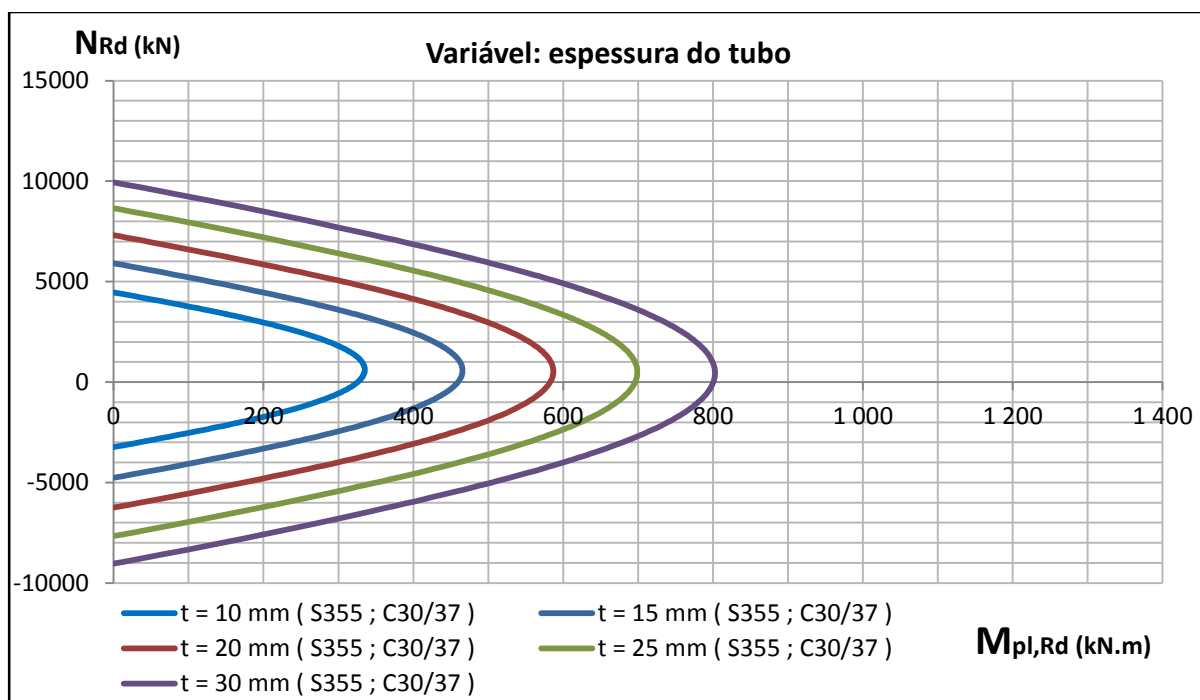


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275

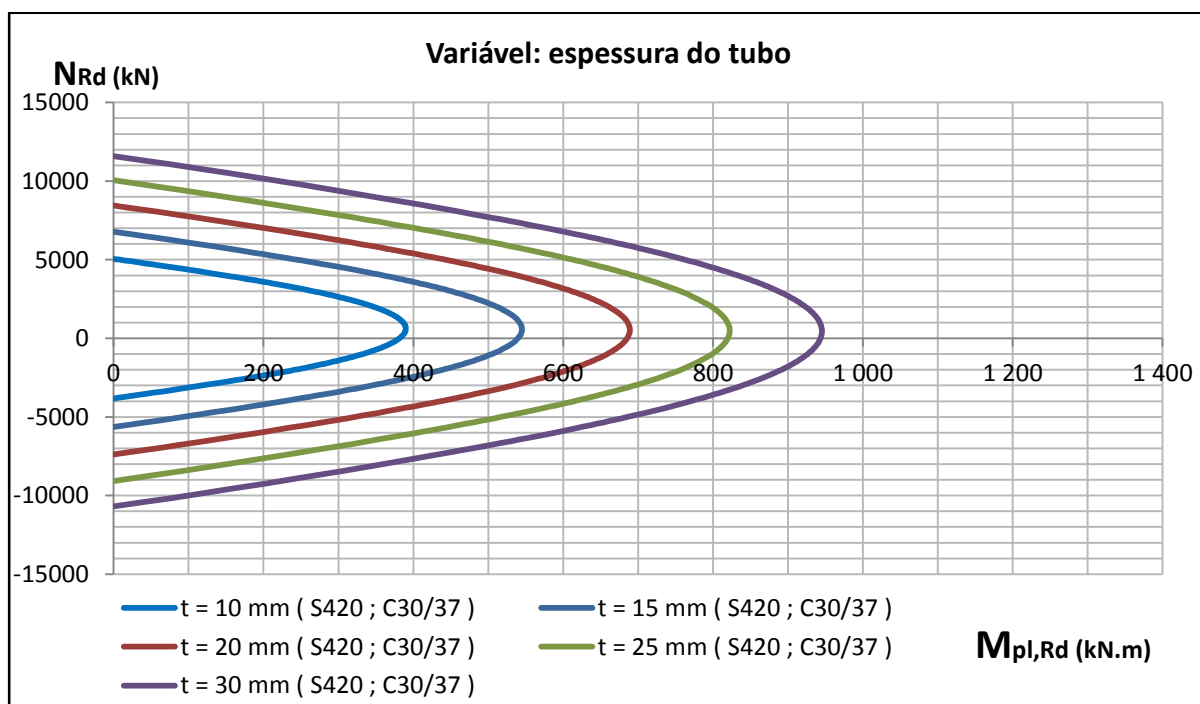


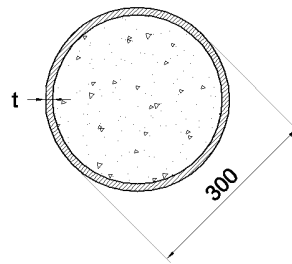


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355

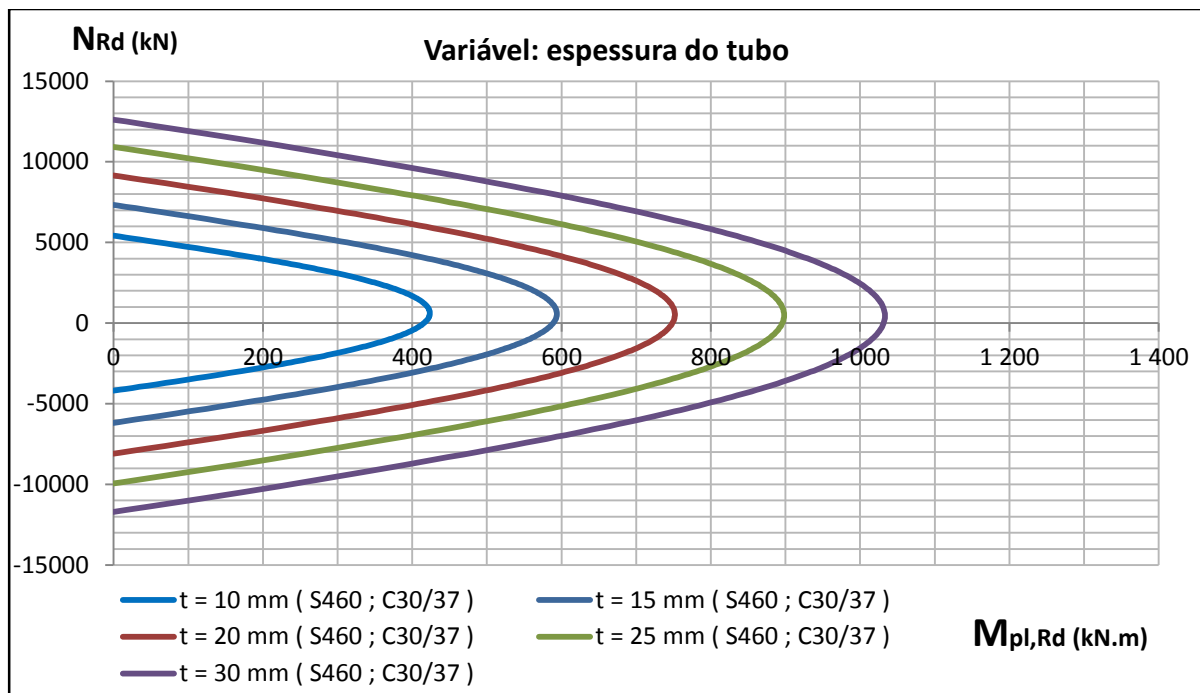


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420

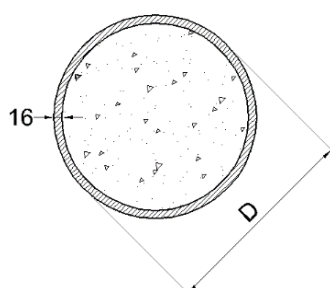




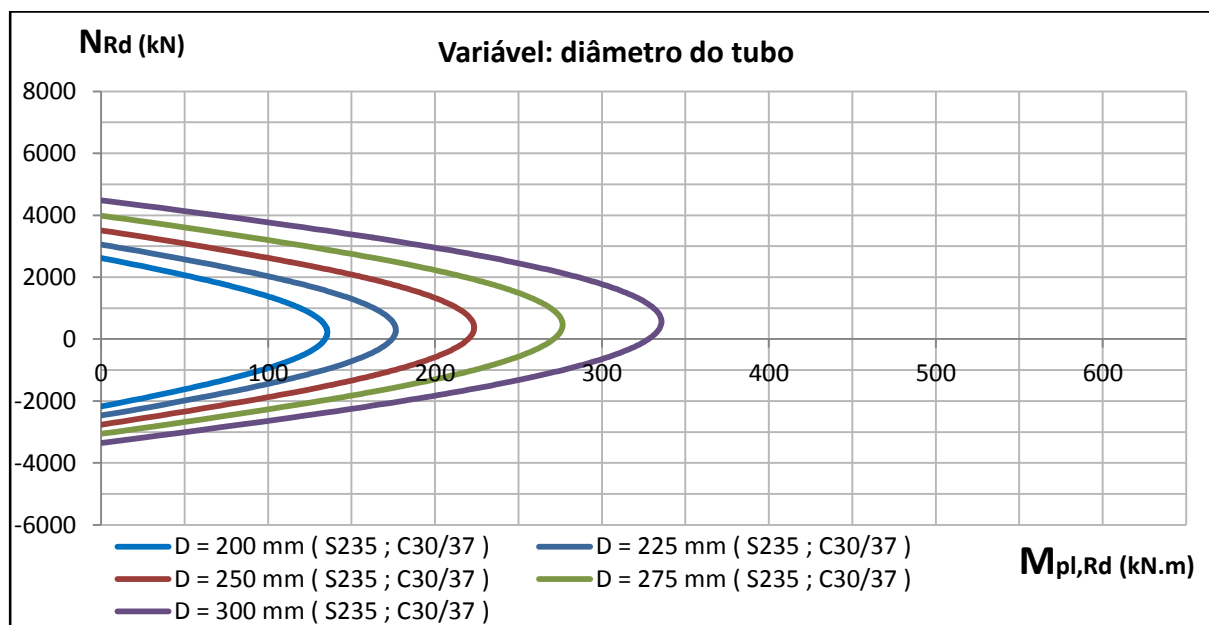
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460



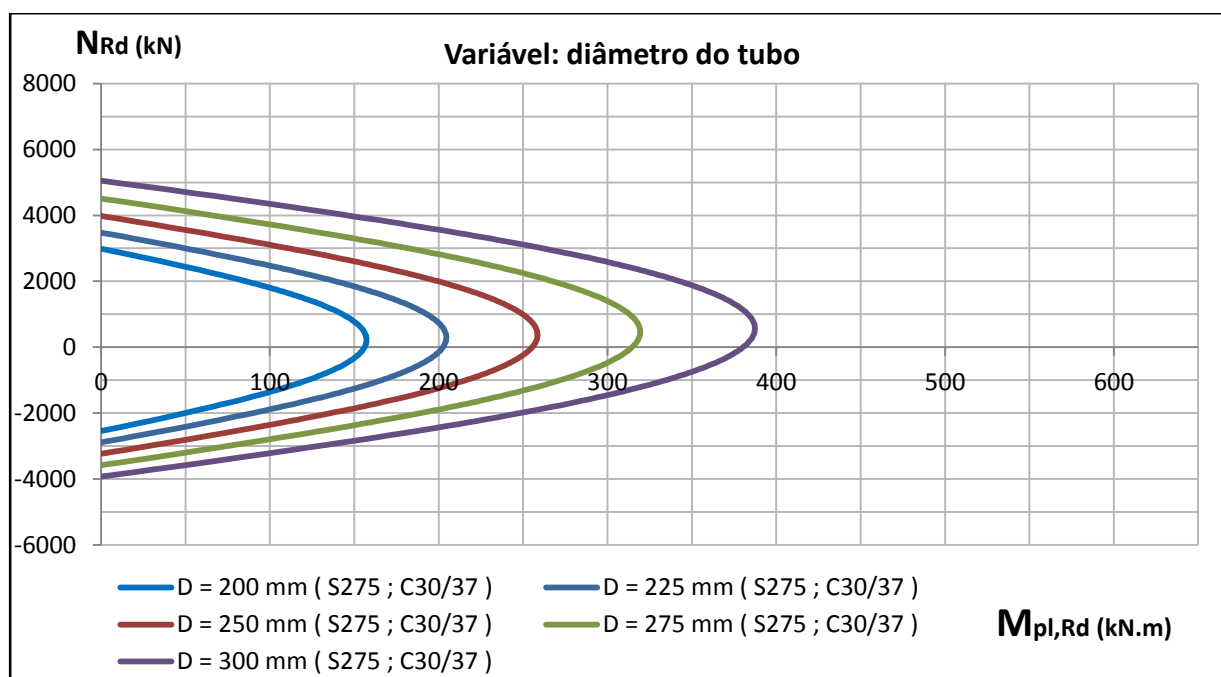
D.5 VARIÁVEL: DIÂMETRO DO TUBO

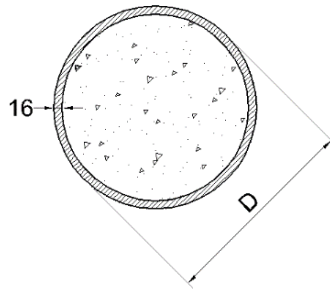


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S235

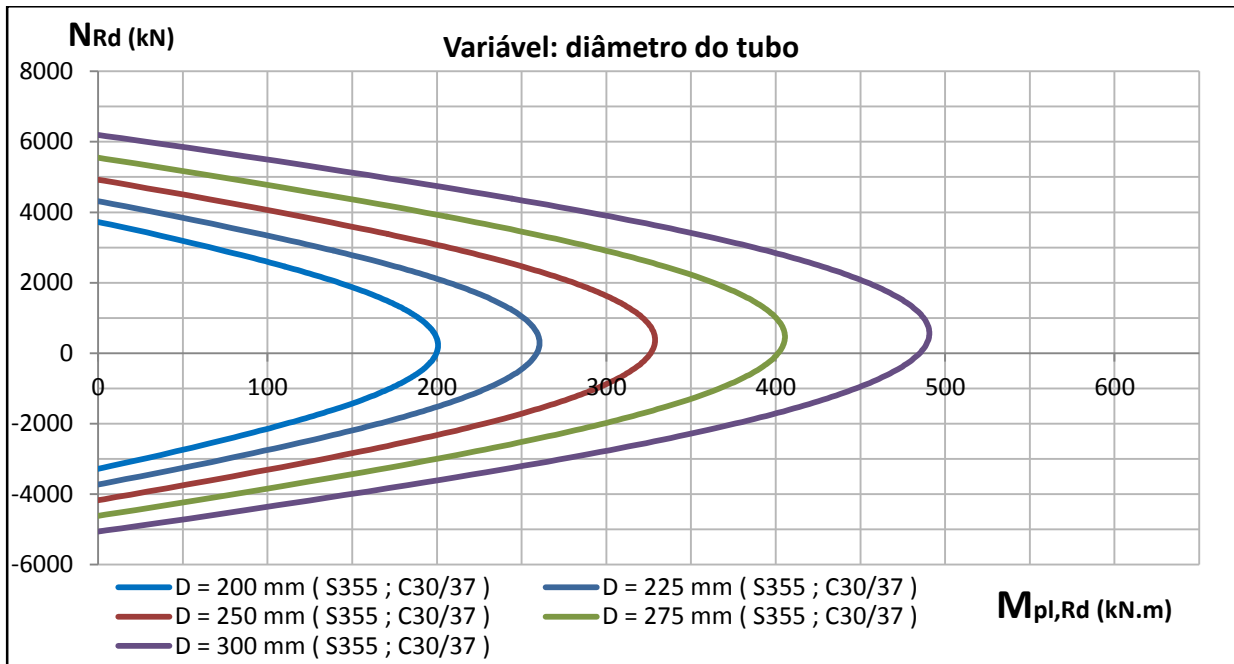


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S275

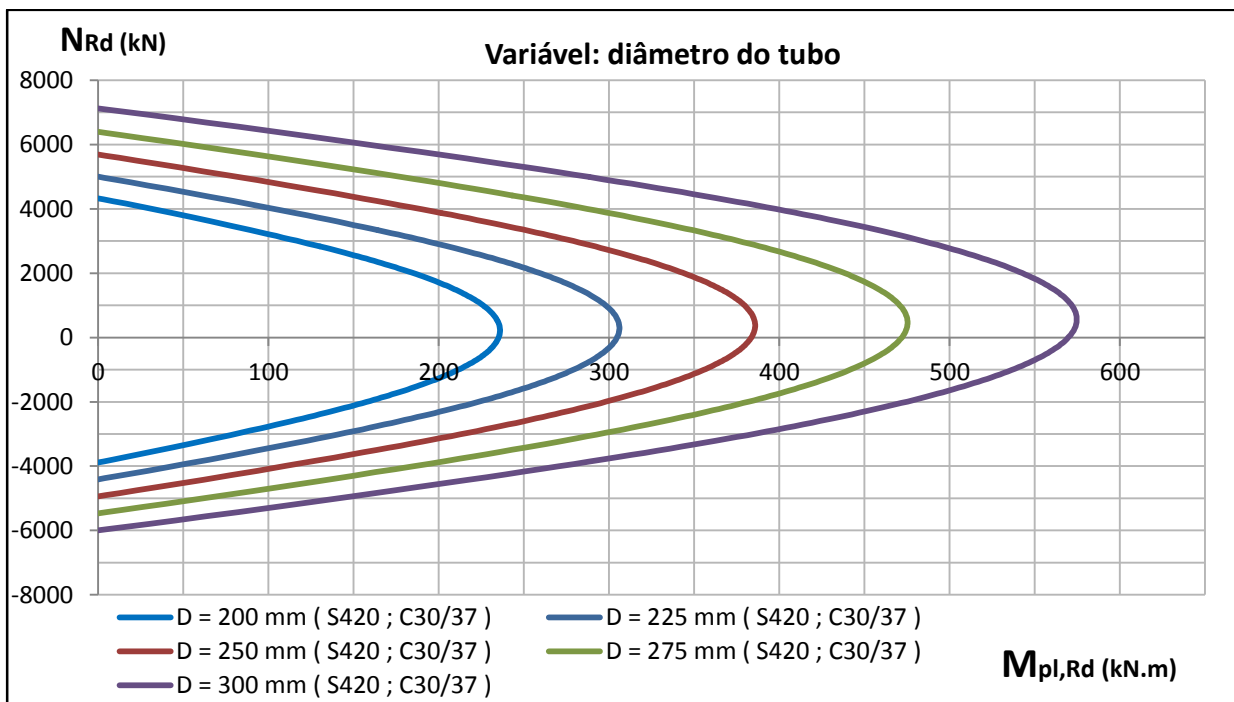


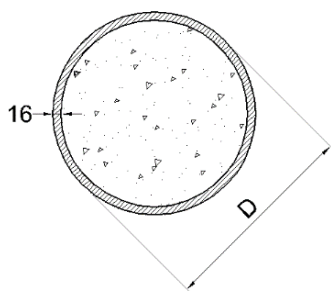


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S355

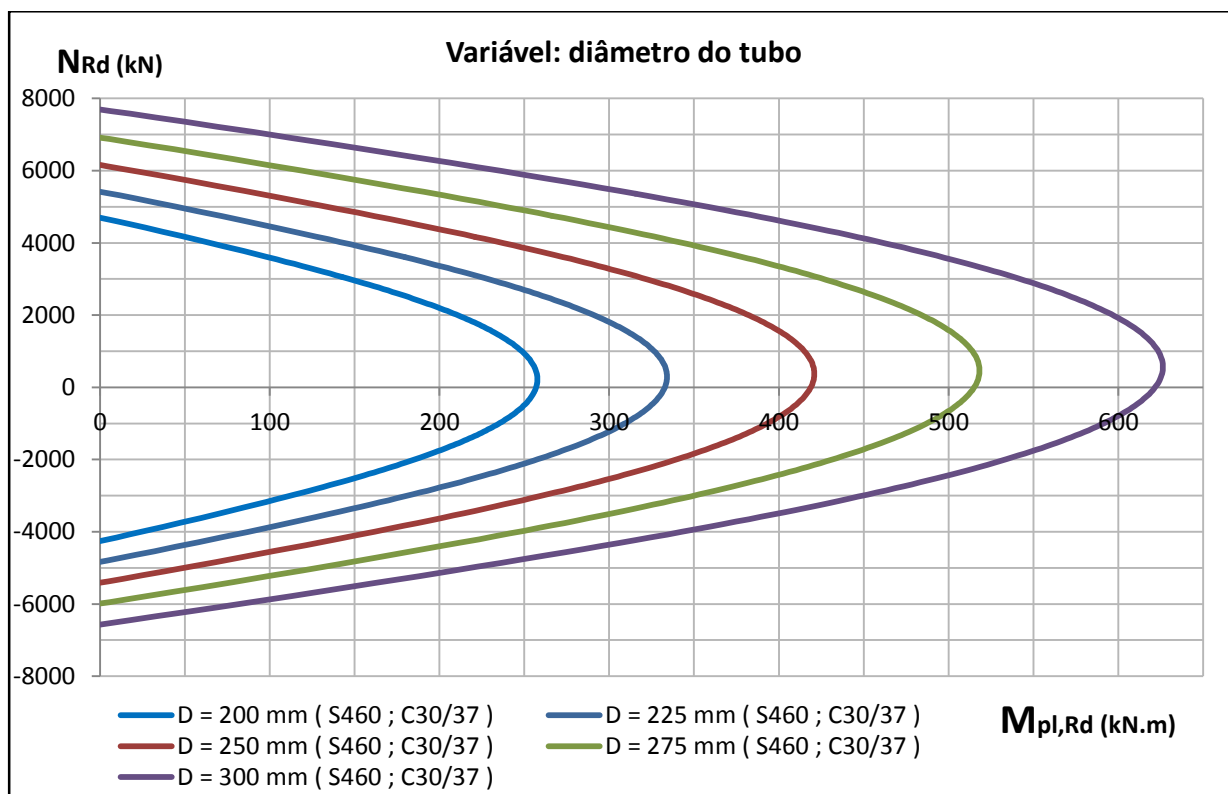


Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S420





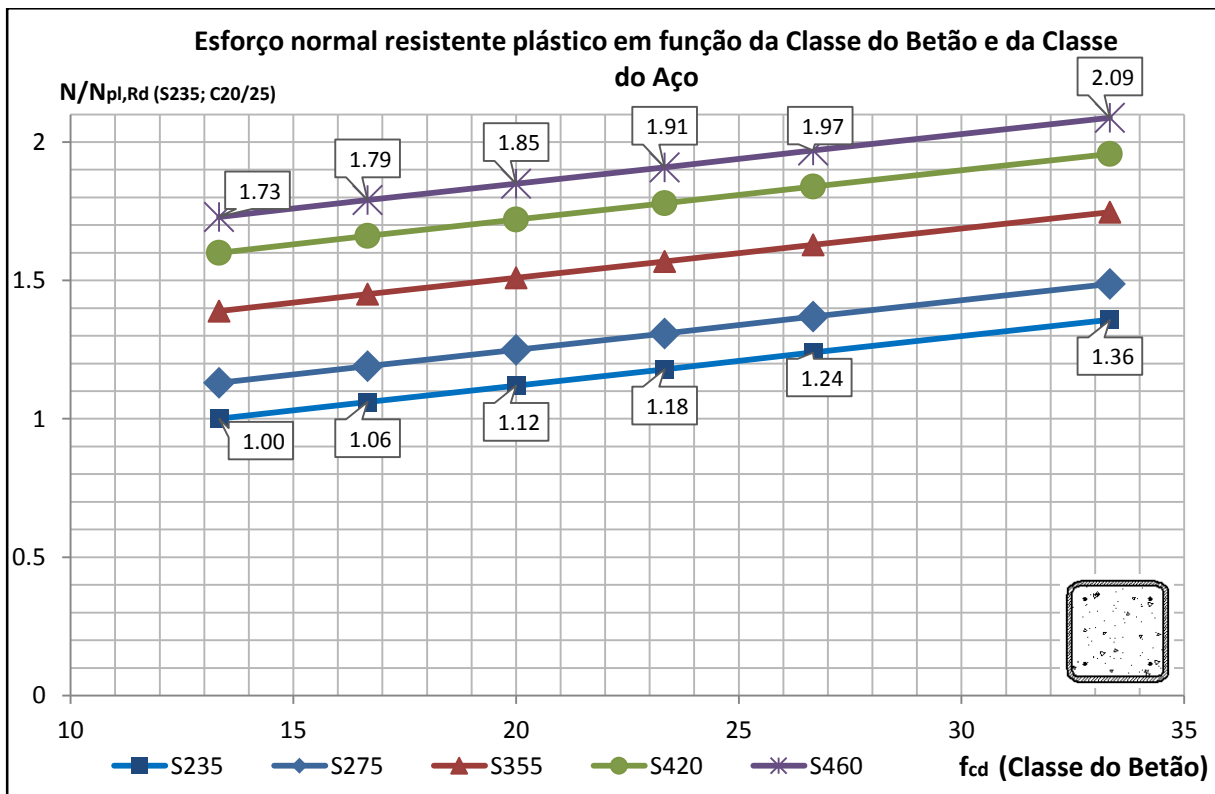
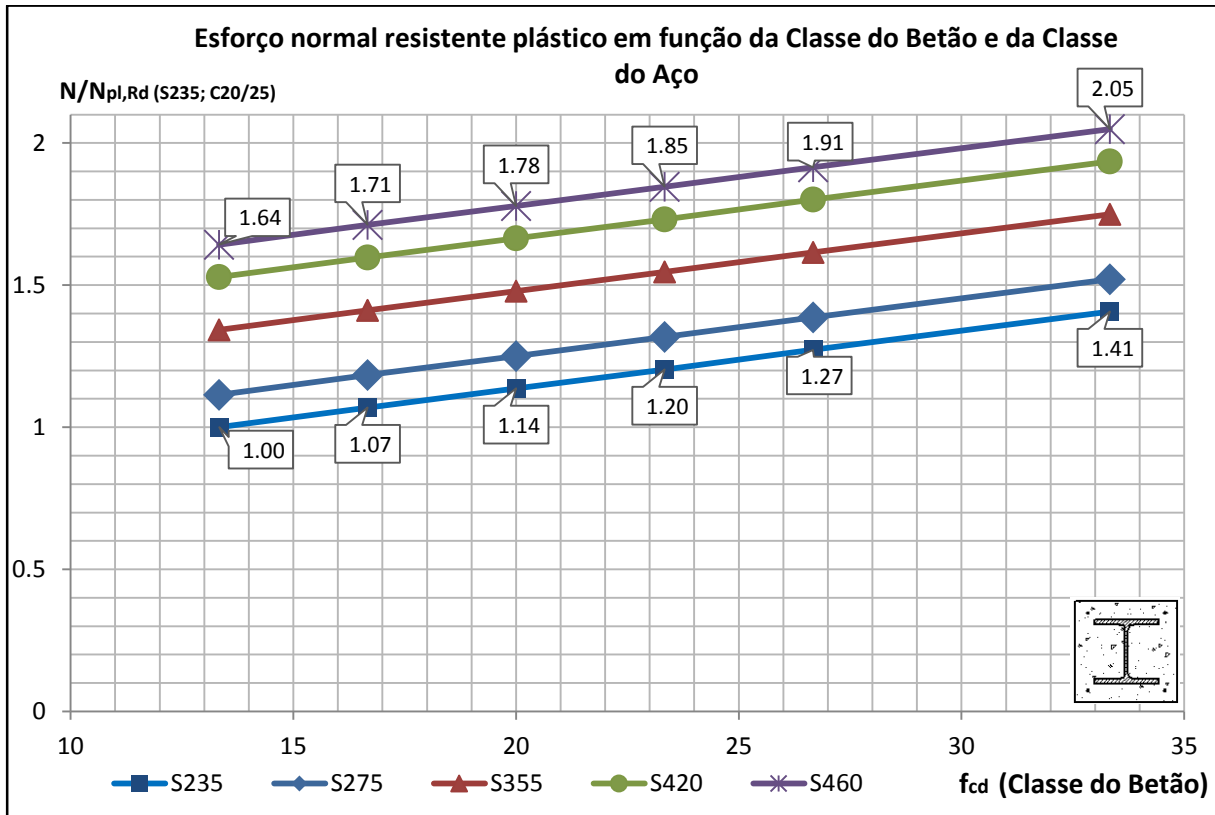
Materiais: Betão C30/37, Aço A500 e Aço S460

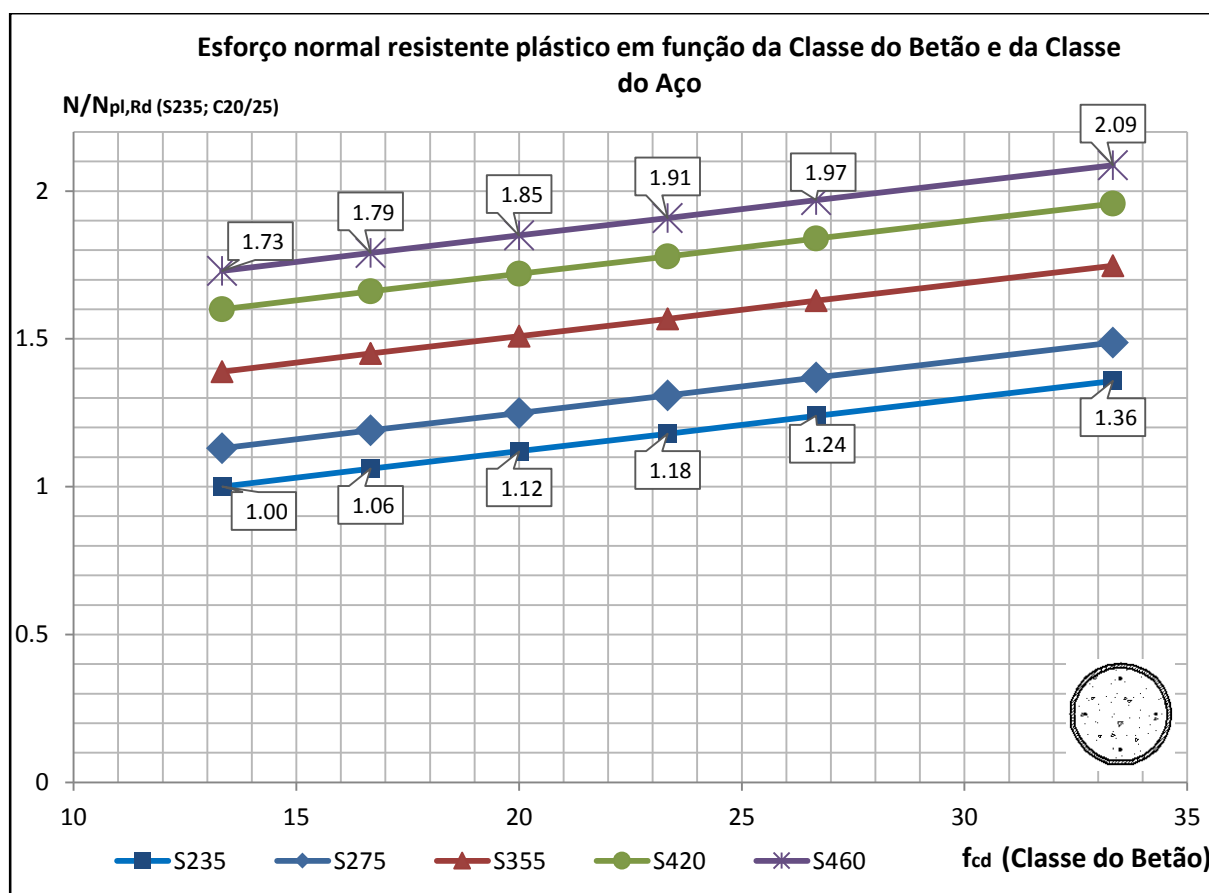


D.6 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA RESISTÊNCIA DA SECÇÃO

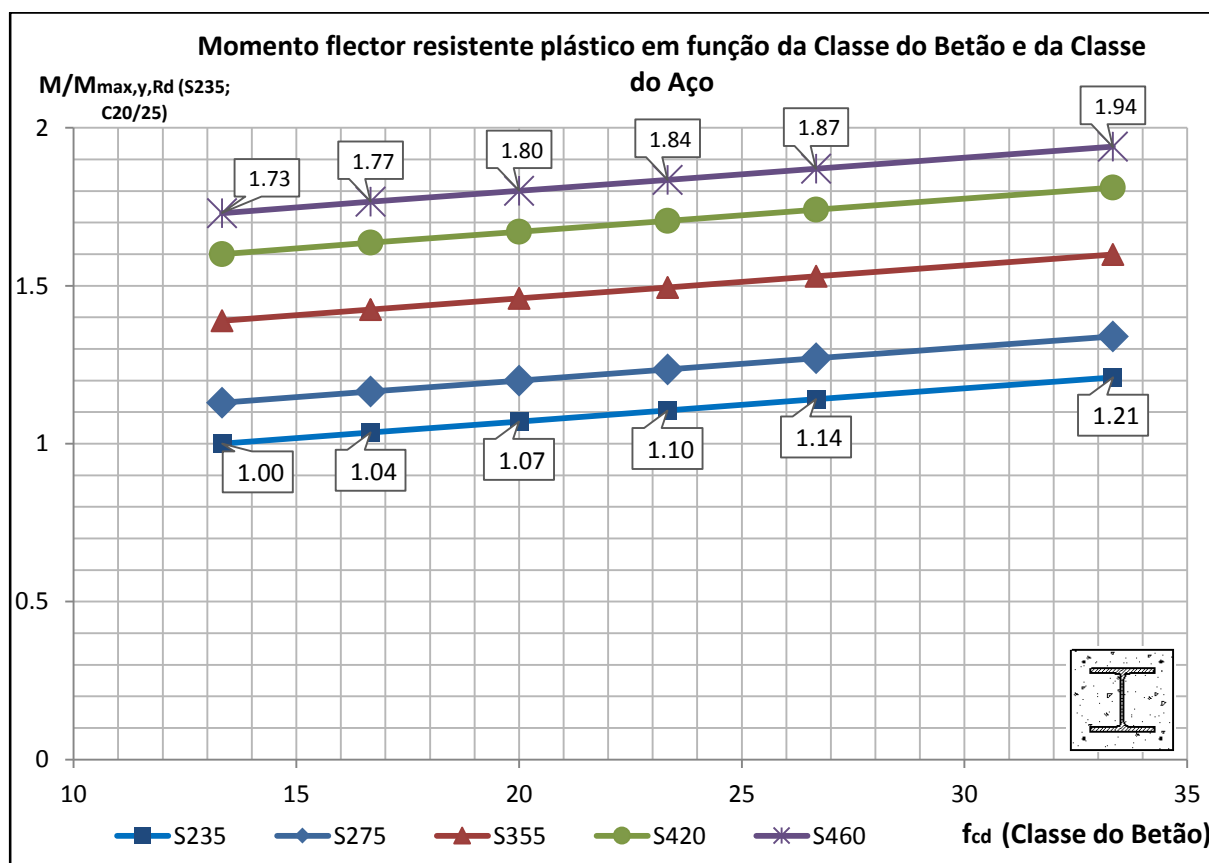
D.6.1 CLASSE DO AÇO ESTRUTURAL

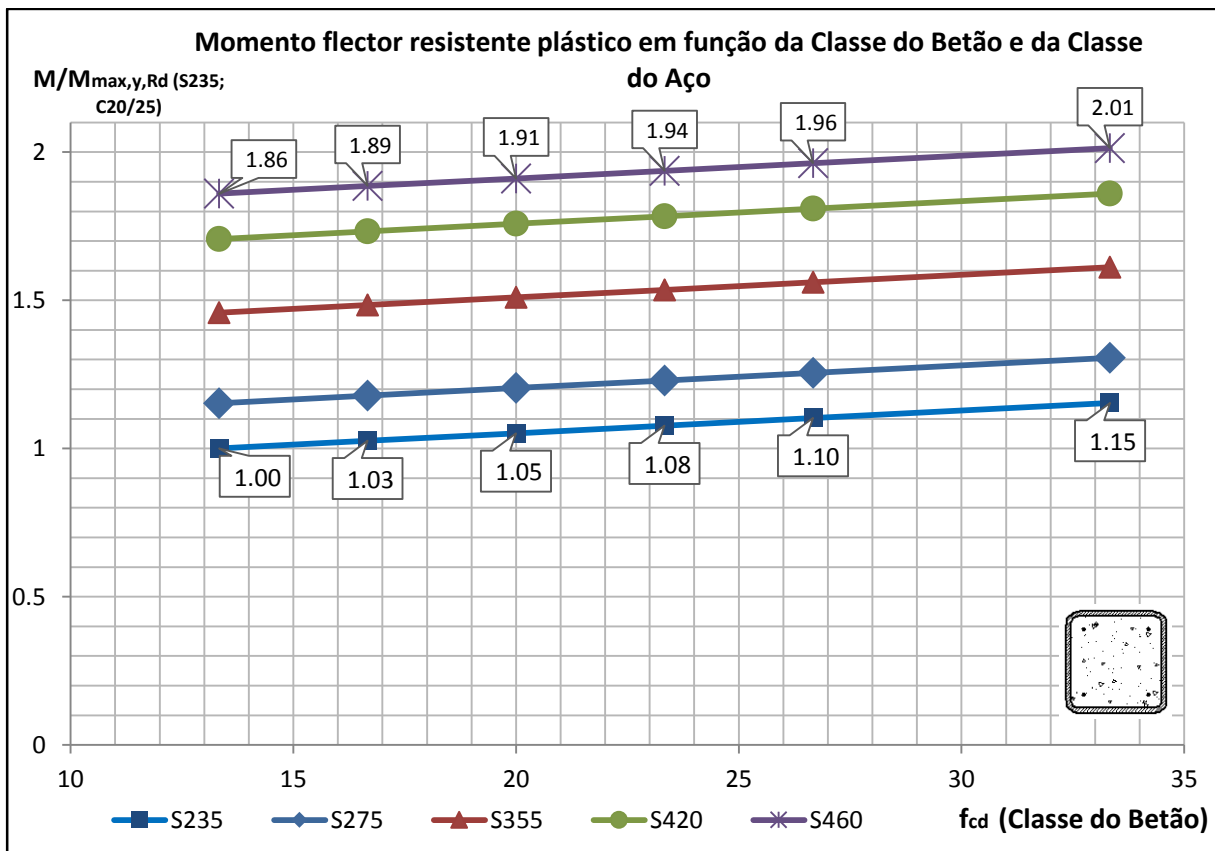
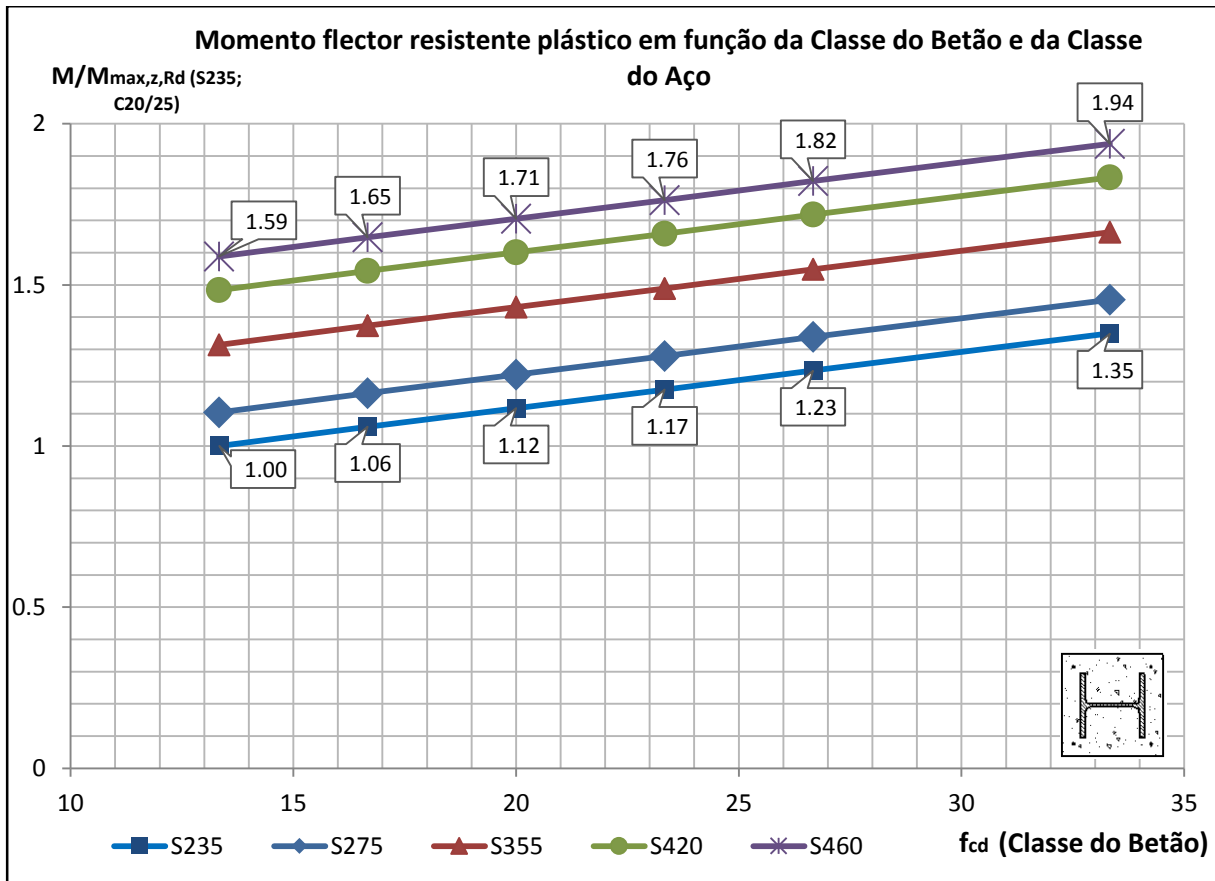
D.6.1.1 Esforço normal resistente plástico

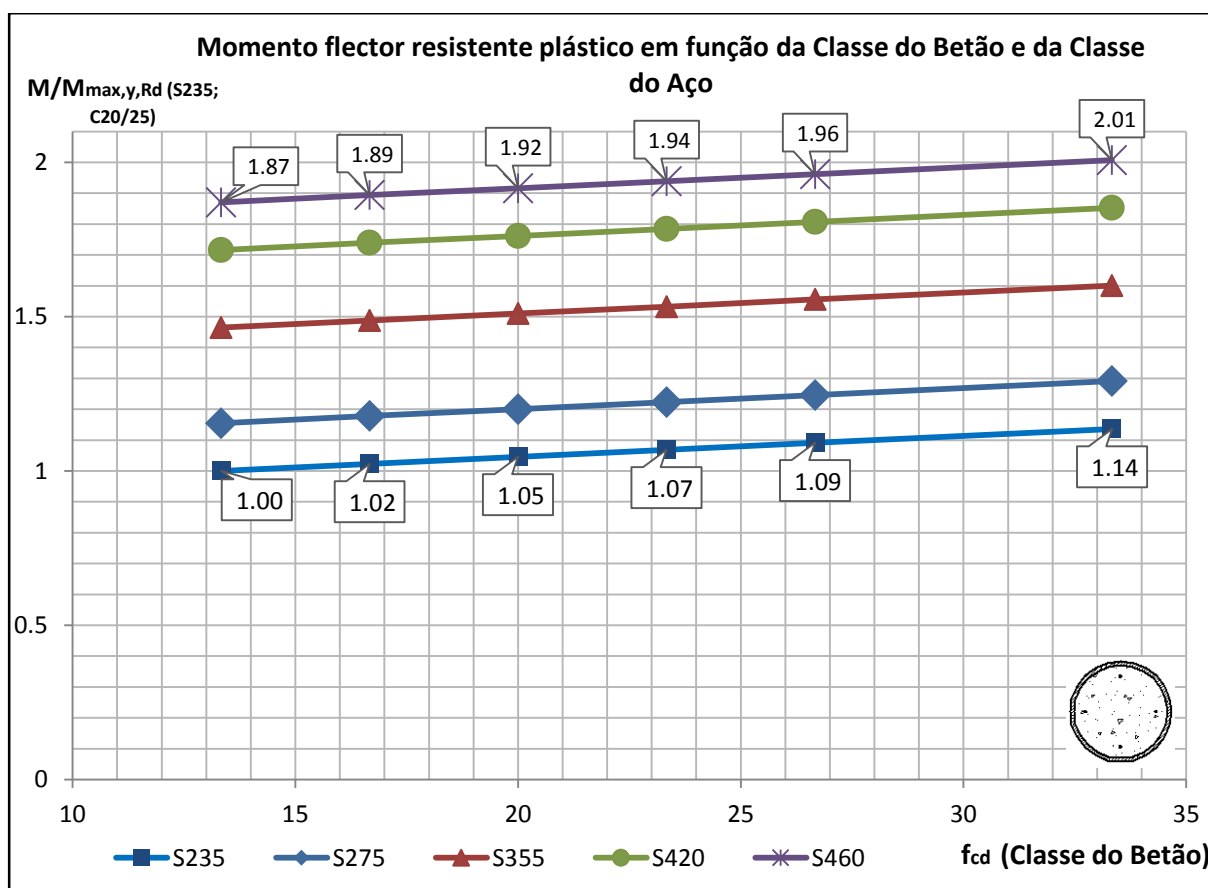




D.6.1.2 Momento flector resistente plástico

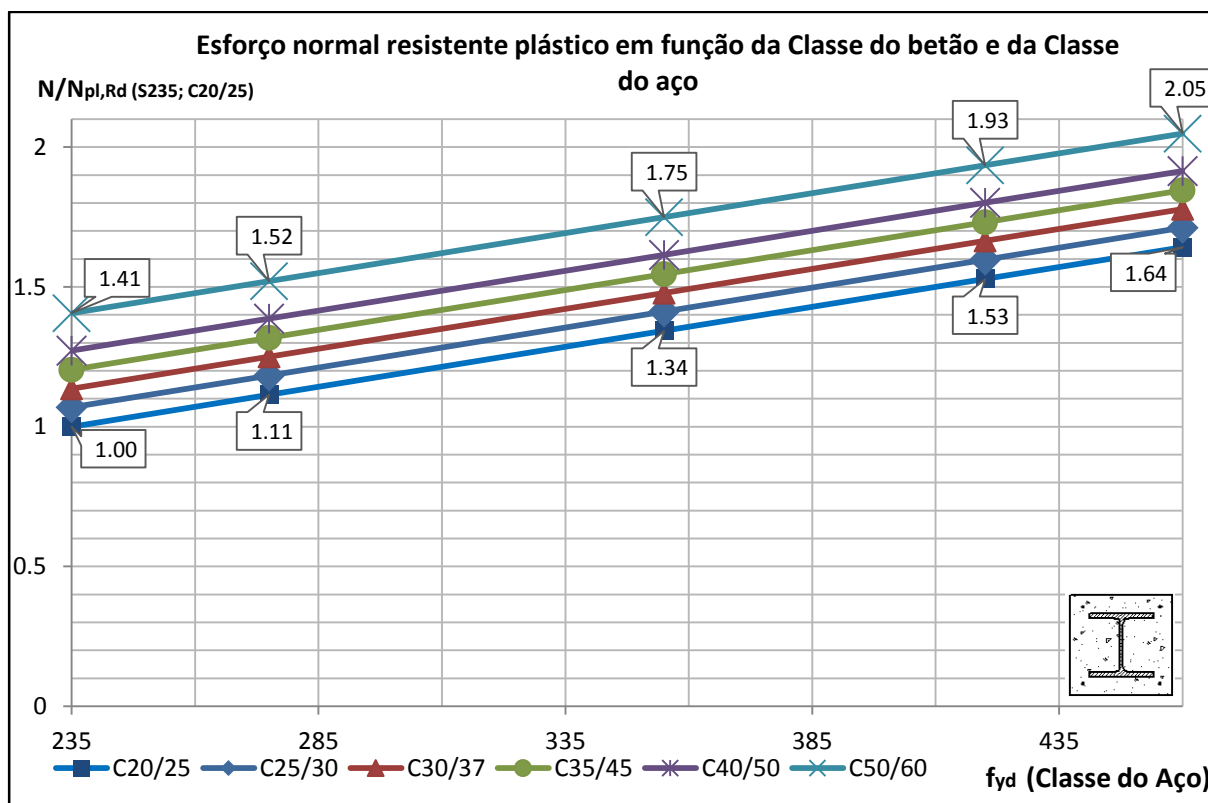


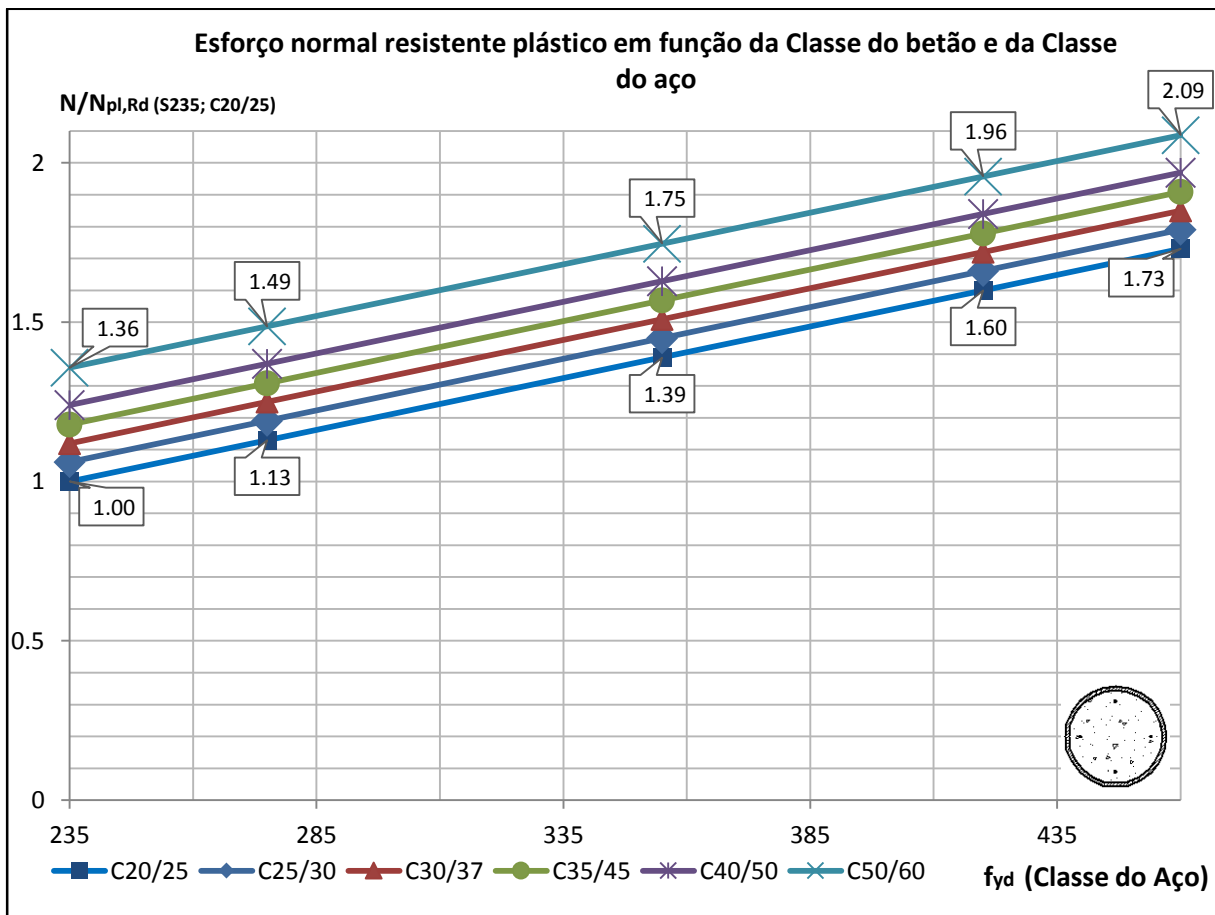
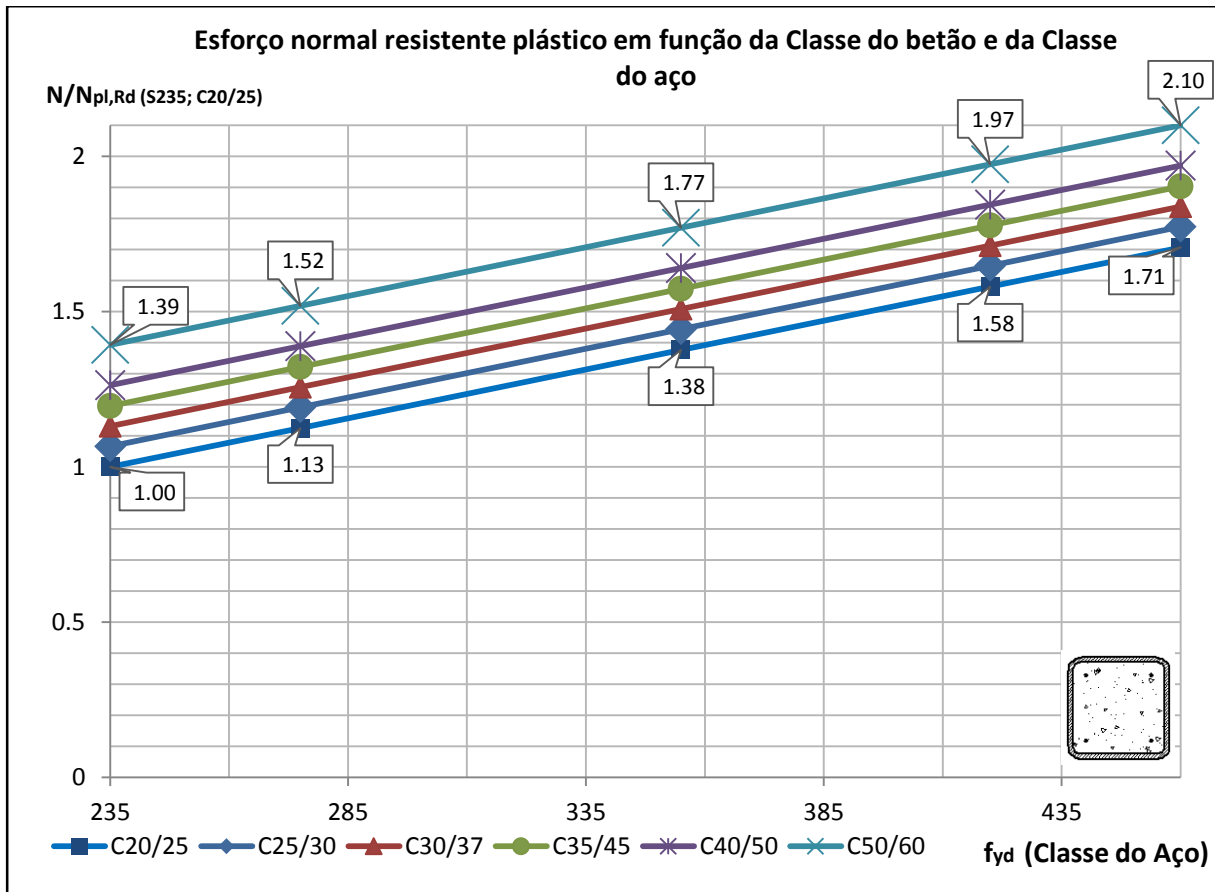




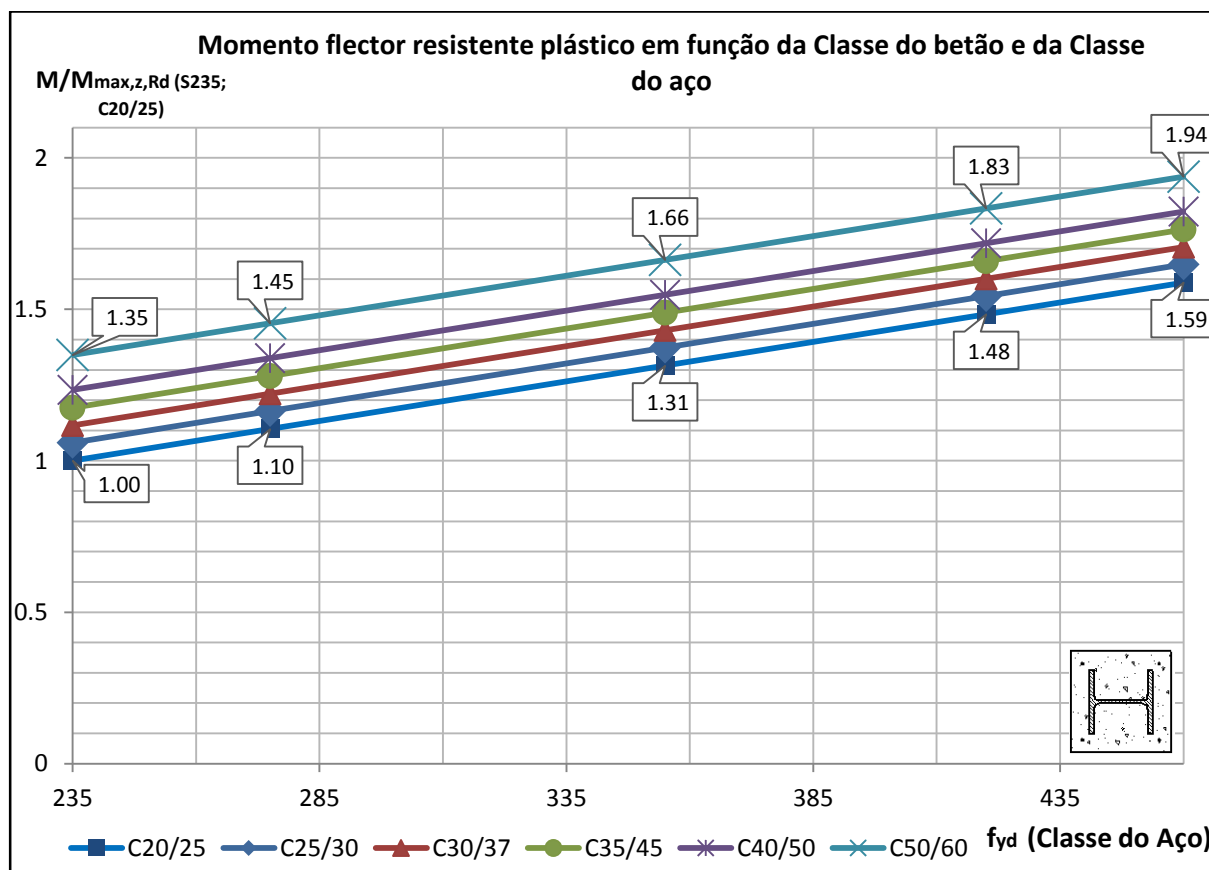
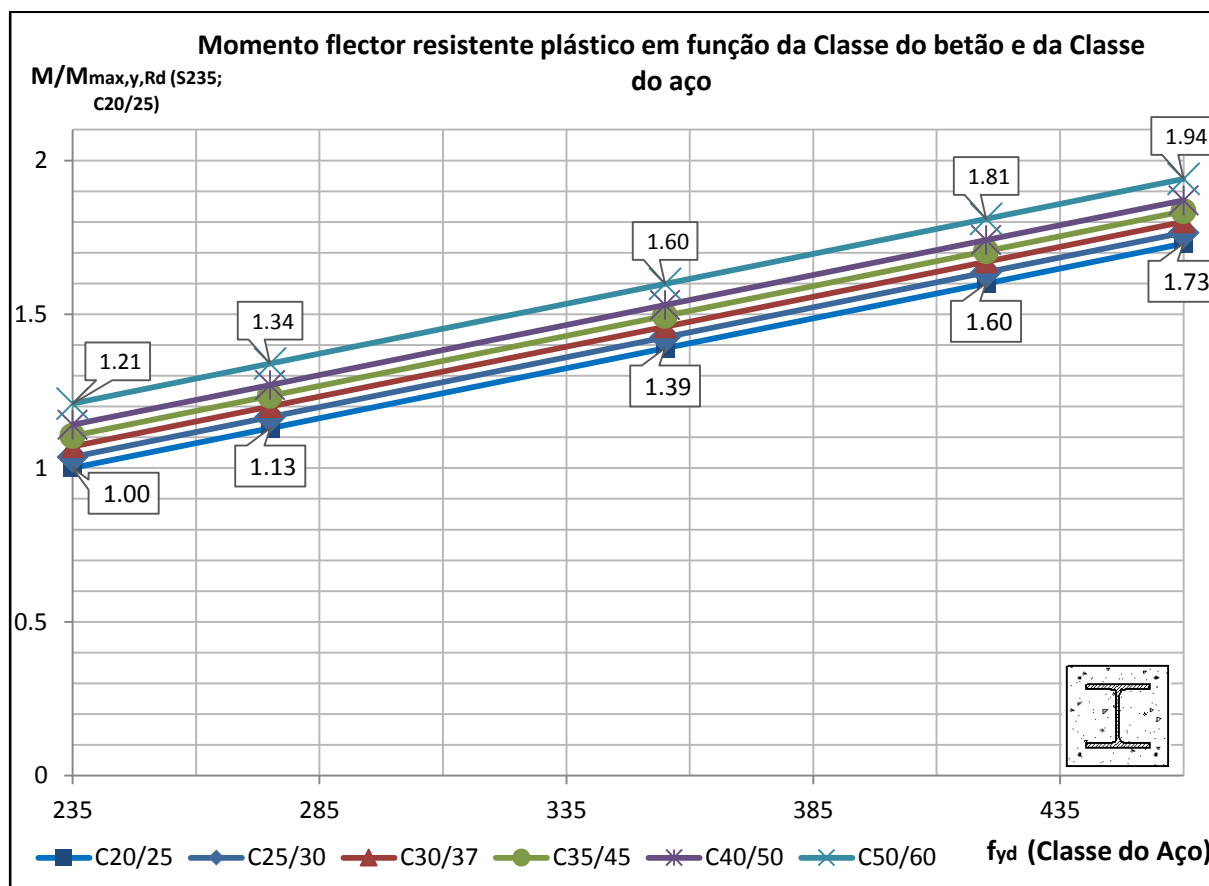
D.6.2 CLASSE DO BETÃO

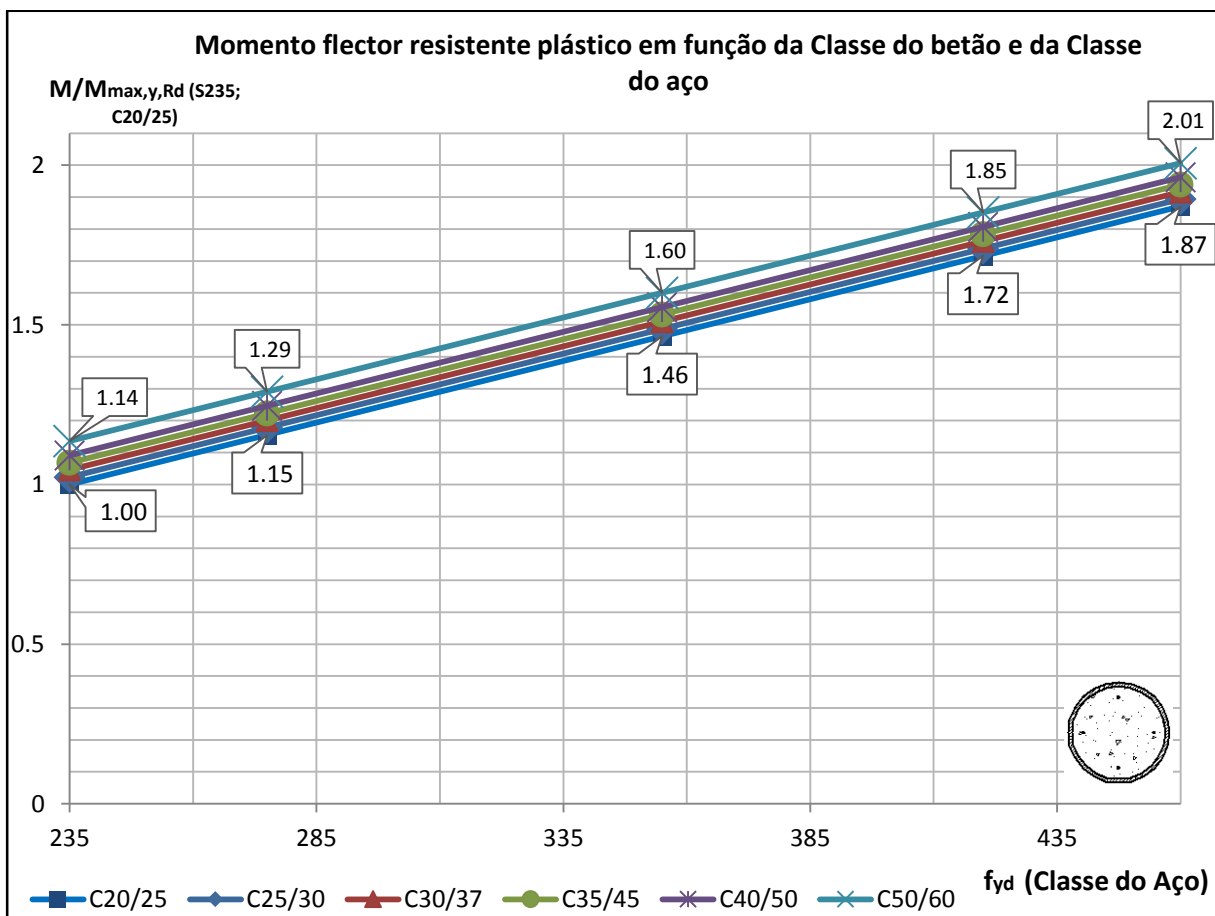
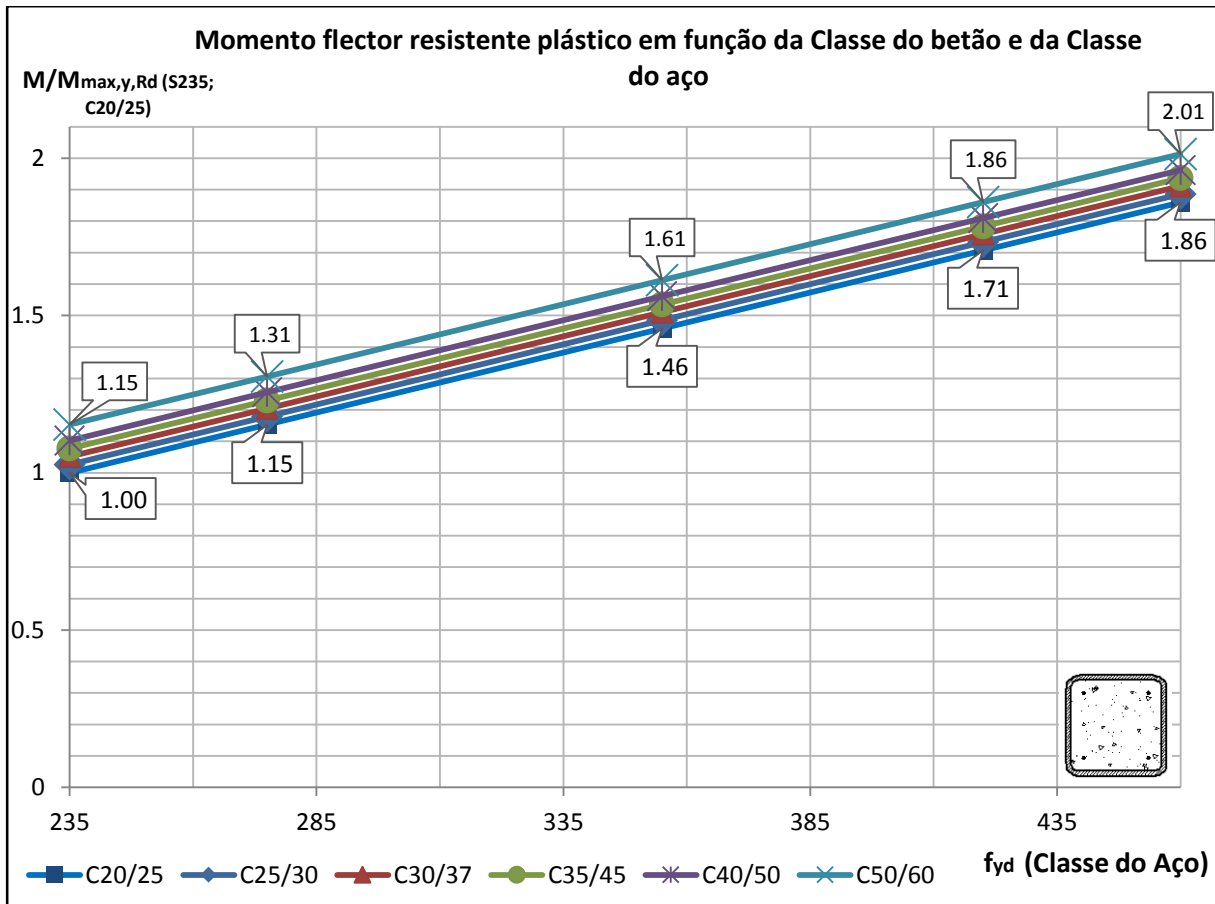
D.6.2.1 Esforço normal resistente plástico





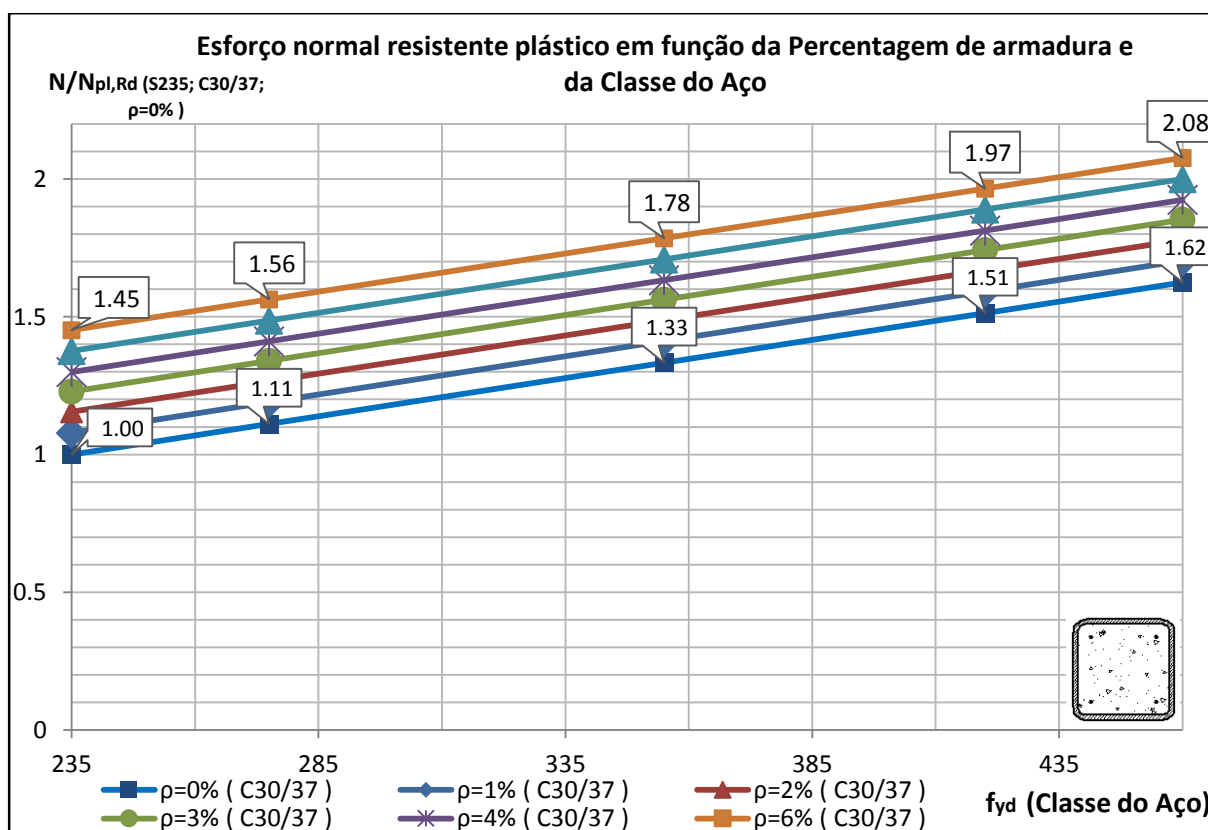
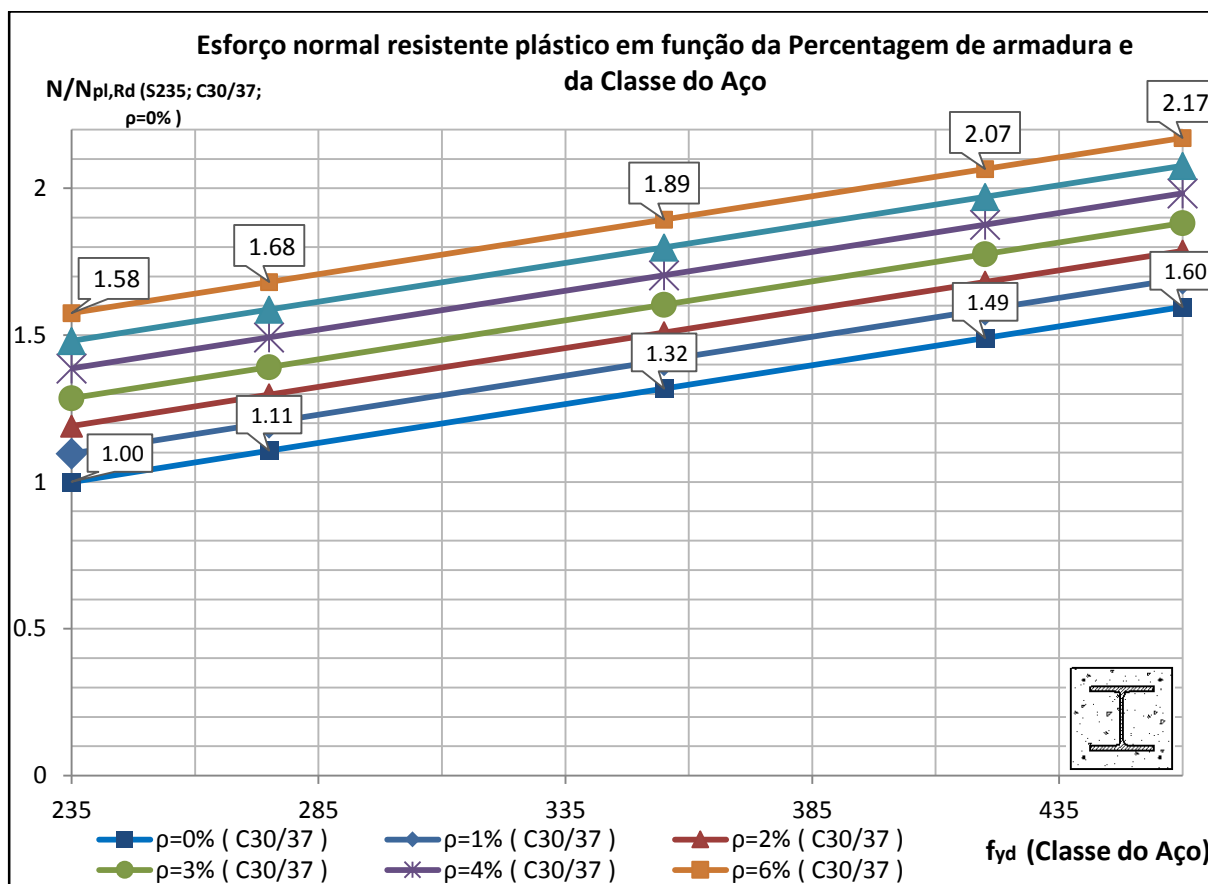
D.6.2.2 Momento flector resistente plástico

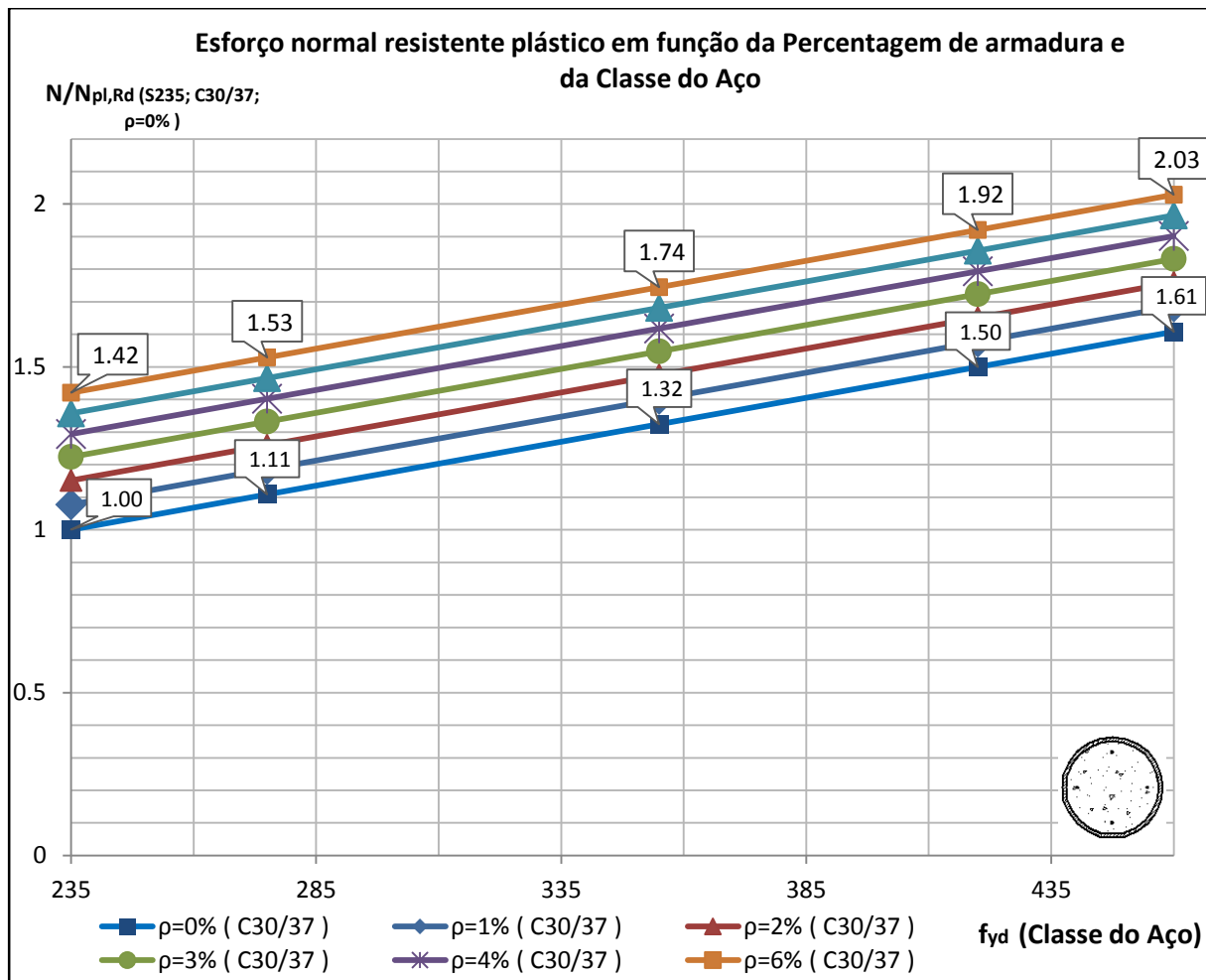




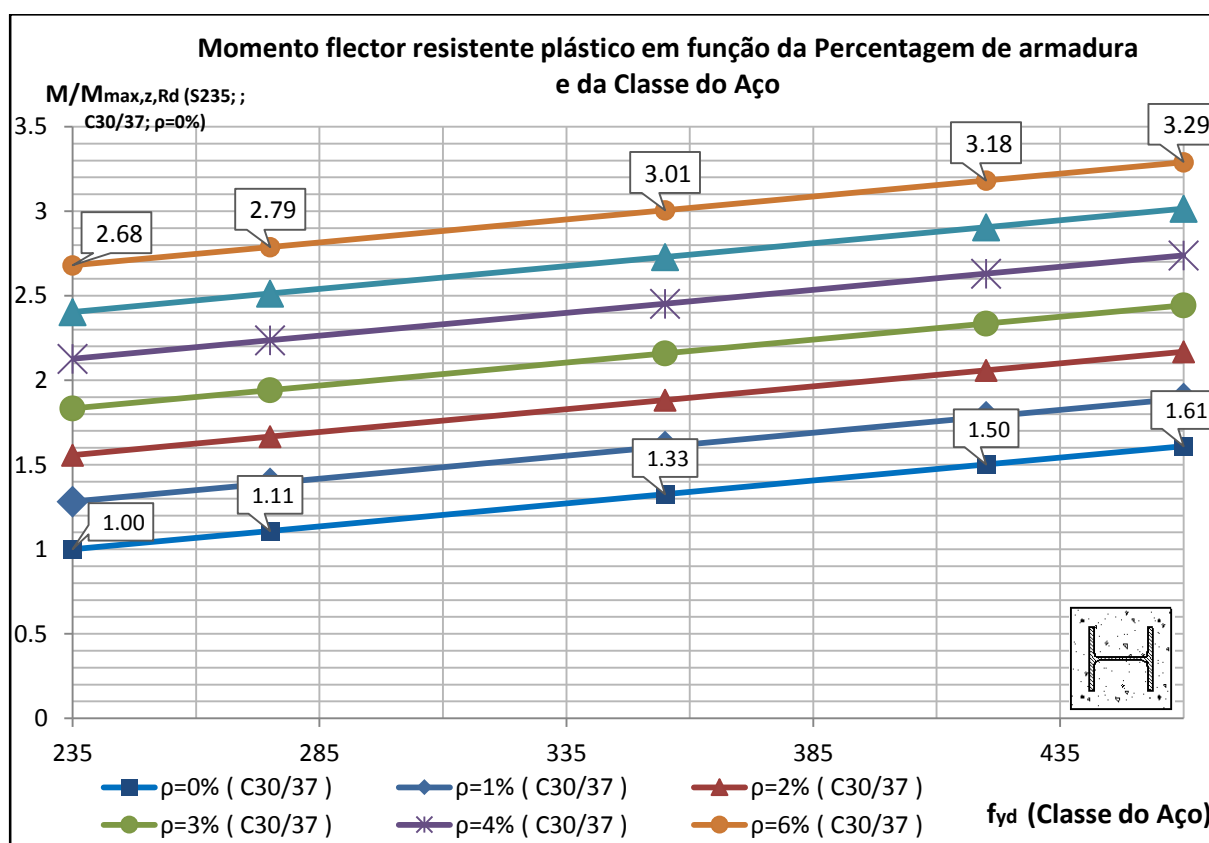
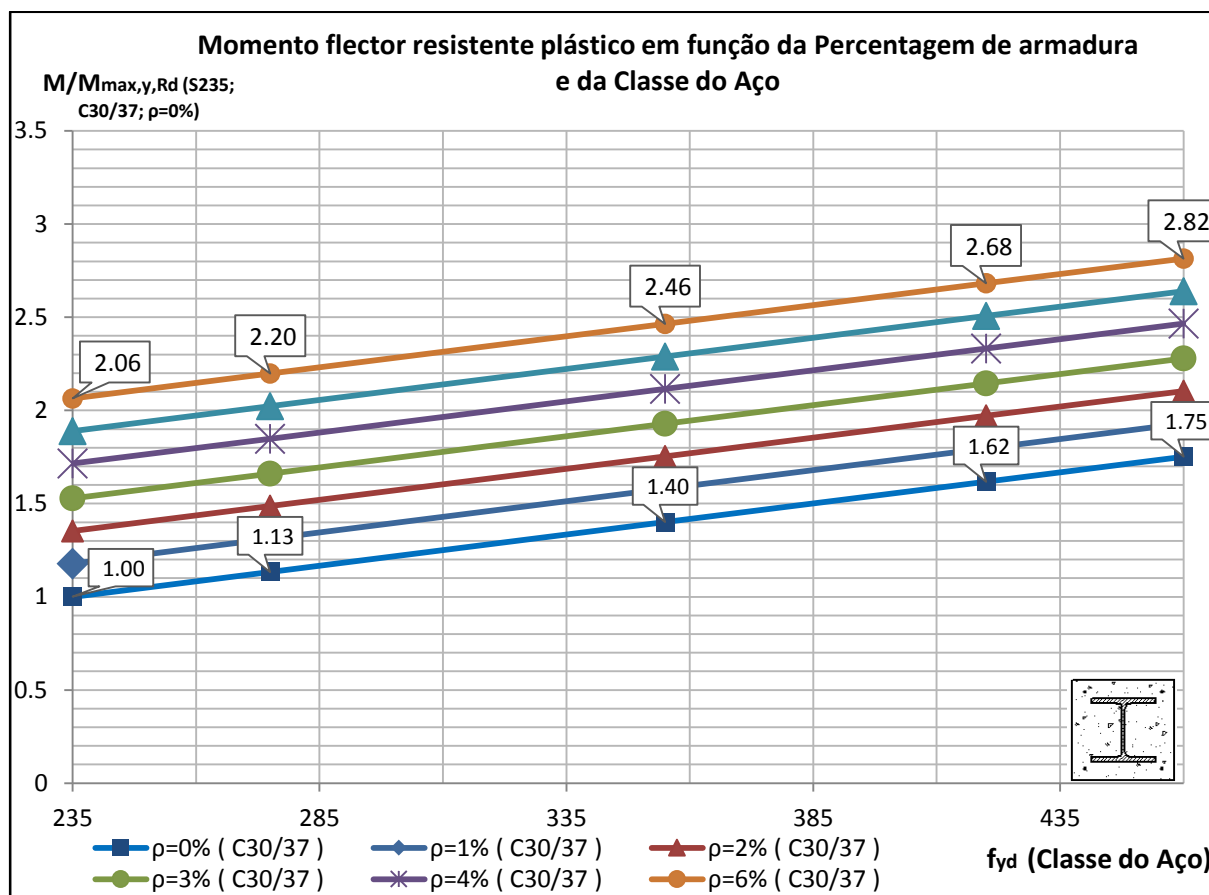
D.6.3 PERCENTAGEM DE ARMADURA LONGITUDINAL

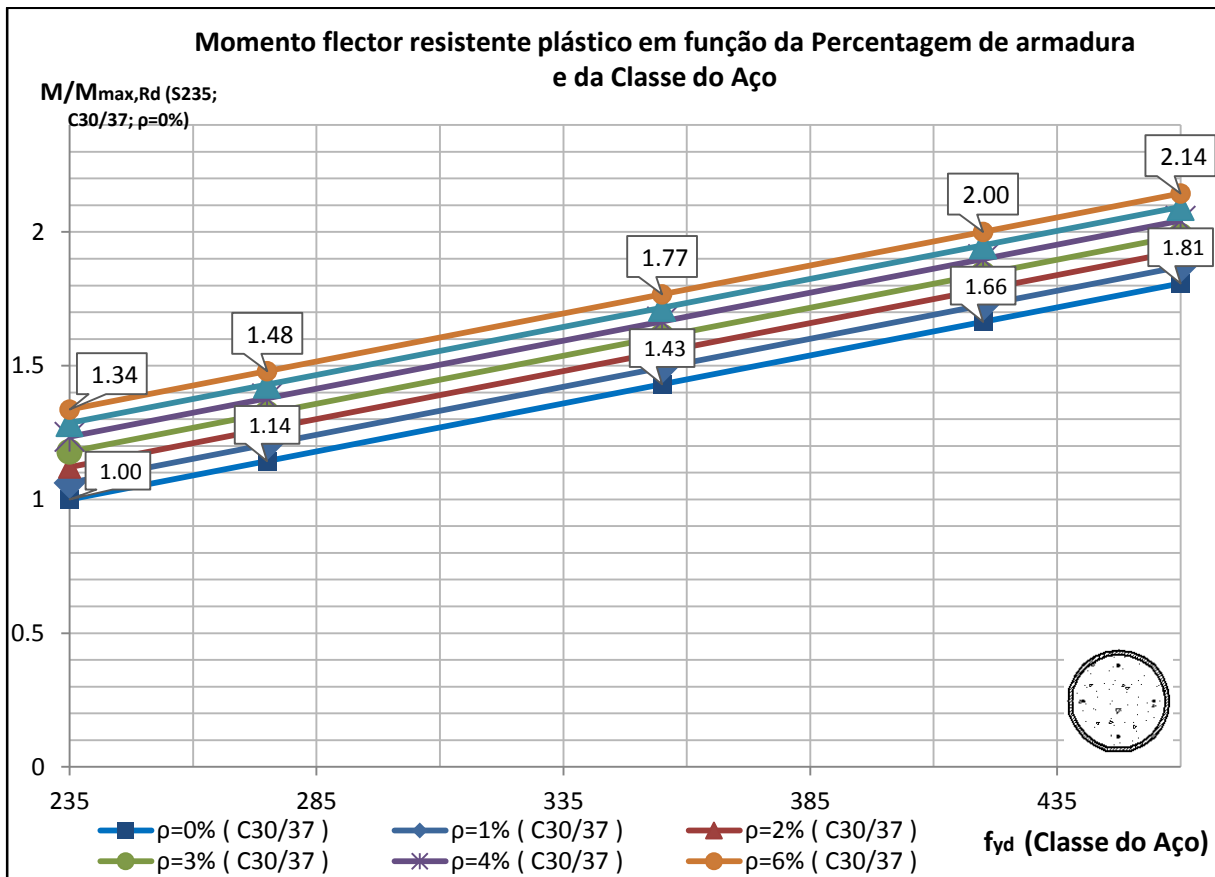
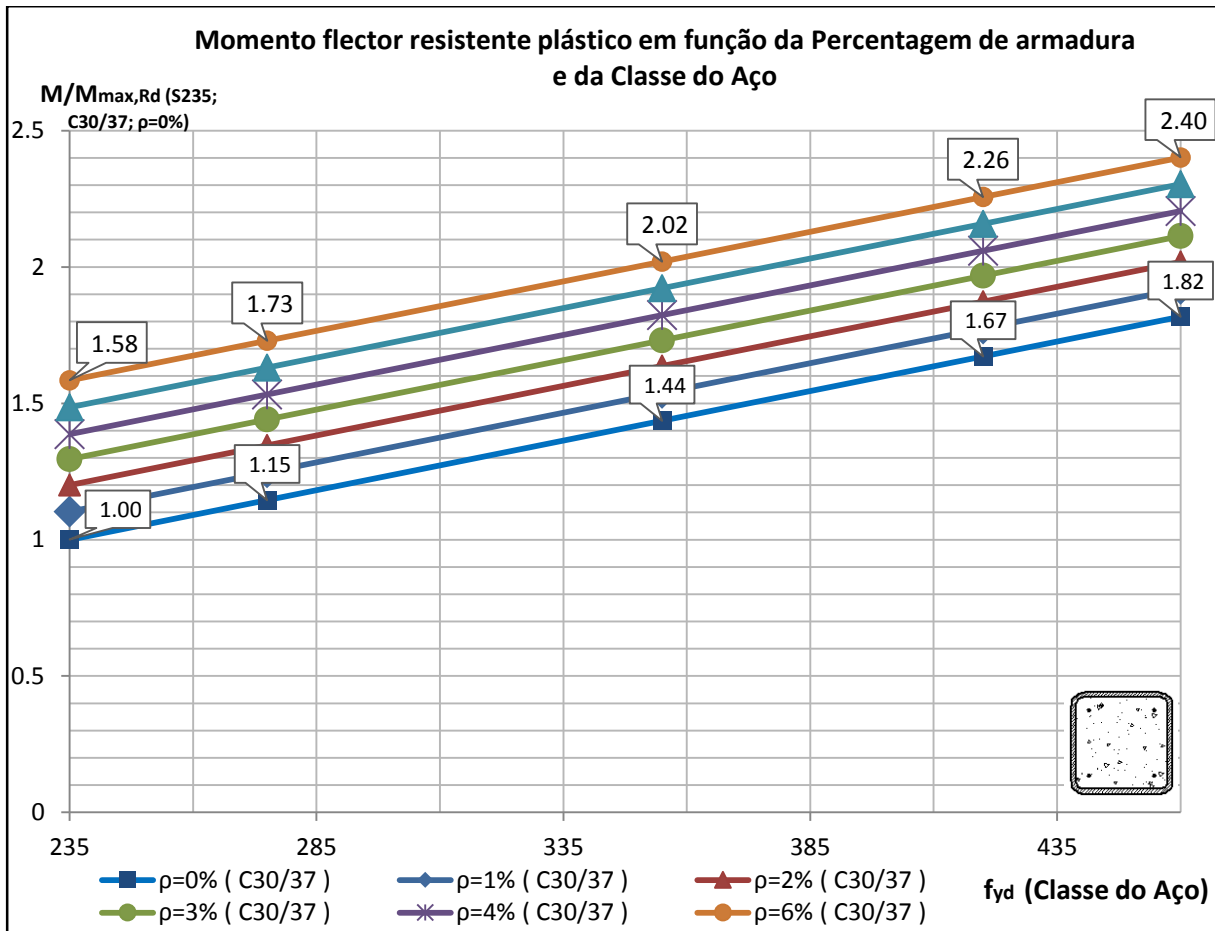
D.6.3.1 Esforço normal resistente plástico





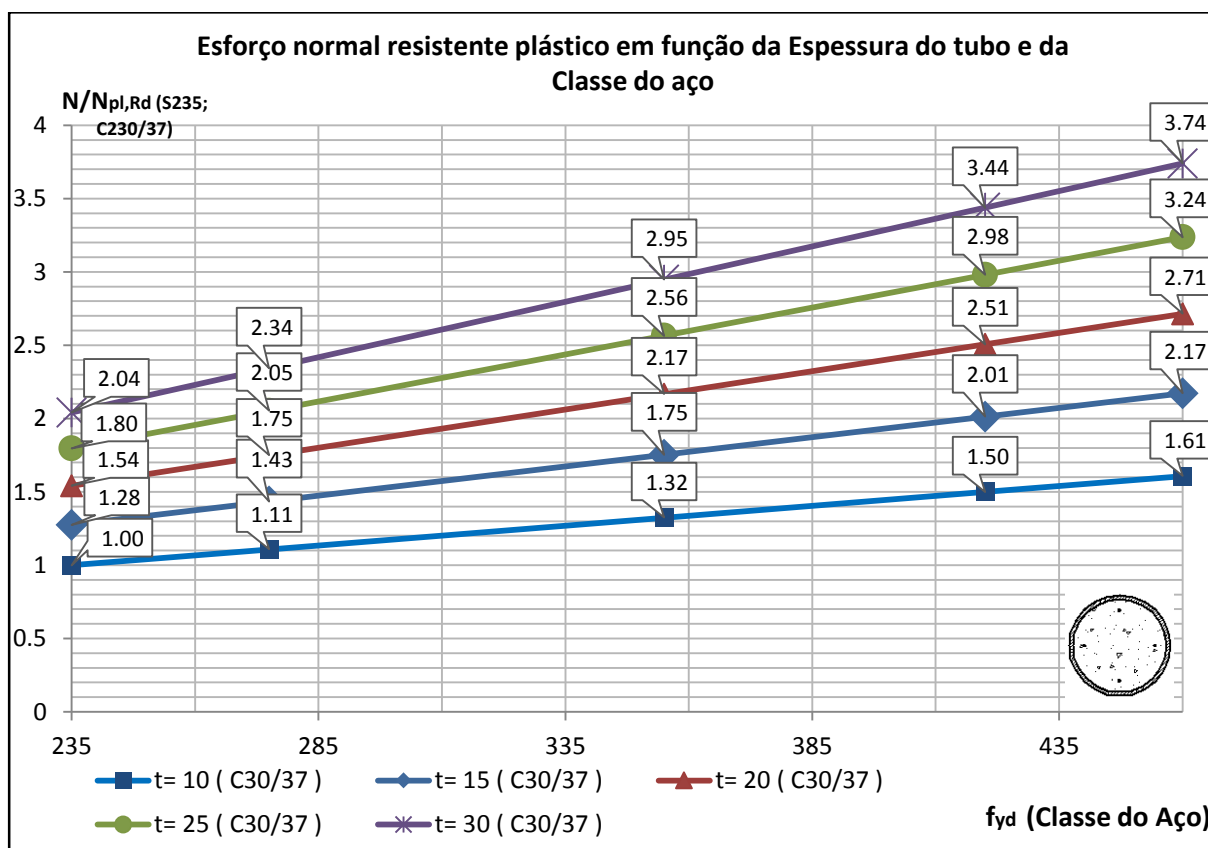
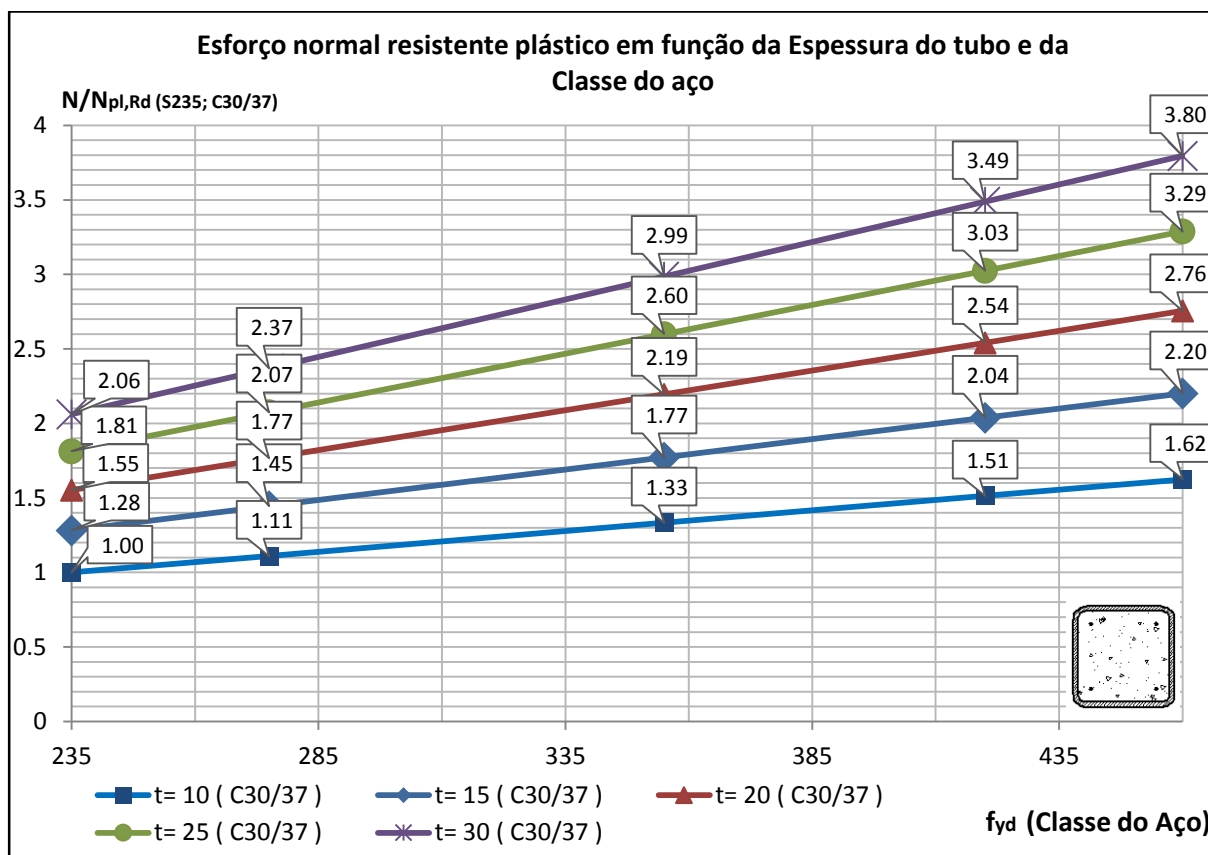
D.6.3.2 Momento flector resistente plástico



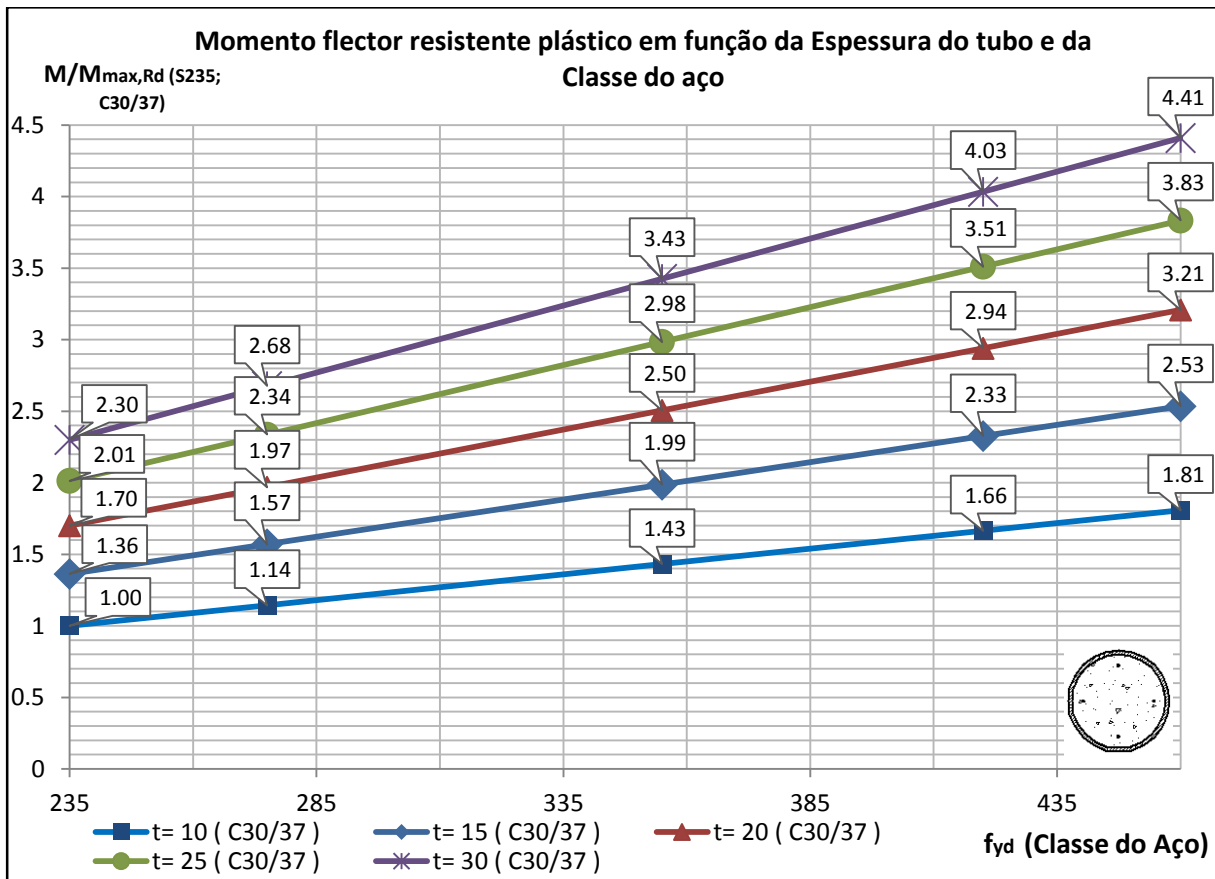
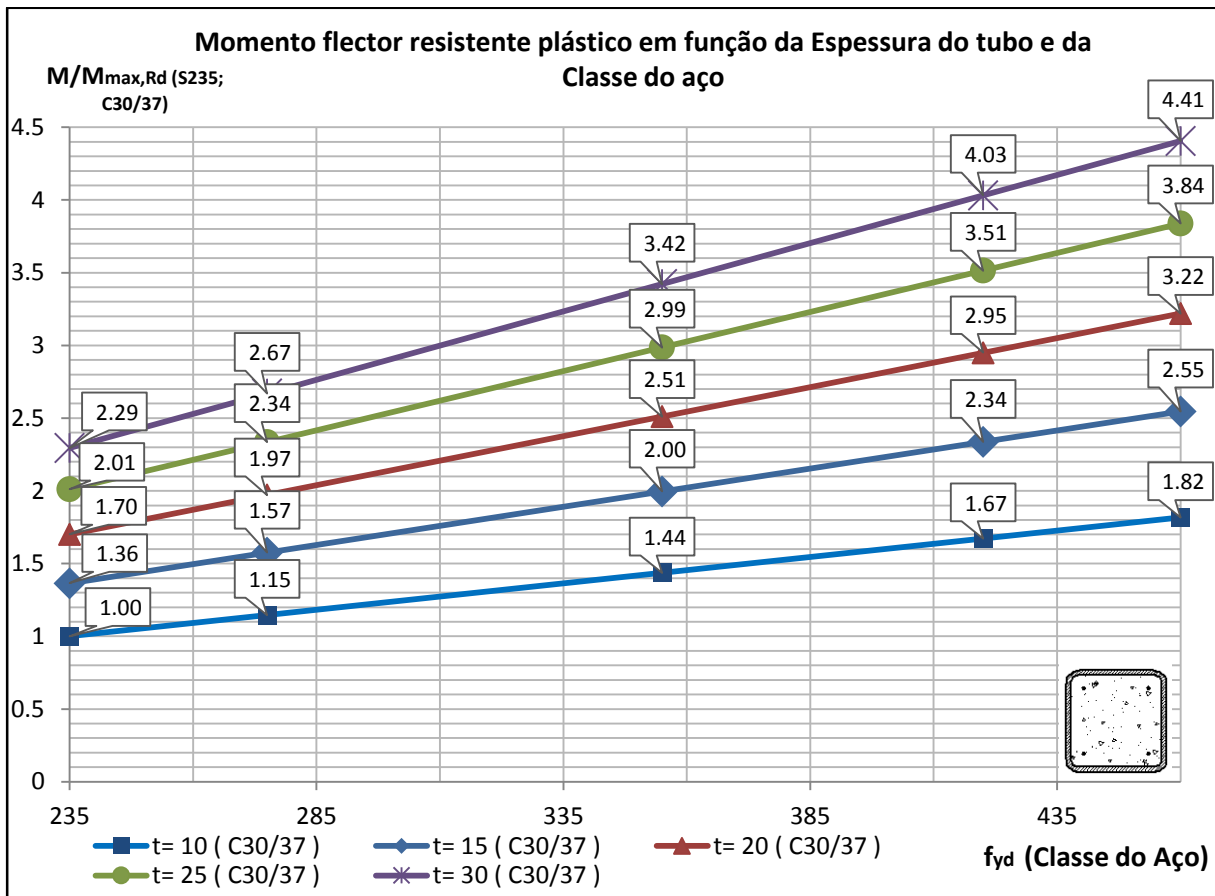


D.6.4 ESPESSURA DO TUBO

D.6.4.1 Esforço normal resistente plástico



D.6.4.2 Momento flector resistente plástico



Anexo E – EXEMPLO DE CÓDIGO EM LINGUAGEM *VISUAL BASIC* PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS PARAMÉTRICOS

A título de exemplo, apresenta-se em seguida o código em linguagem *Visual Basic* utilizado a partir de *Macro MS Excel* para a realização do estudo paramétrico da classe de resistência do aço e do betão:

```

Sub EstudoParametrico()

Dim NomeDoFicheiro As String
Dim FicheiroResultados As Workbook
Dim FicheiroBaseCalculo As String
Dim FicheiroBase As Workbook
Dim i As Integer
Dim r As Integer
Dim f As Integer
Dim m As Single
Dim n As Single
Dim y As Single
Dim z As Single
Dim FicheiroSaida As Workbook

' Mensagem de inicio
MsgBox ("Iniciando o estudo paramétrico. Pressione OK e aguarde pela mensagem de terminado.")
Application.ScreenUpdating = False

' Definir o nome do ficheiro actual e localizacoes de ficheiros
NomeDoFicheiro = GetBook()
Set FicheiroResultados = Workbooks(NomeDoFicheiro)

FicheiroBaseCalculo = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(24, 1)
LocalizacaoFicheiro$ = Application.ActiveWorkbook.Path & "\"
Workbooks.Open (LocalizacaoFicheiro$ & "\" & FicheiroBaseCalculo)
Set FicheiroBase = Workbooks(FicheiroBaseCalculo)

' Definir a Geometria:
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(20, 10) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(11, 2) 'Altura betao
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(21, 10) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(12, 2) 'Base betao
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(20, 13) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(16, 2) 'Base Banzo
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(21, 13) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(17, 2) 'Espessura banzo
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(22, 13) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(18, 2) 'Altura Alma
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(23, 13) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(19, 2) 'Espessura Alma

' Definir variavel e Constante:
Variavel = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(29, 1)
DimVariavel = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(31, 1)
DimConstante = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(36, 1)

' Ciclo do estudo Parametrico:

For r = 38 To 37 + DimConstante

    Constante = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(r, 1)
    FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(34, 2) = Constante

For f = 1 To DimVariavel

```

```

FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(11, 5) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-
OUTPUT").Cells(6, 4 + 3 * f) 'Aço Estrutural
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(12, 5) = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-
OUTPUT").Cells(6, 5 + 3 * f) 'Betão

m = FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(37, 4)

For i = 45 To 105
n = FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(i, 14)
FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(36, 3) = n
FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(i - 36, 4 + 3 * f) = n
y = FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(36, 15)
FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(i - 36, 5 + 3 * f) = y
z = FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(36, 16)
FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(i - 36, 6 + 3 * f) = z
Next i

FicheiroBase.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(37, 4) = m

Next f

If Variavel = "Aco" Then
    Constante = FicheiroResultados.Worksheets("INPUT-OUTPUT").Cells(r - 36, 3)
End If

NomeFicheiroSaida = Constante & " - A comparar o " & Variavel
FicheiroResultados.SaveAs Filename:=LocalizacaoFicheiro$ & NomeFicheiroSaida & ".xlsm"
NomeDoFicheiro = GetBook()
Set FicheiroResultados = Workbooks(NomeDoFicheiro)

Next r

Application.ScreenUpdating = True

MsgBox ("TERMINADO. Ficheiros guardados em: " & LocalizacaoFicheiro & "    Pressione OK para fechar.
Obrigado.")

End Sub

```

```

Function GetBook() As String

```

```

    GetBook = ThisWorkbook.Name

```

```

End Function

```