



# **ANÁLISE DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL NA ILHA DA MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento dos requisitos  
necessários à obtenção de Grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Cláudia Lira Canha**

(Licenciada em Engenharia Civil)

ORIENTADOR:

Doutor José Manuel Martins Neto dos Santos

(Professor Auxiliar Convidado na Universidade da Madeira)

Funchal, dezembro 2015



## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, pelo apoio, esforço e incentivo prestado ao longo minha vida, mas em particular na realização desta dissertação, pois sem eles nada disto era possível.

Ao meu orientador, Professor Doutor José Santos pela sua orientação e disponibilidade prestada ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos e colegas que me ajudaram ao longo do meu percurso universitário.

E a todas as outras pessoas, que de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação.



## RESUMO

A grande maioria das estruturas existentes atualmente contém aço na sua constituição, seja na forma de aço estrutural, seja na forma de armaduras de betão armado. A deterioração precoce do aço destas estruturas é um fenómeno muito comum e que tem acarretado grandes custos em reabilitações e reparações. O principal fator para essa deterioração precoce é o contacto de agentes agressivos, como os cloretos, com o aço que originam a sua corrosão.

Na Ilha da Madeira alguns desses agentes agressivos estão presentes em grandes quantidades, promovendo a súbita corrosão do aço, fazendo com que os custos de manutenção sejam elevados. Uma das formas de evitar a corrosão do aço é através da utilização do aço inoxidável reduzindo assim os custos com manutenções ao longo da sua vida útil.

Nesta dissertação pretende-se avaliar se a utilização do aço inoxidável em vez do aço carbono na Ilha da Madeira é economicamente mais vantajosa a longo prazo. Para esse fim foram elaboradas diversas tarefas. Numa fase inicial foi realizada uma análise comparativa entre o aço carbono e o aço inoxidável em termos de propriedades gerais, comportamento mecânico e regulamentação, mas também uma pesquisa sobre as aplicações e os tipos de aço inoxidável.

Numa fase seguinte foram abordados mecanismos de degradação e métodos de reparação para a corrosão. Para além disso, foram determinados os tempos de vida útil de projeto, através de modelos de degradação, e estimados cenários de degradação e manutenção.

Posteriormente foram dimensionados dois tipos de estruturas (betão armado e estrutura metálica) e para dois tipos de aço (aço carbono e aço inoxidável) por forma a determinar o peso dos materiais das estruturas para apurar o seu custo.

Em seguida foram realizadas as análises económicas das estruturas mencionadas anteriormente face aos cenários de manutenção anteriormente realizados. As análises recaíram sobre os custos iniciais das estruturas e os custos a longo prazo, para um período de vida útil de 50 anos.

Em função da análise realizada pode concluir-se que na Ilha da Madeira a utilização do aço inoxidável nas estruturas metálicas, por enquanto, não é vantajosa em termos económicos.

Para as estruturas de betão armado, verificou-se também que na maioria dos casos a utilização do aço carbono é a melhor opção económica a longo prazo, exceto nas estruturas perto do mar com cimentos do tipo CEM I ou CEM II/A, em que o aço inoxidável é a melhor opção, pois embora este apresente um custo inicial superior ao do aço carbono, o seu custo total a longo prazo incluindo as reparações é inferior.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço Inoxidável; Aço Carbono; Corrosão; Análise de Custos; Betão Armado; Aço Estrutural; Dimensionamento; Durabilidade.



## **ABSTRACT**

The vast majority of currently existing structures contains steel in its composition, either in the form of structural steel, or in the form of reinforcement bars for concrete. The early deterioration of these structures is a very common phenomenon, which has entailed large costs in rehabilitation and repairs. The main reason for this deterioration is the early arrival of aggressive substances, such as chlorides, to steel that originate its corrosion.

In Madeira Island some of these aggressive agents are present in large quantities, which promote the sudden corrosion of steel, causing high costs with maintenance. One way to prevent the corrosion of steel is using the stainless steel thus reducing the cost of maintenance during its service life.

The aim of this dissertation is to assess if the use of stainless steel instead of carbon steel in Madeira is most economically advantageous in the long term. To this end a number of tasks were developed. Initially it was carried out a comparative analysis between carbon steel and stainless steel in terms of general properties, mechanical behaviour and design codes, but also research on applications and types of stainless steel.

In the next phase it was covered the degradation mechanisms and repairing methods for corrosion. In addition the design lifetime was determined, by degradation models, and estimated their respective scenarios of degradation and maintenance.

Later it was developed the structural design for two types of structures (reinforced concrete and steel structure) and two types of steel (carbon steel and stainless steel) in order to determine the weight of materials of the structures to estimate its cost.

Then an economic analysis of the aforementioned structures was carried out. These analysis included the initial costs of the structures and the long-term costs for a service life of 50 years.

According to the performed analysis it can be concluded that in Madeira Island the use of stainless steel in steel structures, for now, is not advantageous in economic terms.

For reinforced concrete structures, it was also concluded that the use of carbon steel is advantageous in economic terms, except for structures located near the sea with cement type CEM I or CEM II/A (cements with diffusion facility of chlorides), where stainless steel is economically viable in the long term.

**KEYWORDS:** Stainless Steel; Carbon Steel; Corrosion; Cost analysis; Concrete; Structural Steel, Structural Design, Durability.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	ENQUADRAMENTO .....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2</b>	<b>AÇO INOXIDÁVEL.....</b>	<b>5</b>
2.1	BREVE HISTÓRIA .....	5
2.2	PROPRIEDADES GERAIS.....	5
2.3	TIPOS DE AÇO INOXIDÁVEL .....	6
2.4	COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	7
2.4.1	Betão Armado .....	7
2.4.2	Estrutura metálica.....	9
2.5	APLICAÇÕES .....	11
2.6	INVESTIGAÇÃO SOBRE AÇO INOXIDÁVEL .....	14
2.7	REGULAMENTAÇÃO .....	15
2.7.1	Betão Armado .....	15
2.7.2	Estrutura Metálica .....	15
<b>3</b>	<b>DURABILIDADE ESTRUTURAL .....</b>	<b>27</b>
3.1	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO .....	27
3.1.1	Betão Armado .....	27
3.1.1.1	Corrosão por Cloretos .....	27
3.1.1.2	Corrosão por Carbonatação.....	28
3.1.2	Estrutura Metálica .....	28
3.2	MODELOS DE DEGRADAÇÃO NO BETÃO ARMADO.....	29
3.2.1	Fase de Iniciação .....	30
3.2.1.1	Carbonatação.....	30
3.2.1.2	Cloretos .....	31
3.2.2	Fase de Propagação .....	34
3.2.3	Período de Vida Útil de Projeto .....	36
3.2.3.1	Carbonatação.....	38
3.2.3.2	Cloretos .....	39
3.3	MÉTODOS DE REPARAÇÃO .....	43
3.3.1	Betão Armado .....	43
3.3.1.1	Reparação eletroquímica .....	43
3.3.1.2	Substituição do Betão contaminado .....	44
3.3.1.3	Inibidores de corrosão .....	44
3.3.1.4	Custos de reparação.....	45
3.3.2	Estrutura Metálica .....	45

3.3.2.1	Manutenção dos revestimentos.....	45
3.3.2.2	Proteção catódica.....	45
3.3.2.3	Substituição total ou parcial de elementos estruturais.....	46
3.3.2.4	Custos de reparação.....	46
3.4	CENÁRIOS DE DEGRADAÇÃO E MANUTENÇÃO .....	46
3.4.1	Betão Armado.....	47
3.4.2	Estrutura Metálica .....	51
<b>4</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS.....</b>	<b>53</b>
4.1	ESTRUTURAS METÁLICAS .....	53
4.1.1	Materiais.....	54
4.1.2	Ações .....	54
4.1.3	Peso das Estruturas.....	56
4.2	ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO.....	58
4.2.1	Materiais.....	59
4.2.2	Ações.....	60
4.2.3	Peso das Armaduras .....	61
4.2.3.1	Lajes .....	61
4.2.3.2	Sapatas.....	62
4.2.3.3	Pilares .....	62
4.2.3.4	Vigas.....	63
4.2.3.5	Todos os elementos estruturais.....	64
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE CUSTOS .....</b>	<b>65</b>
5.1	CUSTOS A CURTO PRAZO .....	65
5.1.1	Estruturas metálicas.....	66
5.1.2	Estruturas de betão armado .....	67
5.2	CUSTOS A LONGO PRAZO.....	69
5.2.1	Estruturas de betão armado .....	71
5.2.2	Estruturas metálicas.....	75
5.3	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE ÀS TAXAS DE INFLAÇÃO E DE JURO.....	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	81
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	82
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>87</b>
A.	FORMULÁRIOS .....	89
B.	CÁLCULOS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS .....	101
C.	CÁLCULOS DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO.....	123
D.	CÁLCULOS DA DURABILIDADE .....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curvas de tensão-deformação [16] .....	8
Figura 2.2 - Curvas de tensão-deformação de alguns tipos de aço [18].....	9
Figura 2.3 - Pier Progreso de Castro, México [23,24] .....	11
Figura 2.4 - <i>Shenzen Western Corridor</i> , Hong Kong [16,25] .....	11
Figura 2.5 - Sheik Zayed Bridge, Abu Dhabi [26].....	12
Figura 2.6 - <i>Rail Viaduct</i> , Itália [27] .....	12
Figura 2.7 - Estação ferroviária <i>Gent Sint Pieters</i> , Bélgica [28,29].....	12
Figura 2.8 - Ponte Helix, Cingapura [30].....	13
Figura 2.9 - Pavilhão dos Emirados Árabes no Expo Shanghai 2010 [31] .....	13
Figura 2.10 - <i>Dream Downtown</i> , Nova Iorque [32] .....	13
Figura 2.11 - Sede do tribunal <i>Butler County Court House</i> , na Pensilvânia [23,33] .....	14
Figura 2.12 - Curvas de encurvadura para o Aço Carbono [19] .....	21
Figura 2.13 - Curvas de encurvadura para o Aço Inoxidável (adaptado de [18]) .....	21
Figura 2.14 - Curvas de encurvadura lateral para o Aço Inoxidável (adaptado de [18]) .....	23
Figura 3.1 - Principais processos de proteção de estruturas metálicas [46,47] .....	29
Figura 3.2 - Deterioração ao longo do tempo [49].....	30
Figura 3.3 - Representação esquemática do teor crítico de cloretos (adaptado de [3]).....	33
Figura 3.4 - Valores expectáveis da velocidade de corrosão [49].....	35
Figura 3.5 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XC3.....	38
Figura 3.6 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XC4.....	38
Figura 3.7 - Aço Carbono: Determinação de $t_L$ para a classe XS1 - 0km da costa .....	40
Figura 3.8 - Aço Carbono: Determinação de $t_L$ para a classe XS1 - 1km da costa .....	40
Figura 3.9 - Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XS1 - 0km da costa.....	40
Figura 3.10 - Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XS1 - 1km da costa.....	41
Figura 3.11 - Aço Carbono: Determinação de $t_L$ para a classe XS3 - 0km da costa .....	41
Figura 3.12 - Aço Carbono: Determinação de $t_L$ para a classe XS3 - 1km da costa .....	42
Figura 3.13 - Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XS3 - 0km da costa.....	42
Figura 3.14 - Aço Inoxidável: Determinação de $t_L$ para a classe XS3 - 1km da costa.....	42
Figura 3.15 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 1.....	48
Figura 3.16 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 1 .....	48
Figura 3.17 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 2.....	49
Figura 3.18 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 2 .....	49
Figura 3.19 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 3.....	50
Figura 3.20 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 3 .....	50
Figura 3.21 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 4.....	51
Figura 3.22 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 4 .....	51
Figura 3.23 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 5 .....	52
Figura 3.24 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 6 .....	52

Figura 4.1 - Representação da estrutura metálica estudada em perspetiva .....	53
Figura 4.2 - Planta e alçados dos pórticos para as estruturas metálicas .....	54
Figura 4.3 - Representação em planta das fachadas e pressões do vento aplicadas .....	55
Figura 4.4 - Representação da estrutura de betão armado estudada em perspetiva.....	59
Figura 4.5 - Planta e alçados do pórtico para as estruturas de betão armado .....	59
Figura 5.1 - Taxa de Inflação. Fonte: INE e Banco de Portugal [60,61].....	70
Figura 5.2 - Taxa de juro Euribor a 12 meses. Fonte: INE [60].....	70
Figura 5.3 - Cenário 1: Representação dos custos ao longo da vida útil.....	72
Figura 5.4 - Cenário 2: Representação dos custos ao longo da vida útil.....	73
Figura 5.5 - Cenário 3: Representação dos custos ao longo da vida útil.....	74
Figura 5.6 - Cenário 4: Representação dos custos ao longo da vida útil.....	75

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Percentagens dos principais elementos e propriedade magnética nos diferentes tipos de aço inoxidável (adaptado de [13,16]) .....	7
Tabela 2.2 - Classes de aço corrente [16].....	8
Tabela 2.3 - Módulos de elasticidade e distorção - vários tipos de aço (adaptado de [19,20]).....	9
Tabela 2.4 - Valores nominais de $f_y$ e $f_u$ para aços inoxidáveis [20] .....	10
Tabela 2.5 - Valores nominais de $f_y$ e $f_u$ para aços carbono (adaptado de [19]).....	10
Tabela 2.6 - Valores do coeficiente n para o cálculo do módulo de elasticidade secante [20] .....	16
Tabela 2.7 - Coeficientes parciais de segurança (adaptado de [19,20]) .....	16
Tabela 2.8 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (adaptado de [19,20]).....	17
Tabela 2.9 - Fator de redução para o cálculo de larguras efetivas dos elementos de Classe 4 (adaptada de [20,40]) .....	19
Tabela 2.10 - Fatores de imperfeição para o Aço Carbono [19] .....	21
Tabela 2.11 - Valores de $\lambda_0$ e $\alpha$ para o Aço Inoxidável (adaptado de [20]) .....	22
Tabela 2.12 - Fatores de imperfeição para encurvadura lateral para o Aço Carbono [19].....	22
Tabela 2.13 - Fatores de imperfeição para encurvadura lateral para o Aço Inoxidável [20] .....	23
Tabela 2.14 - Diferenças para o cálculo de $V_{b,Rd}$ [20,40] .....	25
Tabela 2.15 - Valores nominais $f_{yd}$ e $f_{ub}$ dos parafusos de aço inoxidável [20].....	26
Tabela 2.16 - Valores nominais $f_{yd}$ e $f_{ub}$ dos parafusos de aço carbono [42].....	26
Tabela 3.1 - Valores de $k_l$ e n [48].....	31
Tabela 3.2 - Valores de $R_{C65}$ consoante o tipo de cimento [50] .....	31
Tabela 3.3 - Valores de $C_R$ para Aço Carbono em % [48].....	32
Tabela 3.4 - Valores de $C_b$ e $k_{vert}$ [48].....	33
Tabela 3.5 - Valores de $k_{temp}$ [48] .....	33
Tabela 3.6 - Valores de $k_{hor}$ [48] .....	33
Tabela 3.7 - Valores de $k_{D,c}$ [48].....	34
Tabela 3.8 - Valores de n e $k_{D,RH}$ (adaptado de [48]). .....	34
Tabela 3.9 - Valores de $k_{D,T}$ [48] .....	34
Tabela 3.10 - Valores de $D_0$ [51] .....	34
Tabela 3.11 - Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras [48].....	36
Tabela 3.12 - Intervalos de intensidade da corrente consoante o nível de corrosão [48].....	36
Tabela 3.13 - Dados para o cálculo da vida útil de projeto relativo à carbonatação [52]. .....	38
Tabela 3.14 - Dados para o cálculo da vida útil de projeto relativos aos cloretos [52].....	39
Tabela 3.15 - Tipo de reparação mais utilizada nas estruturas de betão armado (adaptado de [54]).....	45
Tabela 3.16 - Tipos de reparações mais utilizados nas estruturas metálicas (adaptado de [54]) .....	46
Tabela 3.17 - Betão armado: Combinações de fatores na determinação dos cenários de degradação e manutenção .....	47
Tabela 3.18 - Estruturas Metálicas: Combinações de fatores na determinação dos cenários de degradação e manutenção .....	52

Tabela 4.1 - Dados para o cálculo dos efeitos da ação do vento .....	55
Tabela 4.2 - Cálculo das pressões do vento a aplicar na estrutura .....	55
Tabela 4.3 - Estruturas metálicas: Coeficientes de combinação utilizados .....	56
Tabela 4.4 - Aço Carbono: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados .....	57
Tabela 4.5 - Aço Inoxidável: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados.....	57
Tabela 4.6 - Aço Carbono: Determinação do peso da estrutura.....	58
Tabela 4.7 - Aço Inoxidável: Determinação do peso da estrutura.....	58
Tabela 4.8 - Principais características dos materiais utilizados.....	60
Tabela 4.9 - Estruturas de betão armado: Coeficientes de combinação utilizados.....	61
Tabela 4.10 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nas lajes .....	61
Tabela 4.11 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas lajes.....	62
Tabela 4.12 - Aço Carbono e Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas sapatas .....	62
Tabela 4.13 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nos pilares.....	62
Tabela 4.14 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nos pilares .....	63
Tabela 4.15 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nas vigas .....	63
Tabela 4.16 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas vigas.....	64
Tabela 4.17 - Aço Carbono: Determinação do peso total de armadura.....	64
Tabela 4.18 - Aço Inoxidável: Determinação do peso total de armadura .....	64
Tabela 5.1 - Custos unitários dos varões .....	66
Tabela 5.2 - Custos unitários dos perfis metálicos .....	66
Tabela 5.3 - Aço Carbono: Custo total da estrutura metálica.....	66
Tabela 5.4 - Aço Inoxidável: Custo total da estrutura metálica .....	66
Tabela 5.5 - Custo total das lajes.....	67
Tabela 5.6 - Custo total das sapatas .....	67
Tabela 5.7 - Custo total dos pilares .....	68
Tabela 5.8 - Custo total das vigas.....	68
Tabela 5.9 - Aço Carbono: Custo total da estrutura de betão armado.....	69
Tabela 5.10 - Aço Inoxidável: Custo total da estrutura de betão armado .....	69
Tabela 5.11 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 1.....	72
Tabela 5.12 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 2.....	73
Tabela 5.13 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 3.....	74
Tabela 5.14 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 4.....	75
Tabela 5.15 - Estruturas metálicas: Custos a longo prazo - Cenário 5.....	76
Tabela 5.16 - Estruturas metálicas: Custos a longo prazo - Cenário 6.....	76
Tabela 5.17 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 1 .....	77
Tabela 5.18 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 2 .....	77
Tabela 5.19 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 3 .....	78
Tabela 5.20 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 4 .....	78
Tabela 5.21 - Estruturas metálicas: Análise da sensibilidade - Cenário 5.....	79
Tabela 5.22 - Estruturas metálicas: Análise da sensibilidade - Cenário 6.....	79
Tabela 8.1 - Fórmulas para a classificação da seção transversal.....	89
Tabela 8.2 - Fórmulas auxiliares para a verificação da flexão composta desviada.....	91

Tabela 8.3 - Fórmulas para o cálculo das armaduras das sapatas .....	94
Tabela 8.4 - Características dos perfis utilizados nos dimensionamentos .....	101
Tabela 8.5 - Tensões de cedência utilizadas no dimensionamento .....	101
Tabela 8.6 - Aço Carbono: Classificação das secções transversais (Vento A) .....	102
Tabela 8.7 - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A) .....	103
Tabela 8.8 - Curvas de encurvadura em função da secção transversal .....	104
Tabela 8.9 - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento A) .....	104
Tabela 8.10 - Aço Carbono: Classificação das secções transversais (Vento C e D).....	107
Tabela 8.11 - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D)...	108
Tabela 8.12 - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D).....	109
Tabela 8.13 - Aço Inoxidável: Classificação das secções transversais (Vento A).....	112
Tabela 8.14 - Aço Inoxidável: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A).....	113
Tabela 8.15 - Curvas de encurvadura em função do eixo de flexão.....	114
Tabela 8.16 - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento A).....	114
Tabela 8.17 - Aço Inoxidável: Classificação das secções transversais (Vento C e D) .....	117
Tabela 8.18 - Aço Inoxidável: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D) 118	
Tabela 8.19 - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D).....	119
Tabela 8.20 - Áreas e pesos dos vários varões .....	123
Tabela 8.21 - Aço Carbono: Esforços nas lajes e respetivas armaduras adotadas .....	123
Tabela 8.22 - Aço Inoxidável: Esforços nas lajes e respetivas armaduras adotadas .....	126
Tabela 8.23 - Dimensões das sapatas e verificação de segurança do solo .....	129
Tabela 8.24 - Determinação das armaduras das sapatas .....	129
Tabela 8.25 - Aço Carbono: Características dos pilares .....	129
Tabela 8.26 - Aço Inoxidável: Características dos pilares .....	129
Tabela 8.27 - Excentricidade inicial.....	130
Tabela 8.28 - Dados para o cálculo da excentricidade de 2º ordem.....	130
Tabela 8.29 - Esforços nos pilares - Direção x.....	131
Tabela 8.30 - Esforços nos pilares - Direção y.....	132
Tabela 8.31 - Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem - Direção x....	133
Tabela 8.32 - Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem - Direção y....	134
Tabela 8.33 - Aço Carbono: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção x.....	135
Tabela 8.34 - Aço Carbono: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção y.....	136
Tabela 8.35 - Aço Inoxidável: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção x .....	137
Tabela 8.36 - Aço Inoxidável: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção y .....	138
Tabela 8.37 - Aço Carbono: Cálculo da armadura longitudinal por flexão composta .....	139
Tabela 8.38 - Aço Inoxidável: Cálculo da armadura longitudinal por flexão composta.....	140
Tabela 8.39 - Aço Carbono: Verificação à flexão desviada composta.....	141
Tabela 8.40 - Aço Inoxidável: Verificação à flexão desviada composta .....	142
Tabela 8.41 - Aço Carbono: Armadura longitudinal adotada .....	143
Tabela 8.42 - Aço Inoxidável: Armadura longitudinal adotada .....	143
Tabela 8.43 - Dados auxiliares para o cálculo da armadura transversal .....	143
Tabela 8.44 - Armadura transversal adotada.....	143

Tabela 8.45 - Características das vigas e dados auxiliares.....	144
Tabela 8.46 - Aço Carbono: Armadura longitudinal adotada .....	144
Tabela 8.47 - Aço Inoxidável: Armadura longitudinal adotada .....	145
Tabela 8.48 - Verificação à compressão.....	146
Tabela 8.49 - Armadura transversal adotada.....	147
Tabela 8.50 - Aço Carbono: Flecha a longo prazo pelo método dos coeficientes globais .....	148
Tabela 8.51 - Aço Inoxidável: Flecha a longo prazo pelo método dos coeficientes globais.....	149
Tabela 8.52 - Aço Carbono: Cálculo de tensões em Estado II.....	150
Tabela 8.53 - Aço Inoxidável: Cálculo de tensões em Estado II.....	150
Tabela 8.54 - Aço Carbono: Verificação da máxima abertura de fendas.....	151
Tabela 8.55 - Aço Inoxidável: Verificação da máxima abertura de fendas .....	151
Tabela 8.56 - Classes de exposição em função das condições ambientais [39] .....	153
Tabela 8.57 - Definição de classes de consequências [43].....	154
Tabela 8.58 - Fatores de segurança da vida útil $\gamma$ [51].....	154
Tabela 8.59 - Cálculo de $t_i$ para as classes XC3 e XC4 (R=30mm).....	155
Tabela 8.60 - Cálculo de $t_p$ para as classes XC3 e XC4 (R=30mm) .....	156
Tabela 8.61 - Determinação de $t_L$ para as classes XC3 e XC4 (R=30mm) .....	156
Tabela 8.62 - Cálculo de $t_i$ para as classes XC3 e XC4 (R=40mm).....	157
Tabela 8.63 - Cálculo de $t_p$ para as classes XC3 e XC4 (R=40mm) .....	158
Tabela 8.64 - Determinação de $t_L$ para as classes XC3 e XC4 (R=40mm) .....	158
Tabela 8.65 - Cálculo de $t_i$ para as classes XC3 e XC4 (R=50mm).....	159
Tabela 8.66 - Cálculo de $t_p$ para as classes XC3 e XC4 (R=50mm) .....	160
Tabela 8.67 - Determinação de $t_L$ para as classes XC3 e XC4 (R=50mm) .....	160
Tabela 8.68 - Cálculo de $C_s$ e D para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2).....	161
Tabela 8.69 - Cálculo de $C_s$ e D para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2).....	162
Tabela 8.70 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=30mm).....	163
Tabela 8.71 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2; R=30mm).....	163
Tabela 8.72 - Cálculo de $t_p$ para as classes XS1 e XS3 (R=30mm) .....	164
Tabela 8.73 - Determinação de $t_L$ para as classes XS1 e XS3 (R=30mm) .....	164
Tabela 8.74 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=40mm).....	165
Tabela 8.75 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2; R=40mm).....	165
Tabela 8.76 - Cálculo de $t_p$ para as classes XS1 e XS3 (R=40mm) .....	166
Tabela 8.77 - Determinação de $t_L$ para as classes XS1 e XS3 (R=40mm) .....	166
Tabela 8.78 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões; A2, B2, C2 e D2; R=50mm).....	167
Tabela 8.79 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões E2, F2, G2 e H2; R=50mm).....	167
Tabela 8.80 - Cálculo de $t_p$ para as classes XS1 e XS3 (R=50mm) .....	168
Tabela 8.81 - Determinação de $t_L$ para as classes XS1 e XS3 (R=50mm) .....	168
Tabela 8.82 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=30mm).....	169
Tabela 8.83 - Cálculo de $t_i$ para as classes XS1 e XS3 (Betões E2, F2, G2 e H2; R=30mm).....	169
Tabela 8.84 - Cálculo de $t_p$ para as classes XS1 e XS3 (R=30mm) .....	170
Tabela 8.85 - Determinação de $t_L$ para as classes XS1 e XS3 (R=30mm) .....	170

## NOMENCLATURA

$(N_{b,Rd})_{min}$	Menor valor de $N_{b,Rd}$ de quatro modos de encurvadura: encurvadura por flexão sobre o eixo y, encurvadura por flexão sobre o eixo z, encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torsão
$(N_{b,Rd})_{min1}$	Menor valor de $N_{b,Rd}$ de três modos de encurvadura: encurvadura por flexão sobre o eixo z, encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torsão
$\bar{\lambda}_0$	Limite de esbelteza
$\bar{b}$	Largura apropriada correspondente
$E_{s,ser}$	Módulo de elasticidade secante
$\bar{\lambda}$	Esbelteza normalizada
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza normalizada para a encurvadura lateral
$\Phi_{LT}$	Valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{LT}$
$1/r$	Curvatura
$1/r_0$	Curvatura base
$A$	Área da secção transversal
$a$	Quantidade de $CO_2$ que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos do betão contidos numa unidade de volume do betão
$A$ e $B$	Dimensões da sapata
$a$ e $b$	Dimensões do pilar
$A_c$	Área do betão
$A_{c,ef}$	Área efetiva de betão mobilizada por aderência
$A_{net}$	Área útil de uma secção transversal
$A_s$	Área de aço
$A_{s,dist}$	Armadura de distribuição
$A_{s,max}$	Armadura máxima
$A_{s,min}$	Armadura mínima
$A_{sw/s}$	Armadura transversal
$A_v$	Área resistente ao esforço transversal
$b$	Largura de uma secção transversal
$c$	Largura ou altura de parte de uma secção transversal
$c$	Fator que depende da distribuição da curvatura ao longo do elemento
$c$	Representa o recobrimento das armaduras
$C_0$	Custo atual da manutenção

$C_b$	Fator que tem em conta o teor de cloretos e a temperatura da água do mar
$C_i$	Custo no ano de referência
$c_{min}$	Recobrimento mínimo
$C_{my}$	Coefficiente de momento uniforme equivalente, segundo y
$C_{mz}$	Coefficiente de momento uniforme equivalente, segundo z
$Cr$	Crómio
$C_R$	Concentração de cloretos à profundidade de R correspondente ao início da despassivação
$C_S$	Concentração de cloretos na superfície do betão
$d$	Altura da parte reta de uma alma
$d$	Diâmetro exterior de uma secção tubular circular
$D$	Coefficiente de difusão do dióxido de carbono através do betão carbonatado em equilíbrio com o ambiente de 65% de humidade relativa e 20°C
$D$	Coefficiente de difusão dos cloretos no betão
$d$	Altura útil
$d_0$	Diâmetro do furo para um parafuso, para um rebite ou para uma cavilha
$D_0$	Coefficiente de difusão potencial
$E$	Módulo de elasticidade
$e_2$	Distância, para qualquer das peças da ligação, entre o centro do furo (de um parafuso ou rebite) e o bordo adjacente, medido na direção perpendicular à transmissão do esforço
$e_2$	Excentricidade de segunda ordem
$e_i$	Excentricidade inicial
$e_N$	Afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetivas e bruta
$erf$	Função erro
$E_{s,1}$	Módulo de elasticidade secante correspondente à tensão $\sigma_1$ nos banzos tracionados
$E_{s,2}$	Módulo de elasticidade secante correspondente à tensão $\sigma_2$ nos banzos comprimidos
$f_{cd,sp}$	Resistência à compressão diametral do betão
$f_{cd}$	Tensão de dimensionamento do betão
$f_{ct,ef}$	Valor médio da tensão resistente do betão à tração
$f_{ctm}$	Tensão média de tração do betão
$F_t$	Força de tração
$f_u$	Tensão última à tração
$f_{u,red}$	Tensão última à tração reduzida
$f_{ub}$	Valor nominal da tensão de rotura à tração dos parafusos
$f_y$	Tensão de cedência

$f_{yb}$	Valor nominal da tensão de cedência dos parafusos
$f_{yd}$	Tensão de dimensionamento do aço
$f_{yk}$	Tensão característica do aço
<b>G</b>	Módulo de distorção
<b>H</b>	Altura de uma secção transversal
$h_{c,ef}$	Altura efetiva
<b>I</b>	Momento de inercia
<b>i</b>	Raio de giração
$I_{corr}$	Intensidade da corrente de corrosão
<b>k</b>	Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão
$k_0$	Fator que tem em conta as condições de ensaio da LNEC E391
$k_1$	Fator que permite considerar a influência da humidade relativa, dependendo da classe de exposição
$k_1$	Coefficiente que tem em conta as propriedades de aderência dos varões
$k_2$	Fator que permite considerar a influência da cura
$k_2$	Coefficiente que tem em conta a forma da distribuição de extensões da secção
$k_{a/c}$	Fator que tem em conta a razão a/c
$k_{D,c}$	Fator que tem em conta a influência das condições de cura
$k_{D,RH}$	Fator que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente
$k_{D,T}$	Fator que tem em conta a influência da temperatura
$k_{hor}$	Fator que tem em conta a distância à linha da costa
$k_{LT}$	Fator de interação
$K_r$	Fator corretivo que tem em consideração o nível de esforço axial
$k_t$	Coefficiente que entra em consideração com o efeito das armaduras, da fendilhação e da fluência
$k_t$	Fator de integração da distribuição de extensões, e que tem em conta a duração ou a repetição das cargas
$k_{temp}$	Fator que tem em conta a temperatura do betão
$k_{vert}$	Fator que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar
$k_y$ e $k_z$	Fatores de interação para as estruturas de aço inoxidável
$k_{yy}$ , $k_{yz}$ , $k_{zy}$ e $k_{zz}$	Fatores de interação para as estruturas de aço carbono
$k_\sigma$	Coefficiente de encurvadura correspondente à razão de tensões $\psi$ e às condições de fronteira
$K_\phi$	Coefficiente destinado a ter em conta o efeito da fluência
<b>L</b>	Comprimento do elemento

$L_0$	Comprimento de encurvadura
$L_{cr}$	Comprimento de encurvadura
$M_{01}$ e $M_{02}$	Momentos de primeira ordem nas extremidades de um elemento
$M_{0cqp}$	Momento de primeira ordem para a combinação quase-permanente de ações
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral
$M_{c,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente
$M_{cr}$	Momento crítico elástico para a encurvadura lateral
$M_{Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor atuante
$M_{osd1}$	Momento de primeira ordem
$M_{osd2}$	Momento de segunda ordem
$M_{pl,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor plástico resistente
$M_{sd}$	Momento fletor atuante
$M_{y,Ed}$	Momento máximo no elemento em relação ao eixo y-y
$M_{z,Ed}$	Momento máximo no elemento em relação ao eixo z-z
$n$	Coefficiente para o cálculo do módulo de elasticidade secante
$n$	Fator que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo
$n$	Fator que tem em conta o decréscimo de ingresso dos cloretos ao longo do tempo
$n$	Número de elementos verticais
$n$	Esforço normal reduzido
$n_{bal}$	Esforço normal reduzido na zona do máximo momento resistente
$N_{c,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão
$N_{cr}$	Valor crítico do esforço normal associado ao modo de encurvadura elástica relevante, baseado nas propriedades da secção transversal bruta
$N_{Ed}$	Valor de cálculo do esforço normal atuante
$N_i$	Níquel
$N_{pl,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta
$N_{sd}$	Esforço normal atuante
$N_{t,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente de tração
$N_{u,Rd}$	Valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação
$p_2$	Distância, medida perpendicularmente à direção da transmissão do esforço, entre fiadas adjacentes de parafusos ou rebites
$r$	Raio de concordância
$R$	Recobrimento das armaduras
$R_{C65}$	Resistência à carbonatação de um betão

$r_i$	Taxa de inflação
$r_j$	Taxa de juros
$R_m$	Tensão última à tração
$R_{p0,2}$	Tensão de cedência
$S_{r,max}$	Distância máxima entre fendas
$t$	Intervalo de tempo entre o ano de referência e o ano em que é tido o encargo
$t$	Espessura nominal
$t_0$	Período de referência
$t_f$	Espessura do banzo
$t_i$	Período de iniciação de projeto
$t_{ic}$	Período de iniciação de cálculo
$t_L$	Período de vida útil de projeto
$t_p$	Período de propagação de projeto
$t_w$	Espessura da alma
$V_{b,Rd}$	Valor de cálculo do esforço transversal resistente ao cisalhamento
$V_{c,Rd}$	Valor de cálculo do esforço transversal resistente
$V_{Ed}$	Valor de cálculo do esforço transversal atuante
$V_{pl,Rd}$	Valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico
$V_{sd}$	Esforço transversal atuante
$w_{max}$	Valor limite para a largura de fendas
$W_{pl}$	Módulo de flexão plástico
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico em relação ao eixo y-y
$W_{pl,z}$	Módulo de flexão plástico em relação ao eixo z-z
$x$	Profundidade de carbonatação ou de cloretos
$x$	Redução de raio provocada pela intensidade da corrente de corrosão
$\alpha$	Zona comprimida de parte de uma secção transversal
$\alpha$	Fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos
$\alpha$	Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme
$\alpha$	Coefficiente que depende da forma da secção transversal
$\alpha_c$	Flecha base
$\alpha_h$	Coefficiente de redução relacionado com o comprimento do elemento
$\alpha_{LT}$	Fator de imperfeição para a encurvadura lateral
$\alpha_m$	Coefficiente de redução relacionado com o número de elementos verticais
$\alpha_t$	Flecha a longo prazo

$\gamma$	Fator de segurança da vida útil
$\gamma_{M0}$	Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
$\gamma_{M1}$	Coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
$\gamma_{M2}$	Coeficiente parcial de segurança para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação
$\gamma_{Mi}$	Coeficiente parcial de segurança
$\Delta c$	Diferença de concentração de dióxido de carbono no exterior e na frente de carbonatação
$\Delta C_{dur,st}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável
$\varepsilon$	Extensão
$\varepsilon$	Fator que depende de $f_y$
$\varepsilon_{sm}-\varepsilon_{cm}$	Representa a extensão relativa aço-betão
$\eta$	Coeficiente para calcular a área de corte
$\eta$	Coeficiente que entra em consideração com a influência da armadura de compressão
$\theta_0$	Inclinação base
$\theta_i$	Inclinação
$\lambda$	Esbelteza
$\mu$	Momento fletor reduzido
$\nu$	Esforço normal reduzido
$\xi$	Inverso da função erro
$\rho$	Fator de redução
$\rho_{p,ef}$	Percentagem de armadura relativa à área de betão efetiva
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível
$\sigma_s$	Tensão no aço calculada com base na secção fendilhada
$\sigma_{solo}$	Tensão do solo
$\Phi$	Valor para determinar o coeficiente de redução $\chi$
$\phi_0$	Diâmetro inicial das armaduras
$\phi_{ef}$	Coeficiente de fluência efetivo
$\chi$	Coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado
$\chi_{LT}$	Coeficiente de redução para a encurvadura lateral
$\psi$	Relação entre tensões ou extensões ou razão de tensões
$\psi$	Relação entre os momentos que atuam nas extremidades de um segmento de um elemento
$\omega$	Percentagem mecânica de armadura

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ENQUADRAMENTO

Os materiais têm grande importância na história da humanidade. Desde a pré-história que o homem constrói habitações, monumentos, pontes, entre outros, através dos materiais existentes nessa altura: terra, pedra, madeira e fibras vegetais. Até ao séc. XVIII eram essencialmente estes os materiais que eram utilizados para construir todas as infraestruturas [1].

Aos poucos, as exigências do homem foram aumentando e houve a necessidade de novos materiais para construção de estruturas com maior durabilidade, maior resistência e esteticamente mais agradáveis.

Embora o ferro seja conhecido há mais de 5 mil anos, é apenas no século XVIII, através de uma sucessão de descobertas a respeito de metais até então desconhecidos, que se iniciou a utilização de estruturas metálicas na construção civil e que se continuam a utilizar até aos dias atuais. O aço tem possibilitado aos arquitetos, engenheiros e construtores, soluções arrojadas, eficientes e de alta qualidade [2].

O princípio da construção de estruturas em betão armado data de meados do século XIX, inicialmente utilizado em pequena escala, difundindo-se rapidamente a sua utilização em obras de grande dimensão. O seu rápido desenvolvimento deveu-se à descoberta da complementaridade entre as propriedades de dois materiais, relativamente baratos, o aço e o betão. Estes dois materiais juntos dão origem ao conhecido betão armado, conferindo ao material as suas melhores qualidades: elevada resistência à tração, proveniente do aço, e uma boa resistência à compressão, proveniente do betão. Desde a sua descoberta, tem-se verificado um aumento progressivo do recurso ao betão armado para resistir à diversidade de cargas e ações ambientais, com especial destaque para os últimos 50 anos, nos quais tem sido o material estrutural predominante [3,4].

No entanto, ao contrário do que se imaginava inicialmente, o betão armado não é um material com durabilidade ilimitada. Tanto o betão como o aço são facilmente suscetíveis a ataques, podendo modificar-se para formas químicas mais instáveis, deixando as estruturas de cumprir os requisitos iniciais para que foram projetadas.

Tem-se constatado que a deterioração precoce das estruturas, devido essencialmente à corrosão, é um fenómeno muito comum e que tem acarretado grandes custos em reabilitações e reparações.

## CAPÍTULO 1

Os encargos inerentes na reparação de estruturas são bastante elevados (em Portugal, em 2011 a reabilitação de edifícios degradados excedeu os 5462 milhões de euros, representando 26% da produtividade do setor da construção, enquanto que na Alemanha 58% das verbas destinadas ao sector da construção foram usadas na reparação de construções deterioradas) [5,6].

Num país, como Portugal, dotado de mais de 1800 km de Costa, distribuídos entre o Continente e Ilhas, é necessário definir estratégias que inevitavelmente terão de contemplar as tecnologias de prevenção da deterioração e de proteção dos materiais [7]. Na Madeira, em particular, como existe mar em torno de toda a ilha é habitual considerar que todas ou quase todas as estruturas estão sujeitas à ação dos cloretos, devido à ação do vento, mas também por poder estar relacionado com a presença de cloretos na água de amassadura ou os agregados poderão conter cloretos devido à sua má lavagem antes da sua utilização. Assim na Madeira, o fenómeno da corrosão é muito mais intenso, problemático e oneroso do que no Continente.

Assim, não só é necessário tomar medidas preventivas para aumentar a durabilidade das estruturas, como por exemplo substituindo os materiais que são normalmente utilizados como elementos estruturais por materiais mais resistentes à corrosão, mas também estudar os mecanismos que provocam a deterioração das estruturas, definir modelos que permitam estimar o seu período de vida útil e, conseqüentemente, prever o instante em que será necessário intervir nas estruturas de forma a impedir o progresso da deterioração [8,9].

Uma das formas de reduzir drasticamente a corrosão do aço carbono é através da utilização do aço inoxidável. No entanto, dado o seu elevado custo, os projetistas e donos de obra muito raramente o utilizam. Face ao que anteriormente se disse sobre a problemática da corrosão na Madeira é questionável se, mesmo tendo em conta o seu custo elevado, não será mais vantajoso a longo prazo a utilização do aço inoxidável pois os custos de reparação são muito inferiores.

### 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é avaliar se a utilização do aço inoxidável em vez do aço carbono na Ilha da Madeira é economicamente mais vantajosa a longo prazo.

Para satisfação deste objetivo principal propõem-se os seguintes objetivos parciais:

- Comparar as propriedades do aço inoxidável com as do aço carbono;
- Comparar as diferenças regulamentares de projeto de estruturas com os dois tipos de aço;
- Dimensionar estruturas de betão armado e de aço estrutural e comparar as soluções estruturais obtidas com os dois tipos de aço e os seus custos;
- Comparar a degradação nas estruturas anteriores aplicando os modelos de degradação existentes, para vários cenários;
- Prever os custos de reparação dos diversos cenários;

- Fazer uma análise económica a longo prazo dos diversos cenários para os dois tipos de aço.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação será constituída por seis capítulos, incluindo a introdução e as conclusões.

No Capítulo 2 será feita uma abordagem ao aço inoxidável, referindo as suas propriedades gerais e o seu comportamento mecânico, mas também serão apresentadas as suas principais diferenças em relação ao aço carbono.

No Capítulo 3 serão determinados os tempos de vida útil de projeto, através de modelos de degradação, para posterior determinação dos respetivos cenários de degradação e manutenção.

No Capítulo 4 serão apresentados os dimensionamentos para dois tipos de estruturas (betão armado e estrutura metálica) e para dois tipos de aço (aço carbono e aço inoxidável) por forma a poder determinar o peso das estruturas para apurar o seu custo.

No Capítulo 5 serão apresentadas as análises económicas das estruturas dimensionadas no Capítulo 4. As análises recairão sobre os custos iniciais das estruturas e os custos a longo prazo, para um período de vida útil de 50 anos. Estas análises terão como propósito a verificação da solução mais económica de entre os dois tipos de aço.

Por fim, no Capítulo 6, serão apresentadas as principais conclusões decorrentes do trabalho realizado na presente dissertação, nomeadamente dos dimensionamentos estruturais e da análise económica, e sugestões para a continuidade do tema e desenvolvimento de trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# AÇO INOXIDÁVEL

A deterioração das estruturas, particularmente devido a problemas de corrosão, tem graves problemas socioeconômicos, pelo que é necessário tomar medidas preventivas para aumentar a durabilidade das estruturas. Essa prevenção pode ser concebida substituindo os materiais que são normalmente utilizados como elementos estruturais nas estruturas, metálicas ou de betão armado, por materiais mais resistentes à corrosão, como por exemplo substituindo o aço carbono pelo aço inoxidável.

Para saber se o aço inoxidável como elemento estrutural é mais vantajoso que o aço carbono é necessário conhecer as suas propriedades gerais e comportamento mecânico, e comparar com o aço carbono. Assim, neste capítulo serão mencionados os tipos de aço inoxidável, as suas aplicações, os regulamentos que são utilizados para o dimensionamento de estruturas e identificadas as suas diferenças.

### 2.1 BREVE HISTÓRIA

O aparecimento do aço inoxidável só foi possível após a descoberta de alguns elementos químicos no século XVIII, tais como, o Níquel (Ni), o Molibdénio (Mo) e o Crómio (Cr) [2].

Após a descoberta desses metais muitos metalurgistas, por volta do ano 1900, realizaram experiências com ligas de ferro-crómio, constatando que esta liga era resistente ao ataque de certos ácidos, mas sem saber explicar esse fenómeno [2,10].

Embora tenham existido muitos metalurgistas a pensar, a patentear e a produzir essas ligas metálicas, hoje em dia é aceite que quem inventou o aço inoxidável foi Harry Brearley, quando tentava produzir uma liga metálica que resistisse ao desgaste que ocorria no interior dos canos das armas de fogo. Este em vez de obter uma liga metálica que resistisse ao desgaste obteve uma liga resistente à corrosão. [10].

### 2.2 PROPRIEDADES GERAIS

Os aços inoxidáveis são ligas essencialmente constituídas por ferro, crómio (com percentagem em massa superior a 10,5%) e carbono (com percentagem em massa inferior a 1,2%) e, em que a sua principal característica é a elevada resistência à corrosão. O crómio é um metal fulcral

## CAPÍTULO 2

para os aços inoxidáveis, uma vez que este em contato com o oxigênio oxida-se formando uma película passiva que protege o aço do meio agressivo. Para além deste elemento é necessário adicionar outros elementos tais como, o níquel, o molibdênio e o azoto para aumentar essa resistência à corrosão [2,8].

Por outro lado, o aço carbono não apresenta resistência à corrosão, pois é uma liga constituída essencialmente por ferro e carbono. Esta para apresentar resistência à corrosão necessita de ser protegida dos agentes agressivos através de revestimentos, tal como pinturas ou pelo betão [11].

Para além da alta resistência à corrosão, o aço inoxidável possui baixa condutividade térmica, é resistente a altas temperaturas, a temperaturas criogénicas (abaixo de 0°) e a variações bruscas de temperatura, tem forte apelo visual (modernidade e prestígio), é um material reciclável (o que contribui para a conservação dos recursos não renováveis) e não necessita de muita manutenção [2,12]. A massa volúmica do aço inoxidável varia entre 7700 e 8300 kg/m<sup>3</sup> enquanto a do aço carbono admite-se igual a 7850 kg/m<sup>3</sup> [13].

Apesar de este ter boas características mecânicas e químicas o aço carbono continua a ser mais utilizado na área da construção civil, pois apresenta um custo inicial consideravelmente baixo quando comparado com o aço inoxidável [8,14].

### 2.3 TIPOS DE AÇO INOXIDÁVEL

Os aços inoxidáveis são divididos em cinco tipos: austeníticos, ferríticos, martensíticos, austenítico-ferríticos e endurecidos por precipitação. Essa divisão é feita conforme a sua composição química, a sua microestrutura e o seu processo de produção, em que estes fatores fazem com que cada tipo de aço apresente diferentes propriedades mecânicas e químicas e resistência à corrosão [8,13,15].

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de Fe-Cr-Ni, com elevada resistência à corrosão, devido à presença de uma grande quantidade de cromo e níquel. Estes aços têm elevada ductilidade e tenacidade, condutividade térmica baixa, e são fáceis de soldar.

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de Fe-Cr. Estes aços são dúcteis, a sua resistência pode ser aumentada através da deformação plástica a frio, não podem ser endurecidas por tratamento térmico e apresentam resistência à corrosão moderada principalmente à corrosão sob tensão.

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de Fe-Cr-C. Estes aços apresentam uma elevada dureza, consoante o teor de carbono é elevado a resistência ao desgaste abrasivo aumenta, embora a ductilidade e a tenacidade diminua. Contudo a resistência à corrosão é inferior à dos aços inoxidáveis ferríticos.

Os aços inoxidáveis austenítico-ferríticos, também designados por duplex, são aços que apresentam duas fases, a ferrítica e a austenítica. Esta combinação de fases faz com que as propriedades deste aço melhore em comparação às ligas em separado, tais como a sua resistência à

corrosão e as propriedades mecânicas, quando comparado com o austenítico, e melhor tenacidade e ductilidade do que o ferrítico. Contudo este aço apresenta propriedade magnética menor e necessita de maior controle na soldadura.

Os aços endurecidos por precipitação são ligas de Fe-Cr-N. Este tipo de aço, a partir de um processo de envelhecimento da liga, forma precipitados intermetálicos que conferem à liga elevada resistência mecânica, à corrosão e à temperatura.

Dos vários tipos de aço inoxidável os mais utilizados são os austeníticos (1.4301 e 1.4401) e o aço austenítico-ferrítico (1.4462) [12]. Os números 1.4301, 1.4401 e 1.4462 são as designações de alguns aços segundo a Norma Europeia 10088 [13].

Tabela 2.1 - Percentagens dos principais elementos e propriedade magnética nos diferentes tipos de aço inoxidável (adaptado de [13,16])

	<b>Ferrítico</b>	<b>Austenítico</b>	<b>Duplex</b>	<b>Martensítico e Endurecido por precipitação</b>
<b>C (%)</b>	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,03	≤ 1,20
<b>Cr (%)</b>	10,50 – 30,00	16,00 – 28,00	18,00 – 30,00	11,00 – 19,00
<b>Ni (%)</b>	≤ 2,50	≤ 32,00	3,50 – 8,00	≤ 27,00
<b>Mo (%)</b>	≤ 4,50	≤ 8,00	0,10 – 4,50	≤ 2,80
<b>Magnético</b>	Sim	Não	Sim	Sim

## 2.4 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Neste subcapítulo serão abordados os comportamentos mecânicos de dois tipos de aço (inoxidável e carbono) e para os dois tipos de estrutura (metálica e de betão armado), através das suas curvas de tensão-deformação. Para cada estrutura, serão distinguidos os dois tipos de aço essencialmente através dos seus módulos de elasticidade e tensões de cedência.

### 2.4.1 Betão Armado

O aço inoxidável apresenta um comportamento mecânico distinto do aço carbono, nomeadamente no que se refere à curva tensão-deformação.

O aço carbono apresenta um comportamento elástico linear até atingir a tensão de cedência, e antes de ocorrer o fenómeno de encruamento (endurecimento por deformação) verifica-se um aumento de deformação mas sem que a tensão varie (patamar de cedência).

No que toca ao aço inoxidável, este apresenta, na fase inicial, um comportamento idêntico ao do aço carbono, mas não ostenta patamar de cedência, isto é, este tem uma transição contínua do comportamento elástico para o comportamento plástico. Como a tensão de cedência não existe, é utilizada como tensão limite de proporcionalidade a tensão necessária para provocar uma deformação plástica de 0,2% [16]. As curvas tensão-deformação dos dois aços estão representadas na Figura 2.1.

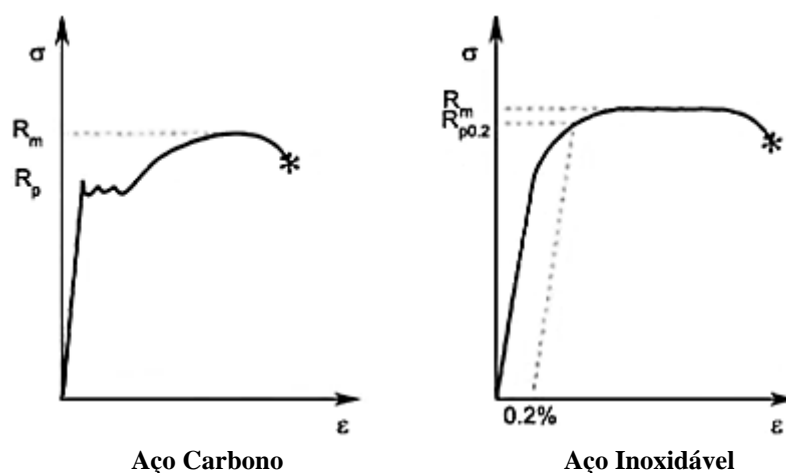


Figura 2.1 - Curvas de tensão-deformação [16]

O módulo de elasticidade do aço inoxidável é semelhante ao do aço carbono (200 GPa), mas é recomendada a utilização dos valores da norma EN 10088-1, pois este varia consoante o tipo de liga [13,16].

Para a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% do aço inoxidável, ( $R_{p0.2}$ ), a norma BS 6744:2001+A2:2009 especifica varões de aço austenítico (1.4301, 1.4436, 1.4429 e 1.4529) e duplex (1.4162, 1.4362, 1.4462 e 1.4501) para três níveis de tensão (200, 500 e 650) [17]. Esses aços são fabricados com diâmetros que variam entre 3 mm e 50 mm, com áreas e pesos por metro linear semelhantes às do aço carbono [13,16]. Na Tabela 2.2 são apresentadas as classes de aço inoxidável e de aço carbono normalmente utilizadas.

Tabela 2.2 - Classes de aço corrente [16]

Aço Inoxidável (BS 6744:2001+A2:2009)		Aço Carbono	
Classe	$R_{p0.2}$ (MPa)	Classe	$f_{yk}$ (MPa)
<b>200*</b>	200	<b>A235</b>	235
<b>500</b>	500	<b>A400</b>	400
<b>650</b>	650	<b>A500</b>	500

\* **Unicamente para Varões lisos**

Uma nova norma europeia está atualmente a ser preparada, em que além de especificar ligas austeníticas e duplex especificará também ligas ferríticas. Esta norma irá incluir propriedades mecânicas e uma orientação para a seleção do tipo de aço a utilizar e terá mais três classes que a norma BS 6744:2001+A2:2009 [12,16].

## 2.4.2 Estrutura metálica

Os aços para estruturas metálicas têm um comportamento mecânico semelhante ao dos aços para betão armado, no que concerne à curva tensão-deformação, como pode-se observar na Figura 2.2.

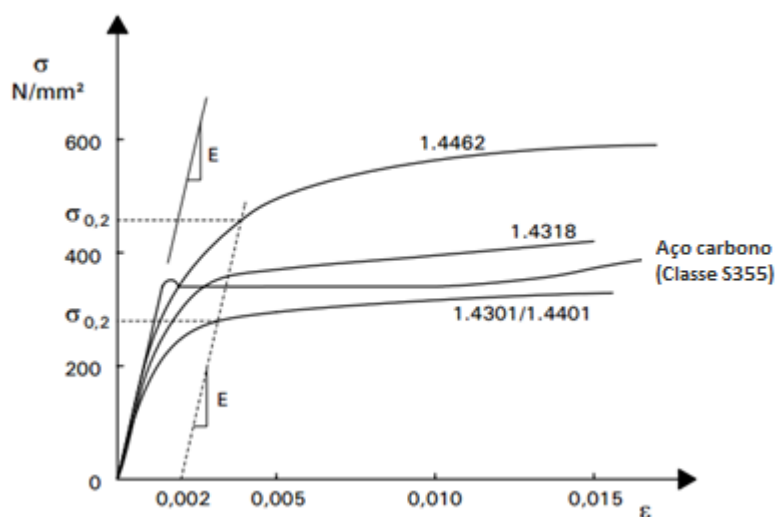


Figura 2.2 - Curvas de tensão-deformação de alguns tipos de aço [18]

O módulo de elasticidade do aço inoxidável varia consoante o tipo de aço, porém o aço carbono apresenta módulo de elasticidade constante. O módulo de elasticidade e o módulo de distorção podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Módulos de elasticidade e distorção - vários tipos de aço (adaptado de [19,20])

Tipos de aço	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de distorção (GPa)
Aço carbono	210	81
Aço austenítico e austenítico-ferrítico (exceto 1.439, 1.4529 e 1.454)	200	76,9
Aço austenítico 1.4539, 1.4529 e 1.457	195	75
Aço ferrítico	220	85

No que toca aos valores nominais da tensão de cedência (ou tensão de limite de proporcionalidade),  $f_y$ , e da tensão última à tração,  $f_u$ , estes são diferentes para os dois tipos de aço e alteram de acordo com o processo de fabrico e classe de aço [19,20]. Os valores nominais de  $f_y$  e  $f_u$  do aço inoxidável são apresentados na Tabela 2.4 e do aço carbono na Tabela 2.5.

Tabela 2.4 - Valores nominais de  $f_y$  e  $f_u$  para aços inoxidáveis [20]

Tipo de aço inoxidável	Classe	Formação do produto							
		Chapas Laminados a frio		Chapas Laminados a quente		Placas Laminadas a quente		Barras, perfis e varões	
		Espessura nominal t							
		t ≤ 6 mm		t ≤ 12 mm		t ≤ 75 mm		t ≤ 250 mm	
		$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
Aço ferrítico	1.4003	280	450	280	450	250 <sup>3)</sup>	450 <sup>3)</sup>	260 <sup>4)</sup>	450 <sup>4)</sup>
	1.4016	260	450	240	450	240 <sup>3)</sup>	430 <sup>3)</sup>	240 <sup>4)</sup>	400 <sup>4)</sup>
	1.4512	210	380	210	380	-	-	-	-
	1.4306							180	460
Aço Austenítico	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	450
	1.4541							190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520		
	1.4401							200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	230	530
	1.4539								
	1.4571		540		540				
	1.4432							200	500
	1.4435	240	550	220	550	220	520		
	1.4311	290	550	270	550	270	550	270	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580		
	1.4439	290	580	270	580	270	580	280	580
	1.4529	300	650	300	650	300	650		
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300	650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
Aço Austenítico-Ferrítico	1.4362	420	600	400	600	400	630	400 <sup>2)</sup>	600 <sup>2)</sup>
	1.4462	480	660	460	660	460	640	450	650

1) Os valores nominais de  $f_y$  e  $f_u$  dados nesta tabela podem ser usados em projeto sem dar especial atenção à anisotropia ou efeitos de endurecimento por tensão.  
2)  $t \leq 160$  mm  
3)  $t \leq 25$  mm  
4)  $t \leq 100$  mm

Tabela 2.5 - Valores nominais de  $f_y$  e  $f_u$  para aços carbono (adaptado de [19])

Aços laminados a quente					Seções tubulares				
Norma e classe de aço	Espessura nominal t				Norma e classe de aço	Espessura nominal t			
	t ≤ 40 mm		40 < t ≤ 80 mm			t ≤ 40 mm		40 < t ≤ 80 mm	
	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$		$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
<b>EN 10025-2</b>					<b>EN 10210-1</b>				
S 235	235	360	215	360	S235 H	235	360	215	340
S 275	275	430	255	410	S 275 H	275	430	255	410
S 355	355	490	335	470	S 355 H	355	510	335	490
S 450	440	550	410	550	S275 NH/NLH	275	390	255	370
<b>EN 10025-3</b>					S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 275 N/NL	275	390	255	370	S 420 NH/NLH	420	540	390	520
S 355 N/NL	355	490	335	470	S 460 NH/NLH	460	560	430	550
S 420 N/NL	420	520	390	520	<b>EN10219-1</b>				
S 460 N/NL	460	540	430	540	S235 H	235	360		
<b>EN 10025-4</b>					S 275 H	275	430		
S 275 M/ML	275	370	255	360	S 355 H	355	510		
S 355 M/ML	355	470	335	450	S 275 NH/NLH	275	370		
S 420 M/ML	420	520	390	500	S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 M/ML	460	540	430	530	S 460 NH/NLH	460	550		
<b>En 10025-5</b>					S275 MH/MLH	275	360		
S 235 W	235	360	215	340	S 355 MH/MLH	355	470		
S 355 W	355	490	335	490	S 420 MH/MLH	420	500		
<b>En 10025-6</b>					S 460 MH/MLH	460	530		
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550					

## 2.5 APLICAÇÕES

O aço inoxidável, desde a sua invenção, tem vindo a ter inúmeras aplicações, nomeadamente na área da medicina, no fabrico de aparelhos domésticos e utensílios, em diversos tipos de indústrias, bem como na construção civil [2,21].

No que concerne à área da construção civil este é utilizado em estruturas localizadas em ambientes marítimos (ambientes de alto risco de corrosão) especialmente estruturas construídas na costa ou perto dela (barragens, cais e instalações portuárias) e estruturas offshore, estruturas projetadas para terem grande durabilidade, na reparação de estruturas, como sejam estruturas associadas a ambientes corrosivos e construções históricas, em estruturas de difícil inspeção e reparação. Para além da sua aplicação como elemento estrutural o aço inoxidável é igualmente utilizado para revestimentos de fachadas, coberturas, corrimãos, entradas de edifícios e decorações de interiores [2,16,21,22].

Como exemplos de aplicações do aço inoxidável temos:

- O *Pier Progreso de Castro*, no México, construído há mais de 65 anos em betão armado com varões de aço inoxidável e sem sinais de deterioração. Ao lado dessa ponte existia outra, construída cerca de 30 anos depois em aço carbono, que devido ao ambiente corrosivo acabou por ruir [16,23].



Figura 2.3 - Pier Progreso de Castro, México [23,24]

- O *Shenzen Western Corridor*, em Hong Kong, que é uma ponte que liga Hong Kong e a China, em que as suas zonas críticas são reforçadas com aço inoxidável [25].



Figura 2.4 - Shenzen Western Corridor, Hong Kong [16,25]

## CAPÍTULO 2

- O *Sheik Zayed Bridge*, em Abu Dhabi nos Emirados Árabes, em que o aço inoxidável foi utilizado nas zonas de alto risco de corrosão.

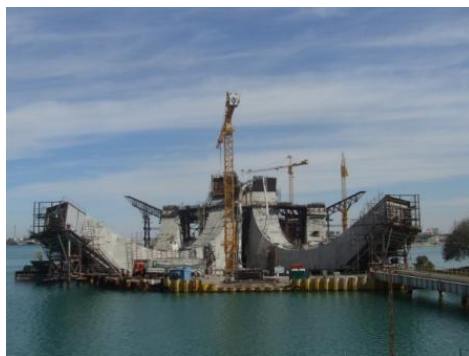


Figura 2.5 - Sheik Zayed Bridge, Abu Dhabi [26]

- O *Rail Viaduct*, em Padova - Itália.



Figura 2.6 - Rail Viaduct, Itália [27]

- A entrada da estação ferroviária de *Gent Sint Pieters*, na Bélgica, construída com estruturas metálicas de aço inoxidável [28].



Figura 2.7 - Estação ferroviária *Gent Sint Pieters*, Bélgica [28,29]

- A Ponte Helix, que é uma ponte pedestre em Singapura com 280 m, em que a sua estrutura é formada por uma dupla espiral de aço inoxidável [30].



Figura 2.8 - Ponte Helix, Cingapura [30]

- O Pavilhão dos Emirados Árabes no Expo Shangai 2010, constituído por painéis triangulares de aço inoxidável dourados, inspirado nas dunas e no deserto dos Emirados Árabes [31].

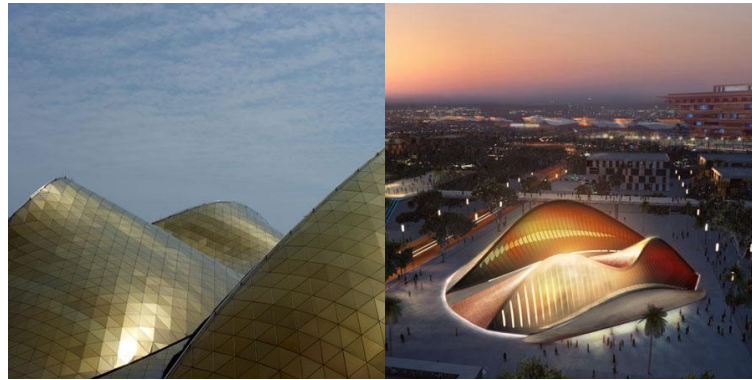


Figura 2.9 - Pavilhão dos Emirados Árabes no Expo Shangai 2010 [31]

- O *Dream Downtown*, em Nova Iorque, em que a entrada do edifício e as suas fachadas são revestidas com aço inoxidável [32].

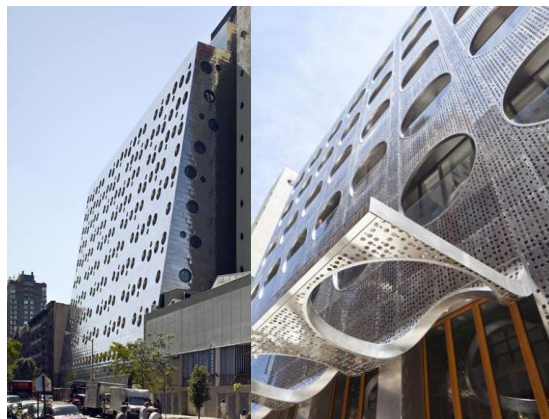


Figura 2.10 - *Dream Downtown*, Nova Iorque [32]

- A cobertura da sede do tribunal *Butler County Court House*, na Pensilvânia, com cerca de 80 anos é considerada uma das mais antigas coberturas em aço inoxidável. Esta apresenta-se intacta e sem manutenção embora esteja ao lado de uma zona industrial [23].



Figura 2.11 - Sede do tribunal *Butler County Court House*, na Pensilvânia [23,33]

## 2.6 INVESTIGAÇÃO SOBRE AÇO INOXIDÁVEL

A investigação científica em torno do aço inoxidável não é tão intensa como no aço estrutural. Ainda assim nos últimos anos foram publicados alguns trabalhos sobre aço inoxidável na construção. Apresentam-se de seguida alguns destes trabalhos:

- N. Lopes, P. M. M. Vila Real, P. Piloto, L. Mesquita e L. Simões da Silva realizaram um estudo para comparar o comportamento ao fogo de uma estrutura em aço inoxidável 1.4301 com o aço carbono S235, do qual concluíram que a estrutura com aço inoxidável possui uma resistência ao fogo três vezes superior à mesma estrutura em aço carbono [34];
- Ana Louro e Manuel Pipa ensaiaram vigas de betão armado com aço inoxidável para avaliar e comparar o seu comportamento com o das vigas com aço carbono. Desses ensaios concluíram que a utilização de armaduras de aço inoxidável pode traduzir-se numa solução vantajosa quer a nível económico quer em termos de durabilidade das estruturas, particularmente se os aços inoxidáveis utilizados forem de elevada resistência mecânica e boa resistência à corrosão [14];
- Robson Cardoso na sua tese de mestrado avaliou o comportamento de duas estruturas metálicas situadas no Brasil, uma em aço inoxidável e outra em aço carbono, e verificou que a estrutura com aço inoxidável apresentava peso estrutural superior ao das estruturas com aço carbono. Para além disso, Robson realizou uma análise económica concluindo que as estruturas com aço inoxidável são economicamente mais vantajosas quando são comparados os custos a longo prazo [2];

- Izabela Tylek e Krzysztof Kuchta realizaram um trabalho de investigação onde apresentam as principais diferenças regulamentares entre o aço inoxidável e o aço carbono nas estruturas metálicas e as principais propriedades mecânicas do aço inoxidável [35];
- R. G. Duarte, A. S. Castela, R. Neves, L. Freire e M. F. Montemor estudaram o comportamento à corrosão de estruturas de betão armado com aço inoxidável através do método de Espetroscopia de Impedância Eletroquímica [36];
- L. Gardner, A. Talja e N. R. Baddoo realizaram uma comparação entre dois métodos de dimensionamento de estruturas metálicas com aço inoxidável austenítico de alta resistência [37];
- Dennis Lam e Leroy Gardner compararam o dimensionamento de estruturas mistas com aço inoxidável e com aço carbono [38].

## 2.7 REGULAMENTAÇÃO

A utilização do aço inoxidável como elemento estrutural é relativamente recente em comparação ao aço carbono, daí que seja necessário distinguir os dois tipos de aço em termos de regulamentação. Neste subcapítulo serão então descritas as principais diferenças entre os dois tipos de aço para os dois tipos de estruturas.

### 2.7.1 Betão Armado

O projeto de estruturas de betão armado com aço inoxidável, tal como as de aço carbono, regem-se segundo o Eurocódigo 2 (EN 1992) [39].

As diferenças que se verificam em relação ao projeto dos dois aços, inoxidável e carbono, são o recobrimento mínimo,  $c_{\min}$ , e a largura de fendas,  $w_{\max}$  (em que esta pode estar compreendida entre 0,3 e 0,4 mm se estiver unicamente relacionada com o processo de corrosão). No que respeita ao recobrimento mínimo este pode ser reduzido de  $\Delta C_{\text{dur,st}} = 20$  mm, segundo o Anexo Nacional, para ligas de aço inoxidável austenítico e duplex. De um modo simplificado, para estruturas com aço inoxidável, o recobrimento poderá tomar um valor de 30 mm independentemente da qualidade e mistura do betão ou das condições de exposição [16,39].

### 2.7.2 Estrutura Metálica

Os projetos de estruturas metálicas com aço inoxidável regem-se segundo o Eurocódigo 3 (EN 1993) [19]. Este Eurocódigo contém a Parte 1.4 (EN 1993-1-4), que é exclusiva para estruturas metálicas em aço inoxidável, onde são explicadas as diferenças que o projeto com aço inoxidável

## CAPÍTULO 2

apresenta em relação ao projeto com aço carbono. Esta parte do Eurocódigo é aplicável apenas para estruturas metálicas em aço inoxidável ferrítico, austenítico e austenítico-ferrítico [20].

As principais diferenças do projeto, para além das propriedades mecânicas, de uma estrutura metálica em aço inoxidável para uma estrutura em aço carbono são:

- O módulo de elasticidade para o cálculo de flechas, em que o módulo de elasticidade a utilizar nas estruturas com aço inoxidável deve ser o secante [20]:

$$E_{s,ser} = \frac{(E_{s,1} + E_{s,2})}{2} \quad (2.1)$$

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n}; \text{ em que } i=1 \text{ ou } 2 \quad (2.2)$$

Em que:

$E_{s,1}$  - módulo de elasticidade secante correspondente à tensão  $\sigma_1$  nos banzos tracionados;

$E_{s,2}$  - módulo de elasticidade secante correspondente à tensão  $\sigma_2$  nos banzos comprimidos;

$n$  - expoente definido na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Valores do coeficiente  $n$  para o cálculo do módulo de elasticidade secante [20]

Tipo de aço inoxidável	Classe do aço	Coeficiente $n$	
		Direção longitudinal	Direção transversal
Aço ferrítico	1.4003	7	11
	1.4016	6	14
	1.4512	9	16
Aço Austenítico	1.4301	6	8
	1.4306		
	1.4307		
	1.4318		
	1.4541		
	1.4401		
	1.4404		
Aço Austenítico-Ferrítico	1.4432	7	9
	1.4435		
	1.4539		
	1.4571		
	1.4462		
	1.4362	5	5

- Os coeficientes parciais de segurança,  $\gamma_{Mi}$ , aplicados aos diversos valores característicos da resistência nos Estados Limites Últimos (Tabela 2.7) [20].

Tabela 2.7 - Coeficientes parciais de segurança (adaptado de [19,20])

	Aço Carbono	Aço inoxidável
$\gamma_{M0}$	1,00	1,10
$\gamma_{M1}$	1,00	1,10
$\gamma_{M2}$	1,25	1,25

- Os valores limites da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos para a classificação das secções transversais, em que os elementos que não atendam aos critérios da Classe 3 devem ser classificados como sendo de Classe 4 (Tabela 2.8) [19,20].

Tabela 2.8 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (adaptado de [19,20])

Componentes internos comprimidos						
Classe	Tipo de aço	Componente solicitado à flexão	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão		
1	Inoxidável			quando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{308\varepsilon}{13\alpha-1}$		
				quando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{28\varepsilon}{\alpha}$		
	Carbono			quando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha-1}$		
				quando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$		
	2	Inoxidável			quando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{320\varepsilon}{13\alpha-1}$	
					quando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{29,1\varepsilon}{\alpha}$	
3	Carbono			quando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha-1}$		
				quando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$		
Aço Inoxidável	$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5}$			$c/t \leq 74,8\varepsilon$		
				Classe <b>1.4301</b>	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 15,3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$
					Para $k_\sigma$ ver EN 1993-1-5	
				Classe <b>1.4401</b>	quando $\psi > -1$ : $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$	
quando $\psi \leq -1$ : $c/t = 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$						
Aço Carbono	$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \right]^{0,5}$			$c/t \leq 124,0\varepsilon$		
				Classe <b>S235</b>	$c/t \leq 42,0\varepsilon$	$c/t \leq 15,3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$
					Para $k_\sigma$ ver EN 1993-1-5	
				Classe <b>S275</b>	quando $\psi > -1$ : $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$	
quando $\psi \leq -1$ : $c/t = 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$						
Classe <b>S355</b>	quando $\psi > -1$ : $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$					
	quando $\psi \leq -1$ : $c/t = 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$					

Nota: Para secções abertas com aço inoxidável, c pode ser tomado, de forma conservativa, por (h-2t) ou (b-2t)

## CAPÍTULO 2

Tabela 2.8 (Continuação) - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos.

<b>Banzos em consola</b>					
Classe	Tipo de aço	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão		
			Extremidade comprimida	Extremidade tracionada	
<b>1</b>	Inoxidável	Enformado a frio	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
		Soldado	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Carbono	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
	Inoxidável	Enformado a frio	$c/t \leq 10,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
		Soldado	$c/t \leq 9,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Carbono	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
<b>2</b>	Inoxidável	Enformado a frio	$c/t \leq 10,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
		Soldado	$c/t \leq 9,4\epsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Carbono	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
	Inoxidável	Enformado a frio	$c/t \leq 11,9\epsilon$	$c/t \leq 18,1\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para $k_\sigma$ ver EN 1993-1-5	
		Soldado	$c/t \leq 11\epsilon$	$c/t \leq 16,7\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para $k_\sigma$ ver EN 1993-1-5	
	Carbono	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para $k_\sigma$ ver EN 1993-1-5		
<b>Cantoneiras</b>					
<b>Notas:</b> Consultar também “Banzos em consola”					
Não se aplicam a cantoneiras em contato contínuo com outros componentes					
Classe	Tipo de aço	Secção comprimida			
<b>3</b>	Inoxidável	$h/t \leq 11,9\epsilon: \frac{b+h}{2t} \leq 9,1\epsilon$			
	Carbono	$h/t \leq 15\epsilon: \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$			
<b>Secções tubulares</b>					
Classe	Tipo de aço	Secção em flexão Acima de 240 CHS	Secção em compressão		
<b>1</b>	Inoxidável/ Carbono	$d/t \leq 50\epsilon^2$			
<b>2</b>	Inoxidável/ Carbono	$d/t \leq 70\epsilon^2$			
<b>3</b>	Inoxidável	$d/t \leq 280\epsilon^2$ Nota: Para $d > 240$ mm e $d/t > 280\epsilon^2$ ver EN 1993-1-6	$d/t \leq 90\epsilon^2$ Nota: Para $d/t > 90\epsilon^2$ ver EN 1993-1-6		
	Carbono	$d/t \leq 90\epsilon^2$ Nota: Para $d/t > 90\epsilon^2$ ver EN 1993-1-6			

- O fator de redução para o cálculo de larguras efetivas dos elementos de Classe 4 (Tabela 2.9) [20].

Tabela 2.9 - Fator de redução para o cálculo de larguras efetivas dos elementos de Classe 4 (adaptada de [20,40])

<b>Aço Inoxidável</b>	<b>Elementos internos comprimidos</b>	Enformados a frio ou soldados	$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$
	<b>Elementos em consola comprimidos</b>	Enformados a frio	$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$
		Soldados	$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$
			$\rho = 1,0$ para $\bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$
<b>Aço Carbono</b>	<b>Elementos internos comprimidos</b>		$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$ para $\bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$
			$\rho = 1,0$ para $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$
	<b>Elementos em consola comprimidos</b>		$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$ para $\bar{\lambda}_p > 0,748$

Onde,

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (2.3)$$

Em que:

t - espessura;

$k_\sigma$  - coeficiente de encurvadura correspondente à razão de tensões  $\psi$  e às condições de fronteira;

$\bar{b}$  - largura apropriada correspondente, em que esta pode tomar diferentes valores, os quais podem ser visualizados no ponto 5.2.3 (1) do EN 1993-1-4, para o aço inoxidável, e no ponto 4.4 (2) do EN 1993-1-5, para o aço carbono;

$\varepsilon$  - fator que depende de  $f_y$ ;

$\psi$  - razão de tensões;

- O valor de cálculo do esforço normal resistente de tração,  $N_{t,Rd}$ , nas secções com furos, que deverá ser considerado igual ao menor dos seguintes valores [20,41]:
  - a. Valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta:

$$N_{pl,Rd} = Af_y/\gamma_{M0} \quad (2.4)$$

## CAPÍTULO 2

- b. Valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil na zona com furos de ligação:

$$N_{u,Rd} = k_r A_{net} f_y / \gamma_{M2} \quad (2.5)$$

Com:

$k_r = \left(1 + 3r \left(\frac{d_0}{u} - 0,3\right)\right)$  mas  $k_r \leq 1,0$ , para as estruturas em aço inoxidável, e  $k_r = 0,9$  para as estruturas com aço carbono.

Onde:

$r = (\text{número de parafusos da secção transversal}) / (\text{número total de parafusos na conexão})$

$u = 2e_2$  mas  $u \leq p_2$

Em que:

$A_{net}$  - área útil de uma secção transversal;

$d_0$  - diâmetro do furo para um parafuso;

$e_2$  - distância, para qualquer das peças da ligação entre o centro do furo (de um parafuso ou rebite) e o bordo adjacente, medido na direção perpendicular à transmissão do esforço;

$p_2$  - distância medida perpendicularmente à direção da transmissão do esforço, entre fiadas adjacentes de parafusos ou rebites.

- O cálculo do coeficiente de redução,  $\chi$ , para o cálculo da resistência à encurvadura de um elemento comprimido [19,20]:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

Onde,

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2]$$

Em que:

$\alpha$  - fator de imperfeição;

$\bar{\lambda}$  - esbelteza normalizada;

$\bar{\lambda}_0$  - limite de esbelteza.

As diferenças verificadas entre os dois tipos de aço são o fator de imperfeição e o limite de esbelteza. Nas estruturas em aço carbono o limite de esbelteza é uniforme, e igual a 0,2, e o fator de imperfeição é determinado através da escolha de curvas de encurvadura. A escolha das curvas é concretizada através da consulta do Quadro 6.2 do EN 1993-1-1, do

qual pode ser retirado cinco curvas de encurvadura que variam em função da secção transversal (Figura 2.12). Os valores dos fatores de imperfeição correspondentes às curvas de encurvadura são apresentados na Tabela 2.10 [19].

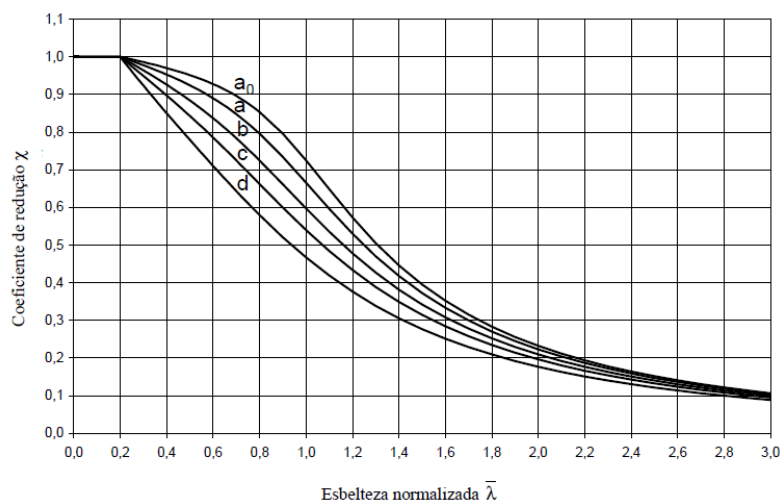


Figura 2.12 - Curvas de encurvadura para o Aço Carbono [19]

Tabela 2.10 - Fatores de imperfeição para o Aço Carbono [19]

Curva de encurvadura	$a_0$	$a$	$b$	$c$	$d$
Fator de imperfeição $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,79

Por outro lado, nas estruturas em aço inoxidável o limite de esbelteza e o fator de imperfeição são variáveis e variam consoante a secção transversal e o modo de encurvadura (Figura 2.13). Os valores do limite de esbelteza e fatores de imperfeição correspondentes às curvas de encurvadura são apresentados na Tabela 2.11 [20].

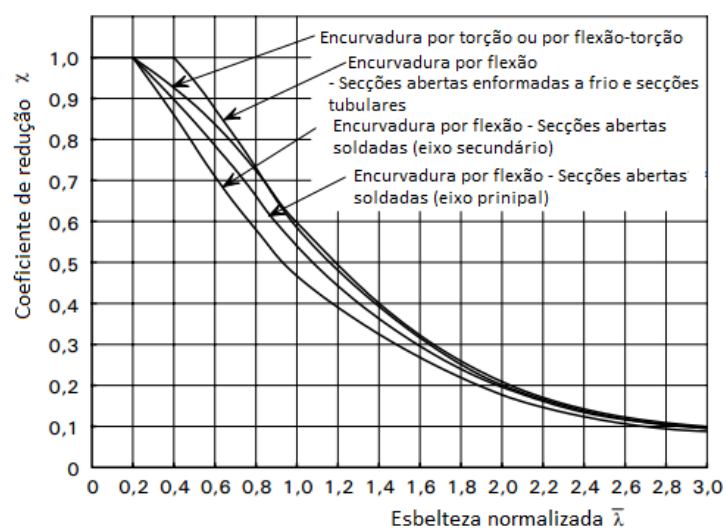


Figura 2.13 - Curvas de encurvadura para o Aço Inoxidável (adaptado de [18])

Tabela 2.11 - Valores de  $\bar{\lambda}_0$  e  $\alpha$  para o Aço Inoxidável (adaptado de [20])

Modo de encurvadura	Secções transversais	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Flexão	Secções abertas enformadas a frio	0,49	0,40
	Secções tubulares	0,49	0,40
	Secções abertas soldadas (eixo principal)	0,49	0,20
	Secções abertas soldadas (eixo secundário)	0,76	0,20
Torção e flexão-torção	Todas as secções	0,34	0,20

Nas estruturas com aço carbono se  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  ou  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$  os efeitos da encurvadura podem ser ignorados, por outro lado nas estruturas com aço inoxidável os efeitos de encurvadura podem ser ignorados se  $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$  ou  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$  [19,20].

- O cálculo do coeficiente de redução,  $\chi_{LT}$ , para o cálculo da resistência à encurvadura lateral [19], [20]:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (2.7)$$

Onde:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Em que:

$\alpha_{LT}$  - fator de imperfeição para a encurvadura lateral;

$\bar{\lambda}_{LT}$  - esbelteza normalizada para a encurvadura lateral;

$\bar{\lambda}_{LT,0}$  - limite de esbelteza para a encurvadura lateral.

As diferenças entre os dois tipos de aço são também o fator de imperfeição e o limite de esbelteza. Nas estruturas em aço carbono o limite de esbelteza é uniforme, e igual a 0,2, e o fator de imperfeição é determinado através da escolha de curvas de encurvadura, as quais são as mesmas que para a encurvadura de um elemento comprimido. A escolha das curvas é concretizada através da consulta do Quadro 6.4 do EN 1993-1-1, do qual pode ser retirado quatro curvas de encurvadura, menos uma que para a encurvadura de um elemento comprimido, em que estas variam igualmente em função da seção transversal. Os valores dos fatores de imperfeição por encurvadura lateral são apresentados na Tabela 2.12 [19].

Tabela 2.12 - Fatores de imperfeição para encurvadura lateral para o Aço Carbono [19]

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Fator de imperfeição $\alpha_{LT}$	0,21	0,34	0,49	0,76

Por outro lado, nas estruturas em aço inoxidável, o valor do limite de esbelteza é também constante, mas igual a 0,4, e o valor do fator de imperfeição varia consoante a secção transversal. As curvas de encurvadura lateral estão representadas na Figura 2.14 e os valores dos fatores de imperfeição são apresentados na Tabela 2.13.

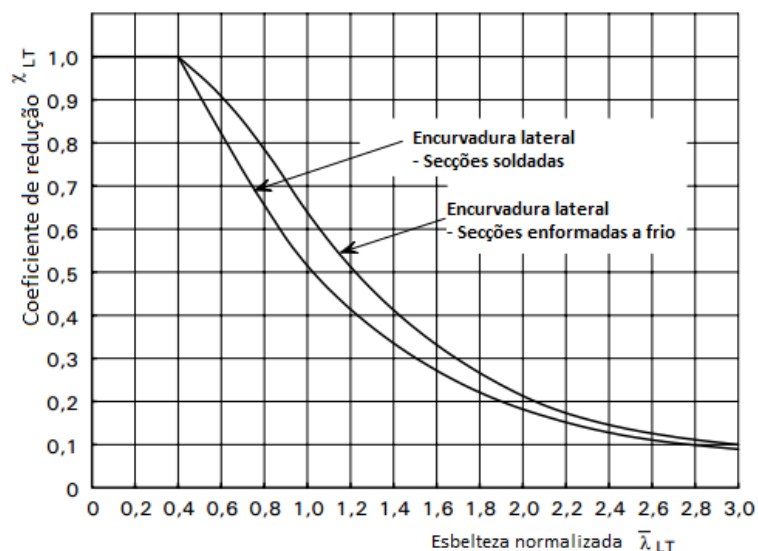


Figura 2.14 - Curvas de encurvadura lateral para o Aço Inoxidável (adaptado de [18])

Tabela 2.13 - Fatores de imperfeição para encurvadura lateral para o Aço Inoxidável [20]

Secções transversais	$\alpha_{LT}$
Secções enformadas a frio e secções tubulares	0,34
Secções abertas soldadas e outras secções para as quais não existem dados de teste disponíveis.	0,76

Nas estruturas com aço carbono se  $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$  ou  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2$  os efeitos da encurvadura lateral podem ser ignorados, onde  $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2$  segundo o Anexo Nacional. Nas estruturas com aço inoxidável os efeitos de encurvadura lateral podem ser ignorados se  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$  ou  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$  [19,20].

- As condições a satisfazer quando os elementos estão solicitados a flexão composta desviada [20]. Essas condições são diferentes nos dois tipos de aço e serão apresentadas seguidamente:

Aço Carbono:

- Compressão e flexão composta:  
 Todos os elementos devem satisfazer as duas equações seguintes:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{N,y}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{N,z}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad (2.8)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{N,y}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{N,z}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad (2.9)$$

Em que:

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  e  $M_{z,Ed}$  são os valores de cálculo do esforço de compressão e dos momentos máximos no elemento, respetivamente, em relação aos eixos y-y e z-z;

$e_{Ny}$  e  $e_{Nz}$  são os deslocamentos do eixo neutro quando a secção transversal está sujeita a compressão uniforme;

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  e  $k_{zz}$  - fatores de interação, e podem ser observados no Anexo B do EN 1993-1-1 [19].

#### Aço Inoxidável:

- Compressão e momento axial sobre o eixo principal:

Para prevenir encurvadura prematura sobre o eixo principal:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0 \quad (2.10)$$

Para prevenir encurvadura prematura sobre o eixo secundário para elementos sujeitos a encurvadura lateral:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1,0 \quad (2.11)$$

- Compressão e momento axial sobre o eixo secundário:

Para prevenir encurvadura prematura sobre o eixo secundário

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0 \quad (2.12)$$

- Compressão e flexão composta:

Todos os elementos devem satisfazer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0 \quad (2.13)$$

Elementos potencialmente sujeitos a encurvadura lateral devem satisfazer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{w,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0 \quad (2.14)$$

Onde,

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \text{ mas } 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \text{ mas } 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Em que:

$(N_{b,Rd})_{\min}$  é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  de quatro modos de encurvadura: encurvadura por flexão sobre o eixo y, encurvadura por flexão sobre o eixo z, encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torsão;

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$  é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  de três modos de encurvadura: encurvadura por flexão sobre o eixo z, encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torsão;

$\beta_{w,y}$  e  $\beta_{w,z}$  são os valores de  $\beta_w$  determinados para os eixos y e z respetivamente e podem tomar os seguintes valores:

- $\beta_w = 1,0$  para secções transversais de Classe 1 ou 2
- $\beta_w = W_{el}/W_{pl}$  para secções transversais de Classe 3
- $\beta_w = W_{eff}/W_{pl}$  para secções transversais de Classe 4

$k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_{LT}$  são fatores de interação

$W_{pl,y}$  e  $W_{pl,z}$  são módulos de flexão plástico para os eixos y e z respetivamente

$M_{b,Rd}$  é o valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura lateral

- O valor de cálculo do esforço transversal resistente  $V_{c,Rd}$ , em que este deve ser tomado como o menor dos valores entre o  $V_{pl,Rd}$ , do ponto 6.2.6 (2) do EN 1993-1-1, e o  $V_{b,Rd}$ , do ponto 5.2 (1) do EN 1993-1-5, em que este último apresenta algumas variações em relação ao projeto com aço carbono tais como as indicadas na Tabela 2.14 [19,20,40]:

Tabela 2.14 - Diferenças para o cálculo de  $V_{b,Rd}$  [20,40]

	Aço carbono	Aço inoxidável
	$\frac{72}{\eta} \varepsilon$	$\frac{52}{\eta} \varepsilon$
<b>Limite de verificação</b>	$\frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_t}$	$\frac{23}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_t}$
	$\eta = 1,0$ ou $1,20$ (recomendado)	$\eta = 1,20$ (recomendado)
<b>Fórmula <math>V_{bw,Rd}</math> (Contribuição da alma)</b>	$\chi_w$ (ver 5.3(1) do EN1993-1-5)	$\chi_w$ (ver 5.6(3) do EN1993-1-4)
<b>Fórmula <math>V_{bf,Rd}</math> (Contribuição dos banzos)</b>	$c = \left[ 0,25 + \frac{1,6b_f t_f^2 f_{yf}}{t \cdot h_w \cdot f_{yw}} \right] \times a$	$c = \left[ 0,17 + \frac{3,5b_f t_f^2 f_{yf}}{t \cdot h_w \cdot f_{yw}} \right] \times a$ e $\frac{c}{a} \leq 0,65$

## CAPÍTULO 2

No projeto de ligações:

- Os valores nominais da tensão de cedência,  $f_{yb}$ , e da tensão de ruptura à tração,  $f_{ub}$ , dos parafusos. Para os parafusos de aço inoxidável esses valores são designados pelas propriedades da EN ISO 3506 enquanto que, para os parafusos de aço carbono esses mesmos valores são designados pelas suas classes de parafusos, como se pode observar nas Tabelas 2.15 e 2.16 [20,42].

Tabela 2.15 - Valores nominais  $f_{yd}$  e  $f_{ub}$  dos parafusos de aço inoxidável [20]

Tipo de aço inoxidável	Classificação de propriedades da EN ISO 3506	Gama de tamanhos	Tensão de cedência $f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Tensão última à tração $f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Austenítico e Austenítico-ferrítico	50	≤ M 39	210	500
	70	≤ M 24	450	700
	80	≤ M 24	600	800

Tabela 2.16 - Valores nominais  $f_{yd}$  e  $f_{ub}$  dos parafusos de aço carbono [42]

Classe do parafuso	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	320	300	400	480	640	900
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	400	500	500	600	800	1000

- A verificação da resistência ao esmagamento, em que a tensão última à tração,  $f_u$ , pode ser reduzida por [20]:

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \text{ mas } \leq f_u \quad (2.15)$$

- O fator  $\alpha_v$  quando o plano de corte atravessa a parte roscada do parafuso. Para o aço inoxidável esse fator toma sempre o mesmo valor,  $\alpha_v = 0,5$ , e para o aço carbono este varia entre 0,5 e 0,6, consoante a classe do parafuso [20,42].

# DURABILIDADE ESTRUTURAL

As estruturas devem ser projetadas e construídas com o intuito de satisfazer requisitos de utilização, resistência e durabilidade, durante um certo período de tempo sem causar custos inesperados de manutenção e reparação [43]. Para garantir a durabilidade das estruturas é necessário manter a deterioração a nível reduzido no período de vida útil das estruturas daí que é essencial conhecer os comportamentos dos materiais, mecanismos de deterioração, medidas de proteção e técnicas de reabilitação.

Como o principal objetivo desta dissertação é avaliar se o aço inoxidável é mais vantajoso para a Ilha da Madeira do que o aço carbono, neste capítulo serão abordados os mecanismos de degradação, os modelos de degradação, os métodos de reparação e os cenários de degradação e manutenção, para o principal problema das estruturas considerado nesta dissertação, que é a corrosão.

### 3.1 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO

#### 3.1.1 Betão Armado

No betão armado a corrosão das armaduras é um dos grandes responsáveis pela deterioração do betão dado que, além de reduzir a secção de aço forma produtos de reação expansivos conducentes a fendilhação e delaminação do betão de recobrimento. Quando o betão não está contaminado as armaduras estão protegidas contra a corrosão devido a uma película passiva, formada à superfície da armadura devido à elevada alcalinidade do betão, que impede a sua corrosão. Quando o pH desce ou o teor de cloretos é superior ao valor crítico esta barreira é destruída e, na presença de água e oxigénio poderá iniciar-se a corrosão [9,11].

Embora o aço inoxidável tenha resistência à corrosão elevada, isso não impede que a armadura não possa ser corroída. Este facto deve-se à rotura da película passiva ou ao seu impedimento de formação devido à presença de iões cloreto em grandes quantidades ou pela redução de alcalinidade do betão [8,11].

##### 3.1.1.1 Corrosão por Cloretos

A deterioração precoce de estruturas de betão armado é frequente não só em estruturas em contacto com a água salgada mas também em estruturas edificadas junto à costa, em que os cloretos

## CAPÍTULO 3

podem ser transportados por ação do vento [9]. Como na Madeira existe mar em torno de toda a ilha é habitual considerar que todas ou quase todas as estruturas estão sujeitas a ação dos cloretos, devido à ação do vento, mas também pode estar relacionado com a presença de cloretos na água de amassadura ou os agregados poderão conter cloretos devido à sua má lavagem antes da sua utilização.

Nos casos em que os cloretos provêm do meio exterior, a corrosão é localizada (corrosão por picada), pois a concentração de cloretos vai aumentando com o tempo, ao longo do elemento de betão (em profundidade), até atingir um valor que cause a rotura da película passiva e consequentemente a corrosão da armadura, que geralmente condiciona perda significativa de secção [9].

Quando os cloretos estão incluídos no processo de fabrico do betão poderá ocorrer a despassivação das armaduras imediatamente e normalmente o betão apresenta um teor de cloretos constante ao longo dos elementos (corrosão generalizada).

### **3.1.1.2 Corrosão por Carbonatação**

A corrosão das armaduras devido à carbonatação do betão ocorre quando o dióxido de carbono da atmosfera reage com o hidróxido de cálcio, originado pela hidratação do cimento, produzindo carbonato de cálcio.

Esta reação tem como resultado a diminuição do pH da água contida nos poros do betão para um valor de pH inferior a 9. À medida que a frente de carbonatação se vai aproximando das armaduras, a película passiva começa a deteriorar-se de forma generalizada e, na presença de água e oxigénio, pode iniciar-se a corrosão das armaduras (corrosão generalizada). Este tipo de corrosão geralmente não diminui significativamente a secção de aço e uma forma de saber se existe corrosão é pela ocorrência de manchas avermelhadas na superfície de betão [9].

### **3.1.2 Estrutura Metálica**

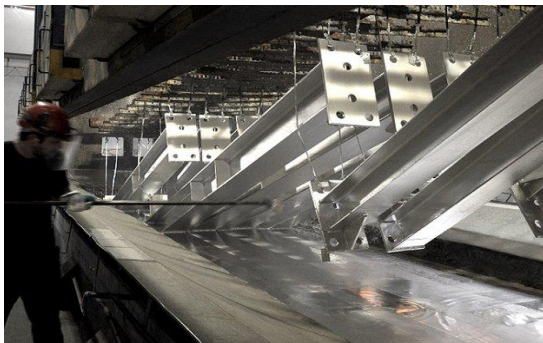
As estruturas metálicas estão ainda mais sujeitas à corrosão por estarem diretamente expostas aos agentes agressivos do meio ambiente e do solo, daí que as estruturas de aço são também normalmente protegidas.

Os principais tipos de corrosão que podem ocorrer numa estrutura metálica são: a corrosão galvânica (quando a estrutura está em contato com outros metais), a corrosão por picada (que ocorre normalmente em ambientes marítimos devido à grande concentração de cloretos) e a corrosão sob tensão (que ocorre devido à ação simultânea de corrosão e de tensões mecânicas, em que esta pode dar início à fissuração mais repentinamente do que o esperado ou aumento da velocidade de propagação). Para além desses fatores a corrosão muitas vezes ocorre devido à existência de descontinuidades estruturais, inclusões ou diferenças químicas [44].

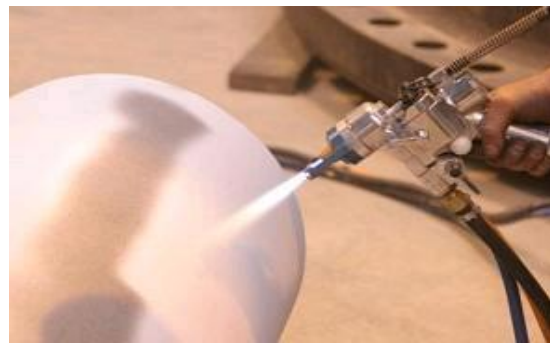
Por forma a evitar a corrosão, as estruturas são protegidas antes da sua construção. Os mecanismos utilizados para proteger as estruturas da corrosão são: aplicando uma barreira contínua

que impede o contacto da superfície da estrutura com os agentes corrosivos ou empregando uma camada superficial com outro metal, com o objetivo de corroer essa camada antes de começar a corroer o aço. Quando estas barreiras de proteção são destruídas dá-se origem à corrosão [45].

Os revestimentos metálicos mais comuns para proteger contra a corrosão do aço são os revestimentos de zinco, uma vez que este corrói a uma velocidade inferior à do aço. Os principais processos de aplicação são galvanização por imersão a quente, projeção a quente (metalização por projeção térmica) e utilizado como aditivo em sistemas de pinturas. A proteção conferida pelos revestimentos depende mais do metal selecionado e da sua espessura do que o método de revestimento aplicado [45].



**Galvanização por imersão a quente**



**Metalização**

Figura 3.1 - Principais processos de proteção de estruturas metálicas [46,47]

As pinturas são utilizadas como proteção adicional para elementos sujeitos a ambientes corrosivos, evitando a exposição direta do aço ou superfícies galvanizadas ao contacto com a água e oxigénio, mas também por uma questão de estética. As pinturas normalmente utilizadas são constituídas por: poliéster, acrílicos, epóxidos, poliuretanos, policloreto vinílico (PVC) e fluorosurfactante (PFC) [45].

### 3.2 MODELOS DE DEGRADAÇÃO NO BETÃO ARMADO

O processo de deterioração de uma estrutura é habitualmente dividido em duas fases, iniciação e propagação. Se não forem tomadas medidas na altura correta a deterioração poderá levar ao colapso da estrutura [9]. Para as estruturas de betão armado existem diversos modelos de degradação que preveem a evolução da sua deterioração ao longo do tempo. Em Portugal deve usar-se o modelo da Especificação do LNEC E465, que permite estimar o período de vida útil das estruturas a partir da duração previsível das duas fases acima referidas [48].

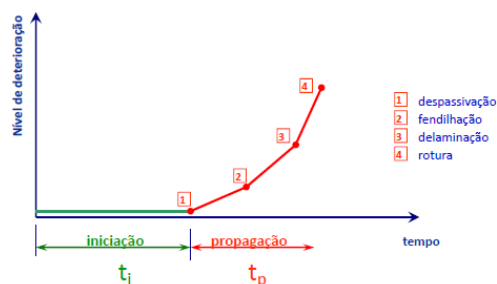


Figura 3.2 - Deterioração ao longo do tempo [49]

### 3.2.1 Fase de Iniciação

Na fase de iniciação ocorre a entrada dos agentes agressivos no betão de recobrimento até atingir o nível das armaduras e começar o processo de destruição da película passiva, ou seja, atingindo valores críticos. Nesta fase não ocorre deterioração significativa da estrutura [9].

A fase de iniciação tem uma duração que depende essencialmente das condições ambientais do meio onde se encontra a estrutura, que irá determinar a velocidade de penetração dos agentes agressivos e os mecanismos de transporte para o interior do betão, e de parâmetros relacionados com a qualidade do betão, tais como a sua composição, compactação e cura, uma vez que estes parâmetros influenciam a resistência do elemento estrutural à penetração dos agentes agressivos [9]. A duração da fase de iniciação é traduzida por modelos que diferem consoante o tipo de agente agressivo.

#### 3.2.1.1 Carbonatação

O modelo para determinação do período de iniciação por carbonatação tem como objetivo a definição da resistência do betão à carbonatação por forma a que no fim do período de iniciação  $t_i$  a profundidade de carbonatação seja no máximo igual ao recobrimento [48,49,50]. Este pode ser traduzido por:

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot \Delta c}{a}} \cdot t \cdot K = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot \Delta c}{a}} \cdot t \cdot \left[ \sqrt{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2} \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \right] \quad (3.1)$$

Em que:

$x$  - profundidade de carbonatação (m);

$D$  - coeficiente de difusão do dióxido de carbono através do betão carbonatado em equilíbrio com o ambiente de 65% de humidade relativa e 20°C (m<sup>2</sup> /ano);

$\Delta c$  - diferença de concentração de dióxido de carbono no exterior,  $c$ , e na frente de carbonatação,  $c_1$ . Considerando o CO<sub>2</sub> totalmente consumido na frente de carbonatação,  $c_1 = 0$  e  $\Delta c = c = 0,7 \times 10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup>;

- a - quantidade de CO<sub>2</sub> que provoca a carbonatação dos componentes alcalinos do betão contidos numa unidade de volume do betão, dependendo portanto do tipo e dosagem do cimento utilizado (kg/m<sup>3</sup>);
- k<sub>0</sub> - fator de valor 3 quando as condições de ensaios são as da Especificação LNEC E391;
- k<sub>1</sub> - fator que permite considerar a influência da humidade relativa, dependendo da classe de exposição;
- k<sub>2</sub> - fator que permite considerar a influência da cura, tendo o valor de 1 na cura normalizada e de 0,25 quando a cofragem é de permeabilidade controlada e a cura é de 3 dias;
- n - fator que permite considerar a influência da molhagem/secagem ao longo do tempo;
- t<sub>0</sub> - período de referência (= 1 ano);
- t - período de iniciação por carbonatação (anos).

Os fatores k<sub>1</sub> e n dependem da classe de exposição e podem tomar os valores da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de k<sub>1</sub> e n [48]

	<b>XC1</b>	<b>XC2</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
<b>k1</b>	1,0	0,20	0,77	0,41
<b>n</b>	0	0,183	0,02	0,085

Considerando que a resistência à carbonatação de um betão, R<sub>C65</sub>, pode ser medida pela relação seguinte:

$$R_{C65} = \frac{a}{D} \tag{3.2}$$

E substituindo essa relação na Equação (3.1) obtemos:

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0007}{R_{C65}}} \cdot t \cdot \left[ \sqrt{k_0 \cdot k_1 \cdot k_2} \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \right] \tag{3.3}$$

A medição do R<sub>C65</sub> pode ser feita através de fórmulas relacionadas com o tipo de cimento (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Valores de R<sub>C65</sub> consoante o tipo de cimento [50]

<b>R<sub>C65</sub></b>	<b>Tipo de cimento</b>
<b>R<sub>C65</sub> = 0,0016 · f<sub>cm</sub><sup>3,106</sup></b>	CEMI; CEM II/A
<b>R<sub>C65</sub> = 0,0018 · f<sub>cm</sub><sup>2,862</sup></b>	CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V

### 3.2.1.2 Cloretos

O modelo para determinação do período de iniciação devido à ação dos cloretos, tem como principal objetivo a definição da resistência à penetração de cloretos no betão por forma a no fim do

### CAPÍTULO 3

período de iniciação,  $t_i$ , a profundidade do teor crítico seja no máximo igual ao recobrimento [9,48,49]. Este método é definido pela Equação (3.4):

$$C(x,t) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{X}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3.4)$$

Essa mesma equação pode ser traduzida de outra forma pela Equação (3.5):

$$D = \frac{X^2}{4 \times t \times \xi^2} \text{ com } \xi = \operatorname{erf}^{-1} \frac{C_s - C(x,t)}{C_s} \quad (3.5)$$

Em que:

D - coeficiente de difusão dos cloretos no betão ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$C(x,t)$  - concentração de cloretos, à profundidade  $x(\text{m})$  após decorrido o tempo  $t(\text{s})$ ;

$C_s$  - concentração de cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão ( $x=0$ );

$\operatorname{erf}$  - função erro;

$x$  - profundidade de cloretos (m);

$t$  - período de iniciação por cloretos (s).

Para que ocorra despassivação das armaduras, a concentração de cloretos ao nível das armaduras terá de ser igual ao teor crítico:

$$C(x,t) = C(R, t_i) = C_R \text{ (teor crítico de cloretos)}$$

Em que:

R - Recobrimento das armaduras (m).

Para a determinação do teor crítico, que depende da razão água/cimento e da classe de exposição, recorre-se aos dados da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores de  $C_R$  para Aço Carbono em % [48].

<b><math>C_R</math> (% em massa do cimento)</b>		
<b>Água/cimento</b>	<b>XS1; XS2</b>	<b>XS3</b>
<b><math>a/c \leq 0,30</math></b>	0,6	0,5
<b><math>0,30 &lt; a/c \leq 0,40</math></b>	0,5	0,4
<b><math>a/c &gt; 0,40</math></b>	0,4	0,3

Nos aços inoxidáveis o teor crítico de cloretos,  $C_R$ , é superior ao do aço carbono, podendo este ser até dez vezes mais elevado [3], como se pode verificar na Figura 3.3.

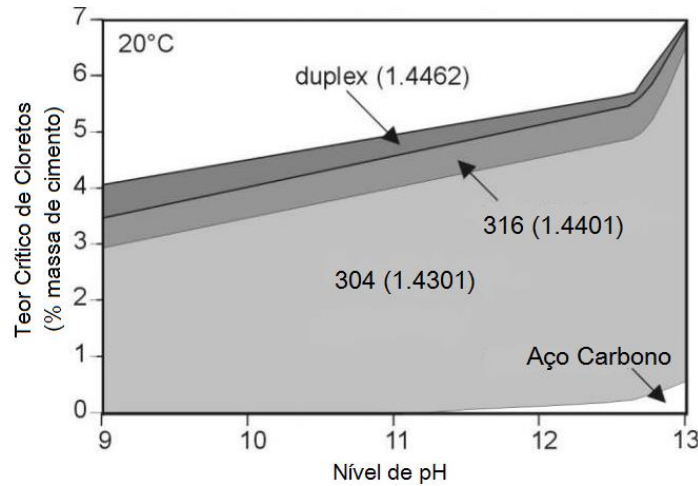


Figura 3.3 - Representação esquemática do teor crítico de cloretos (adaptado de [3])

A concentração superficial  $C_s$  é determinado com recurso à Equação (3.6):

$$C_s = C_b \cdot k_{a/c} \cdot k_{vert} \cdot k_{hor} \cdot k_{temp} \quad (3.6)$$

Onde:

$$k_{a/c} = 2,5 \cdot (a/c)$$

Em que:

$a/c$  - a razão água/ligante.

Os restantes parâmetros da Equação (3.6) estão definidos nas Tabelas 3.4 a 3.6.

Tabela 3.4 - Valores de  $C_b$  e  $k_{vert}$  [48].

Classes de exposição	$C_b$ (%)	$k_{vert}$
XS1	2,0	0,7
XS2	3,0	1 - 1m de profundidade 1,4 - 24 m de profundidade
XS3	3,0	1,0

Tabela 3.5 - Valores de  $k_{temp}$  [48].

Temperatura do betão (°C)	0	10	15	20	25	30	35
$k_{temp}$	2,2	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6

Tabela 3.6 - Valores de  $k_{hor}$  [48].

Distância à linha de costa (Km)	$k_{hor}$
0	1
1*	0,6
<b>*Nas ilhas da Madeira e Açores pode ser duplicada</b>	

O coeficiente de difusão  $D$  das Equações (3.4) e (3.5) é dado por:

$$D_a(t) = D_a(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n = k_{D,c} \cdot k_{D,RH} \cdot k_{D,T} \cdot D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (3.7)$$

## CAPÍTULO 3

Em que:

$k_{D,c}$  - fator que tem em conta a influência das condições de cura;

$k_{D,RH}$  - fator que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente;

$k_{D,T}$  - fator que tem em conta a influência da temperatura;

$D_0$  - coeficiente de difusão potencial ( $m^2/s$ ), determinado em laboratório de acordo com a especificação LNEC E463, com o betão na idade de referência  $t_0 = 28$  dias;

$n$  - fator que tem em conta o decréscimo de ingresso dos cloretos ao longo do tempo.

Para a determinação do coeficiente de difusão é necessário recorrer a tabelas para determinar os valores dos diversos fatores e do coeficiente de difusão potencial, em que este último depende do tipo de cimento. As tabelas necessárias são as apresentadas abaixo:

Tabela 3.7 - Valores de  $k_{D,c}$  [48]

Número de dias de cura	$k_{D,c}$
Normalizada	2,4
Em contato permanente com água	0,75
Cofragem de permeabilidade controlada e 3 dias de cura húmida	1,0

Tabela 3.8 - Valores de  $n$  e  $k_{D,RH}$  (adaptado de [48]).

Classes de exposição	$n$		$k_{D,RH}$
	CEM I/II*	CEM III/IV	
<b>XS1</b>	0,55	0,65	0,4
<b>XS2</b>	0,45	0,55	1,0
<b>XS3</b>	0,55	0,65	1,0

\*Excepto CEM II-W, II-T, II/B-L e II/B-LL

Tabela 3.9 - Valores de  $k_{D,T}$  [48]

Temperatura do betão (°C)	0	10	15	20	25	30
$k_{D,T}$	0,4	0,75	0,8	1,0	1,2	1,5

Tabela 3.10 - Valores de  $D_0$  [51]

$D_0$	Tipo de cimento
$D_0 = 8471,6 \cdot f_{cm}^{-1,5246}$	CEMI; CEM II/A
$D_0 = 981,15 \cdot f_{cm}^{-1,2445}$	CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V

### 3.2.2 Fase de Propagação

Na fase de propagação dá-se o desenvolvimento da deterioração, nomeadamente do processo de corrosão das armaduras, em que o limite aceitável de danos pode ser atingido rapidamente [9].

A velocidade com que esta fase se desenvolve é determinado pelas condições de exposição a que a estrutura está sujeita e pela qualidade do betão com que foi construída, por isso é de difícil

previsão. A velocidade média de corrosão devido à carbonatação é inferior à corrosão provocada por contaminação de cloretos [9,49], como pode-se observar na Figura 3.4.

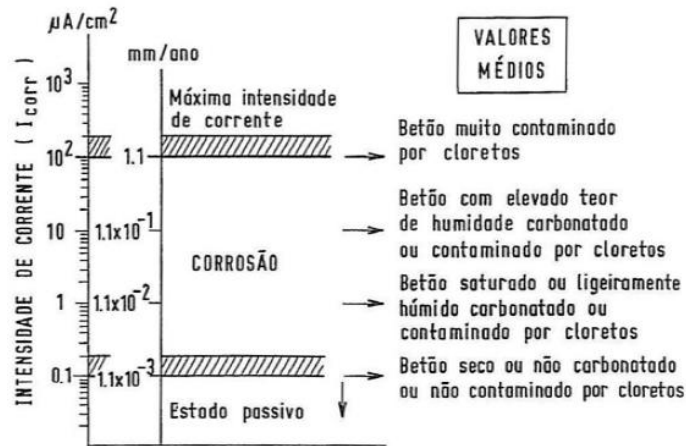


Figura 3.4 - Valores expectáveis da velocidade de corrosão [49]

No caso de haver fendilhação no betão de recobrimento, ocorre um forte aumento de oxigénio nas fendas, gerando produtos de corrosão mais volumosos devido ao grande aumento da velocidade de corrosão [48].

O modelo para determinação do período de propagação recorre a:

- Lei de Faraday:

$$x = 0,0115I_{\text{corr}}t_p \tag{3.8}$$

Em que:

- x - redução de raio provocada pela intensidade da corrente de corrosão durante o tempo de propagação da corrosão (mm);
- $I_{\text{corr}}$  - intensidade da corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ );
- $t_p$  - tempo de propagação (anos).

- Expressão experimental para estimar a redução do raio, x, que provoca o início da fissuração:

$$x = 10^{-3} \times \left( 74,5 + \frac{7,3R}{\phi_0} - 17,4f_{\text{ct,sp}} \right) \tag{3.9}$$

Em que:

- R - recobrimento (mm);
- $f_{\text{cd,sp}}$  - resistência à compressão diametral do betão, com o valor 2 e 2,5 MPa nos betões; para carbonatação e 3 e 4 MPa nos betões para os cloretos;
- $\phi_0$  - diâmetro inicial das armaduras.

- Consideração da diferença de influência na corrosão por ação dos cloretos e por carbonatação:

$$\phi_0 - \phi = \alpha x \tag{3.10}$$

## CAPÍTULO 3

Em que:

$\alpha = 2$  quando a corrosão é uniforme (corrosão por carbonatação);

$\alpha \leq 10$  quando a corrosão é por picadas (corrosão por cloretos).

- Consideração dos níveis de corrosão expetáveis nas classes de exposição XC e XS em função dos teores de humidade nos poros do betão (Tabela 3.11). Dependendo dos níveis de corrosão a intensidade da corrente varia, e os seus valores podem ser observados na Tabela 3.12.

Tabela 3.11 - Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras [48]

Classes de exposição e níveis de corrosão das armaduras						
XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3
Despr.	Baixo	Despr.	Baixo/Moder.	Moder.	Despr.	Elevado

Tabela 3.12 - Intervalos de intensidade da corrente consoante o nível de corrosão [48].

Níveis de corrosão	
Intensidade da corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nível de corrosão
< 0,1	Desprezável
0,1-0,5	Baixo
0,5-1	Moderado
> 1	Elevado

Combinando as fórmulas anteriores é então possível estimar o tempo de propagação pela equação que se segue:

$$t_p = k\phi_0 / (1,15\alpha I_{\text{corr}}) \quad (3.11)$$

Onde:

$$k = 0,1 \times (74,5 + \frac{7,3R}{\phi_0} - 17,4f_{\text{ct,sp}}) / (\frac{\phi_0}{2}) \quad (3.12)$$

### 3.2.3 Período de Vida Útil de Projeto

O período de vida útil de projeto,  $t_L$ , é determinado através da soma do tempo de iniciação com o período de propagação, em que o tempo de iniciação de cálculo deverá ser minimizado através do fator de segurança da vida útil,  $\gamma$ :

$$t_L = t_i + t_p ; t_i = \frac{t_{ic}}{\gamma} \quad (3.13)$$

Onde:

$t_L$  - período de vida útil de projeto;

$t_i$  - período de iniciação de projeto;

$t_{ic}$  - período de iniciação de cálculo;

$t_p$  - período propagação de projeto;

$\gamma$  - fator de segurança da vida útil.

Através dos modelos citados anteriormente foi feita uma estimativa do período de vida útil de projeto, em que essa estimativa teve diversos fatores em conta, como a classe de exposição, tipo de betão, tipo de cimento, tipo de aço, recobrimento e no caso dos cloretos a proximidade à linha da costa.

Os tempos de vida útil de projeto foram estimados para dois tipos de betão, dois grupos de cimentos, dois tipos de aço, e duas classes de exposição, dependendo do agente agressivo.

Os betões escolhidos foram o C30/37 (betão mais utilizado atualmente em projeto) e o C35/45, para comparação dos tempos de vida útil quando a resistência à compressão do betão é aumentada.

Foram considerados todos os tipos de cimentos utilizados em Portugal. Estes foram reunidos em dois grupos: i) CEM I e CEM II/A e ii) CEM II/B até CEM V, à semelhança do que é considerado na Especificação LNEC E465, conforme já apresentado nas Tabelas 3.2 e 3.10, para determinação dos coeficientes  $RC_{65}$  e  $D_0$ .

Os aços usados foram o aço carbono A500 e o aço inoxidável austenítico 1.4301 (aços mais utilizados atualmente em projeto), com tensão de cedência igual, mas com teor crítico de cloretos diferente.

As classes de exposição escolhidas foram a XC3 e XC4 para a carbonatação e XS1 e XS3 para os cloretos, que são as classes de maior agressividade ambiental. A escolha das classes XC3 e XC4 justifica-se porque na Madeira o ambiente é moderadamente húmido a ciclicamente húmido durante a maior parte do ano, enquanto as classes XS1 e XS3 justifica-se pela presença de sais marinhos transportados pelo ar e pela presença de algumas estruturas em contato direto com o mar. Não foram utilizadas as classes XD pois embora em algumas estruturas específicas, como piscinas, até possam existir cloretos não provenientes do mar, na Ilha da Madeira a maior parte dos cloretos é proveniente do mar.

Para o fator de segurança de vida útil foi adotada a classe de fiabilidade RC2 ( $\gamma = 2,3$ ), que corresponde à classe de consequência CC2, ou seja consequência média em termos de perdas de vidas humanas e consequências económicas, sociais ou ambientais medianamente importantes, como é o caso de edifícios de habitação ou de escritórios.

A designação do betão que são apresentadas nas Tabelas 3.13 e 3.14 foram adotadas unicamente para simplificação na representação dos dados.

No Anexo D encontram-se as classes de exposição, as classes de fiabilidade e as classes de consequência.

### 3.2.3.1 Carbonatação

Para a determinação do tempo de vida útil de projeto relativo à carbonatação foram utilizados os dados da Tabela 3.13, dos quais foram obtidos os tempos de vida de projeto apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6 para as classes XC3 e XC4, respetivamente. No caso da carbonatação os tempos de vida útil foram considerados iguais para os dois tipos de aço pois o modelo não continha nenhum parâmetro relativo ao tipo de aço.

Tabela 3.13 - Dados para o cálculo da vida útil de projeto relativo à carbonatação [52].

Designação do betão	Classe de resistência/ Resistência à compressão	Tipo de cimento	Razão a/c	R <sub>C65</sub> (kg.ano/m <sup>5</sup> )	Classe de exposição
A1	C30/37	CEM I ou II/A	0,60	129	XC3
B1	C30/37	CEM I ou II/A	0,60	129	XC4
C1	C30/37	CEM II/B até V	0,55	60	XC3
D1	C30/37	CEM II/B até V	0,55	60	XC4
E1	C35/45	CEM I ou II/A	0,60	190	XC3
F1	C35/45	CEM I ou II/A	0,60	190	XC4
G1	C35/45	CEM II/B até V	0,55	85	XC3
H1	C35/45	CEM II/B até V	0,55	85	XC4

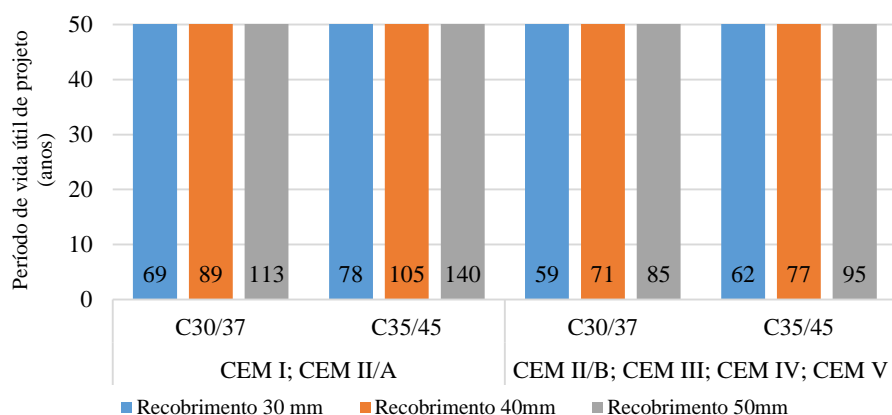


Figura 3.5 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Determinação de t<sub>L</sub> para a classe XC3

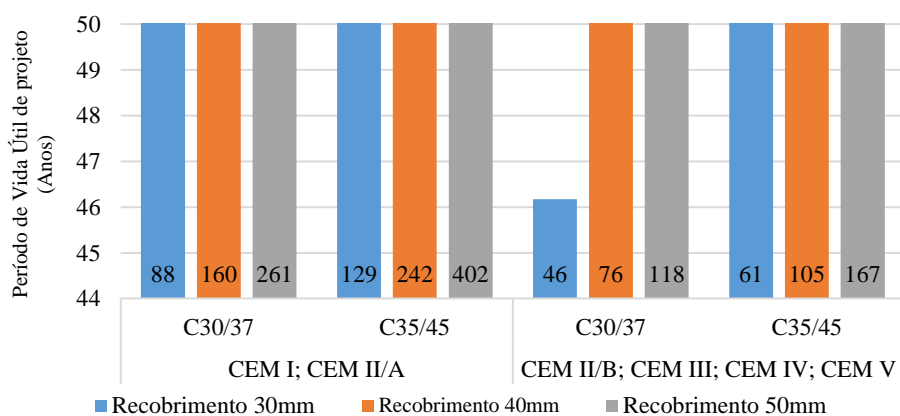


Figura 3.6 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Determinação de t<sub>L</sub> para a classe XC4

Nas Figuras anteriores pode-se observar que a vida útil de projeto por carbonatação para o Betão C35/45 é superior à do C30/37, como era de esperar, mas também que para os cimentos CEM I ou CEM II/A, independentemente do tipo de betão, a sua vida útil é igualmente superior. Este fenómeno deve-se ao facto do tipo de cimento condicionar a quantidade de reservas alcalinas do betão (hidróxidos de cálcio, sódio e potássio) suscetíveis de reagir com o CO<sub>2</sub>, após o CO<sub>2</sub> se difundir nos poros. Os cimentos CEM II/B até CEM V possuem uma menor quantidade de reservas alcalinas, o que implica que a velocidade de carbonatação aumente pois a sua reatividade com o CO<sub>2</sub> é superior. Inversamente, os cimentos CEM I e CEM II/A apresentam um conteúdo de reservas alcalinas superior, pelo que estes são classificados como cimentos mais resistentes à carbonatação [3].

### 3.2.3.2 Cloretos

Para o aço carbono a determinação do tempo de vida útil de projeto por ação dos cloretos foi baseada nos dados da Tabela 3.14. Os valores para a razão a/c foram obtidos da Norma Portuguesa EN 206-1 [53]. Para o aço inoxidável foram usados os mesmos dados, mas considerando um teor crítico de cloretos três vezes superior ao adotado na Especificação LNEC E465 para o aço carbono. De acordo com a Figura 3.3 poder-se-ia ter adotado um valor muito superior, mas preferiu-se adotar uma postura conservativa, até para não desvirtuar os resultados desta dissertação. Para o recobrimento das armaduras foi considerado um valor 50 mm no caso do aço carbono e de 30 mm no caso do aço inoxidável. O recobrimento de 50 mm justifica-se pela elevada exposição ambiental da maior parte das estruturas da Ilha da Madeira, enquanto o de 30 mm foi obtido do anterior reduzindo-o de 20 mm conforme indicado pelo Eurocódigo 2.

De acordo com a Especificação LNEC E465 e já indicado na Tabela 3.6 na determinação da concentração de cloretos na Ilha da Madeira a distância à linha de costa de 1 km pode ser duplicada. Assim, de forma conservativa considerou-se uma distância à linha de costa de 2 km.

Tabela 3.14 - Dados para o cálculo da vida útil de projeto relativos aos cloretos [52].

Designação do betão	Classe de resistência/ Resistência à compressão	Tipo de cimento	Razão a/c	D <sub>0</sub> (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	Classe de exposição
A2	C30/37	CEM I ou II/A	0,45	33	XS1
B2	C30/37	CEM I ou II/A	0,40	33	XS3
C2	C30/37	CEM II/B até V	0,55	11	XS1
D2	C30/37	CEM II/B até V	0,45	11	XS3
E2	C35/45	CEM I ou II/A	0,45	27	XS1
F2	C35/45	CEM I ou II/A	0,40	27	XS3
G2	C35/45	CEM II/B até V	0,55	9	XS1
H2	C35/45	CEM II/B até V	0,45	9	XS3

### CAPÍTULO 3

Os períodos de vida útil para a classe de exposição XS1, estão representados nas Figuras 3.7 e 3.8, para as estruturas em aço carbono, e Figuras 3.9 e 3.10, para as estruturas em aço inoxidável.

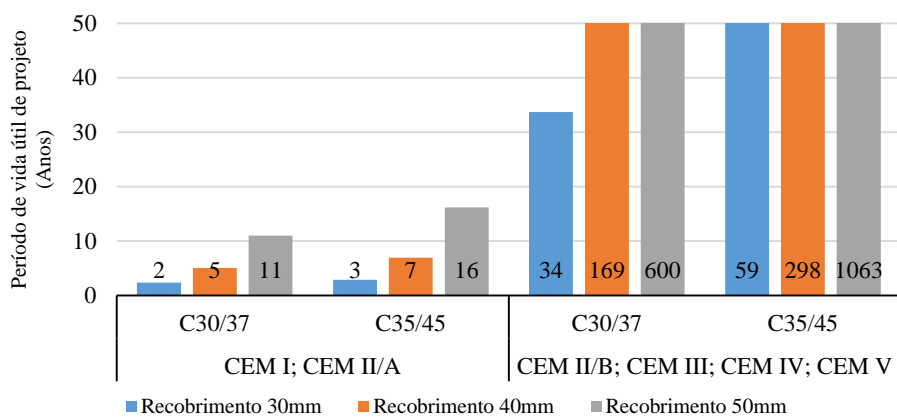


Figura 3.7 - Aço Carbono: Determinação de  $t_L$  para a classe XS1 - 0km da costa

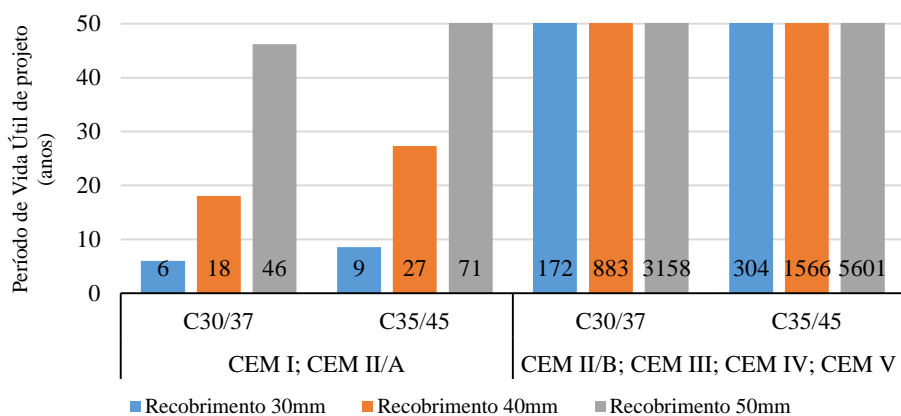


Figura 3.8 - Aço Carbono: Determinação de  $t_L$  para a classe XS1 - 1km da costa

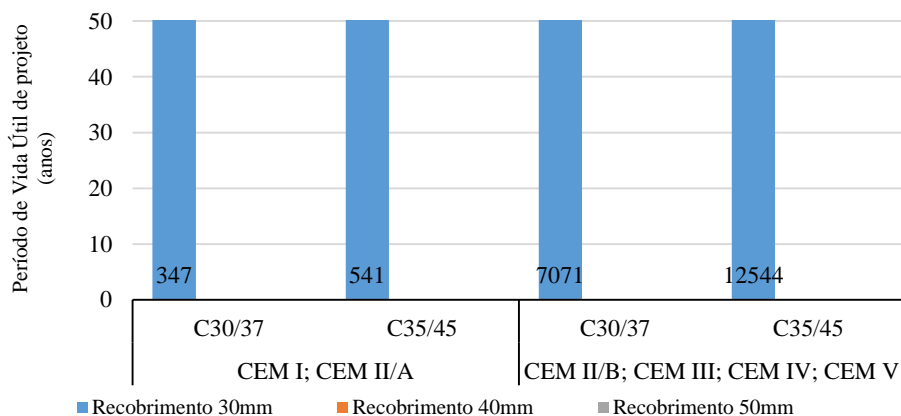


Figura 3.9 - Aço Inoxidável: Determinação de  $t_L$  para a classe XS1 - 0km da costa

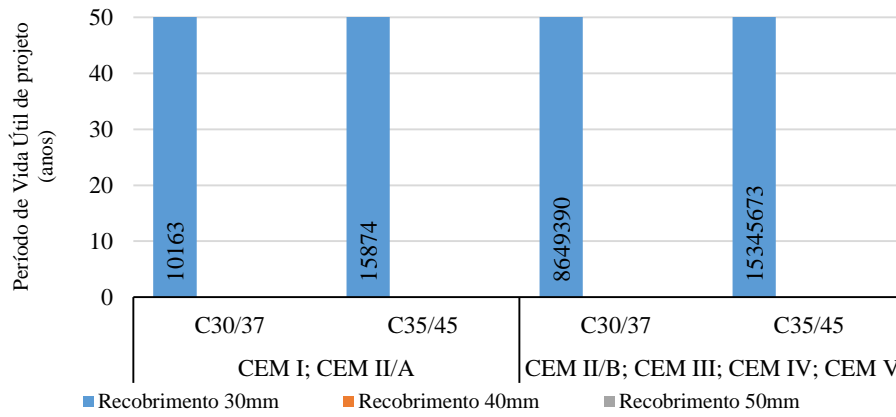


Figura 3.10 - Aço Inoxidável: Determinação de  $t_L$  para a classe XS1 - 1km da costa

Das figuras dos períodos de vida útil de projeto para a classe de exposição XS1, pode-se observar que, tal como para a carbonatação, o Betão C35/45 apresenta um período de vida útil superior ao do Betão C30/37, mas também que para o aço inoxidável esse período é muito superior mesmo quando comparando com os resultados para o recobrimento de 50 mm do aço carbono, independentemente da distância à linha de costa.

Para a classe de exposição XS3, que é uma classe mais desfavorável, os períodos de vida podem ser observados nas Figuras 3.11 e 3.12, para o aço carbono, e nas Figuras 3.13 e 3.14, para o aço inoxidável.

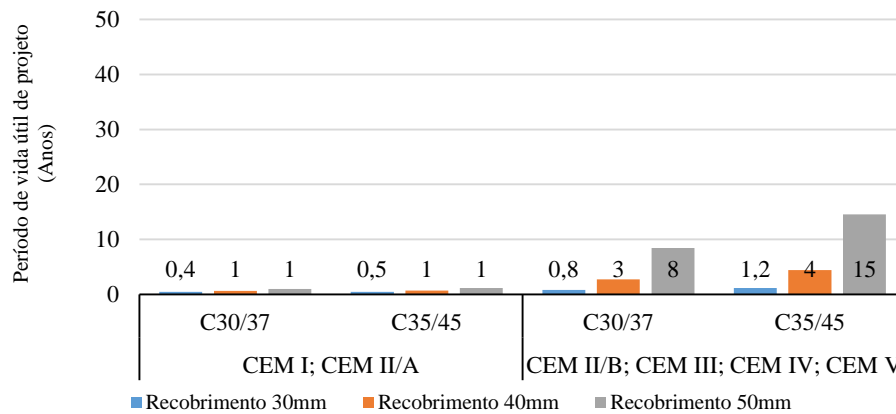


Figura 3.11 - Aço Carbono: Determinação de  $t_L$  para a classe XS3 - 0km da costa

### CAPÍTULO 3

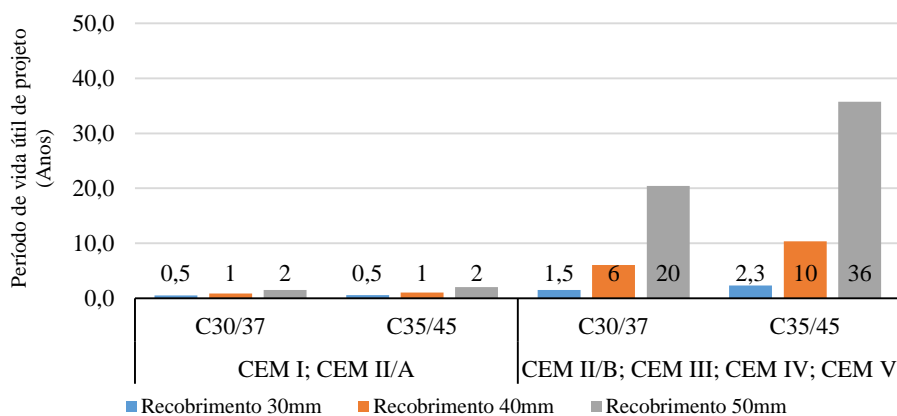


Figura 3.12 - Aço Carbono: Determinação de  $t_L$  para a classe XS3 - 1km da costa

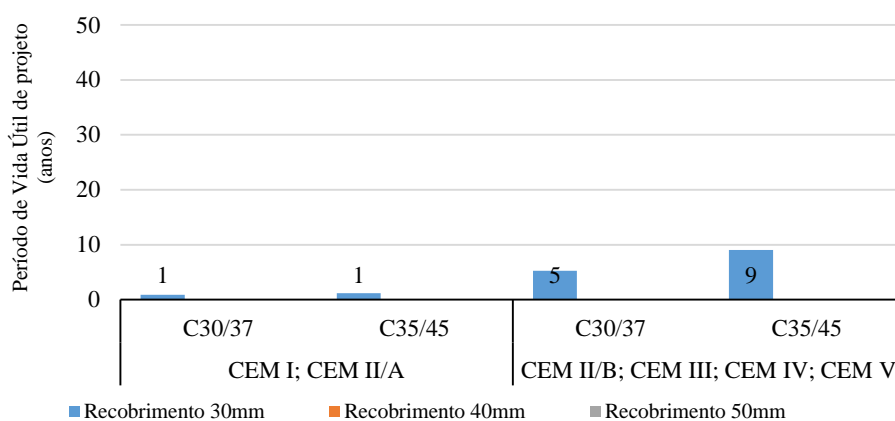


Figura 3.13 - Aço Inoxidável: Determinação de  $t_L$  para a classe XS3 - 0km da costa

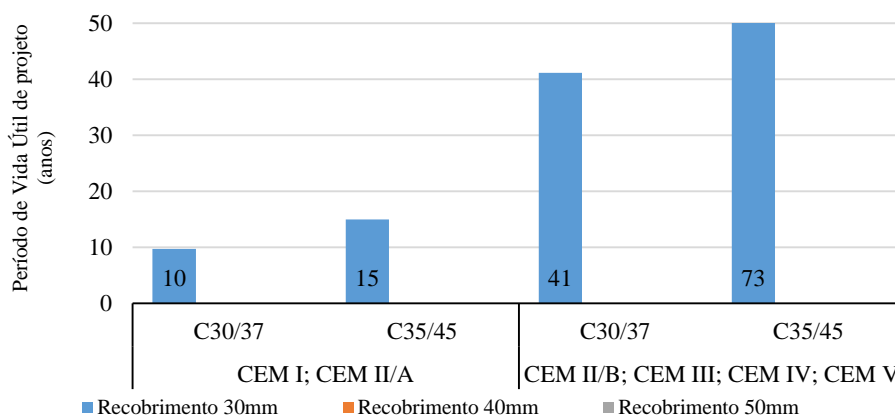


Figura 3.14 - Aço Inoxidável: Determinação de  $t_L$  para a classe XS3 - 1km da costa

As conclusões que podem ser retiradas das figuras do período de vida útil para a classe de exposição XS3 são as mesmas que para a classe de exposição XS1, mas os valores são mais próximos quando comparados os dois tipos de aço.

Para ambas as classes, também se verifica que, o período de vida útil de projeto por ação dos cloretos, para os cimentos CEM II/B até CEM V, independentemente do tipo de betão, apresentam

uma vida útil superior, o que difere da carbonatação. Esse facto deve-se à adição de materiais pozolânicos (por exemplo, cinzas volantes e sílica de fumo) ou hidráulicos latentes (escória granulada de alto-forno), que diminuem a dimensão dos poros da pasta cimentícia, o que melhora significativamente a resistência do betão à penetração de cloretos. Outro fator é que os cimentos mencionados formam uma quantidade adicional de CSH (silicato de cálcio hidratado), que possibilitam um aumento da capacidade de fixação dos cloretos e subseqüentemente uma redução do coeficiente de difusão [3].

Os valores de todos os parâmetros utilizados e os cálculos realizados na determinação da vida útil de projeto estão explicitados no Anexo D. Os períodos de vida útil obtidos neste capítulo são generalizados para todas as estruturas e não só para as estruturas que são construídas na Ilha da Madeira. A sua representação foi realizada com uma escala vertical limitada a 50 anos pois é o tempo de vida escolhido para a realização da análise económica do Capítulo 5.

### **3.3 MÉTODOS DE REPARAÇÃO**

Dado que a corrosão é a principal patologia das estruturas de betão armado e das estruturas metálicas é necessário reparar as estruturas por forma a impedir a sua progressão.

Existem vários métodos de reparação das estruturas para protegê-las da corrosão, entre as quais estão a utilização de produtos de impregnação para preenchimento parcial dos poros e revestimento, tais como pinturas, resinas epoxídicas, silicones, por forma a proteger as estruturas da penetração dos agentes agressivos, reparações eletroquímicas e substituição parcial ou total do material deteriorado [9,44].

De seguida serão apresentados os métodos de reparação mais comumente utilizados nas estruturas de betão armado e estruturas metálicas.

#### **3.3.1 Betão Armado**

As estruturas de betão armado têm sido protegidas da corrosão por diversos métodos, entre os quais se destacam a utilização de pinturas inibidoras de corrosão, a reparação eletroquímica, a utilização de inibidores de corrosão e a substituição parcial ou total do betão de recobrimento por outro de melhor qualidade [3,9].

##### **3.3.1.1 Reparação eletroquímica**

Uma reparação eletroquímica é definida pela aplicação de um campo elétrico, entre um elemento externo à estrutura e as armaduras de betão armado, que leva à interrupção da corrosão destes elementos, sem remoção do betão não delaminado [9].

Os métodos de realização de reparação eletroquímica em estruturas de betão armado são:

- **Proteção catódica**

A proteção catódica consiste na passagem de corrente de baixa intensidade entre as armaduras e um ânodo aplicado à superfície do betão, de forma a estas funcionarem como cátodo e reduzir assim a corrosão a valores ínfimos. Esta técnica permite a remoção de íões cloreto da camada de betão superficial mas também a restauração da película passiva das armaduras, devido aos íões hidróxido que restituem a alcalinidade do betão. Essa proteção pode ser feita utilizando ânodos sacrificiais que se dissipam gradualmente ou impondo uma corrente elétrica [9].

- **Realcalinização**

A realcalinização é uma técnica indicada para estruturas com corrosão originada por carbonatação uma vez que restaura a película passiva por aumento de pH da água existente nos poros de betão. Esta consiste na passagem de uma corrente elétrica entre um ânodo (que no caso desta técnica é uma pasta de celulose com carbonato de sódio) e a armadura. O eletrólito é transportado para o betão carbonatado por electro-osmose e migração de íões, em que no início do tratamento formam-se produtos de reação alcalinos junto à armadura e no final todas as zonas entre as armaduras e a superfície do betão são altamente alcalinas [9].

### 3.3.1.2 Substituição do Betão contaminado

Este método, tal como o nome indica, consiste em substituir o betão contaminado por um betão de melhor qualidade ou por uma argamassa de reparação, diminuindo assim a velocidade de deterioração devido aos agentes agressivos. Esta reparação pode ser feita através da substituição total ou parcial do betão [9].

Na reparação por substituição parcial de betão o agente agressor não é completamente removido do betão, o que acaba por ser uma solução pouco durável e que requer novas intervenções de reparação num curto/médio prazo. Para além disso, esta solução poderá mesmo agravar o problema nas zonas adjacentes à reparação uma vez que poderá potenciar a corrosão das armaduras nessas zonas. A reparação por substituição total do betão é uma solução eficaz e com maior durabilidade mas requer grandes custos iniciais [3,9].

### 3.3.1.3 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são substâncias químicas, em pó, líquido ou gel, que, se forem aplicados na superfície de estruturas já construídas reduzem a velocidade de corrosão e se aplicados durante o fabrico de betão retarda o início da corrosão. O controlo ou retardamento da corrosão deve-se à formação de uma camada muito fina de compostos químicos à superfície do betão [9].

Quando os inibidores de corrosão são introduzidos na produção do betão e este é de boa qualidade o retardamento da corrosão é eficaz, ao contrário do que acontece se este for aplicado à

superfície de betão, uma vez que se o betão apresentar baixo coeficiente de difusão o inibidor não chega às armaduras não as podendo proteger [9].

### 3.3.1.4 Custos de reparação

Na Tabela 3.15 é apresentado o tipo de reparação que será utilizado na análise económica a longo prazo (Capítulo 5), nas estruturas de betão armado. Os preços e as designações das reparações foram obtidos da plataforma CYPE – Gerador de preços para construção civil [54]. Esta plataforma, que vem sendo cada vez mais usada, apresenta valores médios dos custos dos trabalhos de construção em Portugal, podendo apresentar algumas diferenças face aos valores praticados na Ilha da Madeira.

Tabela 3.15 - Tipo de reparação mais utilizada nas estruturas de betão armado (adaptado de [54])

Tipo de reparação	Pequenas reparações	Grandes reparações
<b>Reparação por substituição do betão contaminado</b>	Picagem com martelo elétrico, eliminando o betão em mau estado com posterior reparação estrutural do elemento de betão através da aplicação manual de argamassa leve.	Picagem com martelo elétrico, eliminando o betão em mau estado até chegar às armaduras. Projeção a seco de jato de partículas de material abrasivo para o saneamento de armaduras de aço. Primário ativo, a base de cimento, para a proteção de armaduras de aço e como ligante entre argamassas frescas e betão endurecido, e posterior reparação estrutural do elemento de betão através da aplicação manual de argamassa leve
	<b>80,60 €/m<sup>2</sup></b>	<b>102,00 €/m<sup>2</sup></b>

### 3.3.2 Estrutura Metálica

As estruturas metálicas também têm sido protegidas da corrosão por diversos métodos, entre os quais se destacam manutenção dos revestimentos, a proteção catódica e a substituição total ou parcial dos elementos estruturais [44].

#### 3.3.2.1 Manutenção dos revestimentos

O método de reparação mais comum em estruturas metálicas é a manutenção dos revestimentos metálicos e/ou de pintura empregues antes da sua aplicação em obra, em que esses revestimentos já foram mencionados na Subsecção 3.1.2. Muitas vezes é mais fácil e económico retirar completamente o revestimento e voltar a aplicar em toda a estrutura do que fazer manutenção apenas nas partes danificadas. Para realizar a manutenção desses revestimentos é necessário remover os produtos de corrosão e o material que prejudica a adesão do primário ao substrato de aço [44].

#### 3.3.2.2 Proteção catódica

Este tipo de reparação nas estruturas metálicas ocorre do mesmo modo que no betão armado mas a corrente é passada não através do betão mas sim através do revestimento aplicado e não permite a restauração da película passiva [44].

### 3.3.2.3 Substituição total ou parcial de elementos estruturais

Este tipo de reparação consiste na remoção do elemento deteriorado e substituí-lo total ou parcialmente por um elemento novo. Normalmente é mais económico a substituição total quando existem danos muito extensos [44].

### 3.3.2.4 Custos de reparação

As reparações que irão ser utilizadas na análise económica a longo prazo, nas estruturas metálicas, são as apresentadas na Tabela 3.16, em que os preços e as designações das reparações foram igualmente obtidos da plataforma CYPE – Gerador de preços para construção civil [54].

Tabela 3.16 - Tipos de reparações mais utilizados nas estruturas metálicas (adaptado de [54])

Tipo de Aço	Tipo de reparação	Pequenas reparações	Grandes reparações
Aço Carbono	Pintura da Estrutura	Estrutura lavada a alta pressão com água e uma solução de água e lixívia a 10%, com posterior pintura com tinta plástica.	Estrutura lavada a alta pressão com água e uma solução de água e lixívia a 10%, com escovagem e lixagem das zonas oxidadas ou em mau estado, com posterior pintura com tinta plástica.
		<b>18,20 €/m<sup>2</sup></b>	<b>27,50 €/m<sup>2</sup></b>
Aço Inoxidável	Limpeza da Estrutura	Estrutura lavada a alta pressão com água e uma solução de água e sabão para remover os resíduos que impedem o contacto do aço com o oxigénio.	
		<b>6,60 €/m<sup>2</sup></b>	

## 3.4 CENÁRIOS DE DEGRADAÇÃO E MANUTENÇÃO

Em Portugal, o tema da manutenção em edifícios, ainda não é muito popular. A quase ausência de interesse sobre esta matéria conduz a resultados visíveis em muitas construções portuguesas, degradação, pelo facto de se optarem consecutivamente por ações de correção quando o problema já se encontra instalado. A manutenção surge como uma solução para estender o tempo de serviço das edificações, bem como a qualidade oferecida por estas aos utilizadores [55].

A realização de cenários de degradação e manutenção tem como propósito estimar os períodos de tempo em que são necessárias reparações, sejam elas grandes ou pequenas, por forma a evitar procedimentos bastante dispendiosos [55].

Os cenários de degradação e manutenção estudados nesta dissertação tiveram em conta algumas variáveis, em que as principais são o tipo de dono de obra e tipo de aço. Os donos de obra considerados são o dono ativo, em que este efetua reparações mais pequenas em períodos de tempo mais curtos e o dono inativo, em que este realiza reparações maiores em períodos de tempo mais longos.

Nas próximas subsecções serão apresentados os cenários de degradação e manutenção para os dois tipos de estruturas.

### 3.4.1 Betão Armado

Os cenários para o betão armado foram realizados através do tempo de vida útil de projeto para a classe de exposição XS1, num período de vida da estrutura de 50 anos, e tiveram em conta os cenários da Tabela 3.17.

Os cenários de degradação para a carbonatação não foram determinados pois foi considerado que a corrosão era induzida por sais marinhos transportados pelo vento, mas sem contacto direto com água do mar. As reparações a fazer são as designadas como grandes reparações quando a profundidade de cloretos é igual ao recobrimento e pequenas reparações quando esta é inferior ao recobrimento. Os recobrimentos das estruturas de betão armado são os mesmos utilizados nos dimensionamentos, ou seja 50 mm para as estruturas com aço carbono e 30 mm para as estruturas com aço inoxidável.

Tabela 3.17 - Betão armado: Combinações de fatores na determinação dos cenários de degradação e manutenção

Classe de exposição XS1					
Cenários	Tipo de aço	Dono de Obra	Distância à Linha de Costa	Tipo de cimento	
Cenário 1	CarbAtPmT1	Carbono	Ativo	0-2 km	CEM I;CEM II/A
	CarbInPmT1		Inativo		
	InoxAtPmT1	Inoxidável	Ativo		
	InoxInPmT1		Inativo		
Cenário 2	CarbAtPmT2	Carbono	Ativo	0-2 km	CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V
	CarbInPmT2		Inativo		
	InoxAtPmT2	Inoxidável	Ativo		
	InoxInPmT2		Inativo		
Cenário 3	CarbAtLmT1	Carbono	Ativo	≥ 2 km	CEM I;CEM II/A
	CarbInLmT1		Inativo		
	InoxAtLmT1	Inoxidável	Ativo		
	InoxInLmT1		Inativo		
Cenário 4	CarbAtLmT2	Carbono	Ativo	≥ 2 km	CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V
	CarbInLmT2		Inativo		
	InoxAtLmT2	Inoxidável	Ativo		
	InoxInLmT2		Inativo		
Carb – Aço Carbono Inox – Aço Inoxidável At – Dono de obra ativo In – Dono de obra Inativo			Pm – Distância à linha de costa: 0-2 km Lm - Distância à linha de costa: ≥ 2 km T1 - CEM I;CEM II/A T2 - CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		

Através da tabela anterior foi então possível determinar os cenários de degradação dos dois tipos de aço.

Para os cenários das estruturas com cimento CEM I ou CEM II/A e aço carbono, tanto perto como longe do mar, o período de vida útil de projeto é menor que o período de vida da estrutura, 50 anos, o que significa que é necessário realizar grandes reparações pois a profundidade crítica de cloretos já atingiu a totalidade do recobrimento. Nesses cenários, os períodos entre reparações são

### CAPÍTULO 3

iguais ao tempo de vida útil de projeto. Por outro lado, para as estruturas com aço inoxidável e para estruturas com aço carbono e CEM II/B até CEM V, o tempo de vida da estrutura é inferior ao tempo de vida útil de projeto, o que significa que a profundidade crítica de cloretos não atingiu a armadura. Por esta razão foram estimados cenários em que se realizam apenas pequenas reparações.

Numa primeira fase foram calculados os cenários para o dono de obra inativo. A necessidade de reparações aconteceu sempre que a profundidade de cloretos atingiu o valor do recobrimento ou foi atingido o período de vida útil da estrutura (50 anos). Numa segunda fase foram calculados os cenários para os donos de obra ativos. A necessidade de reparações aconteceu sempre que a profundidade de cloretos atingiu 60% do valor do recobrimento ou foi atingido o período de vida útil da estrutura (50 anos).

Nas Figuras 3.15 a 3.22 apresentam-se as curvas da profundidade de cloretos dos diversos cenários, que foram obtidas com base na Equação (3.4).

Os cenários 1, são os cenários mais gravosos em relação à corrosão, pois são cenários de estruturas próximas do mar e constituídas por cimentos com maior difusão de cloretos (Figuras 3.15 e 3.16).

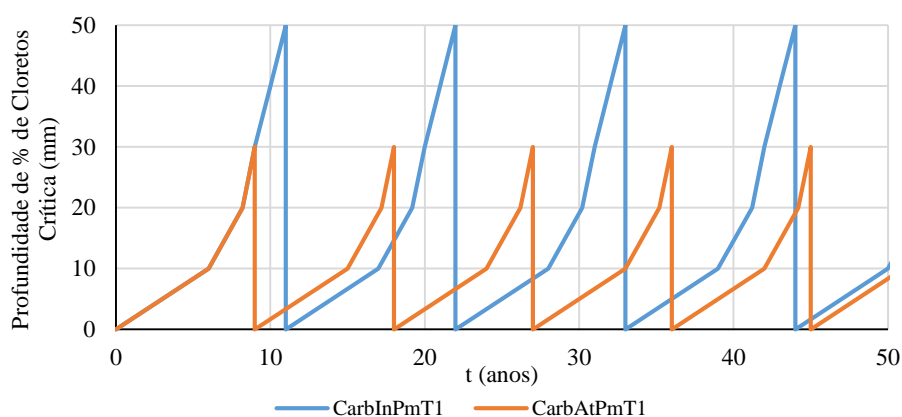


Figura 3.15 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 1

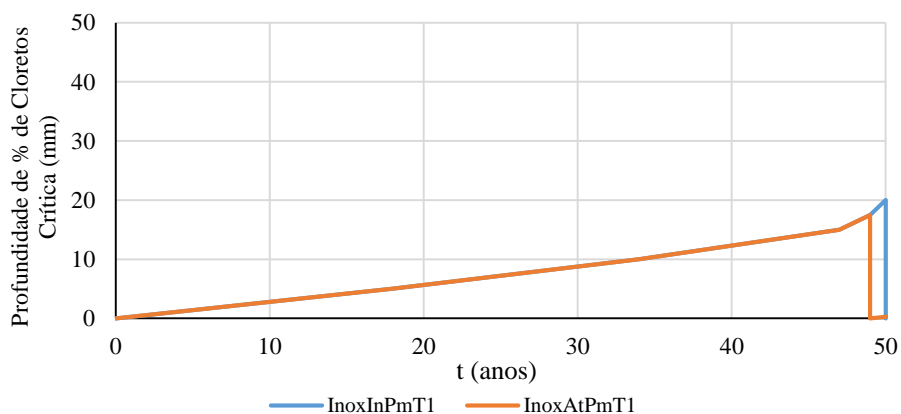


Figura 3.16 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 1

Da análise das figuras dos cenários 1, pode-se observar que para o aço carbono serão necessárias mais reparações que para o aço inoxidável e, as profundidades a reparar tanto para o dono de obra ativo como o inativo serão maiores, pois os recobrimentos das estruturas com aço carbono são maiores.

Os cenários 2, apesar das estruturas estarem próximas do mar são constituídas por cimentos com menor difusão de cloretos, o que diminui a sua gravidade em relação à corrosão (Figuras 3.17 e 3.18).

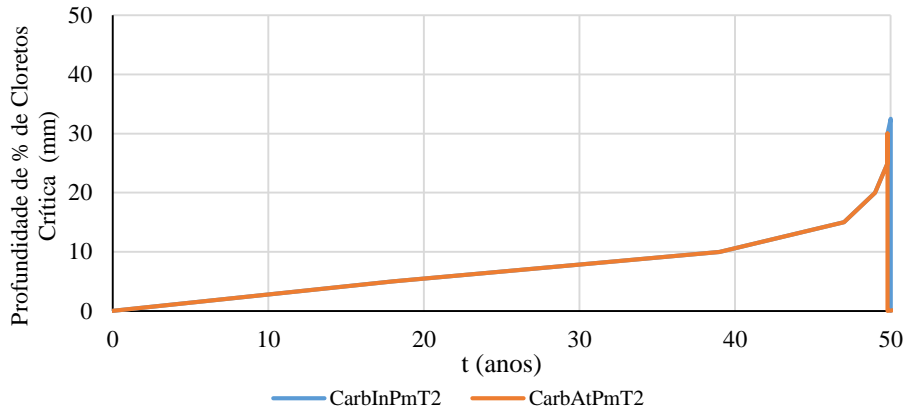


Figura 3.17 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 2

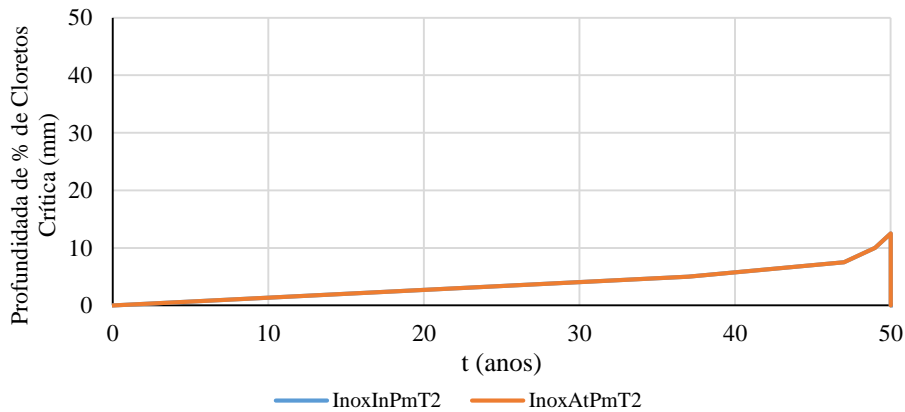


Figura 3.18 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 2

Da observação das figuras dos cenários 2 verifica-se que a velocidade propagação dos cloretos é menor. Deste modo, para o aço carbono o número de reparações diminui drasticamente face ao cenário 1, enquanto para o aço inoxidável deixa de ser necessária a única reparação existente no cenário 1.

Os cenários 3, embora o cimento utilizado tem maior difusão de cloretos, as estruturas situam-se longe do mar, o que implica que existe menor teor de cloretos à superfície do betão, diminuindo assim a sua gravidade em relação à corrosão (Figuras 3.19 e 3.20).

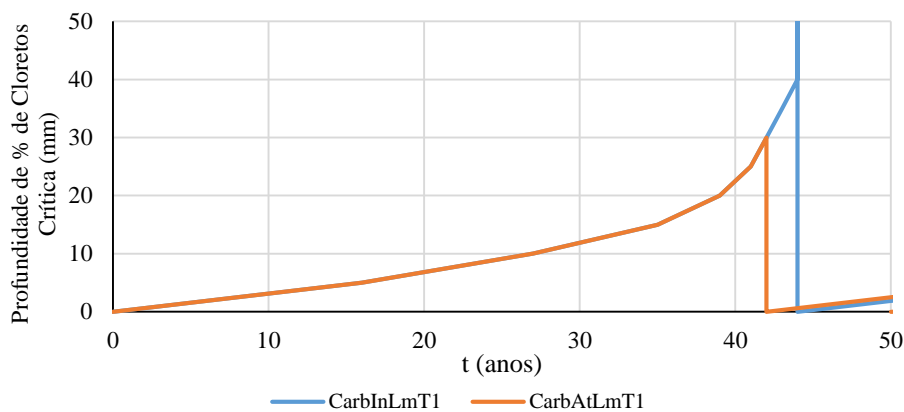


Figura 3.19 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 3

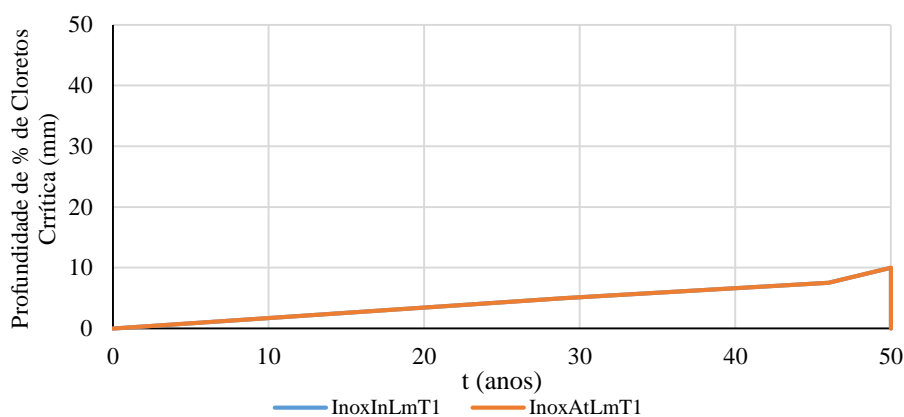


Figura 3.20 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 3

Analisando as figuras dos cenários 3, verifica-se que as estruturas com aço inoxidável não necessitam de reparações daí ser efetuada apenas a reparação dos 50 anos, tanto para o dono de obra ativo como para o dono de obra inativo. Como seria de esperar as estruturas com aço carbono apresentam uma velocidade de propagação dos cloretos inferior ao cenário 1. Tal como nos casos anteriores a profundidade a reparar nas estruturas com aço carbono é mais elevada, o que implicará maiores custos com manutenções.

Os cenários 4, são os menos gravosos, pois as estruturas para além de estarem localizadas longe do mar, são também constituídas por cimentos com menor difusão de cloretos (Figuras 3.21 e 3.22).

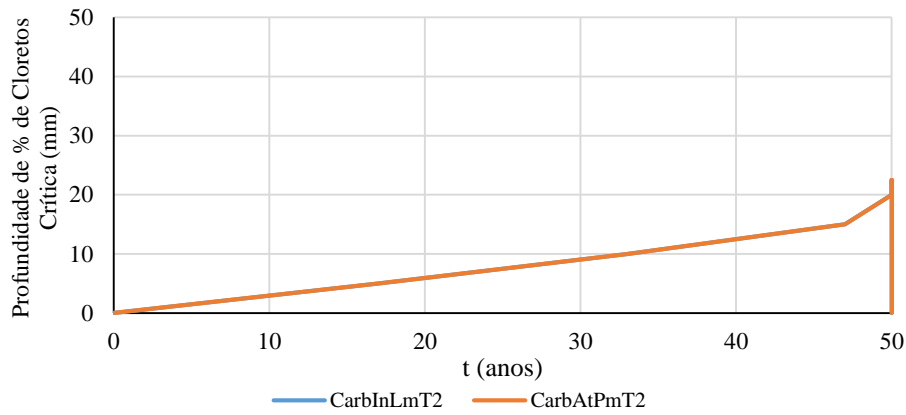


Figura 3.21 - Aço Carbono: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 4

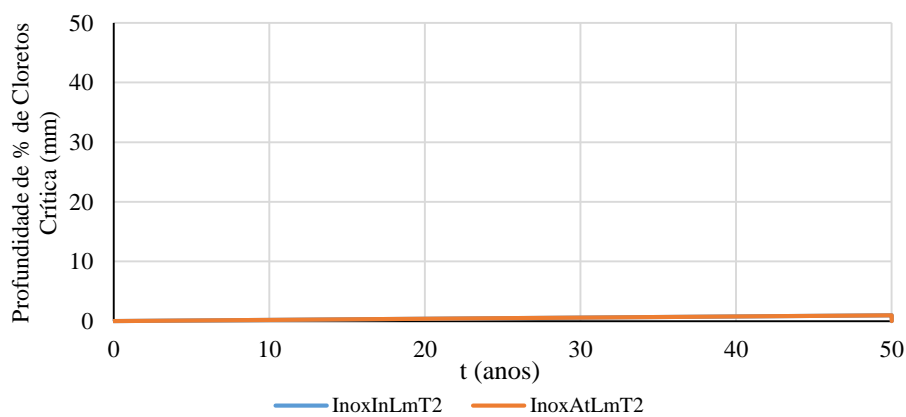


Figura 3.22 - Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 4

Observando as figuras dos cenários 4, conclui-se que tanto o aço inoxidável como o aço carbono não necessitam de reparações, sendo unicamente necessário efetuar a reparação dos 50 anos.

De um modo geral as profundidades a reparar nas estruturas com aço inoxidável são menores, donde se pode concluir que o uso de estruturas com aço inoxidável irá implicar menores custos com manutenções ao longo da vida útil da estrutura.

### 3.4.2 Estrutura Metálica

Nas estruturas metálicas os intervalos entre reparações não foram traduzidos por modelos de degradação. A determinação desses intervalos teve em conta o tempo de vida do sistema de pintura entre o instante de aplicação e o instante em que se verifica a necessidade de uma grande manutenção por repintura. A classificação da durabilidade da pintura é especificada segundo a ISO 12944 como: baixa, 2 a 5 anos, média, 5 a 15 anos, e alta, mais de 15 anos [56].

Para estruturas a uma distância inferior a 2 km foi adotado um período entre reparações de 5 anos, para os donos de obra inativos, e 3 anos, para os donos de obra ativos. Por outro lado, para as estruturas a uma distância igual ou superior a 2 km os períodos utilizados foram de 15 e 10 anos, para os donos de obra inativos e ativos respetivamente. Para os donos de obra inativos as reparações

### CAPÍTULO 3

a realizar serão as designadas por grandes reparações e para os donos de obra ativos as pequenas reparações.

Embora os tempos entre manutenções sejam iguais, as tarefas a realizar e os seus custos são diferentes. Na estrutura com aço carbono a manutenção a realizar é pintar a estrutura e na estrutura com aço inoxidável é limpar a estrutura de forma a limpar os resíduos acumulados, como descrito na Tabela 3.16.

Os cenários das estruturas metálicas foram realizados através da Tabela 3.18 e podem ser observados nas Figuras 3.23 e 3.24 as suas representações.

Tabela 3.18 - Estruturas Metálicas: Combinações de fatores na determinação dos cenários de degradação e manutenção

Cenário		Tipo de aço	Dono de Obra	Distância à linha de costa
<b>Cenário 5</b>	AtPm	Carbono/ Inoxidável	Ativo	0-2 km
	InPm	Carbono/ Inoxidável	Inativo	
<b>Cenário 6</b>	AtLm	Carbono/ Inoxidável	Ativo	≥ 2 km
	InLm	Carbono/ Inoxidável	Inativo	

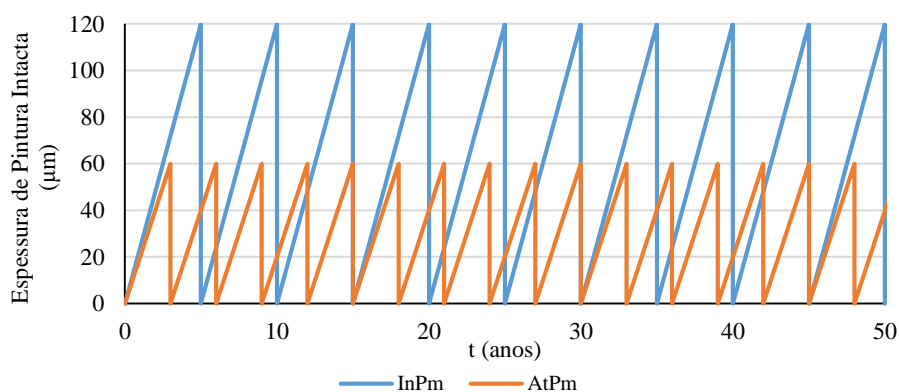


Figura 3.23 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 5

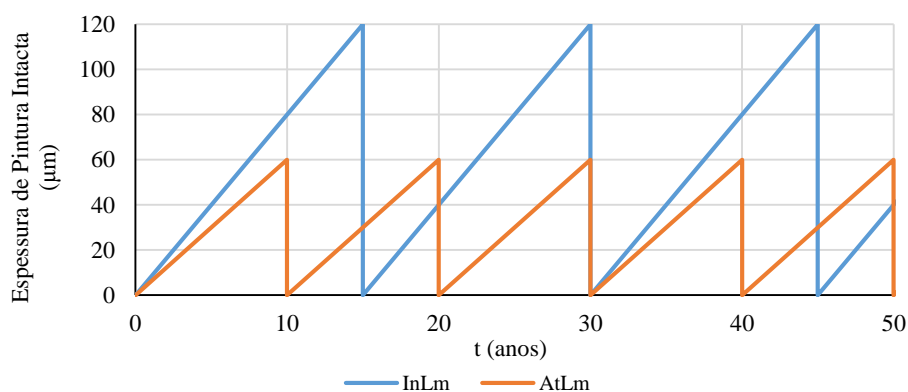


Figura 3.24 - Aço Carbono e Aço Inoxidável: Cenários de degradação e manutenção - Cenário 6

Tal como os períodos de vida útil obtidos, os cenários de degradação apresentados neste capítulo são generalizados para todas as estruturas e não só para as estruturas que são construídas na Ilha da Madeira.

# DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento do dimensionamento de duas estruturas, uma metálicas e uma de betão armado, situadas na Ilha da Madeira, em que essas estruturas por sua vez foram dimensionadas para dois tipos de aço, o aço carbono e o aço inoxidável, perfazendo um total de quatro estruturas.

O aço inoxidável escolhido foi igual para os dois tipos de estruturas, aço austenítico 1.4301, e foi devido essencialmente à sua tensão de cedência. Essa escolha recaiu também na facilidade de obtenção dos seus preços unitários, tanto como varão estrutural como perfil metálico, e por este ser um dos aços inoxidáveis mais utilizados para fins estruturais.

Os dimensionamentos apresentados de forma resumida neste capítulo foram realizados não só com o objetivo de comparar os pesos das estruturas, mas também para serem alvo de um estudo económico no Capítulo 5. Nos Anexos B e C encontram-se os cálculos detalhados do projeto das quatro estruturas.

## 4.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

O dimensionamento das estruturas metálicas foi realizado através de um pórtico adaptado da tese de Cardoso [2]. O pórtico adotado é constituído por 7 vigas, com 10 m de comprimento, e 6 pilares, com 14 m de comprimento. Os perfis utilizados nas vigas foram os IPE's e nos pilares os HEA's. A representação da estrutura é apresentada nas Figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.1 - Representação da estrutura metálica estudada em perspetiva

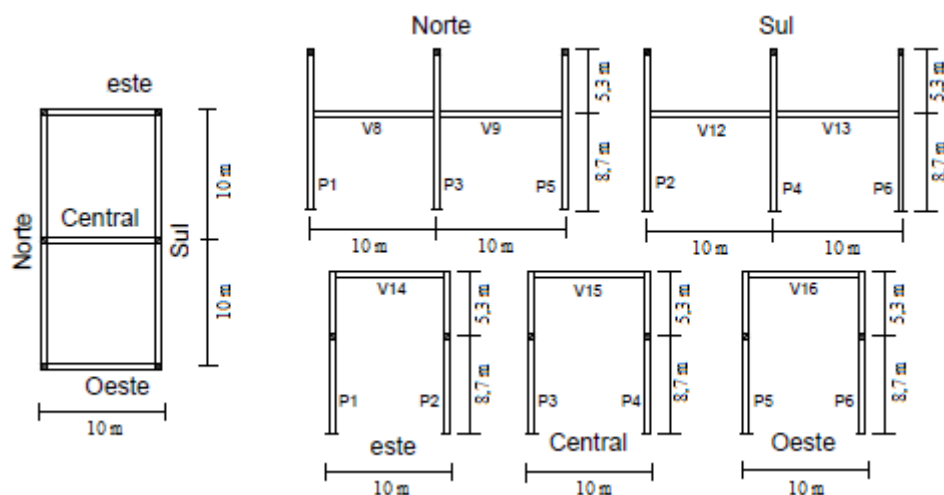


Figura 4.2 - Planta e alçados dos pórticos para as estruturas metálicas

Após a escolha da estrutura a dimensionar, foi necessário determinar os materiais e as ações a que as estruturas estavam sujeitas, para posterior dimensionamento e estimativa dos pesos das estruturas.

#### 4.1.1 Materiais

Para os perfis em aço carbono foi utilizado o S235 com as seguintes propriedades: tensão de cedência ( $f_y$ ) de 235 MPa, tensão última à tração ( $f_u$ ) de 360 MPa, módulo de elasticidade (E) de 210 GPa, módulo de distorção (G) de 81 GPa e coeficiente de Poisson em regime elástico ( $\nu$ ) de 0,3.

Para os perfis em aço inoxidável foi utilizado o aço austenítico 1.4301 com as seguintes propriedades: tensão de cedência ( $f_y$ ) de 210 MPa, tensão última à tração ( $f_u$ ) de 520 MPa, módulo de elasticidade (E) de 200 GPa, módulo de distorção (G) de 77 GPa e coeficiente de Poisson em regime elástico ( $\nu$ ) de 0,3.

Com o objetivo de realizar uma comparação realista escolheu-se um aço inoxidável com uma tensão de cedência o mais próximo possível do aço carbono.

#### 4.1.2 Ações

Em ambos os dimensionamentos foi considerado como ações permanentes o peso específico da estrutura e como ações variáveis o sismo e o vento. As sobrecargas não foram usadas por se tratar de uma estrutura de piso térreo.

A quantificação da ação sísmica sobre a estrutura realizou-se segundo o RSA, que considera o país dividido por 4 zonas. Visto que a estrutura em estudo, se situa no arquipélago da Madeira, pertence assim à zona sísmica D, sendo influenciada por um coeficiente de sismicidade,  $\alpha$ , igual a 0,3, coeficiente de comportamento,  $\eta$ , igual a 2,5, e coeficiente de amortecimento,  $\xi$ , igual a 5%. Quanto à natureza do terreno, considerou-se que este era constituído por solos coerentes muito duros

remetendo-nos para as características de um solo do Tipo II [57]. Nestes dimensionamentos foi tido em conta a análise sísmica mediante a utilização de espectros de resposta inseridos diretamente no programa de modelação estrutural SAP2000.

Para efeitos da quantificação da ação do vento foi utilizado também o RSA, do qual verificou-se que a estrutura era implantada na zona B (arquipélago da Madeira), mais propriamente em zonas rurais ou preferia de zonas urbanas, apresentando uma rugosidade aerodinâmica do solo do Tipo II.

Através, dos dados apresentados na Tabela 4.1 foi possível determinar os coeficientes de pressão a aplicar nas estruturas e conseqüentemente calcular as pressões, nas diferentes fachadas.

Tabela 4.1 - Dados para o cálculo dos efeitos da ação do vento

<b>Zonamento território:</b>	B
<b>Altura acima do solo (m):</b>	14,0
<b>Rugosidade aerodinâmica do solo:</b>	Tipo II
<b>Maior dimensão em planta (m)</b>	20
<b>Menor dimensão em planta (m)</b>	10

Na Tabela 4.2 são apresentadas as pressões do vento aplicadas na estrutura e a sua representação em planta na Figura 4.3.

Tabela 4.2 - Cálculo das pressões do vento a aplicar na estrutura

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
$\delta_{pe} (\alpha=0^\circ)$	+0,7	-0,3	-0,7	-0,7
$\delta_{pi}^*$		-0,3		
$w_k$ (KN/m <sup>2</sup> )		1,08**		
<b>q (KN/m<sup>2</sup>)</b>	+1,08	0	-0,41	-0,41

\*Quatro fachadas com permeabilidade semelhante  
 \*\*Valor  $w_k$  multiplicado por 1,2 por ser da zona B

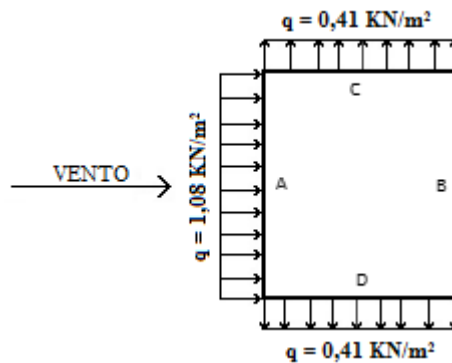


Figura 4.3 - Representação em planta das fachadas e pressões do vento aplicadas

## CAPÍTULO 4

Depois de definidas as ações foi realizada a modelação das estruturas no programa de cálculo automático SAP2000 e foram tidas em conta as seguintes combinações:

- ELU-CSIX - Combinação Sísmica para o sismo tipo I na direção X
- ELU-CSIY - Combinação Sísmica para o sismo tipo I na direção Y
- ELU-CSIIX - Combinação Sísmica para o sismo tipo II na direção X
- ELU-CSIIY - Combinação Sísmica para o sismo tipo II na direção Y
- ELU-W,A - Combinação Fundamental com o vento a atuar na fachada A como ação variável base.
- ELU-W,B - Combinação Fundamental com o vento a atuar na fachada B como ação variável base.
- ELU-W,C - Combinação Fundamental com o vento a atuar na fachada C como ação variável base.
- ELU-W,D - Combinação Fundamental com o vento a atuar na fachada D como ação variável base.

Em que os coeficientes de segurança utilizados foram os da Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Estruturas metálicas: Coeficientes de combinação utilizados

Combinações/ Ações	Peso próprio	Vento A	Vento B	Vento C	Vento D	Sismo
<b>ELU-CSIX</b>	1	0	0	0	0	1,5
<b>ELU-CSIY</b>	1	0	0	0	0	1,5
<b>ELU-CSIIX</b>	1	0	0	0	0	1,5
<b>ELI-CSIIY</b>	1	0	0	0	0	1,5
<b>ELU-W,A</b>	1,35	1,5	0	0	0	0
<b>ELU-W,B</b>	1,35	0	1,5	0	0	0
<b>ELU-W,C</b>	1,35	0	0	1,5	0	0
<b>ELU-W,D</b>	1,35	0	0	0	1,5	0

### 4.1.3 Peso das Estruturas

Depois de efetuada a modelação foram retirados os esforços do SAP2000 e realizadas as devidas verificações. As verificações foram efetuadas para as combinações mais condicionantes, que são as ações do vento, das quais se obteve os perfis mencionados nas Tabelas 4.4 e 4.5, para as estruturas de aço carbono e aço inoxidável, respetivamente. As fórmulas utilizadas nas verificações podem ser consultadas no Anexo A e os cálculos realizados no Anexo B. Os cálculos realizados foram as verificações de segurança das seções transversais e verificações à flexão composta, para tal foi necessário classificar as seções transversais, das quais se concluí que todas as seções eram de classe 1.

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS

Tabela 4.4 - Aço Carbono: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados

		Eixo Este/ Oeste		Eixo Central	
		Pilares	Vigas	Pilares	Viga
<b>Elemento mais carregado</b>		1 e 5	14 e 16	3	15
<b>Vento A</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	8,81	6,95	11,07	9,81
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	171,51	51,45	232,30	69,33
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	2,98	0,00	0,00	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	38,72	12,34	53,06	15,84
<b>Vento C e D</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	24,86	0,17	20,67	0,17
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	68,78	4,29	67,16	4,29
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	1,87	0,00	0,00	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	20,55	2,43	13,43	2,42
<b>Perfil</b>		<b>HE280A</b>	<b>IPE270</b>	<b>HE280A</b>	<b>IPE270</b>

Tabela 4.4 (Continuação) - Aço Carbono: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados

		Eixo Norte			Eixo Sul		
		Pilares	Vigas		Pilares	Vigas	
<b>Elemento mais carregado</b>		3	1 e 5	8 e 9	4	2 e 6	12 e 13
<b>Vento A</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	11,07	8,81	0,54	30,51	23,80	0,32
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	232,30	171,51	4,53	67,54	51,58	4,87
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	0,00	2,98	0,00	0,00	1,99	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	53,06	38,72	2,55	9,81	7,21	2,66
<b>Vento C e D</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	20,67	24,86	22,51	15,31	21,24	21,96
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	67,16	68,78	36,92	58,68	63,19	46,92
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	0,00	1,87	0,00	0,00	1,46	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	13,43	20,55	8,28	12,89	21,07	9,54
<b>Perfil</b>		<b>HE280A</b>	<b>HE280A</b>	<b>IPE270</b>	<b>HE220A</b>	<b>HE220A</b>	<b>IPE270</b>

Tabela 4.5 - Aço Inoxidável: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados

		Eixo Este/ Oeste		Eixo Central	
		Pilares	Vigas	Pilares	Viga
<b>Elemento mais carregado</b>		1 e 5	14 e 16	3	15
<b>Vento A</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	11,44	6,07	10,77	8,59
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	181,02	54,00	232,30	63,56
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	3,19	0,00	0,00	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	39,57	12,02	52,74	15,32
<b>Vento C e D</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	26,67	0,17	23,10	0,17
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	71,62	4,18	70,07	4,19
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	2,01	0,00	2,03	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	20,50	2,45	13,43	2,44
<b>Perfil</b>		<b>HE300A</b>	<b>IPE270</b>	<b>HE300A</b>	<b>IPE270</b>

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.5 (Continuação) - Aço Inoxidável: Resumo dos esforços mais condicionantes e perfis adotados

		Eixo Norte			Eixo Sul		
		Pilares		Vigas	Pilares		Vigas
<b>Elemento mais carregado</b>		3	1 e 5	8 e 9	4	2 e 6	12 e 13
<b>Vento A</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	10,77	11,44	0,58	30,15	23,48	0,32
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	232,30	181,02	4,42	58,64	44,61	4,87
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	0,00	3,19	0,00	0,00	2,00	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	52,74	39,57	2,52	8,14	6,29	2,66
<b>Vento C e D</b>	<b>N<sub>Ed</sub> (kN)</b>	23,10	26,67	22,57	15,29	21,22	21,96
	<b>M<sub>y</sub> (kNm)</b>	70,07	71,62	33,62	58,65	63,18	44,89
	<b>M<sub>z</sub> (kNm)</b>	2,03	2,01	0,00	1,50	1,48	0,00
	<b>V<sub>Ed</sub> (kN)</b>	13,43	20,5	7,78	12,88	21,07	9,54
<b>Perfil</b>		<b>HE300A</b>	<b>HE300A</b>	<b>IPE270</b>	<b>HE220A</b>	<b>HE220A</b>	<b>IPE270</b>

Através dos perfis obtidos foi determinado o peso das estruturas para os dois tipos de aço, o qual verifica-se que o peso da estrutura com o aço 1.4301 é superior ao da estrutura com aço S235, como se pode observar nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Aço Carbono: Determinação do peso da estrutura

Perfis	Quantidade	Comprimento	Massa linear	Peso	Peso da estrutura
			m	kg/m	kg
<b>Vigas IPE 270</b>	4	10	36,1	1.444,0	<b>7.856,8</b>
	3		36,1	1.083,0	
<b>Pilares HE220A</b>	3	14	50,5	2.121,0	
	3		HE280A	76,4	

Tabela 4.7 - Aço Inoxidável: Determinação do peso da estrutura

Perfis	Quantidade	Comprimento	Massa linear	Peso	Peso da estrutura
			m	kg/m	kg
<b>Vigas IPE 270</b>	4	10	36,1	1.444,0	<b>8.146,6</b>
	3		36,1	1.083,0	
<b>Pilares HE220A</b>	3	14	50,5	2.121,0	
	3		HE300A	83,3	

## 4.2 ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

O dimensionamento das estruturas de betão armado foi concretizado através de um pórtico constituído por 3 pisos com pé direito de 3,00 m. O tipo de laje utilizado foi a vigada com uma espessura de 0,20 m, em que cada painel de laje tem uma área de 5,00 m x 5,00 m. Para as vigas foi

utilizado uma seção transversal de  $0,30 \times 0,50 \text{ m}^2$  e para os pilares foram utilizados dois tipos de seção:  $0,30 \times 0,30 \text{ m}^2$  para os pilares de canto e  $0,30 \times 0,50 \text{ m}^2$  para os restantes pilares. A representação da estrutura é apresentada nas Figuras 4.4 e 4.5.

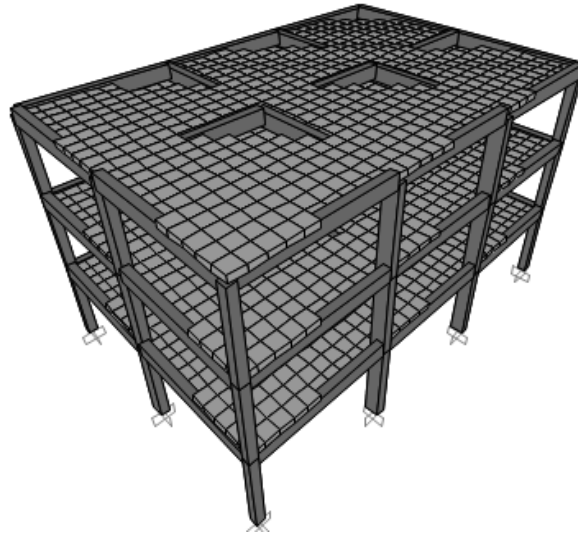


Figura 4.4 - Representação da estrutura de betão armado estudada em perspetiva

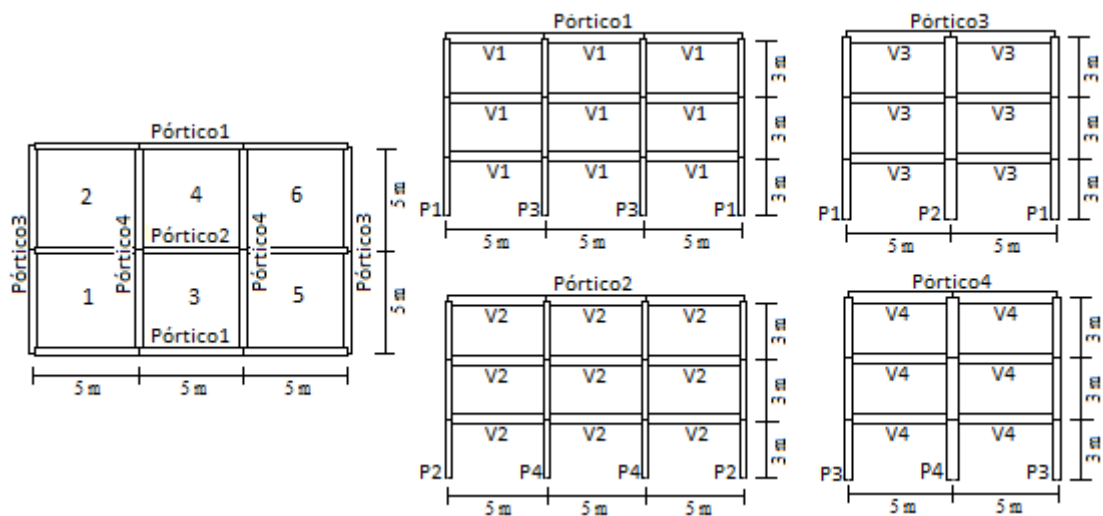


Figura 4.5 - Planta e alçados do pórtico para as estruturas de betão armado

Após a escolha da estrutura a dimensionar, foi necessário determinar os materiais e as ações a que as estruturas estavam sujeitas, tal como foi feito para as estruturas metálicas, para posterior dimensionamento e estimativa dos pesos das armaduras.

#### 4.2.1 Materiais

Os materiais utilizados para os dimensionamentos foram o C30/37 para o betão e para as armaduras o A500, para as estruturas com aço carbono, e o 1.4301 (304), para as estruturas com aço

## CAPÍTULO 4

inoxidável. Embora os materiais sejam diferentes as principais propriedades de dimensionamento são iguais (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Principais características dos materiais utilizados.

<b>Materiais</b>			
<b>C30/37</b>		<b>A500/ 1,4301 (304)</b>	
<b>f<sub>cd</sub> (MPa)</b>	20	<b>f<sub>yd</sub> (MPa)</b>	435
<b>f<sub>ck</sub> (MPa)</b>	30	<b>f<sub>yk</sub> (MPa)</b>	500
<b>f<sub>ctm</sub> (MPa)</b>	2,9	<b>ε<sub>yd</sub> (MPa)</b>	2,18
<b>E<sub>C 28</sub> (GPa)</b>	33	<b>E<sub>S</sub> (GPa)</b>	200

De acordo com o adotado nos cenários de degradação no Capítulo 3 os recobrimentos utilizados foram 50 mm para as estruturas com aço carbono e 30 mm para as estruturas com aço inoxidável.

### 4.2.2 Ações

Em ambos os dimensionamentos foi considerado como ações permanentes os pesos próprios dos elementos estruturais e não estruturais (e.g. paredes e pavimentos) e como ações variáveis as sobrecargas, o sismo e o vento.

As ações permanentes utilizadas foram o peso específico do betão armado (25 kN/m<sup>3</sup>), a carga distribuída das paredes divisórias (2,3 kN/m<sup>2</sup>), o peso dos revestimentos usuais de pavimentos (1,5 kN/m<sup>2</sup>) e o peso das paredes exteriores (9,0 kN/m). Para a quantificação das paredes exteriores considerou-se uma carga linear a descarregar diretamente sobre as vigas de bordadura, considerando o peso do bloco por altura de parede (3,0 kN/m<sup>2</sup> x 3,0 m). Para a ação variável sobrecarga esta foi empregue com o valor de 2 kN/m<sup>2</sup>.

As ações variáveis do sismo e do vento foram as mesmas que as consideradas nas estruturas metálicas, pois, embora as dimensões em planta e a altura da estrutura de betão armado sejam diferentes, as pressões aplicadas nas estruturas deram os mesmos valores.

Na presente modelação para além das combinações utilizadas nas estruturas metálicas foram consideradas também as seguintes combinações:

- CQP - Combinação Quase Permanente com sobrecarga como ação variável base
- FREQUENTE - Combinação Freqüente com sobrecarga como ação variável base
- RARA - Combinação Rara com sobrecarga como ação variável base
- ELU-Vertical - Estado Limite Último

Em que os coeficientes de segurança utilizados foram os da Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Estruturas de betão armado: Coeficientes de combinação utilizados

Combinações/ Ações	Peso próprio	RCP	RCP (viga,ext)	SC	Vento A	Vento B	Vento C	Vento D	Sismo
ELU-CSIX	1	1	1	0,2	0	0	0	0	1,5
ELU-CSIY	1	1	1	0,2	0	0	0	0	1,5
ELU-CSIX	1	1	1	0,2	0	0	0	0	1,5
ELI-CSIIY	1	1	1	0,2	0	0	0	0	1,5
ELU-W,A	1,35	1,35	1,35	1,5	1,5	0	0	0	0
ELU-W,B	1,35	1,35	1,35	1,5	0	1,5	0	0	0
ELU-W,C	1,35	1,35	1,35	1,5	0	0	1,5	0	0
ELU-W,D	1,35	1,35	1,35	1,5	0	0	0	1,5	0
CQP	1	1	1	0,2	0	0	0	0	0
FREQUENTE	1	1	1	0,3	0	0	0	0	0
RARA	1	1	1	1	0	0	0	0	0
ELU-Vertical	1,35	1,35	1,35	1,5	0	0	0	0	0

#### 4.2.3 Peso das Armaduras

Depois de efetuada a modelação foram retirados os esforços do SAP2000 e realizadas as devidas verificações, das quais foram escolhidas as armaduras necessárias. As fórmulas necessárias para fazer os devidos cálculos e verificações podem ser consultados no Anexo A. No Anexo B, estão representados os esforços, os cálculos e verificações necessárias para a escolha das armaduras dos diferentes elementos estruturais.

Para a determinação do comprimento dos varões nos diferentes elementos estruturais, foi usado uma sobreposição de 20% ao seu comprimento, para contabilizar os comprimentos de amarração e as emendas.

Os varões escolhidos para os diferentes elementos estruturais e os seus respetivos pesos são apresentados nas seções seguintes.

##### 4.2.3.1 Lajes

Tabela 4.10 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nas lajes

			Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/ Painel	Peso total
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg
Face Inferior	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ10	39,30	29,76	19,20	142,9	1.714,2
	Painéis 3 e 4	φ10	35,37	26,66	18,00	123,4	740,3
Face Superior	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ10	78,50	60,76	2,90	88,1	704,8
		φ12	90,50	71,20	2,90	103,2	413,0
	Painéis 3 e 4	φ6	25,43	20,46	18,65	53,0	636,1
		φ10	117,75	91,14	4,35	132,2	528,6
		φ12	135,75	106,80	4,35	154,9	309,7
		φ6	16,95	13,42	15,75	38,6	231,9
							<b>5.278,5</b>

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.11 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas lajes

			Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/Painel	Peso total	
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg	
Face Inferior	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ10	39,30	29,76	19,20	142,9	1.714,2	
	Painéis 3 e 4	φ10	35,37	26,66	18,00	123,4	740,3	
Face Superior	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ10	78,50	60,76	2,90	88,1	1.057,2	<b>5.172,6</b>
		φ6	25,43	20,46	18,65	53,0	636,1	
	Painéis 3 e 4	φ10	117,75	91,14	4,35	132,2	792,9	
		φ6	16,95	13,42	15,75	38,6	231,9	

### 4.2.3.2 Sapatas

Tabela 4.12 - Aço Carbono e Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas sapatas

		Direção	Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/Sapata	Peso total	
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg	
Sapata P1	φ10	x	5,11	3,72	2,20	8,2	65,5	
		y	5,11	3,72	2,20	8,2		
Sapata P2/3	φ10	x	12,56	9,30	2,90	27,0	323,6	<b>558,7</b>
		y	12,56	9,30	2,90	27,0		
Sapata P4	φ10	x	15,70	11,78	3,60	42,4	169,6	
		y	15,70	11,78	3,60	42,4		

Os pesos das armaduras das sapatas são iguais para os dois tipos de aço.

### 4.2.3.3 Pilares

Tabela 4.13 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nos pilares

			Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/Pilar	Peso total	
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg	
Armadura Longitudinal	P1	φ12	6,79	6,04	12,00	72,5	290,1	
		φ12	4,52	4,02	12,00	48,3	96,6	
	P2	φ16	8,04	12,70	12,00	152,4	304,9	
		φ12	4,52	4,02	12,00	48,3	193,1	<b>2.307,7</b>
	P3	φ16	8,04	12,70	12,00	152,4	609,8	
		P4	φ16	6,03	9,53	12,40	118,1	236,3
			φ20	9,42	23,27	12,40	288,5	577,0
		Armadura Transversal	P1	φ6	12,78	10,56	4,00	10,6
P2	φ6		12,78	10,56	5,60	14,8	51,1	<b>277,6</b>
P3	φ6		12,78	10,56	5,60	14,8	102,3	
P4	φ6		12,78	10,56	5,60	14,8	51,1	

Tabela 4.14 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nos pilares

			Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/ Pilar	Peso total
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg
<b>Armadura Longitudinal</b>	<b>P1</b>	<b>φ12</b>	6,79	6,04	12,00	72,5	290,1
	<b>P2</b>	<b>φ12</b>	4,52	4,02	12,00	48,3	96,6
		<b>φ16</b>	8,04	12,70	12,00	152,4	304,9
	<b>P3</b>	<b>φ12</b>	4,52	4,02	12,00	48,3	193,1
		<b>φ16</b>	8,04	12,70	12,00	152,4	609,8
	<b>P4</b>	<b>φ16</b>	12,06	19,05	12,40	236,3	472,6
		<b>φ12</b>	2,26	2,01	12,40	24,9	49,9
							<b>2.016,8</b>
<b>Armadura Transversal</b>	<b>P1</b>	<b>φ6</b>	12,78	10,56	4,64	12,3	73,0
	<b>P2</b>	<b>φ6</b>	12,78	10,56	6,24	16,5	51,1
	<b>P3</b>	<b>φ6</b>	12,78	10,56	6,24	16,5	102,3
	<b>P4</b>	<b>φ6</b>	12,78	10,56	6,24	16,5	51,1
		<b>φ6</b>	12,78	10,56	6,24	16,5	51,1
							<b>277,6</b>

#### 4.2.3.4 Vigas

Tabela 4.15 - Aço Carbono: Determinação do peso das armaduras nas vigas

			Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/ Viga	Peso total	
			cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	kg	
<b>Armadura Longitudinal</b>	<b>V1</b>	<b>AI φ12</b>	4,52	4,02	15,60	62,8	376,5	
		<b>AS φ16</b>	6,03	9,53	15,60	148,6	891,8	
	<b>V2</b>	<b>AI φ16</b>	6,03	9,53	15,60	148,6	445,9	
		<b>AS φ16</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	15,60	148,6	445,9
			<b>φ20</b>	3,14	7,76	15,60	121,0	363,0
	<b>V3</b>	<b>AI φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9	
		<b>AS φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9	
	<b>V4</b>	<b>AI φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9	
		<b>AS φ16</b>	8,04	12,70	10,60	134,7	807,9	
								<b>5.148,8</b>
<b>Armadura Transversal</b>	<b>V1</b>	<b>φ8</b>	15,075	12,00	1,40	16,8	302,4	
	<b>V2</b>	<b>φ8</b>	22,635	18,00	1,40	25,2	226,8	
	<b>V3</b>	<b>φ8</b>	15,075	12,00	1,40	16,8	201,6	
	<b>V4</b>	<b>φ10</b>	28,26	21,70	1,40	30,4	364,6	
							<b>1.095,4</b>	
<b>AS – Armadura superior; AI – Armadura inferior</b>								

## CAPÍTULO 4

Tabela 4.16 - Aço Inoxidável: Determinação do peso das armaduras nas vigas

				Área	Massa Linear	Comprimento	Peso/Viga	Peso total
				cm <sup>2</sup>	kg/m	m	kg	Kg
<b>Armadura Longitudinal</b>	<b>V1</b>	<b>AI</b>	<b>φ12</b>	4,52	4,02	15,60	62,8	376,5
		<b>AS</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	15,60	148,6	891,8
	<b>V2</b>	<b>AI</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	15,60	148,6	445,9
		<b>AS</b>	<b>φ16</b>	8,04	12,70	31,20	198,2	594,5
	<b>V3</b>	<b>AI</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9
		<b>AS</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9
	<b>V4</b>	<b>AI</b>	<b>φ16</b>	6,03	9,53	10,60	101,0	605,9
		<b>AS</b>	<b>φ16</b>	8,04	12,70	10,60	134,7	807,9
								<b>4.934,4</b>
<b>Armadura Transversal</b>	<b>V1</b>		<b>φ8</b>	15,075	12,00	1,56	18,7	302,4
	<b>V2</b>		<b>φ8</b>	22,635	18,00	1,56	28,1	226,8
	<b>V3</b>		<b>φ8</b>	15,075	12,00	1,56	18,7	201,6
	<b>V4</b>		<b>φ10</b>	28,26	21,70	1,56	33,9	364,6
								<b>1.095,4</b>
<b>AS – Armadura superior; AI – Armadura inferior</b>								

### 4.2.3.5 Todos os elementos estruturais

Tabela 4.17 - Aço Carbono: Determinação do peso total de armadura

Varões	Massa linear	Peso	Peso total Armadura
<b>φ6</b>	0,22	1.145,5	<b>14.666,6</b>
<b>φ8</b>	0,40	730,8	
<b>φ10</b>	0,62	4.611,2	
<b>φ12</b>	0,89	1.678,9	
<b>φ16</b>	1,58	5.560,2	
<b>φ20</b>	2,47	940,0	

Tabela 4.18 - Aço Inoxidável: Determinação do peso total de armadura

Varões	Massa linear	Peso	Peso total Armadura
<b>φ6</b>	0,22	1.159,1	<b>14.055,4</b>
<b>φ8</b>	0,40	814,3	
<b>φ10</b>	0,62	5.269,6	
<b>φ12</b>	0,89	1.006,1	
<b>φ16</b>	1,58	5.945,1	

Das tabelas anteriores verifica-se que o peso total das armaduras é ligeiramente diferente, sendo maior nas estruturas com aço carbono. Esta diferença é devida à necessidade de adotar varões de maior diâmetro em alguns elementos estruturais no caso das estruturas com aço carbono.

# ANÁLISE DE CUSTOS

Muitos donos de obra adotam soluções inicialmente menos dispendiosas mas, menores custos iniciais não significam soluções mais económicas. Muitas das vezes essas soluções, devido à agressividade do meio ambiente, levam à necessidade de realizar grandes manutenções e reparações, o que expressa que essas soluções a longo prazo sejam mais onerosas.

Para comparar o custo total das soluções apresentadas foi necessário proceder-se a uma análise económica, ao longo do período de vida da estrutura (que neste caso é de 50 anos), em que foram contabilizados não só os custos de construção das estruturas propriamente dita como também os custos de manutenção/ reparação. Com base nessa estimativa, é então possível calcular, de um modo aproximado, o custo total de cada alternativa de construção o que poderá constituir uma importante ferramenta para auxiliar, tanto os donos de obra como os projetistas, na escolha da solução mais económica, pois a vertente económica é sem dúvida aquela que geralmente mais peso tem para a decisão de um dono de obra.

Se o intuito da análise económica fosse comparar o custo de duas ou mais soluções de reparação para uma mesma estrutura, não seria necessário incluir os custos iniciais da estrutura pois esses custos seriam iguais em todas as soluções de reparação mas, como é pretendido comparar soluções em que as estruturas são construídas com materiais diferentes, o custo inicial já tem de ser contabilizado uma vez que os custos iniciais são diferentes.

### 5.1 CUSTOS A CURTO PRAZO

Os custos a curto prazo, nesta dissertação, são os custos que foram considerados na fase da construção das estruturas, e só incluem o custo dos materiais (betão e aço). No caso das estruturas de betão armado poder-se-ia considerar, tal como nas estruturas metálicas, apenas o custo do aço. No entanto, como as secções transversais de betão dos elementos estruturais são maiores no caso do aço carbono, considerou-se mais correto incluir também os custos do betão no caso das estruturas de betão armado.

Para a determinação desses custos foi necessário pesquisar informação sobre os preços unitários dos varões e dos perfis metálicos para estimar os custos das estruturas. Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados esses custos, em que os preços do aço carbono são valores praticados na Ilha da Madeira e os do aço inoxidável são praticados na Europa.

Tabela 5.1 - Custos unitários dos varões

Diâmetro (mm)	Preço Unitário (€/kg)	
	1.4301 (304)	A500
6	3,65	1,125
8	3,65	1,105
10	3,65	1,070
12	3,65	1,050
16	3,60	1,045
20	3,60	1,045

Tabela 5.2 - Custos unitários dos perfis metálicos

Vigas	Preço Unitário (€/kg)	
	Aço Carbono	Aço Inoxidável
		1.4301 (304)
IPE 270	1,15	8,40
HEA 220	1,08	7,85
HEA 280	1,10	7,40
HEA 300	1,15	7,40

Através dos custos unitários apresentados nas tabelas anteriores foi então possível determinar o custo das estruturas metálicas e de betão armado para os dois tipos de aço.

### 5.1.1 Estruturas metálicas

Os custos das estruturas metálicas foram de fácil determinação pois já tinham sido estimados os pesos das estruturas no Capítulo 4. Aos pesos das estruturas foram multiplicados os custos unitários dos perfis dos quais obtiveram-se os custos totais das estruturas em aço carbono e aço inoxidável, respetivamente (Tabelas 5.3 e 5.4).

Tabela 5.3 - Aço Carbono: Custo total da estrutura metálica

Perfis		Peso	Peso da estrutura	Custo por kg	Custo	Custo da Estrutura
		kg	kg	€/ kg	€	€
Vigas	IPE 270	1.444,0	7.856,8	1,15	1.661	8.726
		1.083,0		1,15	1.245	
Pilares	HE220A	2.121,0		1,08	2.291	
	HE280A	3.208,8		1,10	3.530	

Tabela 5.4 - Aço Inoxidável: Custo total da estrutura metálica

Perfis		Peso	Peso da estrutura	Custo por kg	Custo	Custo da Estrutura
		kg	kg	€/ kg	€	€
Vigas	IPE 270	1.444,0	8.146,6	8,40	12.130	63.766
		1.083,0		8,40	9.097	
Pilares	HE220A	2.121,0		7,85	16.650	
	HE300A	3.498,6		7,40	25.890	

Da análise das tabelas anteriores, pode-se concluir que as estruturas metálicas com aço inoxidável têm um custo inicial aproximadamente sete vezes superior ao das estruturas com aço carbono, o que significa que a curto prazo as estruturas com aço carbono são muito mais económicas.

### 5.1.2 Estruturas de betão armado

Os custos das estruturas de betão armado foram divididos por elementos estruturais para ser mais fácil determinar o custo total das armaduras. Para a determinação dos custos foi necessário recorrer às tabelas de pesos totais das estruturas, do Capítulo 4, e multiplicar pelos custos unitários dos varões. Após a determinação dos custos das armaduras por elementos estruturais, foi então possível confinar esses custos por tipo de varão, de forma a resumir os custos totais das armaduras. A esses custos foi somado o custo do betão, para obtenção dos custos totais das estruturas.

As tabelas de custos são apresentadas de seguida:

Tabela 5.5 - Custo total das lajes

			Aço Carbono			Aço inoxidável			Custo Total	
			Peso total	Custo por kg	Custo	Custo Total	Peso total	Custo por kg		Custo
			kg	€/ kg	€	€	kg	€/ kg		€
Face Inferior	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ10	1.714,2	1,07	1.834	5.681	1.714,2	3,65	6.257	18.880
	Painéis 3 e 4	φ10	740,3	1,07	792		740,3	3,65	2.702	
Face Superior		φ10	704,8	1,07	754		1.057,2	3,65	3.859	
	Painéis 1, 2, 5 e 6	φ12	413,0	1,05	434		-	-	-	
		φ6	636,1	1,13	716		636,1	3,65	2.322	
		φ10	528,6	1,07	566		792,9	3,65	2.894	
	Painéis 3 e 4	φ12	309,7	1,05	325		-	-	-	
		φ6	231,9	1,13	261		231,9	3,65	846	

Tabela 5.6 - Custo total das sapatas

		Direção	Peso total	Aço Carbono			Aço inoxidável		
				Custo por kg	Custo	Custo Total	Custo por kg	Custo	Custo Total
				kg	€/ kg	€	€	€/ kg	€
Sapata P1	φ10	$\frac{x}{y}$	65,5	1,07	70		3,65	239	
Sapata P2/3	φ10	$\frac{x}{y}$	323,6	1,07	346	598	3,65	1.181	2.039
Sapata P4	φ10	$\frac{x}{y}$	169,6	1,07	182		3,65	619	

Tabela 5.7 - Custo total dos pilares

		Aço Carbono				Aço inoxidável							
		Peso	Custo por kg	Custo	Custo Total	Peso	Custo por kg	Custo	Custo Total				
		Kg	€/kg	€	€	Kg	€/kg	€	€				
Armadura Longitudinal	P1	φ12	290,1	1,05	305	2.414	72,5	3,65	1.059	7.292			
	P2	φ12	96,6	1,05	101		96,6	3,65	352				
		φ16	304,9	1,05	319		304,9	3,60	1098				
	P3	φ12	193,1	1,05	203		193,1	3,65	705				
		φ16	609,8	1,05	637		609,8	3,60	2.195				
	P4	φ16	236,3	1,05	247		472,6	3,65	1.701				
		φ20/ φ12	577,0	1,05	603		49,9	3,60	182				
	Armadura Transversal	P1	φ6	73,0	1,13		82	312	63,3		3,65	267	1.013
		P2	φ6	51,1	1,13		58		57,0		3,65	187	
		P3	φ6	102,3	1,13		115		113,9		3,65	373	
P4		φ6	51,1	1,13	58	57,0	3,65		187				

Tabela 5.8 - Custo total das vigas

		Aço Carbono				Aço inoxidável							
		Peso total	Custo por kg	Custo	Custo Total	Peso total	Custo por kg	Custo	Custo Total				
		Kg	€/kg	€	€	Kg	€/kg	€	€				
Armadura Longitudinal	V1	φ12	376,5	1,05	395	5.382	376,5	3,65	1.374	17.783			
		φ16	891,8	1,05	932		891,8	3,60	3.210				
	V2	φ16	445,9	1,05	466		445,9	3,60	1.605				
		φ16	445,9	1,05	466		594,5	3,60	2.140				
	V3	φ20	363,0	1,05	379		-	-	-				
		φ16	605,9	1,05	633		605,9	3,60	2.181				
	V4	φ16	605,9	1,05	633		605,9	3,60	2.181				
		φ16	807,9	1,05	844		807,9	3,60	2.909				
	Armadura Transversal	V1	φ8	302,4	1,11		334	1.198	337,0		3,65	1.104	3.998
		V2	φ8	226,8	1,11		251		252,7		3,65	828	
V3		φ8	201,6	1,11	223	224,6	3,65		736				
V4		φ10	364,6	1,07	390	406,2	3,65		1.331				

Tabela 5.9 - Aço Carbono: Custo total da estrutura de betão armado

Armadura	Peso Armadura	Custo por kg	Custo da Armadura	Volume de Betão	Custo por m <sup>3</sup>	Custo do Betão	Custo Total Estrutura
-	kg	€/kg	€	m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€	€
φ6	1.145,5	1,13	1.289				
φ8	730,8	1,11	808				
φ10	4.611,2	1,07	4.934	174	71,61	<b>12.460</b>	<b>28.046</b>
φ12	1.678,9	1,05	1.763				
φ16	5.560,2	1,05	5.810				
φ20	940,0	1,05	982				
	<b>14.666,6</b>		<b>15.586</b>				

Tabela 5.10 - Aço Inoxidável: Custo total da estrutura de betão armado

Armadura	Peso Armadura	Custo por kg	Custo da Armadura	Volume de Betão	Custo por m <sup>3</sup>	Custo do Betão	Custo Total Estrutura
-	kg	€/kg	€	m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€	€
φ6	1.145,5	3,65	4.181				
φ8	730,8	3,65	2.667				
φ10	5.227,9	3,65	19.082	174	71,61	<b>12.460</b>	<b>63.465</b>
φ12	1.006,1	3,65	3.672				
φ16	5.945,1	3,60	21402				
	<b>14.055,4</b>		<b>51.005</b>				

Observando as tabelas anteriores, pode-se tirar a mesma conclusão que foi tirada para as estruturas metálicas, mas neste caso os custos iniciais das estruturas de betão armado com aço inoxidável são aproximadamente duas vezes e meia superiores às com aço carbono.

## 5.2 CUSTOS A LONGO PRAZO

Para a realização de uma análise económica a longo prazo é necessário atualizar todos os custos para um determinado tempo de referência. No caso desta dissertação os custos foram atualizados para o ano de 2015 (ano de análise e de construção das estruturas) [9], sendo necessário conhecer a taxa de juro e a taxa de inflação.

A taxa de inflação representa as variações generalizadas nos preços dos bens e serviços de um determinado país (aumento ou diminuição), num determinado período de tempo [58,59]. Nesta análise foi utilizada a média das taxas de inflação de Portugal entre 1999 e 2015, compreendendo o período desde a introdução do euro e onde se tem verificado uma maior estabilidade dos preços, devido à política monetária definida pelo Banco Central Europeu e que estabelece uma barreira de 2% para a taxa de inflação dos países aderentes [58,59]. Assim, a taxa utilizada foi de 2,2% (Figura 5.1).

## CAPÍTULO 5

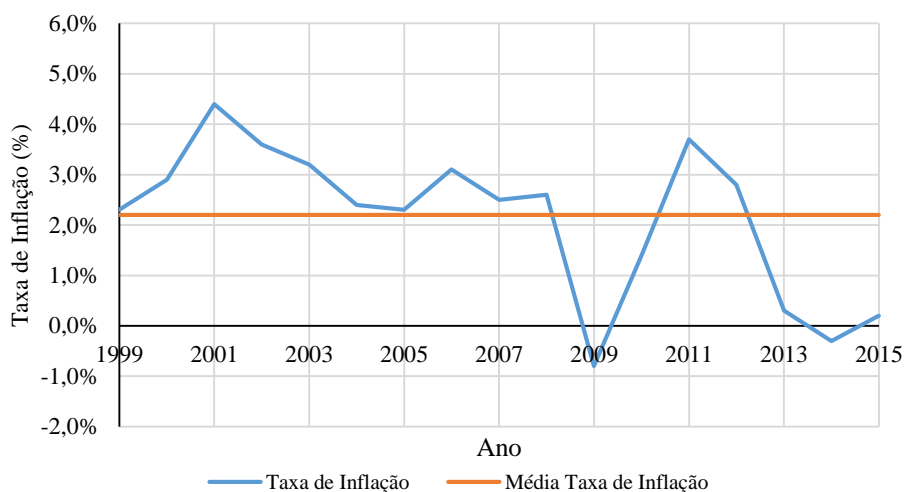


Figura 5.1 - Taxa de Inflação. Fonte: INE e Banco de Portugal [60,61]

Relativamente à taxa de juro, foi considerada a média das taxas de juro Euribor a 12 meses entre 1999 e 2015, pois esta taxa baseia-se na média das taxas de juros praticadas em empréstimos interbancários em euros, sendo um bom indicador para esta análise. A taxa utilizada foi assim de 2,54% (Figura 5.2) [62].



Figura 5.2 - Taxa de juro Euribor a 12 meses. Fonte: INE [60]

A atualização de custos pontuais para um determinado tempo de referência é feita de acordo com a seguinte equação (adaptada de [9]):

$$C_i = \frac{C_0 \times (1+r_i)^t}{(1+r_j)^t} \quad (5.1)$$

Em que:

$C_i$  - custo no ano de referência (2015);

$C_0$  - custo atual da manutenção;

$t$  - intervalo de tempo entre o ano de referência e o ano em que é tido o encargo (anos);

$r_i$  - taxa de inflação;

$r_j$  - taxa de juro.

Esta equação é dividida em duas partes. Primeiro, transforma um custo atual definido para as manutenções,  $C_0$ , no custo no ano da reparação, utilizando a taxa de inflação:  $C_0 \times (1+r_i)^t$ . Posteriormente este custo é novamente transformado (atualizado) para o ano de referência através da taxa de juro:  $(1+r_j)^t$ , para que se possa avaliar hoje o custo total estimado para as estruturas apresentadas.

Assim, através dessa equação, foi possível determinar os custos atualizados das reparações das estruturas para os cenários de degradação do Capítulo 3.

O cálculo do custo total a longo prazo das estruturas é obtido através da soma do custo inicial da estrutura com o custo atualizado das reparações.

### 5.2.1 Estruturas de betão armado

Para as estruturas de betão armado foram determinados os custos ao fim de 50 anos e a sua representação ao longo da sua vida útil para os vários cenários de degradação. A área a reparar para os cenários em que os cloretos já tenham começado a degradar a armadura (grande reparação), ou seja quando a profundidade do teor crítico de cloretos é igual ou superior ao recobrimento, foi igual a área da estrutura exposta ao meio ambiente, que foi estimada em 300 m<sup>2</sup> (igual para o aço carbono e inoxidável). Para os restantes casos (pequena reparação) foi estimado um valor inferior de área a reparar, tendo como base a profundidade de cloretos dos cenários de degradação.

Os cenários 1, são os que são necessárias mais reparações durante a vida útil da estrutura, pois são cenários para estruturas localizadas perto do mar e para um tipo de cimento mais suscetível à entrada dos cloretos (CEM I ou CEM II/A).

Nestes cenários, para o dono de obra inativo, as estruturas com aço carbono são reparadas para uma profundidade que abrange todo o recobrimento, daí que os custos com as manutenções sejam bastante elevados. Os custos a longo prazo do cenário 1 estão apresentados na Tabela 5.11 e a sua representação na Figura 5.3.

Tabela 5.11 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 1

	Estruturas de Betão Armado			
	Dono de Obra Inativo		Dono de Obra Ativo	
	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Aço Carbono	Aço Inoxidável
Área a reparar (m <sup>2</sup> )	300	200	180	175
Custo inicial da estrutura (€)	28.046	63.465	28.046	63.465
Tipo de reparação	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão
Custo unitário das reparações (€/m <sup>2</sup> )	102,00	102,00	80,60	80,60
Custo atualizado das reparações (€)	111.809	17.279	66.377	11.987
Custo Total a Longo Prazo (€)	139.855	80.744	94.423	75.452

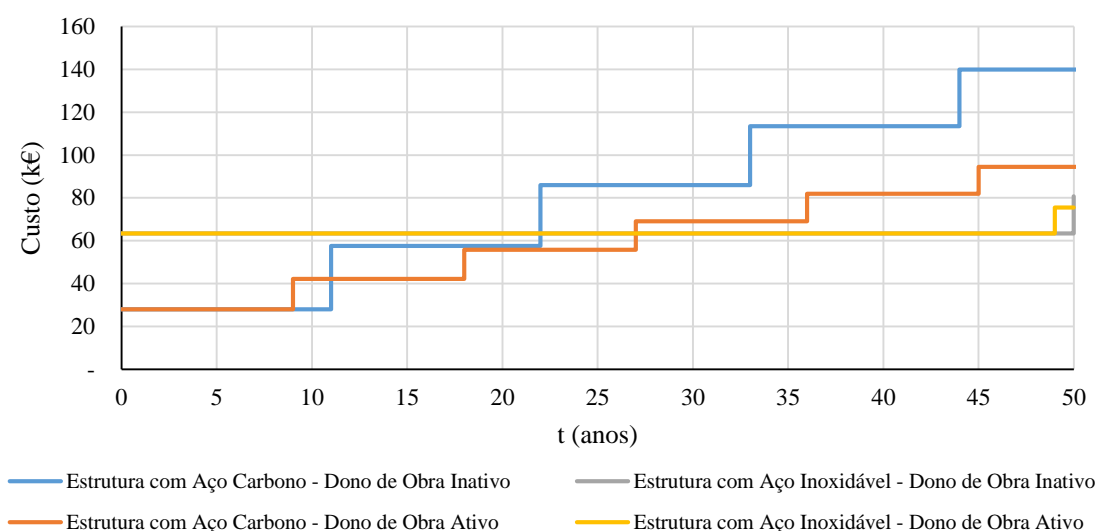


Figura 5.3 - Cenário 1: Representação dos custos ao longo da vida útil

Para os cenários 1 a solução mais económica é a solução com aço inoxidável tanto para o dono de obra ativo como para o dono de obra inativo, pois embora o custo inicial seja superior, o custo total a longo prazo é inferior.

Os cenários 2, são cenários que já não precisam de tantas manutenções pois, embora as estruturas estejam perto do mar, são estruturas constituídas por um cimento que não deixa que os cloretos penetrem no betão facilmente, daí que as profundidades a reparar sejam inferiores às dos cenários 1. Os custos a longo prazo e as suas representações estão apresentados na Tabela 5.12 e Figura 5.4.

Tabela 5.12 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 2

	<b>Estruturas de Betão Armado</b>			
	<b>Dono de Obra Inativo</b>		<b>Dono de Obra Ativo</b>	
	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>
<b>Área a reparar (m<sup>2</sup>)</b>	195	125	180	125
<b>Custo inicial da estrutura (€)</b>	28.046	63.465	28.046	63.465
<b>Tipo de reparação</b>	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão
<b>Custo unitário das reparações (€/m<sup>2</sup>)</b>	102,00	80,60	80,60	80,60
<b>Custo atualizado das reparações (€)</b>	16.847	8.533	12.288	8.533
<b>Custo Total a Longo Prazo (€)</b>	44.893	71.998	40.334	71.998

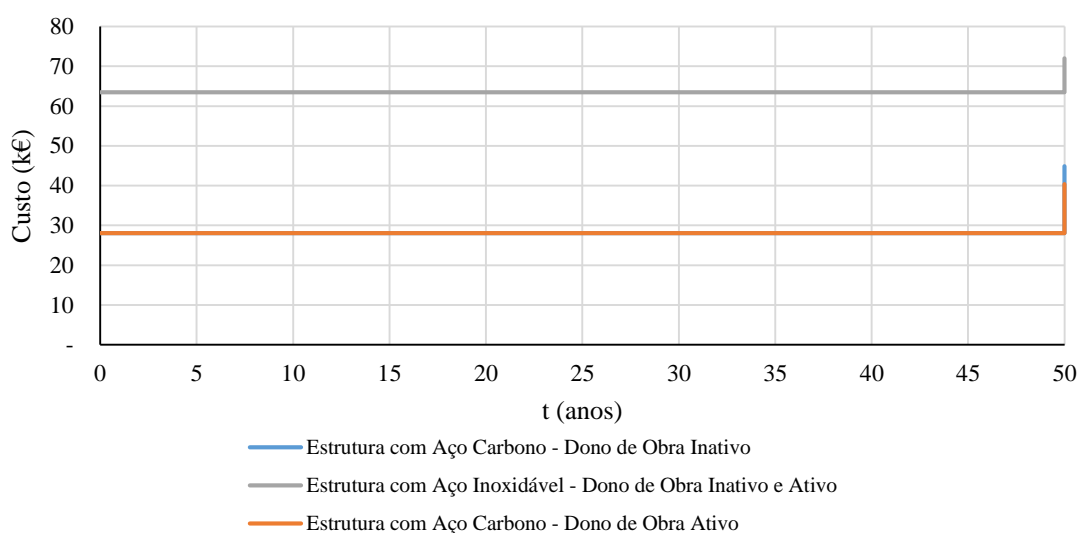


Figura 5.4 - Cenário 2: Representação dos custos ao longo da vida útil

Para os cenários 2 a solução mais económica é a solução com aço carbono, tanto para o dono ativo como para o dono inativo, pois embora os custos com as manutenções sejam superiores, o seu custo inicial é bastante inferior.

Os cenários 3, tal como os cenários 2, não necessitam de muitas manutenções, mas agora devido à maior distância ao mar e não do tipo de cimento. Nestes cenários as manutenções são elevadas para o aço carbono pois a profundidade de cloretos já teria atingido a armadura. Os custos a longo prazo e as suas representações são apresentados na Tabela 5.13 e Figura 5.5.

Tabela 5.13 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 3

	Estruturas de Betão Armado			
	Dono de Obra Inativo		Dono de Obra Ativo	
	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Aço Carbono	Aço Inoxidável
Área a reparar (m <sup>2</sup> )	300	100	180	100
Custo inicial da estrutura (€)	28.046	63.465	28.046	63.465
Tipo de reparação	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão
Custo unitário das reparações (€/m <sup>2</sup> )	102,00	80,60	80,60	80,60
Custo atualizado das reparações (€)	26.440	6.827	12.619	6.827
<b>Custo Total a Longo Prazo (€)</b>	<b>54.486</b>	<b>70.292</b>	<b>40.665</b>	<b>70.292</b>

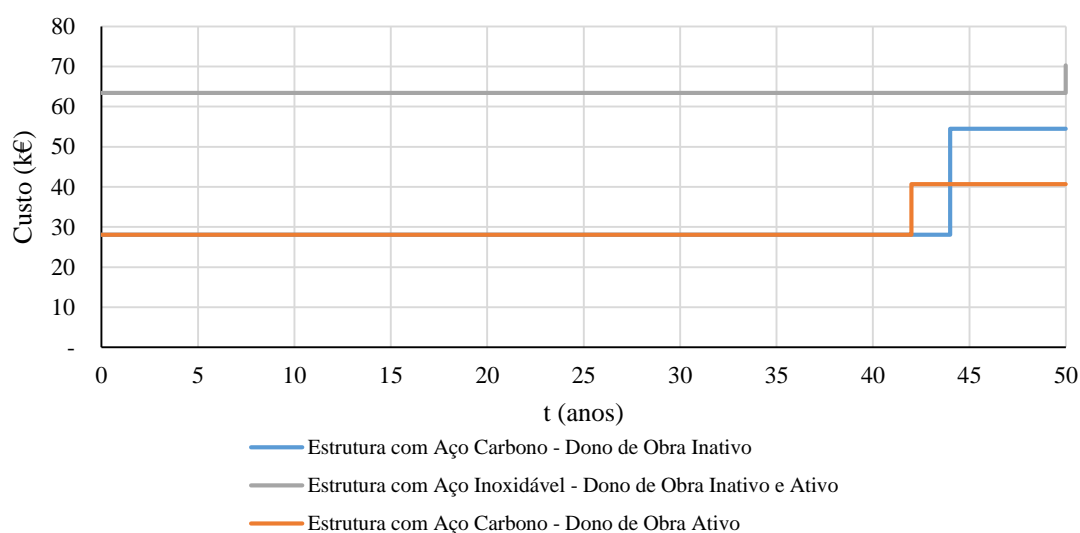


Figura 5.5 - Cenário 3: Representação dos custos ao longo da vida útil

Para os cenários 3, a conclusão é a mesma que para os cenários 2, ou seja a solução mais económica é a utilização do aço carbono.

Os cenários 4, são os que quase não carecem de manutenções, pois para além das estruturas estarem longe do mar são estruturas cujo betão contém um cimento que dificulta a entrada dos cloretos. Por esta razão, o dono de obra inativo e o dono de obra ativo, realizam apenas a reparação dos 50 anos, como pode-se observar na Tabela 5.14 e na Figura 5.6.

Tabela 5.14 - Estruturas de betão armado: Custos a longo prazo - Cenário 4

	Estruturas de Betão Armado			
	Dono de Obra Inativo		Dono de Obra Ativo	
	Aço Carbono	Aço Inoxidável	Aço Carbono	Aço Inoxidável
Área a reparar (m <sup>2</sup> )	135	25	135	25
Custo inicial da estrutura (€)	28.046	63.465	28.046	63.465
Tipo de reparação	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão	Reparação do betão
Custo unitário das reparações (€/m <sup>2</sup> )	80,60	80,60	80,60	80,60
Custo atualizado das reparações (€)	9.216	1.707	9.216	1.707
Custo Total a Longo Prazo (€)	37.762	65.172	37.762	65.172

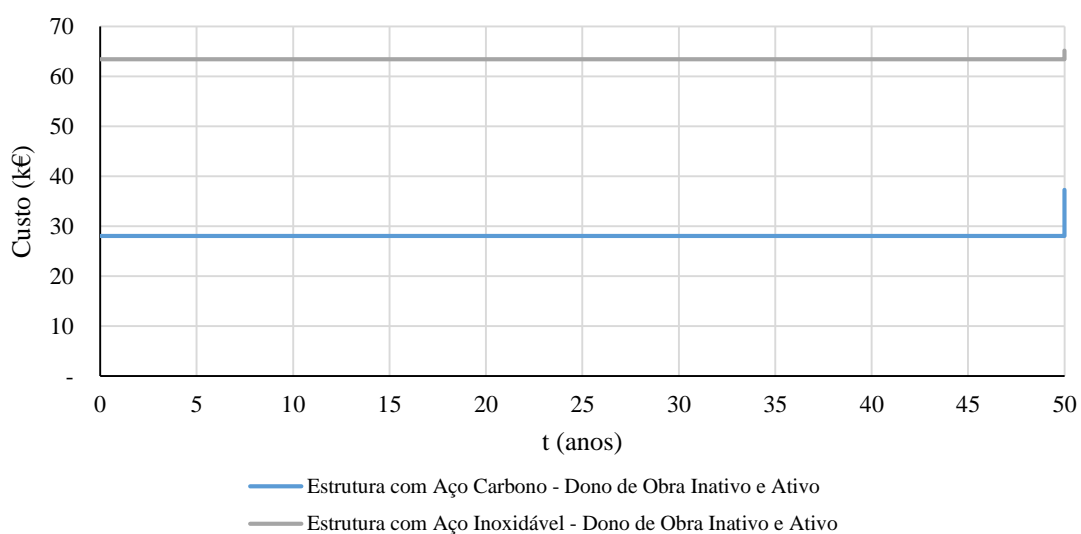


Figura 5.6 - Cenário 4: Representação dos custos ao longo da vida útil

Para os cenários 4, a conclusão é a mesma que para os cenários 2 e 3, ou seja a longo prazo a solução mais económica é a utilização do aço carbono.

Após a análise de todos os cenários anteriores, a conclusão que pode ser retirada é que para estruturas perto do mar com cimentos do tipo CEM I ou CEM II/A a solução mais económica, a longo prazo, é a utilização do aço inoxidável como armadura para as estruturas de betão armado, pois embora o custo inicial das estruturas seja superior este é compensado a longo prazo, uma vez que os custos das manutenções são inferiores.

## 5.2.2 Estruturas metálicas

Para as estruturas metálicas foram determinados os custos totais a longo prazo para um período de 50 anos, para os dois tipos de aço. A área a reparar para o dono de obra inativo foi a área das faces dos perfis expostas ao meio ambiente, tanto para estruturas perto do mar como para as estruturas longe do mar (40 m<sup>2</sup> para as estruturas com aço carbono e 41 m<sup>2</sup> para as estruturas com aço inoxidável), e a área a reparar para os donos de obra ativo foi estimada através da espessura de

pintura intacta dos cenários de degradação. Através dessas áreas foi possível estimar os custos das manutenções ao longo de 50 anos (Tabelas 5.15 e 5.16).

Tabela 5.15 - Estruturas metálicas: Custos a longo prazo - Cenário 5

	<b>Estruturas Metálicas</b>			
	<b>Dono de Obra Inativo</b>		<b>Dono de Obra Ativo</b>	
	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>
<b>Área a reparar (m<sup>2</sup>)</b>	40	41	20	21
<b>Custo inicial da estrutura (€)</b>	8.726	63.766	8.726	63.766
<b>Tipo de reparação</b>	Pintura da estrutura	Limpeza da estrutura	Pintura da estrutura	Limpeza da estrutura
<b>Custo unitário das reparações (€/m<sup>2</sup>)</b>	27,50	6,60	18,20	6,60
<b>Custo atualizado das reparações (€)</b>	10.051	2.473	5.357	2.040
<b>Custo Total a Longo Prazo (€)</b>	18.777	66.239	14.083	65.806

Tabela 5.16 - Estruturas metálicas: Custos a longo prazo - Cenário 6

	<b>Estruturas Metálicas</b>			
	<b>Dono de Obra Inativo</b>		<b>Dono de Obra Ativo</b>	
	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>	<b>Aço Carbono</b>	<b>Aço Inoxidável</b>
<b>Área a reparar (m<sup>2</sup>)</b>	40	41	20	21
<b>Custo inicial da estrutura (€)</b>	8.726	63.766	8.726	63.766
<b>Tipo de reparação</b>	Pintura da estrutura	Limpeza da estrutura	Pintura da estrutura	Limpeza da estrutura
<b>Custo unitário das reparações (€/m<sup>2</sup>)</b>	27,50	6,60	18,20	6,60
<b>Custo atualizado das reparações (€)</b>	2.990	735	1.649	628
<b>Custo Total a Longo Prazo (€)</b>	11.716	64.501	10.375	64.394

Das tabelas anteriores pode-se concluir que a solução mais económica para as estruturas metálicas é a utilização do aço carbono, pois embora os custos das manutenções das estruturas metálicas com aço inoxidável sejam inferiores aos custos das estruturas com aço carbono, as estruturas com aço inoxidável são mais dispendiosas devido ao seu custo inicial elevado.

### 5.3 ANÁLISE DA SENSIBILIDADE ÀS TAXAS DE INFLAÇÃO E DE JURO

As taxas de inflação e de juros são taxas que variam ao longo dos anos, por essa razão as conclusões retiradas na subsecção 5.2 podem sofrer alterações com essas variações.

Nesta subsecção foi então realizada uma análise de sensibilidade para variações de -1% ( $r_j+0,5\%$  e  $r_i-0,5\%$ ), +1% ( $r_j-0,5\%$  e  $r_i+0,5\%$ ), -2% ( $r_j+1,0\%$  e  $r_i-1,0\%$ ) e +2% ( $r_j-1,0\%$  e  $r_i+1,0\%$ )

entre a taxa de inflação e a taxa de juros para os seis cenários de degradação do Capítulo 3. Nas Tabelas 5.17 a 5.22 são apresentados os custos atualizados das reparações e custos totais a longo prazo para as diversas taxas de juro e de inflação e para os seis cenários de degradação.

Tabela 5.17 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 1

Cenário 1					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	111.809	139.855
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	86.508	114.554
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	146.604	174.650
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	67.886	95.932
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	195.007	223.053
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	17.279	80.744
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	10.602	74.067
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	28.160	91.625
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	6.505	69.970
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	45.894	109.359
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	66.377	94.423
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	51.653	79.699
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	86.624	114.670
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	40.808	68.854
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	114.798	142.844
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	11.987	75.452
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	7.427	70.892
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	19.345	82.810
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	4.602	68.067
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	31.222	94.687

Tabela 5.18 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 2

Cenário 2					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	16.847	44.893
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	10.337	38.383
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	27.456	55.502
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	6.342	34.388
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	44.747	72.793
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	8.533	71.998
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	5.236	68.701
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	13.907	77.372
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	3.213	66.678
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	22.666	86.131
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	12.288	40.334
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	7.540	35.586
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	20.027	48.073
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	4.626	32.672
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	32.639	60.685
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	8.533	71.998
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	5.236	68.701
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	13.907	77.372
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	3.213	66.678
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	22.666	86.131

Tabela 5.19 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 3

Cenário 3					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	26.440	54.486
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	17.202	45.248
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	40.637	68.683
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	11.192	39.238
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	62.459	90.505
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	6.827	70.292
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	4.189	67.654
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	11.126	74.591
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	2.570	66.035
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	18.133	81.598
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	12.619	40.665
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	8.372	36.418
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	19.020	47.066
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	5.555	33.601
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	28.668	56.714
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	6.827	70.292
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	4.189	67.654
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	11.126	74.591
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	2.570	66.035
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	18.133	81.598

Tabela 5.20 - Estruturas de betão armado: Análise da sensibilidade - Cenário 4

Cenário 4					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	9.216	37.262
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	5.655	33.701
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	15.020	43.066
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	3.470	31.516
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	24.479	52.525
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	1.707	65.172
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	1.047	64.512
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	2.781	66.246
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	643	64.108
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	4.533	67.998
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	9.216	37.262
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	5.655	33.701
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	15.020	43.066
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	3.470	31.516
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	24.479	52.525
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	1.707	65.172
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	1.047	64.512
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	2.781	66.246
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	643	64.108
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	4.533	67.998

Tabela 5.21 - Estruturas metálicas: Análise da sensibilidade - Cenário 5

Cenário 5					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	10.051	18.777
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	7.811	16.537
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	13.190	21.916
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	6.188	14.914
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	17.651	26.377
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	2.472	66.239
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	1.921	65.688
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	3.245	67.011
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	1.522	65.288
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	4.342	68.108
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	5.357	14.083
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	4.240	12.966
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	6.892	15.618
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	3.416	12.142
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	9.030	17.756
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	2.040	65.806
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	1.614	65.380
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	2.624	66.390
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	1.301	65.067
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	3.438	67.204

Tabela 5.22 - Estruturas metálicas: Análise da sensibilidade - Cenário 6

Cenário 6					
Dono de Obra	Tipo de aço	Taxa de Juro (%)	Taxa de Inflação (%)	Custo atualizado das reparações (€)	Custo Total a Longo Prazo (€)
Inativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	2.990	11.716
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	2.257	10.983
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	4.017	12.743
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	1.728	10.454
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	5.474	14.200
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	735	64.501
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	555	64.321
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	988	64.754
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	425	64.191
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	1.347	65.113
Ativo	Carbono	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	1.649	10.375
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	1.250	9.976
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	2.218	10.944
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	965	9.691
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	3.039	11.765
	Inoxidável	$r_j = 2,54$	$r_i = 2,20$	628	64.394
		$r_j + 0,5$	$r_i - 0,5$	476	64.242
		$r_j - 0,5$	$r_i + 0,5$	844	64.610
		$r_j + 1,0$	$r_i - 1,0$	368	64.134
		$r_j - 1,0$	$r_i + 1,0$	1.157	64.923

Das tabelas anteriores pode-se concluir que para os Cenários 1 as conclusões são as mesmas independentemente da variação das taxas utilizadas na análise, isto é a utilização do aço inoxidável é uma opção economicamente melhor a longo prazo, embora se verifique que se a variação passar a ser inferior a -2% o aço inoxidável deixará de ser vantajoso, pelo menos para o dono de obra ativo.

## CAPÍTULO 5

Nos cenários 2, tal como nos cenários 1, as conclusões são as mesmas independentemente da variação das taxas, isto é, a utilização do aço inoxidável não é favorável a longo prazo. Além disso pode-se observar que para uma variação de +2% os custos, tanto para o dono de obra ativo como para o dono de obra inativo, aproximam-se o que revela que se a variação for superior a +2% o aço inoxidável passará a ser a solução mais económica.

Nos Cenários 3, para uma variação de +2%, para o dono de obra inativo, a conclusão retirada na secção anterior é alterada, deixando o aço carbono de ser mais económico que o aço inoxidável.

Nos cenários 4, as conclusões são as mesmas independentemente da variação das taxas, isto é, a utilização do aço carbono é a opção economicamente mais favorável a longo prazo, embora tal como os cenários 2, se a variação for superior a +2% o aço inoxidável passará a ser a solução mais económica.

Tanto para as estruturas metálicas perto do mar (Cenário 5) como para longe do mar (Cenário 6) as conclusões da secção anterior não são alteradas, ou seja aço inoxidável nunca será uma boa opção, pois o seu custo inicial é muito elevado.

Desta forma pode-se concluir que se a variação entre a taxa de inflação e a taxa de juro for de +2% o aço inoxidável será uma boa opção económica para as estruturas de betão armado perto do mar e longe do mar (se dono de obra inativo) quando se utilizam cimentos CEM I e CEM II/A.

# CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

## 6.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como principal objetivo avaliar se o aço inoxidável é mais vantajoso para a Ilha da Madeira do que o aço carbono, em que a principal propriedade do aço inoxidável é alta resistência à corrosão.

Por esse motivo, foram realizados dimensionamentos de estruturas metálicas e de betão armado com o propósito de determinar os seus pesos para os dois tipos de aço, para posteriormente utilizar esses pesos para apurar os custos, a curto e a longo prazo, das estruturas.

Dos dimensionamentos das estruturas metálicas verificou-se que a estrutura com aço carbono (S235) tem um peso inferior ao da estrutura com aço inoxidável (1.4301), pois neste último houve a necessidade de se utilizar em alguns pilares uns perfis maiores, uma vez que não estavam a verificar alguns parâmetros. Por outro lado, para as estruturas de betão armado, a estrutura com aço inoxidável (1.4301) é que possui um peso de armadura inferior à da estrutura com aço carbono (A500), isto deve-se à necessidade de adotar varões de maior diâmetro em alguns elementos estruturais no caso das estruturas com aço carbono.

Ao longo desta dissertação, verificou-se que os períodos de vida das estruturas de betão armado com aço inoxidável são superiores às de com aço carbono, pois para haver corrosão nas armaduras com aço inoxidável o teor crítico de cloretos tem de ser pelo menos três vezes superior ao teor crítico para ocorrer corrosão nas armaduras de aço carbono.

No que concerne a custos, tanto as estruturas metálicas como as estruturas de betão armado com aço inoxidável apresentam um custo inicial consideravelmente superior às estruturas com aço carbono (sete vezes superior no caso das estruturas metálicas e duas vezes e meia nas estruturas de betão armado), daí a curto prazo ser uma solução mais onerosa.

Pela análise económica a longo prazo das estruturas metálicas verificou-se que o aço carbono é mais vantajoso que o aço inoxidável pois embora os custos com as manutenções fossem superiores o seu custo inicial era muito menor. Por esta razão, na Ilha da Madeira a utilização do aço inoxidável nas estruturas metálicas, por enquanto, não é uma boa solução em termos económicos. Este seria uma boa solução, pelo menos para estruturas perto do mar, se o seu preço fosse no máximo duas vezes e meia superior ao preço do aço carbono.

Para as estruturas de betão armado, verificou-se também que na maioria dos casos a utilização do aço carbono é a melhor opção económica a longo prazo, exceto nas estruturas perto do mar com cimentos do tipo CEM I ou CEM II/A (cimentos com facilidade de difusão dos cloretos), em que o aço inoxidável é a melhor opção para ser utilizado como armadura nas estruturas de betão armado na Ilha da Madeira, pois embora este apresente um custo inicial superior ao do aço carbono, o seu custo total ao fim de 50 anos é inferior, acabando assim por ser mais favorável.

### **6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Como sugestões para a continuidade do tema aqui apresentado e desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se:

- Realização de ensaios mais específicos para determinação rigorosa do teor crítico de cloretos no aço inoxidável usado na Ilha da Madeira, para a determinação da sua vida útil (teor crítico de cloretos tem grande sensibilidade);
- Desenvolvimento de modelos de degradação para estimar o tempo de vida útil dos revestimentos das estruturas metálicas, tal como acontece para as estruturas de betão armado;
- Repetição da análise realizada para outros tipos de aço inoxidável e para outros tipos de obras (pontes e viadutos);
- Concretização de uma análise económica que inclua os custos das inspeções na análise económica realizada.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Barros, «APO - Introdução aos materiais de construção e normalização», *Mater. Construção*, pp. 1–6, 2000.
- [2] R. P. Cardoso, «Avaliação do comportamento estrutural de subestações de energia elétrica com o uso do aço inoxidável», Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [3] T. M. H. Santos, «Corrosão das Armaduras do Betão Armado - Causas , Consequências , Prevenção e Projeto de Durabilidade», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [4] C. Sousa, «Aços Inoxidáveis na Construção Civil - Aplicação em estruturas», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.
- [5] A. Vilhena, «Reabilitação habitacional e o setor da construção civil», *O Parq. Habitacional e a sua Reabil. Retrato e Prospetiva*, INE e LNEC, Lisboa, 2013.
- [6] EUROCONSTRUCT, «74th EUROCONSTRUCT conference 14th June 2013», Copenhagen.
- [7] LNEG, «Corrosão e Protecção de Materiais», *Corrosão e Protecção Mater.*, vol. 32, pp. 1–32, 2013.
- [8] F. J. L. Feliciano, «Corrosão do Aço Inoxidável em Estruturas de Betão», Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [9] T. P. D. V. N. Silva, «Análise Técnico-Económica de Alguns Tipos de Reparação de Estruturas de Betão Armado Expostas a um Ambiente Marítimo», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- [10] Inoxcenter, «História do Aço Inox.». Disponível em: <http://inoxcenter.com.br/historia-do-aco-inox/>. [Acedido: 15-Mai-2015].
- [11] C. S. D. S. Tavares, «Monitorização da resistência à corrosão localizada do aço inoxidável no betão», Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [12] N. R. Baddoo, «Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities», *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, n. 11, pp. 1199–1206, 2008.
- [13] BS EN 10088-1: 2005, «Stainless Steels - Part1: List of stainless steels», *CEN*, 2005.
- [14] A. Louro e M. Pipa, «Comportamento de vigas de betão armado com aço inoxidável», *BE2008 - Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*, Guimarães, pp. 9–30, 2008.

## CAPÍTULO 6

- [15] L. P. Sanches, «Estudo comparativo quanto a resistência à corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor», Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [16] M. J. Correia, X. R. Nóvoa, e M. Salta, «TR 6.3 Stainless Steel Rebars», *smart green Struct. repair Mater.*, 2008.
- [17] BS 6744:2001+A2:2009, «Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete. Requirements and test methods», *BSI*, 2001.
- [18] Euro Inox and The Steel Construction Institute, *Design Manual For Structural Stainless Steel*, Third Edit. 2006.
- [19] NP EN 1993-1-1: 2010, «Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios», *Inst. Port. da Qual.*, 2010.
- [20] EN 1993-1-4: 2006, «Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels», *CEN*, 2006.
- [21] M. da S. Barros, «Aplicação do Aço Inoxidável na Construção Civil», *BM Eng. e Construções*, pp. 1–5, 2012.
- [22] M. J. Correia e M. M. Salta, «Stainless Steel Rebar for Long Service Life», *DURABLE STRUCTURES: from construction to rehabilitation*, Lisbon, pp. 1–2, 2012.
- [23] C. Houska, «Arquitetura sustentável com aço inoxidável», *Núcleo Inox*. pp. 1–9, 2001.
- [24] U. Jenninger, «Progreso de Castro - Pier», 2006. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/ulfjenninger/11969019183/in/photostream/>. [Acedido: 14-Mai-2015].
- [25] Arminox, «Bridge Building», *Stainless Reinforcement*. Disponível em: <http://www.arminox.com/Default.aspx?ID=339>. [Acedido: 20-Mai-2015].
- [26] Arminox, «Super Structures», *Stainless Reinforcement*. Disponível em: <http://www.arminox.com/Default.aspx?ID=341>. [Acedido: 20-Mai-2015].
- [27] Reval, «Stainless Steel - Rebar applications.». Disponível em: <http://www.reval-stainless-steel.com/applications.html>. [Acedido: 20-Mai-2015].
- [28] N. Baddoo, «Designing Structural Stainless Steel Members To Eurocode 3», *New steel Constr.*, n. April, 2009.
- [29] Ghent Belgium, «Train Stations in Ghent Belgium (Gent Belgium).». Disponível em: <http://gentbelgium.ca/transportation/trainstation.html>. [Acedido: 19-Mai-2015].
- [30] Portal Met@lica, «Ponte Helix: dupla estrutura de aço inoxidável em formato helicoidal.». Disponível em: <http://wwwo.metalica.com.br/ponte-helix-dupla-estrutura-de-aco-inoxidavel-em-formato-helicoidal>. [Acedido: 19-Mai-2015].
- [31] Caio de Maria, «Pavilhão dos Emirados Árabes no Expo Shanghai 2010 | maisArquitetura», *mais Arquitetura*, 2010. Disponível em: <http://maisarquitetura.com.br/pavilhao-dos-emirados-arabes-no-expo-shanghai-2010>. [Acedido: 19-Mai-2015].

- [32] dezeen magazine, «Dream Downtown Hotel by Handel Architects», 2012. Disponível em: <http://www.dezeen.com/2012/04/29/dream-downtown-hotel-by-handel-architects/>. [Acedido: 19-Mai-2015].
- [33] Wikipédia, «Butler County Courthouse (Pennsylvania).». Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/Butler\\_County\\_Courthouse\\_\(Pennsylvania\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Butler_County_Courthouse_(Pennsylvania)). [Acedido: 19-Mai-2015].
- [34] N. Lopes, P. M. . Vila Real, P. Piloto, L. Mesquita, e L. Simões da Silva, «Modelação numérica do comportamento ao fogo de uma estrutura em aço inoxidável em situação de incêndio», *V Congresso de Construção Metálica e Mista*, Lisboa, 2005.
- [35] I. Tylek e K. Krzysztof, «Mechanical Properties of Structural Stainless Steel», *Technical Trans. Civ. Eng.*, 2014.
- [36] R. G. Duarte, A. S. Castela, R. Neves, L. Freire, e M. F. Montemor, «Corrosion Behavior of Stainless Steel Rebars Embedded in Concrete: an Electrochemical Impedance Spectroscopy Study», *Electrochim. Acta*, vol. 124, pp. 218–224, Abr. 2014.
- [37] L. Gardner, A. Talja, e N. R. Baddoo, «Structural design of high-strength austenitic stainless steel», *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, n. 5, pp. 517–528, Mai. 2006.
- [38] D. Lam e L. Gardner, «Structural design of stainless steel concrete filled columns», *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, n. 11, pp. 1275–1282, Nov. 2008.
- [39] NP EN 1992-1-1: 2004, «Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios», *CEN*, 2004.
- [40] NP EN 1993-1-5: 2012, «Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Part 1-5: Elementos estruturais constituídos por placas», *Inst. Port. da Qual.*, 2012.
- [41] T. J. Mesquita, E. Chauveau, M. Mantel, N. Kinsman, e R. P. Nogueira, «Metallurgy and materials», *REM R. Esc. Minas*, vol. 66, n. 2, pp. 173–178, 2013.
- [42] NP EN 1993-1-8: 2010, «Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-8: Projecto de ligações», *Inst. Port. da Qual.*, 2010.
- [43] NP EN 1990: 2009, «Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas», *Inst. Port. da Qual.*, 2009.
- [44] H. M. B. Pernet, «Pontes metálicas em ambiente marítimo: Metodologias de avaliação, reparação e protecção», Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Madeira, 2010.
- [45] H. M. D. C. D. M. Moreira, «Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- [46] GRUPO metalcon, «Galvanização», *Galvaza*. Disponível em: <http://www.galvaza.pt/pt/servicos/galvanizacao/>. [Acedido: 10-Out-2015].
- [47] PORTAL METÁLICA - Met@lica, «Tipos de Metalização por projeção.». Disponível em: <http://wwwo.metlica.com.br/tipos-de-metalizacao-por-projecao>. [Acedido: 10-Out-2015].

## CAPÍTULO 6

- [48] LNEC E465, «Betão. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil de projecto sob as exposições ambientais XC ou XS», *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 2007.
- [49] A. Costa, «Durabilidade de Estruturas de Betão», *Apontamentos da Cadeira Reabil. e Reforço Estruturas*, 2006.
- [50] F. I. G. Monteiro, «Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [51] A. Gonçalves, «Modelação da Durabilidade do betão segundo a Especificação LNEC E465», *Seminário: Materiais em ambiente marítimo*, Funchal, 2007.
- [52] APEB, «A Especificação do Betão. Guia para a utilização da norma NP EN 206-1», p. 19, 2008.
- [53] NP EN 206-1: 2007, «Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade», *Inst. Port. da Qual.*, 2007.
- [54] CYPE Ingenieros, «Gerador de preços para construção civil. Portugal.». Disponível em: <http://www.geradordeprecos.info/>. [Acedido: 07-Out-2015].
- [55] Mickael Cavaco, «Manutenção em construções aeroportuárias», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- [56] HEMPEL, «Guia sobre protecção anticorrosiva de estruturas de aço por esquemas de pintura, de acordo com a Norma ISO 12944», *Como Sel. um Sist. Pint.*, 2000.
- [57] RSA, «Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.» 1983.
- [58] M. Ciccarelli e J. A. Garcia, «What drives euro area break-even inflation rates?», *Eur. Cent. Bank*, vol. 996, p. 38, 2009.
- [59] ECB, «ECB Banking Supervision.». Disponível em: <https://www.bankingsupervision.europa.eu/home/html/index.en.html>. [Acedido: 10-Nov-2015].
- [60] INE, «Portal do Instituto Nacional de Estatística.». Disponível em: <https://www.ine.pt/>. [Acedido: 20-Nov-2015].
- [61] BPortugal, «Banco de Portugal.». Disponível em: <https://www.bportugal.pt/>. [Acedido: 20-Nov-2015].
- [62] Euribor-rates.eu, «Euribor rates.». Disponível em: <http://pt.euribor-rates.eu/>. [Acedido: 10-Nov-2015].

## **Capítulo 8**

### **ANEXOS**



## A. FORMULÁRIOS

### A.1 Formulário para estruturas metálicas

#### A.1.1 Classificação da secção transversal:

Tabela 8.1 - Fórmulas para a classificação da secção transversal

	Aço Carbono	Aço Inoxidável
<b>Percentagem da alma submetida a tensões de compressão</b>	$\alpha = \frac{\frac{c-a}{2} + a}{c}$ onde $a = \frac{N_{Ed}}{f_y \times t_w}$	
<b>Coefficiente <math>\varepsilon</math></b>	$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1,0$	$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 1,03$
<b>Alma solicitada à flexão e compressão</b>	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha-1}$	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{308\varepsilon}{13\alpha-1}$
<b>Banzo solicitado à flexão e compressão</b>	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	
<b>Comprimento da alma</b>	$c = h_w$	
<b>Comprimento do banzo</b>	$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r$	

Em que:

$N_{Ed}$  - valor de cálculo do esforço normal atuante;

$\alpha$  - percentagem da alma submetida a tensões de compressão;

$c$  - largura ou altura de parte de uma secção transversal;

$t$  - espessura;

$t_w$  - espessura da alma;

$h_w$  - Altura da parte reta de uma alma;

$r$  - raio de concordância;

$b$  - largura de uma secção transversal;

$\varepsilon$  - fator que depende de  $f_y$ ;

$f_y$  - tensão de cedência.

#### A.1.2 Verificação de segurança das secções transversais:

a) Tração

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.1)$$

## CAPÍTULO 8

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.2)$$

Em que:

$N_{t,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço normal resistente de tração;

$N_{pl,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta;

$A$  - Área da secção transversal;

$\gamma_{M0}$  - Coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais.

### b) Compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.3)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.4)$$

Em que:

$N_{c,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço normal resistente à compressão.

### c) Momento fletor

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.5)$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.6)$$

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.7)$$

$$M_{c,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.8)$$

Em que:

$M_{Ed}$  - valor de cálculo do momento fletor atuante;

$M_{c,Rd}$  - valor de cálculo do momento fletor resistente;

$M_{pl,Rd}$  - valor de cálculo do momento fletor plástico resistente;

$W_{pl}$  - módulo de flexão plástico.

### d) Esforço Transverso

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.9)$$

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \text{ mas: } \eta h_w t_w < A_v \quad (8.10)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (8.11)$$

Em que:

$V_{Ed}$  - valor de cálculo do esforço transversal atuante;

$V_{c,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço transversal resistente;

$V_{pl,Rd}$  - Valor de cálculo do esforço transversal resistente plástico;

$A_v$  - área resistente ao esforço transversal;

$\eta$  - coeficiente para calcular a área de corte.

e) Flexão composta

- Eixo yy:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \times N_{pl,Rd} \quad (8.12)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.13)$$

- Eixo zz:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.14)$$

### A.1.3 Verificação da flexão composta desviada:

Tabela 8.2 - Fórmulas auxiliares para a verificação da flexão composta desviada

	Encurvatura em torno do eixo y-y	Encurvatura em torno do eixo z-z	Encurvatura lateral
<b>Esbelteza normalizada</b>	$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y \times \lambda_1}$	$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \times \lambda_1}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}}$
<b>Valor para determinar o coeficiente de redução</b>	$\Phi_y = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]$	$\Phi_z = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2]$	$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$
<b>Coeficiente de redução</b>	$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \leq 1,0$	$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \leq 1,0$	$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$

Onde:

$$\lambda_1 = 93,9\epsilon$$

Em que:

$\lambda_1$  - esbelteza de referência;

$\bar{\lambda}$  - esbelteza normalizada;

$\bar{\lambda}_{LT}$  - esbelteza normalizada para a encurvadura lateral;

$\Phi$  - valor para determinar o coeficiente de redução  $\chi$ ;

$\Phi_{LT}$  - valor para determinar o coeficiente de redução  $\chi_{LT}$ ;

$\chi$  - Coeficiente de redução associado ao modo de encurvadura considerado;

$\chi_{LT}$  - Coeficiente de redução para a encurvadura lateral;

$\alpha$  - fator de imperfeição para a encurvadura de elementos comprimidos;

$\alpha_{LT}$  - fator de imperfeição para a encurvadura lateral;

$L_{cr}$  - comprimento de encurvadura;

$i$  - raio de giração;

$M_{cr}$  - momento crítico para a encurvadura lateral;

$W_{pl,y}$  - módulo de flexão plástico em relação ao eixo y-y.

• Aço carbono

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad (8.15)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad (8.16)$$

Com:

$$C_{mz} = C_{my} = 0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{zy} = 0,6k_{yy}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left( 1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq C_{mz} \left( 1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{yz} = 0,6k_{zz}$$

Em que:

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  e  $k_{zz}$  - fatores de interação;

$C_{mz}$  e  $C_{my}$  - coeficientes de momento uniforme equivalente;

$\psi$  - relação entre os momentos que atuam nas extremidades de um segmento de um elemento.

• Aço inoxidável

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0 \quad (8.17)$$

Com:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$k_i = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_i - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,i}}$$

$$1,2 \leq k_i \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,i}}$$

Em que:

$\gamma_{M1}$  - Coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenômenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento;

$(N_{b,Rd})_{\min}$  - Menor valor de  $N_{b,Rd}$  de quatro modos de encurvadura: encurvadura por flexão sobre o eixo y, encurvadura por flexão sobre o eixo z, encurvadura por torção e encurvadura por flexão-torsão;

$k_z$  e  $k_y$  - fatores de interação.

## A.2 Formulário para estruturas de betão armado

### A.2.1 Lajes

#### A.2.1.1 Cálculo das armaduras:

- Armaduras ordinárias

$$\mu = \frac{M_{sd}}{d^2 \cdot f_{cd}} \quad (8.18)$$

$$\omega = \frac{1 - \sqrt{1 - 2,42 \cdot \mu}}{1,21} \quad (8.19)$$

$$A_s = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (8.20)$$

Em que:

$\mu$  - momento fletor reduzido;

$\omega$  - percentagem mecânica de armadura;

$A_s$  - Área de aço;

$M_{sd}$  - momento fletor atuante;

$d$  - altura útil;

$f_{cd}$  - tensão de dimensionamento do betão;

$f_{yd}$  - tensão de dimensionamento do aço.

- Armadura mínima

$$A_{s,\min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_t \cdot d \quad (8.21)$$

Em que:

$f_{ctm}$  - tensão média de tração do betão;

$f_{yk}$  - tensão característica do aço.

- Armadura de distribuição

$$A_{s,dist} = 0,2 \cdot A_{s,princ.} \quad (8.22)$$

## A.2.2 Sapatas

**A.2.2.1 Determinação da área mínima da sapata, capaz de suportar a carga  $N_{sd}$ , para um valor de tensão de segurança do solo igual a 400kPa:**

$$A_{e=0} \geq \frac{N_{sd}}{\sigma_{adm}}; A_e = A \times B \quad (8.23)$$

Em que:

$A_{e=0}$  - representa a área;

A e B - dimensões da sapata.

**A.2.2.2 Verificação da Tensão do solo:**

$$\sigma_{solo} = \frac{N_{sd}}{A \times B} < \sigma_{adm} \quad (8.24)$$

Em que:

$\sigma_{solo}$  - tensão do solo;

$\sigma_{adm}$  - tensão admissível.

**A.2.2.3 Cálculo das armaduras:**

$$d = 0,9 \times H \quad (8.25)$$

Tabela 8.3 - Fórmulas para o cálculo das armaduras das sapatas

Direção x	Direção y
$\text{tg}(\alpha) = \frac{d}{\frac{A-a}{4}}$	$\text{tg}(\alpha) = \frac{d}{\frac{B-b}{4}}$
$F_t = \frac{N/2}{\text{tg}(\alpha)}$	$F_t = \frac{N/2}{\text{tg}(\alpha)}$
$A_s = \frac{F_t}{f_{syd}}$	$A_s = \frac{F_t}{f_{syd}}$
$\left(\frac{A_s}{s}\right) = \frac{A_s}{A}$	$\left(\frac{A_s}{s}\right) = \frac{A_s}{B}$

Em que:

$F_t$  - força de tração;

a e b - dimensões do pilar.

### A.2.3 Pilares

#### A.2.3.1 Características dos pilares:

- Momento de inércia

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (8.26)$$

$$I_y = \frac{hb^3}{12} \quad (8.27)$$

- Raio de giração

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (8.28)$$

- Esbelteza

$$\lambda = \frac{L_0}{i} \quad (8.29)$$

Em que:

I - momento de inercia;

i - raio de giração;

A - área do pilar;

b e h - dimensões do pilar;

L<sub>0</sub> - comprimento de encurvadura;

λ - esbelteza.

#### A.2.3.2 Excentricidade inicial:

$$e_i = \frac{\theta_i L_0}{2} \quad (8.30)$$

$$\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (8.31)$$

$$\theta_0 = \frac{1}{200} \quad (8.32)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{L}} ; \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1 \quad (8.33)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (8.34)$$

Em que:

e<sub>i</sub> - Excentricidade inicial;

θ<sub>i</sub> - inclinação;

θ<sub>0</sub> - inclinação base;

α<sub>h</sub> - coeficiente de redução relacionado com o comprimento do elemento (L);

α<sub>m</sub> - coeficiente de redução relacionado com o número de elementos verticais (m).

**A.2.3.3 Momento de primeira ordem:**

$$M_{0sd1} = M_{sd} + N_{sd}e_i \quad (8.35)$$

Em que:

$M_{0sd1}$  - momento de primeira ordem.

**A.2.3.4 Excentricidade de 2ª ordem:**

$$e_2 = \frac{1}{r} \frac{L_0^2}{c} \quad (8.36)$$

$$\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\phi \cdot \frac{1}{r_0} \quad (8.37)$$

$$\frac{1}{r_0} \cong \frac{\varepsilon_{yd}}{0,45d} \quad (8.38)$$

$$K_r \frac{n_u - n}{n_u - n_{bal}} \leq 1,0 \quad (8.39)$$

$$n_u = 1 + \omega \quad (8.40)$$

$$K_\phi = 1 + \beta \phi_{ef} \geq 1,0 \quad (8.41)$$

$$\phi_{ef} = \phi \frac{M_{0cqp1}}{M_{0sd}} \quad (8.42)$$

$$\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150} \quad (8.43)$$

Em que:

$e_2$  - excentricidade de segunda ordem;

$c$  - fator que depende da distribuição da curvatura ao longo do elemento ( $c=10$ );

$1/r$  - curvatura;

$K_r$  - fator corretivo que tem em consideração o nível de esforço axial;

$K_\phi$  - coeficiente destinado a ter em conta o efeito da fluência;

$1/r_0$  - curvatura base;

$n$  - esforço normal reduzido;

$n_{bal}$  - esforço normal reduzido na zona do máximo momento resistente ( $n_{bal} \approx 0,4$ );

$\phi_{ef}$  - coeficiente de fluência efetivo;

$M_{0cqp}$  - momento de primeira ordem para a combinação quase-permanente de ações.

**A.2.3.5 Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem:**

$$\lambda \leq \lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}} \quad (8.44)$$

Com:

$$A = 1 / (1 + 0,2 \phi_{ef})$$

$$B = \sqrt{1 + 2\omega}$$

$$C = 1,7 - r_m$$

$$r_m = \frac{M_{01}}{M_{02}}$$

$$n = \frac{N_{sd}}{A_c f_{cd}}$$

Em que:

$M_{01}$  e  $M_{02}$  - momentos de primeira ordem nas extremidades de um elemento, sendo  $|M_{02}| \geq |M_{01}|$ .

#### A.2.3.6 Momento de segunda ordem:

$$M_{0sd2} = M_{0sd1} + N_{sd} e_2 \quad (8.45)$$

Em que:

$M_{0sd2}$  - momento de segunda ordem.

#### A.2.3.7 Cálculo das armaduras:

- Armadura longitudinal por flexão composta

$$v = \frac{N_{sd}}{b h f_{cd}}$$

$$\mu_x = \frac{M_{sd}}{b h^2 f_{cd}} \quad \longrightarrow \quad \omega_{TOT}$$

$$\mu_y = \frac{M_{sd}}{h b^2 f_{cd}}$$

$$A_{sTOT} = \frac{\omega_{TOT} b d f_{cd}}{f_{yd}} \quad (8.46)$$

Em que:

$v$  - esforço normal reduzido.

- Armadura mínima:

$$A_{s,min} = \frac{0,10 N_{sd}}{f_{yd}} \geq 0,002 A_c \quad (8.47)$$

$$A_c = b h \quad (8.48)$$

- Armadura máxima:

$$A_{s,max} = 0,04 A_c \quad (8.49)$$

## CAPÍTULO 8

- Armadura transversal

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sd}}{z \cdot \cotg\theta \cdot f_{yd}} \quad (8.50)$$

$$z = 0,9 \times d \quad (8.51)$$

### A.2.3.8 Verificação à flexão composta desviada:

$$\left(\frac{M_{sd,x}}{M_{Rd,x}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{sd,y}}{M_{Rd,y}}\right)^\alpha \leq 1,0 \quad (8.52)$$

Em que:

$\alpha$  - coeficiente que depende da forma da seção transversal.

## A.2.4 Vigas

### A.2.4.1 Cálculo das armaduras:

- Armadura longitudinal

$$\mu = \frac{M_{sd}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad (8.53)$$

$$\omega = \frac{1 - \sqrt{1 - 2,42 \cdot \mu}}{1,21} \quad (8.54)$$

$$A_s = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \quad (8.55)$$

- Armadura mínima

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b \cdot d \quad (8.56)$$

- Armadura máxima

$$A_{s,max} = 0,04 A_c \quad (8.57)$$

- Armadura transversal

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sd}}{z \cdot \cotg\theta \cdot f_{yd}} \quad (8.58)$$

$$\frac{A_{sw,min}}{s} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yd}} \cdot b_w \quad (8.59)$$

### A.2.4.2 Verificação à compressão:

- Bielas comprimidas

$$\sigma_c = \frac{V_{sd}}{0,9b_w \sin\theta \cos\theta} \quad (8.60)$$

$$\sigma_c \leq 0,6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] f_{cd} \quad (8.61)$$

- Apoio

$$\sigma_c = \frac{R}{A_{apoio}} \quad (8.62)$$

$$\sigma_c \leq 0,85f_{cd} \quad (8.63)$$

#### A.2.4.3 Verificação da segurança ao ELS de Deformação:

$$a_t = \left( \frac{h}{d} \right)^3 \cdot \eta \cdot k_t \cdot a_c \quad (8.64)$$

Em que,

$\alpha_t$  - flecha a longo prazo;

$\alpha_c$  - flecha base;

$k_t$  - coeficiente que entra em consideração com o efeito das armaduras, da fendilhação e da fluência;

$\eta$  - coeficiente que entra em consideração com a influência da armadura de compressão.

$$M_{cr} = \omega \cdot f_{ctm} = \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot f_{ctm} \quad (8.65)$$

$$\alpha \cdot \rho = \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (8.66)$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} \quad (8.67)$$

#### A.2.4.4 Verificação da Segurança ao ELS de Fendilhação:

$$\beta = \frac{A_{s2}}{A_{s1}} \quad (8.68)$$

$$x = \frac{C_c}{C_c + C_s} d \quad (8.69)$$

$$\sigma_{s1} = \alpha C_s \frac{M_{sd}}{bd^2} \quad (8.70)$$

- Determinação da distância máxima entre fendas

$$h_{c,ef} = \min \left[ 2,5(h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2} \right] \quad (8.71)$$

$$A_{c,ef} = h_{c,ef} \cdot b \quad (8.72)$$

$$\rho_{p,ef} = \frac{A_s}{A_{c,ef}} \quad (8.73)$$

$$S_{r,max} = 3,4c + 0,425 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\emptyset}{\rho_{p,ef}} \quad (8.74)$$

Onde,

c - representa o recobrimento das armaduras;

k<sub>1</sub> - coeficiente que tem em conta as propriedades de aderência dos varões;

k<sub>2</sub> - coeficiente que tem em conta a forma da distribuição de extensões da secção;

ρ<sub>p,ef</sub> - percentagem de armadura relativa à área de betão efetiva;

A<sub>c,ef</sub> - área efetiva de betão mobilizada por aderência;

h<sub>c,ef</sub> - altura efetiva.

- Cálculo do valor característico da abertura de fendas

$$w_k = S_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (8.75)$$

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s}{E_s} - k_t \frac{f_{ct,ef}}{E_s \cdot \rho_{p,ef}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,ef}) \quad (8.76)$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (8.77)$$

Em que,

σ<sub>s</sub> - tensão no aço calculada com base na secção fendilhada;

k<sub>t</sub> - é um fator de integração da distribuição de extensões, e que tem em conta a duração ou a repetição das cargas (k<sub>t</sub>=0,6 para ações de curta duração; k<sub>t</sub>=0,4 para ações de longa duração);

f<sub>ct,ef</sub> - valor medio da tensão resistente do betão à tração (=f<sub>ctm</sub>);

ε<sub>sm</sub>-ε<sub>cm</sub> - representa a extensão relativa aço-betão.

## B. CÁLCULOS DAS ESTRUTURAS METÁLICAS

Tabela 8.4 - Características dos perfis utilizados nos dimensionamentos

Grandeza	IPE 270	HE220A	HE280A	HE300A	Unidade
A	4595	6434	9726	11250	mm <sup>2</sup>
b	135	220	280	300	mm
h	270	210	270	290	mm
h <sub>w</sub> ou d	219,6	152	196	208	mm
t <sub>f</sub>	10,2	11	13	14	mm
t <sub>w</sub>	6,6	7	8	8,5	mm
i <sub>z</sub>	30,2	55,1	70	74,9	mm
i <sub>y</sub>	112,3	91,7	118,6	127,4	mm
r	15	18	24	27	mm
W <sub>EL,z</sub>	62200	177700	340200	420600	mm <sup>3</sup>
W <sub>EL,y</sub>	428900	512200	1013000	1260000	mm <sup>3</sup>
W <sub>PL,z</sub>	96950	270600	518100	641200	mm <sup>3</sup>
W <sub>PL,y</sub>	484000	568500	1112000	1383000	mm <sup>3</sup>
I <sub>z</sub>	4199000	19550000	47630000	63100000	mm <sup>4</sup>
I <sub>y</sub>	57900000	54100000	1,37E+08	182600000	mm <sup>4</sup>
I <sub>w</sub>	70580000000	1,933E+11	7,85E+11	1,2E+12	mm <sup>6</sup>
I <sub>t</sub>	159400	284600	621000	851700	mm <sup>4</sup>
Massa linear	36,1	50,5	76,4	83,3	kg/m
A <sub>vz</sub>	2214	2067	3174	3728	mm <sup>2</sup>

Tabela 8.5 - Tensões de cedência utilizadas no dimensionamento

Tensão de cedência	
Aço carbono	Aço Inoxidável
235 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>

**B.1 Verificações para Estrutura metálica em Aço Carbono com Perfis “I” e “H”****a. Vento A**

Tabela 8.6 - Aço Carbono: Classificação das secções transversais (Vento A)

Pórtico	Perfil		Componente	Componente solicitado à flexão e compressão						c	a	$\alpha$
				c/t	24,5	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	70,0	OK			
Pórtico Este e Oeste	Pilares	HE280A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	70,0	OK	196,0	4,69	0,51
			Banzo	c/t	8,6	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,3	OK	112,0		0,52
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	70,3	OK	219,6	4,48	0,51
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	16,2	OK	49,2		0,55
Pórtico Central	Pilares	HE280A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	69,5	OK	196,0	5,89	0,52
			Banzo	c/t	8,6	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,1	OK	112,0		0,53
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	69,6	OK	219,6	6,32	0,51
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	15,9	OK	49,2		0,56
Pórtico Norte	Pilar Interno	HE280A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	69,3	OK	196,0	5,89	0,52
			Banzo	c/t	8,6	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,1	OK	112,0		0,53
	Pilares Externos	HE280A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	70,0	OK	196,0	4,69	0,51
			Banzo	c/t	8,6	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,3	OK	112,0		0,52
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	71,9	OK	219,6	0,35	0,50
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,9	OK	49,2		0,50
Pórtico Sul	Pilar Interno	HE220A	Alma	c/t	21,7	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	62,9	OK	152,0	18,55	0,56
			Banzo	c/t	8,0	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	14,9	OK	88,5		0,60
	Pilares Externos	HE220A	Alma	c/t	21,7	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	64,7	OK	152,0	14,47	0,55
			Banzo	c/t	8,0	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	15,5	OK	88,5		0,58
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	71,9	OK	219,6	0,21	0,50
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,9	OK	49,2		0,50
$\varepsilon = 1$												

Como os critérios de classificação foram verificados para a classe 1, pode-se concluir que todos os perfis escolhidos são da classe 1.

Tabela 8.7 - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A)

Esforços solicitantes Pórtico Este e Oeste		Pilares - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	8,8	OK	1079,8	≥	7,0	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		171,5	OK	113,7		51,5	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		3,0	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		38,7	OK	300,4		12,3	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		8,8	OK	270,0		7,0	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5				340,6			
Esforços solicitantes Pórtico Central		Pilares - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	11,1	OK	1079,8	≥	9,8	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		232,3	OK	113,7		69,3	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		0,0	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		53,1	OK	300,4		15,8	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		11,1	OK	270,0		9,8	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5				340,6			

Tabela 8.7 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A)

Esforços solicitantes Pórtico Norte		Pilar Interno - HE280A				Pilares Externos - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	11,1	OK	2285,6	≥	8,8	OK	1079,8	≥	0,5	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		232,3	OK	261,3		171,5	OK	113,7		4,5	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		0,0	OK	121,8		3,0	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		53,1	OK	430,6		38,7	OK	300,4		2,6	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		11,1	OK	571,4		8,8	OK	270,0		0,5	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5				368,5				340,6			
Esforços solicitantes Pórtico Sul		Pilar Interno - HE220A				Pilares Externos - HE220A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		1512,0	≥	30,5	OK	1512,0	≥	23,8	OK	1079,8	≥	0,3	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		133,6		67,5	OK	133,6		51,6	OK	113,7		4,9	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		63,6		0,0	OK	63,6		2,0	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		280,4		9,8	OK	280,4		7,2	OK	300,4		2,7	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	378,0		30,5	OK	378,0		23,8	OK	270,0		0,3	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	125,0				125,0				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	250,0				250,0				340,6			

Tabela 8.8 - Curvas de encurvadura em função da secção transversal

			$\alpha$	$\alpha_{LT}$
<b>Perfis H</b>	Eixo de flexão em y	Curva b	0,34	0,76
	Eixo de flexão em z	Curva c	0,49	
<b>Perfis I</b>	Eixo de flexão em y	Curva a	0,21	0,21
	Eixo de flexão em z	Curva b	0,34	

Tabela 8.9 - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

<b>Pórtico Este e Oeste</b>	<b>Pilares HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6533	ou 0,6491		
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3895		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6458	ou 0,6444		
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3866		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,7155	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,4444	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5181	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6443	ou 0,6447		
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3866		
		$\lambda_{LT}$	1,22	<b>1ª Equação</b>	0,5718	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\phi_{LT}$	1,35	<b>2ª Equação</b>	0,4255	$\leq 1$	<b>OK</b>	
<b>Pórtico Central</b>	<b>Pilares HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6567	ou 0,6515		
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3909		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6473	ou 0,6455		
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3873		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,9570	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,5805	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5181	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6462	ou 0,6466		
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3877		
		$\lambda_{LT}$	1,22	<b>1ª Equação</b>	0,7732	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\phi_{LT}$	1,35	<b>2ª Equação</b>	0,5802	$\leq 1$	<b>OK</b>	

Tabela 8.8 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

<b>Pórtico Norte</b>	<b>Pilar Interno HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6567	ou	0,6514	
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3909		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6473	ou	0,6455	
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3873		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,9570	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,5805	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6533	ou	0,6491	
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3895		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6458	ou	0,6444	
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3866		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,7155	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,4444	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5791	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6403	ou	0,6404	
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3842		
		$\lambda_{LT}$	1,12	<b>1ª Equação</b>	0,0448	$\leq 1$	<b>OK</b>	
$\phi_{LT}$		1,23	<b>2ª Equação</b>	0,0333	$\leq 1$	<b>OK</b>		

CAPÍTULO 8

Tabela 8.8 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

<b>Pórtico Sul</b>	<b>Pilar Interno HE220A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	1,0520	$\chi_{LT}$	0,5777	
		$\lambda_y$	1,63	$C_{my} = C_{mz}$		0,64		
		$\lambda_z$	1,68	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,7760	ou 0,7089		
		$\phi_y$	2,06	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,4253		
		$\phi_z$	2,28	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,7014	ou 0,6745		
		$\chi_y$	0,30	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,4047		
		$\chi_z$	0,26	<b>1ª Equação</b>	0,6576	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,80	<b>2ª Equação</b>	0,4311	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE220A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	1,0520	$\chi_{LT}$	0,5777	
		$\lambda_y$	1,63	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,68	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,7461	ou 0,6938		
		$\phi_y$	2,06	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,4163		
		$\phi_z$	2,28	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6879	ou 0,6669		
		$\chi_y$	0,30	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,4001		
		$\chi_z$	0,26	<b>1ª Equação</b>	0,5113	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,80	<b>2ª Equação</b>	0,3491	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9				$\chi_{LT}$	0,5791
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6402	ou 0,6402		
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3841		
		$\lambda_{LT}$	1,12	<b>1ª Equação</b>	0,0478	$\leq 1$	<b>OK</b>	
$\phi_{LT}$		1,23	<b>2ª Equação</b>	0,0324	$\leq 1$	<b>OK</b>		

## b. Vento C e D

Tabela 8.10 - Aço Carbono: Classificação das secções transversais (Vento C e D)

Pórtico	Perfil		Componente	Componente solicitado à flexão e compressão						c	a	$\alpha$
				c/t	24,5	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	66,7	OK			
Pórtico Este e Oeste	Pilares	HE280A	Alma	c/t	24,5	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	66,7	OK	196,0	13,22	0,53
			Banzo	c/t	8,6	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,1	OK	112,0		0,56
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	72,0	OK	219,6	0,11	0,50
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	18,0	OK	49,2		0,50
Pórtico Central	Pilares	HE280A	Alma	c/t	24,5	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	67,5	OK	196,0	10,99	0,53
			Banzo	c/t	8,6	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,4	OK	112,0		0,55
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	72,0	OK	219,6	0,11	0,50
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	18,0	OK	49,2		0,50
Pórtico Norte	Pilar Interno	HE280A	Alma	c/t	24,5	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	67,5	OK	196,0	10,99	0,53
			Banzo	c/t	8,6	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,4	OK	112,0		0,55
	Pilares Externos	HE280A	Alma	c/t	24,5	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	66,7	OK	196,0	13,22	0,53
			Banzo	c/t	8,6	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,1	OK	112,0		0,56
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	66,8	OK	219,6	14,51	0,53
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	13,9	OK	49,2		0,65
Pórtico Sul	Pilar Interno	HE220A	Alma	c/t	21,7	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	67,1	OK	152,0	9,31	0,53
			Banzo	c/t	8,0	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,3	OK	88,5		0,55
	Pilares Externos	HE220A	Alma	c/t	21,7	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	65,4	OK	152,0	12,91	0,54
			Banzo	c/t	8,0	≤	$9\varepsilon/\alpha$	15,7	OK	88,5		0,57
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$396\varepsilon/(13\alpha-1)$	66,9	OK	219,6	14,16	0,53
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	14,0	OK	49,2		0,64
$\varepsilon = 1$												

Como os critérios de classificação foram verificados para a classe 1, pode-se concluir que todos os perfis escolhidos são da classe 1.

CAPÍTULO 8

Tabela 8.11 - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D)

Esforços solicitantes Pórtico Este e Oeste		Pilares - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	24,9	OK	1079,8	≥	0,2	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		68,8	OK	113,7		4,3	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		1,9	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		20,6	OK	300,4		2,4	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		24,9	OK	270,0		0,2	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5			340,6				
Esforços solicitantes Pórtico Central		Pilares - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	20,7	OK	1079,8	≥	0,2	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		67,2	OK	113,7		4,3	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		0,0	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		13,4	OK	300,4		2,4	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		20,7	OK	270,0		0,2	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5			340,6				

Tabela 8.10 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D)

Esforços solicitantes Pórtico Norte		Pilar Interno - HE280A				Pilares Externos - HE280A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2285,6	≥	20,7	OK	2285,6	≥	24,9	OK	1079,8	≥	22,5	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		261,3		67,2	OK	261,3		68,8	OK	113,7		36,9	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		121,8		0,0	OK	121,8		1,9	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		430,6		13,4	OK	430,6		20,6	OK	300,4		8,3	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	571,4		20,7	OK	571,4		24,9	OK	270,0		22,5	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	184,2				184,2				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	368,5			368,5			340,6					
Esforços solicitantes Pórtico Sul		Pilar Interno - HE220A				Pilares Externos - HE220A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		1512,0	≥	15,3	OK	1512,0	≥	21,2	OK	1079,8	≥	22,0	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		133,6		58,7	OK	133,6		63,2	OK	113,7		46,9	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		63,6		0,0	OK	63,6		1,5	OK	22,8		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		280,4		12,9	OK	280,4		21,1	OK	300,4		9,5	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	378,0		15,3	OK	378,0		21,2	OK	270,0		22,0	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	125,0				125,0				170,3			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	250,0			250,0			340,6					

Tabela 8.12 - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

Pórtico Este e Oeste	Pilares HE280A	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6776	ou	0,6657	
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3994		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6564	ou	0,6524	
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3915		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,3135	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,2088	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Vigas IPE270	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5181	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6401	ou	0,6401	
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3841		
		$\lambda_{LT}$	1,22	<b>1ª Equação</b>	0,0468	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\phi_{LT}$	1,35	<b>2ª Equação</b>	0,0301	$\leq 1$	<b>OK</b>	
Pórtico Central	Pilares HE280A	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6713	ou	0,6614	
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3968		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6537	ou	0,6455	
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3902		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,2958	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,1892	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Vigas IPE270	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5181	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6401	ou	0,6401	
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3841		
		$\lambda_{LT}$	1,22	<b>1ª Equação</b>	0,0468	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\phi_{LT}$	1,35	<b>2ª Equação</b>	0,0301	$\leq 1$	<b>OK</b>	

CAPÍTULO 8

Tabela 8.9 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

<b>Pórtico Norte</b>	<b>Pilar Interno HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6712	ou 0,6614		
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3968		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6537	ou 0,6503		
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3902		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,2958	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,1892	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE280A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	0,9982	$\chi_{LT}$	0,6065	
		$\lambda_y$	1,26	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,32	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,6776	ou 0,6657		
		$\phi_y$	1,47	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,3994		
		$\phi_z$	1,65	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6564	ou 0,6524		
		$\chi_y$	0,45	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3915		
		$\chi_z$	0,38	<b>1ª Equação</b>	0,7155	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,76	<b>2ª Equação</b>	0,4444	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5791	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6542	ou 0,6552		
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3925		
		$\lambda_{LT}$	1,12	<b>1ª Equação</b>	0,3964	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\phi_{LT}$	1,23	<b>2ª Equação</b>	0,5047	$\leq 1$	<b>OK</b>	

Tabela 8.9 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

<b>Pórtico Sul</b>	<b>Pilar Interno HE220A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	1,0520	$\chi_{LT}$	0,5777	
		$\lambda_y$	1,63	$C_{my} = C_{mz}$		0,64		
		$\lambda_z$	1,68	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,7083	ou 0,6746		
		$\phi_y$	2,06	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,4047		
		$\phi_z$	2,28	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6708	ou 0,6573		
		$\chi_y$	0,30	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3944		
		$\chi_z$	0,26	<b>1ª Equação</b>	0,5336	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,80	<b>2ª Equação</b>	0,3385	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE220A</b>	$\lambda_1$	93,9	$\phi_{LT}$	1,0520	$\chi_{LT}$	0,5777	
		$\lambda_y$	1,63	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\lambda_z$	1,68	$k_{zz}(\text{mínimo})$	0,7347	ou 0,6880		
		$\phi_y$	2,06	$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz}$	$k_{yz} =$	0,4128		
		$\phi_z$	2,28	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6828	ou 0,6640		
		$\chi_y$	0,30	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3984		
		$\chi_z$	0,26	<b>1ª Equação</b>	0,6000	$\leq 1$	<b>OK</b>	
		$\lambda_{LT}$	0,80	<b>2ª Equação</b>	0,3956	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	93,9			$\chi_{LT}$	0,5791	
		$\lambda_y$	0,95	$C_{my} = C_{mz}$		0,6400		
		$\phi_y$	1,03	$k_{yy}(\text{mínimo})$	0,6439	ou 0,6548		
		$\chi_y$	0,70	$k_{zy} = 0,6 \times k_{yy}$	$k_{zy} =$	0,3929		
		$\lambda_{LT}$	1,12	<b>1ª Equação</b>	0,4948	$\leq 1$	<b>OK</b>	
$\phi_{LT}$		1,23	<b>2ª Equação</b>	0,5576	$\leq 1$	<b>OK</b>		

## B.2 Verificações para Estrutura metálica em Aço Inoxidável com Perfis “I” e “H”

## a. Vento A

Tabela 8.13 - Aço Inoxidável: Classificação das secções transversais (Vento A)

Pórtico	Perfil		Componente	Componente solicitado à flexão e compressão						c	a	$\alpha$
				c/t	24,5	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	55,7	OK			
Pórtico Este e Oeste	Pilares	HE300A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	55,7	OK	208,0	6,41	0,52
			Banzo	c/t	8,5	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,6	OK	118,8		0,53
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	56,4	OK	219,6	4,38	0,51
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,0	OK	49,2		0,54
Pórtico Central	Pilares	HE300A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	55,8	OK	208,0	6,03	0,51
			Banzo	c/t	8,5	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,6	OK	118,8		0,53
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	55,8	OK	219,6	6,20	0,51
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	16,5	OK	49,2		0,56
Pórtico Norte	Pilar Interno	HE300A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	55,8	OK	208,0	6,03	0,51
			Banzo	c/t	8,5	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,6	OK	118,8		0,53
	Pilares Externos	HE300A	Alma	c/t	24,5	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	71,6	OK	208,0	6,41	0,52
			Banzo	c/t	8,5	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	17,6	OK	118,8		0,53
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	57,6	OK	219,6	0,42	0,50
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	18,4	OK	49,2		0,50
Pórtico Sul	Pilar Interno	HE220A	Alma	c/t	21,7	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	49,7	OK	152,0	20,51	0,57
			Banzo	c/t	8,0	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	15,1	OK	88,5		0,62
	Pilares Externos	HE220A	Alma	c/t	21,7	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	51,3	OK	152,0	15,97	0,55
			Banzo	c/t	8,0	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	15,7	OK	88,5		0,59
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	$\leq$	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	57,6	OK	219,6	0,23	0,50
			Banzo	c/t	4,8	$\leq$	$9\varepsilon/\alpha$	18,5	OK	49,2		0,50
$\varepsilon = 1,03$												

Como os critérios de classificação foram verificados para a classe 1, pode-se concluir que todos os perfis escolhidos são da classe 1.

Tabela 8.14 - Aço Inoxidável: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A)

Esforços solicitantes Pórtico Leste e Oeste		Pilares - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	11,4	OK	877,2	≥	6,1	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		181,0	OK	92,4		54,0	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		3,2	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		39,6	OK	244,0		12,0	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		11,4	OK	219,3		6,1	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			304,4				
Esforços solicitantes Pórtico Central		Pilares - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	10,8	OK	877,2	≥	8,6	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		232,3	OK	92,4		63,6	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		0,0	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		52,7	OK	244,0		15,3	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		10,8	OK	219,3		8,6	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			304,4				

Tabela 8.11 (Continuação) - Aço Carbono: Verificação de segurança das secções transversais (Vento A)

Esforços solicitantes Pórtico Norte		Pilar Interno - HE300A				Pilares Externos - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	10,8	OK	2147,7	≥	11,4	OK	877,2	≥	0,6	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		232,3	OK	290,4		181,0	OK	92,4		4,4	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		0,0	OK	122,4		3,2	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		52,7	OK	410,9		39,6	OK	244,0		2,5	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		10,8	OK	536,9		11,4	OK	219,3		0,6	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			371,3			304,4					
Esforços solicitantes Pórtico Sul		Pilar Interno - HE220A				Pilares Externos - HE220A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		1228,3	≥	30,2	OK	1228,3	≥	23,5	OK	877,2	≥	0,3	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		108,5		58,6	OK	108,5		44,6	OK	92,4		4,9	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		51,7		0,0	OK	51,7		2,0	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		227,8		8,1	OK	227,8		6,3	OK	244,0		2,7	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	307,1		30,2	OK	307,1		23,5	OK	219,3		0,3	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	111,7				111,7				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	223,4			223,4			304,4					

Tabela 8.15 - Curvas de encurvadura em função do eixo de flexão

	<b><math>\alpha</math></b>
<b>Eixo de flexão em y</b>	0,49
<b>Eixo de flexão em z</b>	0,76

Tabela 8.16 - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

<b>Pórtico Este e Oeste</b>	<b>Pilares HE300A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0146	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0199	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,7621	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Viga IPE270</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0099	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,5808	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,8006	$\leq 1$	<b>OK</b>	
<b>Pórtico Central</b>	<b>Pilares HE300A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0137	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0187	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,9732	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Viga IPE270</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0140	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,8219	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,9660	$\leq 1$	<b>OK</b>	

Tabela 8.13 (Continuação) - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

Pórtico Norte	<b>Pilar Interno HE300A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0137	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0187	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,9732	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE300A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0146	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0199	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,7621	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0009	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,0555	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,0669	$\leq 1$	<b>OK</b>	

Tabela 8.13 (Continuação) - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento A)

Pórtico Sul	Pilar Interno HE220A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		356,7		
		$\lambda_y$	1,58	$N_{b,z,Rd}$		299,3		
		$\lambda_z$	1,63					
		$\phi_y$	2,08	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	2,38	$k_y$	1,1823	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,29	$k_z$	1,2282	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,24	<b>Equação</b>	0,7491	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Pilares Externos HE220A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		356,7		
		$\lambda_y$	1,58	$N_{b,z,Rd}$		299,3		
		$\lambda_z$	1,63					
		$\phi_y$	2,08	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	2,38	$k_y$	1,1420	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,29	$k_z$	1,1778	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,24	<b>Equação</b>	0,5717	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Vigas IPE270	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1		
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1		
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0005	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,0306	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,0685	$\leq 1$	<b>OK</b>	

## b. Vento C e D

Tabela 8.17 - Aço Inoxidável: Classificação das secções transversais (Vento C e D)

Pórtico	Perfil		Componente	Componente solicitado à flexão e compressão						c	a	$\alpha$
Pórtico Este e Oeste	Pilares	HE300A	Alma	c/t	24,5	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,2	OK	208,0	14,94	0,54
			Banzo	c/t	8,5	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,5	OK	118,8		0,56
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	57,6	OK	219,6	0,12	0,50
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	18,5	OK	49,2		0,50
Pórtico Central	Pilares	HE300A	Alma	c/t	24,5	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,7	OK	208,0	12,94	0,53
			Banzo	c/t	8,5	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,7	OK	118,8		0,55
	Viga	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	57,6	OK	219,6	0,12	0,50
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	18,5	OK	49,2		0,50
Pórtico Norte	Pilar Interno	HE300A	Alma	c/t	24,5	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,7	OK	208,0	12,94	0,53
			Banzo	c/t	8,5	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,7	OK	118,8		0,55
	Pilares Externos	HE300A	Alma	c/t	24,5	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	68,4	OK	208,0	14,94	0,54
			Banzo	c/t	8,5	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,5	OK	118,8		0,56
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,0	OK	219,6	16,28	0,54
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	13,9	OK	49,2		0,67
Pórtico Sul	Pilar Interno	HE220A	Alma	c/t	21,7	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,4	OK	152,0	10,40	0,53
			Banzo	c/t	8,0	≤	$9\varepsilon/\alpha$	16,6	OK	88,5		0,56
	Pilares Externos	HE220A	Alma	c/t	21,7	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	51,9	OK	152,0	14,44	0,55
			Banzo	c/t	8,0	≤	$9\varepsilon/\alpha$	15,9	OK	88,5		0,58
	Vigas	IPE270	Alma	c/t	33,3	≤	$308\varepsilon/(13\alpha-1)$	53,1	OK	219,6	15,84	0,54
			Banzo	c/t	4,8	≤	$9\varepsilon/\alpha$	14,0	OK	49,2		0,66
$\varepsilon = 1,03$												

Como os critérios de classificação foram verificados para a classe 1, pode-se concluir que todos os perfis escolhidos são da classe 1.

Tabela 8.18 - Aço Inoxidável: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D)

Esforços solicitantes Pórtico Leste e Oeste		Pilares - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	26,7	OK	877,2	≥	0,2	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		71,6	OK	92,4		4,2	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		2,0	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		20,5	OK	244,0		2,5	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		26,7	OK	219,3		0,2	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			304,4				
Esforços solicitantes Pórtico Central		Pilares - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	23,1	OK	877,2	≥	0,2	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		70,1	OK	92,4		4,2	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		2,0	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		13,4	OK	244,0		2,4	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		23,1	OK	219,3		0,2	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			304,4				

Tabela 8.15 (Continuação) - Aço Inoxidável: Verificação de segurança das secções transversais (Vento C e D)

Esforços solicitantes Pórtico Norte		Pilar Interno - HE300A				Pilares Externos - HE300A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		2147,7	≥	23,1	OK	2147,7	≥	26,7	OK	877,2	≥	22,6	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		290,4		70,1	OK	290,4		71,6	OK	92,4		33,6	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		122,4		2,0	OK	122,4		2,0	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		410,9		13,4	OK	410,9		20,5	OK	244,0		7,8	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	536,9		23,1	OK	536,9		26,7	OK	219,3		22,6	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	185,6				185,6				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	371,3			371,3			304,4					
Esforços solicitantes Pórtico Sul		Pilar Interno - HE220A				Pilares Externos - HE220A				Vigas - IPE 270			
		Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V	Rd	C	Ed	V
$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd}$ (kN)		1228,3	≥	15,3	OK	1228,3	≥	21,2	OK	877,2	≥	22,0	OK
$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$ (kN.m)		108,5		58,7	OK	108,5		63,2	OK	92,4		44,9	OK
$M_{c,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$ (kN.m)		51,7		1,5	OK	51,7		1,5	OK	18,5		0,0	OK
$V_{pl,Rd}$ (kN)		227,8		12,9	OK	227,8		21,1	OK	244,0		9,5	OK
Eixo y-y	$0,25 \times N_{pl,Rd}$	307,1		15,3	OK	307,1		22,2	OK	219,3		22,0	OK
	$0,50 \times h_w \times t_w \times f_y$	111,7				111,7				152,2			
Eixo z-z	$h_w \times t_w \times f_y$	223,4			223,4			304,4					

Tabela 8.19 - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

Pórtico Este e Oeste	Pilares HE300A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0340	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0463	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,3290	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Viga IPE270	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0003	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,0163	ou	1,2	
$\chi_z$		0,07	<b>Equação</b>	0,0571	$\leq 1$	<b>OK</b>		
Pórtico Central	Pilares HE300A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0294	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0401	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,3380	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Viga IPE270	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0003	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	1,0163	ou	1,2	
$\chi_z$		0,07	<b>Equação</b>	0,0572	$\leq 1$	<b>OK</b>		

Tabela 8.16 (Continuação) - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

Pórtico Norte	Pilar Interno HE300A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0294	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0401	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,3380	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Pilares Externos HE300A	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		999,4	kN	
		$\lambda_y$	1,14	$N_{b,z,Rd}$		807,1	kN	
		$\lambda_z$	1,20					
		$\phi_y$	1,37	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	1,60	$k_y$	1,0340	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,47	$k_z$	1,0463	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,38	<b>Equação</b>	0,3290	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	Vigas IPE270	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1	kN	
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1	kN	
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0369	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	3,1596	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,8060	$\leq 1$	<b>OK</b>	

Tabela 8.16 (Continuação) - Aço Inoxidável: Verificação da flexão composta desviada (Vento C e D)

Pórtico Sul	<b>Pilar Interno HE220A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		356,7		
		$\lambda_y$	1,58	$N_{b,z,Rd}$		299,3		
		$\lambda_z$	1,63					
		$\phi_y$	2,08	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	2,38	$k_y$	1,0925	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,29	$k_z$	1,1157	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,24	<b>Equação</b>	0,7344	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Pilares Externos HE220A</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		356,7		
		$\lambda_y$	1,58	$N_{b,z,Rd}$		299,3		
		$\lambda_z$	1,63					
		$\phi_y$	2,08	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	2,38	$k_y$	1,1283	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,29	$k_z$	1,1606	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,24	<b>Equação</b>	0,7695	$\leq 1$	<b>OK</b>	
	<b>Vigas IPE270</b>	$\lambda_1$	96,7	$N_{b,y,Rd}$		515,1		
		$\lambda_y$	0,92	$N_{b,z,Rd}$		61,1		
		$\lambda_z$	3,42					
		$\phi_y$	1,10	<b>Compressão Axial e flexão bi-axial</b>				
		$\phi_z$	7,59	$k_y$	1,0359	ou	1,2	
		$\chi_y$	0,59	$k_z$	3,1012	ou	1,2	
		$\chi_z$	0,07	<b>Equação</b>	0,9423	$\leq 1$	<b>OK</b>	



## C. CÁLCULOS DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Tabela 8.20 - Áreas e pesos dos vários varões

$\phi$	Área de seção de um varão (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg/m)
6	0,28	0,22
8	0,50	0,40
10	0,79	0,62
12	1,13	0,89
16	2,01	1,58
20	3,14	2,47

### C.1 Lajes

Tabela 8.21 - Aço Carbono: Esforços nas lajes e respetivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$ [kN.m/m]	$\mu$ [-]	$\omega$ [-]	$A_{s(calc)}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,min}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$A_s$ [cm <sup>2</sup> /m]	Armadura [cm <sup>2</sup> /m]	Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]				
										$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$		
1	1	x	vão	24,17	0,054	0,056	3,83	2,26	3,83	$\phi 10//0,20$	3,93	9,05	1,81	$\phi 6//0,125$ (2,26)
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	22,88	0,051	0,053	3,62	2,26	3,62	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			
	2	x	vão	24,17	0,054	0,056	3,83	2,26	3,83	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	22,88	0,051	0,053	3,62	2,26	3,62	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			
	3	x	vão	14,88	0,033	0,034	2,33	2,26	2,33	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	18,28	0,041	0,042	2,87	2,26	2,87	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			
	4	x	vão	14,88	0,033	0,034	2,33	2,26	2,33	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	18,28	0,041	0,042	2,87	2,26	2,87	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			
	5	x	vão	24,17	0,054	0,056	3,83	2,26	3,83	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	22,88	0,051	0,053	3,62	2,26	3,62	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			
	6	x	vão	24,17	0,054	0,056	3,83	2,26	3,83	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-49,1	0,109	0,117	8,10	2,26	8,10	$\phi 12//0,125$	9,05			
		y	vão	22,88	0,051	0,053	3,62	2,26	3,62	$\phi 10//0,20$	3,93			
			bordo	-42	0,093	0,099	6,85	2,26	6,85	$\phi 10//0,10$	7,85			

CAPÍTULO 8

Tabela 8.2 (Continuação) - Aço Carbono: Esforços nas lajes e respectivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$ (calc)	$A_{s,min}$	$A_s$	Armadura		Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]			
			[kN.m/m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$	
2	1	x	vão	24,25	0,054	0,056	3,85	2,26	3,85	φ10//0,20	3,93	9,05	1,81	φ6//0,125 (2,26)
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,052	0,053	3,67	2,26	3,67	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			
	2	x	vão	24,25	0,054	0,056	3,85	2,26	3,85	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,052	0,053	3,67	2,26	3,67	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			
	3	x	vão	15,94	0,035	0,036	2,50	2,26	2,50	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,01	0,040	0,041	2,83	2,26	2,83	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			
	4	x	vão	15,94	0,035	0,036	2,50	2,26	2,50	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,01	0,040	0,041	2,83	2,26	2,83	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			
	5	x	vão	24,25	0,054	0,056	3,85	2,26	3,85	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,052	0,053	3,67	2,26	3,67	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			
	6	x	vão	24,25	0,054	0,056	3,85	2,26	3,85	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,104	0,112	7,72	2,26	7,72	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,052	0,053	3,67	2,26	3,67	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,089	0,094	6,50	2,26	6,50	φ10//0,10	7,85			

Tabela 8.2 (Continuação) - Aço Carbono: Esforços nas lajes e respectivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$ (calc)	$A_{s,min}$	$A_s$	Armadura	Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]				
			[kN.m/m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$		
3	1	x	vão	21,12	0,047	0,048	3,33	2,26	3,33	φ10//0,20	3,93	9,05	1,81	φ6//0,125 (2,26)
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,044	0,045	3,10	2,26	3,10	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			
	2	x	vão	21,12	0,047	0,048	3,33	2,26	3,33	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,044	0,045	3,10	2,26	3,10	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			
	3	x	vão	12,4	0,028	0,028	1,93	2,26	2,26	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	16,85	0,037	0,038	2,64	2,26	2,64	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			
	4	x	vão	12,4	0,028	0,028	1,93	2,26	2,26	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	16,85	0,037	0,038	2,64	2,26	2,64	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			
	5	x	vão	21,12	0,047	0,048	3,33	2,26	3,33	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,044	0,045	3,10	2,26	3,10	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			
	6	x	vão	21,12	0,047	0,048	3,33	2,26	3,33	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,081	0,086	5,91	2,26	5,91	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,044	0,045	3,10	2,26	3,10	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,081	0,085	5,86	2,26	5,86	φ10//0,10	7,85			

CAPÍTULO 8

Tabela 8.22 - Aço Inoxidável: Esforços nas lajes e respectivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$ (calc)	$A_{s,min}$	$A_s$	Armadura		Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]			
			[kN.m/m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$		
1	1	x	vão	24,17	0,042	0,043	3,36	2,56	3,36	φ10//0,20	3,93	9,05	1,81	φ6//0,125 (2,26)
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	22,88	0,040	0,041	3,17	2,56	3,17	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			
	2	x	vão	24,17	0,042	0,043	3,36	2,56	3,36	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	22,88	0,040	0,041	3,17	2,56	3,17	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			
	3	x	vão	14,88	0,026	0,026	2,04	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,28	0,032	0,032	2,52	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			
	4	x	vão	14,88	0,026	0,026	2,04	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,28	0,032	0,032	2,52	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			
	5	x	vão	24,17	0,042	0,043	3,36	2,56	3,36	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	22,88	0,040	0,041	3,17	2,56	3,17	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			
	6	x	vão	24,17	0,042	0,043	3,36	2,56	3,36	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-49,1	0,085	0,090	7,02	2,56	7,02	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	22,88	0,040	0,041	3,17	2,56	3,17	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-42	0,073	0,076	5,95	2,56	5,95	φ10//0,10	7,85			

Tabela 8.3 (Continuação) - Aço Inoxidável: Esforços nas lajes e respectivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$ (calc)	$A_{s,min}$	$A_s$	Armadura	Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]				
			[kN.m/m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$		
2	1	x	vão	24,25	0,042	0,043	3,37	2,56	3,37	φ10//0,20	3,93	9,05	1,81	φ6//0,125 (2,26)
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,040	0,041	3,21	2,56	3,21	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			
	2	x	vão	24,25	0,042	0,043	3,37	2,56	3,37	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,040	0,041	3,21	2,56	3,21	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			
	3	x	vão	15,94	0,028	0,028	2,19	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,01	0,031	0,032	2,48	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			
	4	x	vão	15,94	0,028	0,028	2,19	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	18,01	0,031	0,032	2,48	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			
	5	x	vão	24,25	0,042	0,043	3,37	2,56	3,37	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,040	0,041	3,21	2,56	3,21	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			
	6	x	vão	24,25	0,042	0,043	3,37	2,56	3,37	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-46,94	0,081	0,086	6,69	2,56	6,69	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	23,18	0,040	0,041	3,21	2,56	3,21	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-40	0,069	0,072	5,66	2,56	5,66	φ10//0,10	7,85			

CAPÍTULO 8

Tabela 8.3 (Continuação) - Aço Inoxidável: Esforços nas lajes e respectivas armaduras adotadas

Piso	Painel	Direção	$M_{sd}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$ (calc)	$A_{s,min}$	$A_s$	Armadura		Armadura de Distribuição [cm <sup>2</sup> /m]			
			[kN.m/m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	$A_{s,max}$	$A_{s,d}$	$A_{adop}$	
3	1	x	vão	21,12	0,037	0,037	2,92	2,56	2,92	φ10//0,20	3,93	9,05	1,81	φ6//0,125 (2,26)
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,034	0,035	2,72	2,56	2,72	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			
	2	x	vão	21,12	0,037	0,037	2,92	2,56	2,92	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,034	0,035	2,72	2,56	2,72	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			
	3	x	vão	12,4	0,021	0,022	1,70	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	16,85	0,029	0,030	2,32	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			
	4	x	vão	12,4	0,021	0,022	1,70	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	16,85	0,029	0,030	2,32	2,56	2,56	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			
	5	x	vão	21,12	0,037	0,037	2,92	2,56	2,92	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,034	0,035	2,72	2,56	2,72	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			
	6	x	vão	21,12	0,037	0,037	2,92	2,56	2,92	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,57	0,063	0,066	5,15	2,56	5,15	φ10//0,10	7,85			
		y	vão	19,67	0,034	0,035	2,72	2,56	2,72	φ10//0,20	3,93			
			bordo	-36,3	0,063	0,065	5,11	2,56	5,11	φ10//0,10	7,85			

## C.2 Sapatas

Tabela 8.23 - Dimensões das sapatas e verificação de segurança do solo

	Características do pilar		Tensão admissível do solo		Dimensão da sapata			Verificação da Tensão do Solo	
	b	h	$\sigma_{adm}$	N	A (=B)	Adotar	H	$N_{raro}$	$< \sigma_{adm}$
	[m]	[m]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN]	[m]	[m]	[m]	[kN]	[kN/m <sup>2</sup> ]
<b>P1</b>	0,3	0,3	400	626,6	1,25	1,3	0,60	475,0	281,0
<b>P2/3</b>	0,3	0,5		1324,1	1,82	2,0	0,60	1010,4	252,6
<b>P4</b>	0,3	0,5		2188,1	2,34	2,5	1,00	1687,5	270,0

Tabela 8.24 - Determinação das armaduras das sapatas

	Armadura -Direção xx						Armadura -Direção yy				
	d	F <sub>t</sub>	A <sub>s</sub>	(A <sub>s</sub> /s)	$\phi$		F <sub>t</sub>	A <sub>s</sub>	(A <sub>s</sub> /s)	$\phi$	
	[m]	[kN]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[kN]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]
<b>P1</b>	0,54	145,1	3,33	2,57	$\phi 10//0,2$	3,93	145,1	3,33	2,57	$\phi 10//0,2$	3,93
<b>P2/3</b>	0,54	521,1	11,98	5,99	$\phi 10//0,125$	6,28	459,8	10,57	5,28	$\phi 10//0,125$	6,28
<b>P4</b>	0,90	668,6	15,37	6,15	$\phi 10//0,125$	6,28	607,8	13,97	5,59	$\phi 10//0,125$	6,28

Foram consideradas sapatas sem excentricidade, pois os momentos nos pilares eram muito inferiores ao seu esforço axial, ou seja as excentricidades eram muito próximas de zero.

## C.3 Pilares

Tabela 8.25 - Aço Carbono: Características dos pilares

Caraterísticas dos pilares													
Pilar	b	h	b <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	L	L <sub>0</sub>	$\lambda_x$	$\lambda_y$	Nº pilares
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>4</sup> ]	[m <sup>4</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]
<b>P1</b>	0,3	0,3	0,05	0,05	0,000675	0,000675	0,087	0,087	3	3	34,64	34,64	1
<b>Restantes</b>	0,3	0,5	0,05	0,05	0,003125	0,001125	0,144	0,087	3	3	20,78	34,64	1

Tabela 8.26 - Aço Inoxidável: Características dos pilares

Caraterísticas dos pilares													
Pilar	b	h	b <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	L	L <sub>0</sub>	$\lambda_x$	$\lambda_y$	Nº pilares
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m <sup>4</sup> ]	[m <sup>4</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]
<b>P1</b>	0,3	0,3	0,03	0,03	0,000675	0,000675	0,087	0,087	3	3	34,64	34,64	1
<b>Restantes</b>	0,3	0,5	0,03	0,03	0,003125	0,001125	0,144	0,087	3	3	20,78	34,64	1

Tabela 8.27 - Excentricidade inicial

<b>Excentricidade inicial devido às imperfeições</b>		
$\alpha_h$	1	[-]
$\alpha_m$	1	[-]
$\theta_0$	0,005	[-]
$\theta_i$	0,005	[-]
$e_i$	0,008	[m]

Tabela 8.28 - Dados para o cálculo da excentricidade de 2º ordem

<b>Aço Carbono</b>							
<b>Pilar 1</b>				<b>Restantes Pilares</b>			
$\phi$ [-]	2,5	$\beta_y$ [-]	0,269	$\phi$ [-]	2,5	$\beta_y$ [-]	0,269
$\omega$ [-]	0,5	$1/r_0^{dirX}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,019	$\omega$ [-]	0,5	$1/r_0^{dirX}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,011
$n_u$ [-]	1,5	$1/r_0^{dirY}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,019	$n_u$ [-]	1,5	$1/r_0^{dirY}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,019
$n_{bal}$ [-]	0,4	$d_1/h$ [-]	0,167	$n_{bal}$ [-]	0,4	$d_1/h$ [-]	0,100
$\beta_x$ [-]	0,269	$b_1/b$ [-]	0,167	$\beta_x$ [-]	0,361	$b_1/b$ [-]	0,167
<b>Aço Inoxidável</b>							
<b>Pilar 1</b>				<b>Restantes Pilares</b>			
$\phi$ [-]	2,5	$\beta_y$ [-]	0,269	$\phi$ [-]	2,5	$\beta_y$ [-]	0,269
$\omega$ [-]	0,5	$1/r_0^{dirX}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,018	$\omega$ [-]	0,5	$1/r_0^{dirX}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,010
$n_u$ [-]	1,5	$1/r_0^{dirY}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,018	$n_u$ [-]	1,5	$1/r_0^{dirY}$ [m <sup>-1</sup> ]	0,018
$n_{bal}$ [-]	0,4	$d_1/h$ [-]	0,100	$n_{bal}$ [-]	0,4	$d_1/h$ [-]	0,06
$\beta_x$ [-]	0,269	$b_1/b$ [-]	0,100	$\beta_x$ [-]	0,361	$b_1/b$ [-]	0,10

Tabela 8.29 - Esforços nos pilares - Direção x

Pilar	Combinação	Esforços					Efeitos de 1ª ordem
		N <sub>sd</sub>	V <sub>sd</sub>	M <sub>01</sub>	M <sub>02</sub>	M <sub>sd</sub>	M <sub>0sd1</sub>
		[kN]	[kN]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]
1	ELU-Vertical	626,64	9,91	9,43	19,33	19,33	24,03
	ELU-CSIX	466,54	13,72	10,55	16,94	16,94	20,44
	ELU-CSIIX	463,93	13,72	9,79	16,26	16,26	19,74
	ELU-CSIIY	466,84	10,53	13,05	22,26	22,26	25,76
	ELI-CSIHY	432,34	10,26	13,04	22,35	22,35	25,59
	ELU-W,A	618,84	9,37	20,59	28,35	28,350	32,991
	ELU-W,B	601,69	9,44	8,98	18,38	18,380	22,893
	ELU-W,C	606,65	12,57	8,95	18,33	18,330	22,880
	ELU-W,D	606,65	12,57	8,95	18,33	18,330	22,880
	CQP	438,93	6,86	6,52	13,37	13,37	16,66
2	ELU-Vertical	1271,53	3,20	29,51	63,12	63,12	72,66
	ELU-CSIX	887,37	4,42	33,57	49,58	49,58	56,24
	ELU-CSIIX	885,23	4,41	30,89	48,01	48,01	54,65
	ELU-CSIIY	911,21	4,42	39,26	49,44	49,44	56,27
	ELI-CSIHY	904,40	4,41	39,26	61,76	61,76	68,54
	ELU-W,A	1234,000	3,11	68,95	81,75	81,750	91,005
	ELU-W,B	1205,37	3,04	27,31	58,40	58,400	67,440
	ELU-W,C	1205,77	8,48	27,33	58,44	58,440	67,483
	ELU-W,D	1205,77	8,48	27,33	58,44	58,440	67,483
	CQP	874,90	2,21	19,63	41,98	41,98	48,54
3	ELU-Vertical	1324,11	22,77	0,00	0,00	0,00	9,93
	ELU-CSIX	941,76	30,30	0,00	0,00	0,00	7,06
	ELU-CSIIX	939,79	30,31	0,00	0,00	0,00	7,05
	ELU-CSIIY	920,65	20,69	0,00	0,00	0,00	6,90
	ELI-CSIHY	920,05	20,28	0,00	0,00	0,00	6,90
	ELU-W,A	1255,740	21,08	44,06	28,44	44,060	53,478
	ELU-W,B	1255,73	21,08	0,00	0,00	0,000	9,418
	ELU-W,C	1262,81	25,94	0,00	0,00	0,000	9,471
	ELU-W,D	1262,81	25,94	0,00	0,00	0,000	9,471
	CQP	911,60	15,15	0,00	0,00	0,00	6,84
4	ELU-Vertical	2188,05	4,15	0,00	0,00	0,00	16,41
	ELU-CSIX	1471,78	5,57	0,00	0,00	0,00	11,04
	ELU-CSIIX	1448,80	5,57	0,00	0,00	0,00	10,87
	ELU-CSIIY	1466,65	5,57	0,00	0,00	0,00	11,00
	ELI-CSIHY	1444,01	5,57	0,00	0,00	0,00	10,83
	ELU-W,A	2033,64	3,86	47,11	34,98	47,110	62,362
	ELU-W,B	2033,63	3,86	0,00	0,00	0,000	15,252
	ELU-W,C	2035,32	9,53	0,00	0,00	0,000	15,265
	ELU-W,D	2035,32	9,53	0,00	0,00	0,000	15,265
	CQP	1464,45	2,78	0,00	0,00	0,00	10,98

Tabela 8.30 - Esforços nos pilares - Direção y

Pilar	Combinação	Esforços					Efeitos de 1ª ordem
		N <sub>sd</sub>	V <sub>sd</sub>	M <sub>01</sub>	M <sub>02</sub>	M <sub>sd</sub>	M <sub>0sd1</sub>
		[kN]	[kN]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]
1	ELU-Vertical	626,640	9,59	9,76	19,98	19,98	24,68
	ELU-CSIX	466,540	9,16	13,49	27,65	27,65	31,15
	ELU-CSIIX	463,930	8,69	13,50	27,65	27,65	31,13
	ELU-CSIY	466,840	13,26	12,74	18,83	18,83	22,33
	ELI-CSIIY	432,340	13,14	12,31	18,44	18,44	21,68
	ELU-W,A	618,840	16,31	9,22	18,88	18,880	23,521
	ELU-W,B	601,690	9,12	9,29	19,02	19,020	23,533
	ELU-W,C	606,650	9,09	14,42	23,29	23,290	27,840
	ELU-W,D	606,650	9,09	14,42	23,29	23,290	27,840
CQP	438,930	6,63	6,75	13,83	13,83	17,12	
2	ELU-Vertical	1271,530	30,88	3,14	6,45	6,45	15,99
	ELU-CSIX	887,370	27,71	4,34	8,92	8,92	15,58
	ELU-CSIIX	885,230	26,32	4,33	8,92	8,92	15,56
	ELU-CSIY	911,210	41,07	4,33	8,91	8,91	15,74
	ELI-CSIIY	904,400	39,54	4,33	8,91	8,91	15,69
	ELU-W,A	1234,000	50,24	3,05	6,27	6,270	15,525
	ELU-W,B	1205,370	28,57	2,98	6,12	6,120	15,160
	ELU-W,C	1205,770	28,59	11,74	13,70	13,700	22,743
	ELU-W,D	1205,770	28,59	11,74	13,70	13,700	22,743
CQP	874,900	20,54	2,17	4,46	4,46	11,02	
3	ELU-Vertical	1324,110	0,00	22,42	45,90	45,90	55,83
	ELU-CSIX	941,760	0,00	29,84	48,04	48,04	55,10
	ELU-CSIIX	939,790	0,00	29,83	44,43	44,43	51,48
	ELU-CSIY	920,650	0,00	24,32	37,75	37,75	44,65
	ELI-CSIIY	920,050	0,00	23,65	37,20	37,20	44,10
	ELU-W,A	1255,740	24,17	20,76	42,49	42,490	51,908
	ELU-W,B	1255,730	0,00	20,75	42,48	42,480	51,898
	ELU-W,C	1262,810	0,00	28,95	48,87	48,870	58,341
	ELU-W,D	1262,810	0,00	28,95	48,87	48,870	58,341
CQP	911,600	0,00	14,92	30,54	30,54	37,38	
4	ELU-Vertical	2188,05	0,00	4,08	8,38	8,38	24,79
	ELU-CSIX	1471,78	0,00	5,47	11,24	11,24	22,28
	ELU-CSIIX	1448,80	0,00	5,44	11,24	11,24	22,11
	ELU-CSIY	1466,65	0,00	5,47	11,24	11,24	22,24
	ELI-CSIIY	1444,01	0,00	5,45	11,24	11,24	22,07
	ELU-W,A	2033,64	27,36	3,79	7,80	7,800	23,052
	ELU-W,B	2033,63	0,00	3,79	7,80	7,800	23,052
	ELU-W,C	2035,32	0,00	12,77	15,81	15,810	31,075
	ELU-W,D	2035,32	0,00	12,77	15,81	15,810	31,075
CQP	1464,45	0,00	2,73	5,62	5,62	16,60	

Tabela 8.31 - Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem - Direção x

Pilar	Combinação	Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem								
		$M_{0cqp}$	$\phi_{ef}$	A	B	$r_m$	C	n	$\lambda_{lim}$	Verificação
		[kN.m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1	ELU-Vertical	17,12	1,781	0,737	1,414	0,488	1,212	0,348	42,844	Desprezar
	ELU-CSIX	17,12	2,094	0,705	1,414	0,623	1,077	0,259	42,179	Desprezar
	ELU-CSIIX	17,12	2,168	0,697	1,414	0,602	1,098	0,258	42,664	Desprezar
	ELU-CSIIY	17,12	1,662	0,751	1,414	0,586	1,114	0,259	46,427	Desprezar
	ELI-CSIIY	17,12	1,673	0,749	1,414	0,583	1,117	0,240	48,287	Desprezar
	ELU-W,A	17,12	1,297	0,794	1,414	0,726	0,974	0,344	37,293	Desprezar
	ELU-W,B	17,12	1,870	0,728	1,414	0,489	1,211	0,334	43,134	Desprezar
	ELU-W,C	17,12	1,871	0,728	1,414	0,488	1,212	0,337	42,961	Desprezar
	ELU-W,D	17,12	1,871	0,728	1,414	0,488	1,212	0,337	42,961	Desprezar
	CQP	17,12	2,569	0,661	1,414	0,488	1,212	0,244	45,871	Desprezar
2	ELU-Vertical	48,54	1,670	0,750	1,414	0,468	1,232	0,424	40,137	Desprezar
	ELU-CSIX	48,54	2,158	0,699	1,414	0,677	1,023	0,296	37,160	Desprezar
	ELU-CSIIX	48,54	2,221	0,692	1,414	0,643	1,057	0,295	38,096	Desprezar
	ELU-CSIIY	48,54	2,156	0,699	1,414	0,794	0,906	0,304	32,483	Desprezar
	ELI-CSIIY	48,54	1,770	0,738	1,414	0,636	1,064	0,301	40,490	Desprezar
	ELU-W,A	48,54	1,333	0,789	1,414	0,843	0,857	0,411	29,822	Desprezar
	ELU-W,B	48,54	1,799	0,735	1,414	0,468	1,232	0,402	40,437	Desprezar
	ELU-W,C	48,54	1,798	0,735	1,414	0,468	1,232	0,402	40,437	Desprezar
	ELU-W,D	48,54	1,798	0,735	1,414	0,468	1,232	0,402	40,437	Desprezar
	CQP	48,54	2,500	0,667	1,414	0,468	1,232	0,292	43,031	Desprezar
3	ELU-Vertical	37,38	9,409	0,347	1,414	0,000	0,700	0,441	10,341	Não Desprezar
	ELU-CSIX	37,38	13,229	0,274	1,414	0,000	0,700	0,314	9,692	Não Desprezar
	ELU-CSIIX	37,38	13,257	0,274	1,414	0,000	0,700	0,313	9,688	Não Desprezar
	ELU-CSIIY	37,38	13,533	0,270	1,414	0,000	0,700	0,307	9,642	Não Desprezar
	ELI-CSIIY	37,38	13,542	0,270	1,414	0,000	0,700	0,307	9,641	Não Desprezar
	ELU-W,A	37,38	1,747	0,741	1,414	0,000	0,700	0,419	22,677	Desprezar
	ELU-W,B	37,38	9,922	0,335	1,414	0,000	0,700	0,419	10,254	Não Desprezar
	ELU-W,C	37,38	9,866	0,336	1,414	0,000	0,700	0,421	10,264	Não Desprezar
	ELU-W,D	37,38	9,866	0,336	1,414	0,000	0,700	0,421	10,264	Não Desprezar
	CQP	37,38	13,667	0,268	1,414	0,000	0,700	0,304	9,620	Não Desprezar
4	ELU-Vertical	16,60	2,529	0,664	1,414	0,000	0,700	0,729	15,395	Não Desprezar
	ELU-CSIX	16,60	3,760	0,571	1,414	0,000	0,700	0,491	16,134	Não Desprezar
	ELU-CSIIX	16,60	3,820	0,567	1,414	0,000	0,700	0,483	16,151	Não Desprezar
	ELU-CSIIY	16,60	3,774	0,570	1,414	0,000	0,700	0,489	16,137	Não Desprezar
	ELI-CSIIY	16,60	3,833	0,566	1,414	0,000	0,700	0,481	16,155	Não Desprezar
	ELU-W,A	16,60	0,666	0,883	1,414	0,000	0,700	0,678	21,222	Desprezar
	ELU-W,B	16,60	2,721	0,648	1,414	0,000	0,700	0,678	15,572	Não Desprezar
	ELU-W,C	16,60	2,719	0,648	1,414	0,000	0,700	0,678	15,570	Não Desprezar
	ELU-W,D	16,60	2,719	0,648	1,414	0,000	0,700	0,678	15,570	Não Desprezar
	CQP	16,60	3,779	0,570	1,414	0,000	0,700	0,488	16,139	Não Desprezar

Tabela 8.32 - Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem - Direção y

Pilar	Combinação	Verificação da necessidade de consideração dos efeitos de 2ª ordem								
		$M_{0cqp}$	$\phi_{ef}$	A	B	$r_m$	C	n	$\lambda_{lim}$	Verificação
		[kN.m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1	ELU-Vertical	17,12	1,734	0,742	1,414	0,488	1,212	0,348	43,119	Desprezar
	ELU-CSIX	17,12	1,374	0,784	1,414	0,488	1,212	0,259	52,823	Desprezar
	ELU-CSIIX	17,12	1,375	0,784	1,414	0,488	1,212	0,258	52,949	Desprezar
	ELU-CSIY	17,12	1,917	0,723	1,414	0,677	1,023	0,259	41,088	Desprezar
	ELI-CSIY	17,12	1,974	0,717	1,414	0,668	1,032	0,240	42,718	Desprezar
	ELU-W,A	17,12	1,820	0,733	1,414	0,488	1,212	0,344	42,852	Desprezar
	ELU-W,B	17,12	1,819	0,733	1,414	0,488	1,212	0,334	43,460	Desprezar
	ELU-W,C	17,12	1,538	0,765	1,414	0,619	1,081	0,337	40,275	Desprezar
	ELU-W,D	17,12	1,538	0,765	1,414	0,619	1,081	0,337	40,275	Desprezar
	CQP	17,12	2,500	0,667	1,414	0,488	1,212	0,244	46,278	Desprezar
2	ELU-Vertical	48,54	7,591	0,397	1,414	0,487	1,213	0,424	20,930	Não Desprezar
	ELU-CSIX	48,54	7,791	0,391	1,414	0,487	1,213	0,296	24,668	Não Desprezar
	ELU-CSIIX	48,54	7,800	0,391	1,414	0,485	1,215	0,295	24,705	Não Desprezar
	ELU-CSIY	48,54	7,708	0,393	1,414	0,486	1,214	0,304	24,514	Não Desprezar
	ELI-CSIY	48,54	7,733	0,393	1,414	0,486	1,214	0,301	24,558	Não Desprezar
	ELU-W,A	48,54	7,817	0,390	1,414	0,486	1,214	0,411	20,879	Não Desprezar
	ELU-W,B	48,54	8,005	0,384	1,414	0,487	1,213	0,402	20,811	Não Desprezar
	ELU-W,C	48,54	5,336	0,484	1,414	0,857	0,843	0,402	18,195	Não Desprezar
	ELU-W,D	48,54	5,336	0,484	1,414	0,857	0,843	0,402	18,195	Não Desprezar
	CQP	48,54	11,010	0,312	1,414	0,487	1,213	0,292	19,848	Não Desprezar
3	ELU-Vertical	37,38	1,674	0,749	1,414	0,488	1,212	0,441	38,645	Desprezar
	ELU-CSIX	37,38	1,696	0,747	1,414	0,621	1,079	0,314	40,669	Desprezar
	ELU-CSIIX	37,38	1,815	0,734	1,414	0,671	1,029	0,313	38,136	Desprezar
	ELU-CSIY	37,38	2,093	0,705	1,414	0,644	1,056	0,307	38,001	Desprezar
	ELI-CSIY	37,38	2,119	0,702	1,414	0,636	1,064	0,307	38,177	Desprezar
	ELU-W,A	37,38	1,800	0,735	1,414	0,489	1,211	0,419	38,940	Desprezar
	ELU-W,B	37,38	1,801	0,735	1,414	0,488	1,212	0,419	38,942	Desprezar
	ELU-W,C	37,38	1,602	0,757	1,414	0,592	1,108	0,421	36,571	Desprezar
	ELU-W,D	37,38	1,602	0,757	1,414	0,592	1,108	0,421	36,571	Desprezar
	CQP	37,38	2,500	0,667	1,414	0,489	1,211	0,304	41,440	Desprezar
4	ELU-Vertical	16,60	1,674	0,749	1,414	0,487	1,213	0,729	30,098	Não Desprezar
	ELU-CSIX	16,60	1,863	0,729	1,414	0,487	1,213	0,491	35,696	Desprezar
	ELU-CSIIX	16,60	1,878	0,727	1,414	0,484	1,216	0,483	35,980	Desprezar
	ELU-CSIY	16,60	1,866	0,728	1,414	0,487	1,213	0,489	35,741	Desprezar
	ELI-CSIY	16,60	1,881	0,727	1,414	0,485	1,215	0,481	35,998	Desprezar
	ELU-W,A	16,60	1,801	0,735	1,414	0,486	1,214	0,678	30,665	Não Desprezar
	ELU-W,B	16,60	1,801	0,735	1,414	0,486	1,214	0,678	30,665	Não Desprezar
	ELU-W,C	16,60	1,336	0,789	1,414	0,808	0,892	0,678	24,180	Não Desprezar
	ELU-W,D	16,60	1,336	0,789	1,414	0,808	0,892	0,678	24,180	Não Desprezar
	CQP	16,60	2,500	0,667	1,414	0,486	1,214	0,488	32,770	Não Desprezar

Tabela 8.33 - Aço Carbono: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção x

Pilar	Combinação	Excentricidade de 2ª ordem					Efeitos de 2ª ordem	Armadura Longit.		Armadura Trans.
		K <sub>r</sub>		K <sub>φ</sub>	1/r	e <sub>2</sub>	M <sub>0sd2</sub>	ν	μ	A <sub>sw/s</sub>
		[-]		[-]	[m <sup>-1</sup> ]	[m]	[kN.m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]
1	ELU-Vertical	1,047	1,000	1,479	0,029	0,026	40,20	0,348	0,044	0,506
	ELU-CSIX	1,128	1,000	1,563	0,030	0,027	33,16	0,259	0,038	0,701
	ELU-CSIX	1,129	1,000	1,583	0,031	0,028	32,55	0,258	0,037	0,701
	ELU-CSIIY	1,128	1,000	1,447	0,028	0,025	37,54	0,259	0,048	0,538
	ELI-CSIIY	1,145	1,000	1,450	0,028	0,025	36,53	0,240	0,047	0,524
	ELU-W,A	1,051	1,000	1,349	0,026	0,024	47,551	0,344	0,061	0,479
	ELU-W,B	1,060	1,000	1,503	0,029	0,026	38,665	0,334	0,042	0,482
	ELU-W,C	1,057	1,000	1,503	0,029	0,026	38,786	0,337	0,042	0,642
	ELU-W,D	1,057	1,000	1,503	0,029	0,026	38,786	0,337	0,042	0,642
	CQP	1,142	1,000	1,691	0,033	0,029	29,61	0,244	0,031	0,350
2	ELU-Vertical	0,978	0,978	1,604	0,017	0,015	91,99	0,424	0,048	0,163
	ELU-CSIX	1,095	1,000	1,780	0,019	0,017	71,54	0,296	0,037	0,226
	ELU-CSIX	1,095	1,000	1,803	0,019	0,017	70,11	0,295	0,036	0,225
	ELU-CSIIY	1,088	1,000	1,779	0,019	0,017	71,98	0,304	0,038	0,226
	ELI-CSIIY	1,090	1,000	1,640	0,018	0,016	82,91	0,301	0,046	0,225
	ELU-W,A	0,990	0,990	1,482	0,016	0,014	108,541	0,411	0,061	0,159
	ELU-W,B	0,998	0,998	1,650	0,018	0,016	86,683	0,402	0,045	0,155
	ELU-W,C	0,998	0,998	1,650	0,018	0,016	86,725	0,402	0,045	0,433
	ELU-W,D	0,998	0,998	1,650	0,018	0,016	86,725	0,402	0,045	0,433
	CQP	1,099	1,000	1,904	0,020	0,018	64,68	0,292	0,032	0,113
3	ELU-Vertical	0,962	0,962	4,401	0,046	0,041	64,27	0,441	0,043	1,163
	ELU-CSIX	1,078	1,000	5,782	0,062	0,056	59,82	0,314	0,040	1,548
	ELU-CSIX	1,079	1,000	5,792	0,062	0,056	59,78	0,313	0,040	1,548
	ELU-CSIIY	1,085	1,000	5,891	0,063	0,057	59,46	0,307	0,040	1,057
	ELI-CSIIY	1,085	1,000	5,894	0,063	0,057	59,44	0,307	0,040	1,036
	ELU-W,A	0,983	0,983	1,632	0,017	0,016	72,993	0,419	0,036	1,077
	ELU-W,B	0,983	0,983	4,586	0,049	0,044	64,273	0,419	0,043	1,077
	ELU-W,C	0,981	0,981	4,566	0,048	0,043	64,273	0,421	0,043	1,325
	ELU-W,D	0,981	0,981	4,566	0,048	0,043	64,273	0,421	0,043	1,325
	CQP	1,087	1,000	5,940	0,064	0,058	59,30	0,304	0,040	0,774
4	ELU-Vertical	0,701	0,701	1,914	0,014	0,013	44,84	0,729	0,030	0,212
	ELU-CSIX	0,918	0,918	2,359	0,023	0,021	41,91	0,491	0,028	0,285
	ELU-CSIX	0,925	0,925	2,381	0,024	0,021	41,76	0,483	0,028	0,285
	ELU-CSIIY	0,919	0,919	2,364	0,023	0,021	41,88	0,489	0,028	0,285
	ELI-CSIIY	0,926	0,926	2,385	0,024	0,021	41,73	0,481	0,028	0,285
	ELU-W,A	0,747	0,747	1,241	0,010	0,009	80,631	0,678	0,042	0,197
	ELU-W,B	0,747	0,747	1,984	0,016	0,014	44,464	0,678	0,030	0,197
	ELU-W,C	0,747	0,747	1,983	0,016	0,014	44,469	0,678	0,030	0,487
	ELU-W,D	0,747	0,747	1,983	0,016	0,014	44,469	0,678	0,030	0,487
	CQP	0,920	0,920	2,366	0,023	0,021	41,86	0,488	0,028	0,142

Tabela 8.34 - Aço Carbono: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção y

Pilar	Combinação	Excentricidade de 2ª ordem				Efeitos de 2ª ordem	Armadura Longit.		Armadura Trans.	
		K <sub>r</sub>	K <sub>φ</sub>	1/r	e <sub>2</sub>	M <sub>0sd2</sub>	v	μ	A <sub>sw/s</sub>	
		[-]	[-]	[m <sup>-1</sup> ]	[m]	[kN.m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	
1	ELU-Vertical	1,047	1,000	1,467	0,028	0,026	40,71	0,348	0,046	0,490
	ELU-CSIX	1,128	1,000	1,370	0,027	0,024	42,29	0,259	0,058	0,468
	ELU-CSIIX	1,129	1,000	1,370	0,027	0,024	42,21	0,258	0,058	0,444
	ELU-CSIY	1,128	1,000	1,516	0,029	0,026	34,67	0,259	0,041	0,677
	ELI-CSIY	1,145	1,000	1,531	0,030	0,027	33,23	0,240	0,040	0,671
	ELU-W,A	1,051	1,000	1,490	0,029	0,026	39,60	0,344	0,044	0,833
	ELU-W,B	1,060	1,000	1,489	0,029	0,026	39,16	0,334	0,044	0,466
	ELU-W,C	1,057	1,000	1,414	0,027	0,025	42,80	0,337	0,052	0,464
	ELU-W,D	1,057	1,000	1,414	0,027	0,025	42,80	0,337	0,052	0,464
	CQP	1,142	1,000	1,673	0,032	0,029	29,93	0,244	0,032	0,339
	ELU-Vertical	0,978	0,978	3,042	0,058	0,052	81,99	0,424	0,091	0,876
	ELU-CSIX	1,095	1,000	3,096	0,060	0,054	63,49	0,296	0,071	0,786
	ELU-CSIIX	1,095	1,000	3,099	0,060	0,054	63,40	0,295	0,070	0,747
	ELU-CSIY	1,088	1,000	3,074	0,060	0,054	64,59	0,304	0,072	1,166
	ELI-CSIY	1,090	1,000	3,081	0,060	0,054	64,28	0,301	0,071	1,122
	ELU-W,A	0,990	0,990	3,103	0,060	0,054	81,62	0,411	0,091	1,426
	ELU-W,B	0,998	0,998	3,154	0,061	0,055	81,35	0,402	0,090	0,811
	ELU-W,C	0,998	0,998	2,436	0,047	0,042	73,87	0,402	0,082	0,811
	ELU-W,D	0,998	0,998	2,436	0,047	0,042	73,87	0,402	0,082	0,811
	CQP	1,099	1,000	3,962	0,077	0,069	71,48	0,292	0,079	0,583
3	ELU-Vertical	0,962	0,962	1,450	0,027	0,024	88,06	0,441	0,062	0,000
	ELU-CSIX	1,078	1,000	1,456	0,028	0,025	79,02	0,314	0,061	0,000
	ELU-CSIIX	1,079	1,000	1,488	0,029	0,026	75,87	0,313	0,057	0,000
	ELU-CSIY	1,085	1,000	1,563	0,030	0,027	69,75	0,307	0,050	0,000
	ELI-CSIY	1,085	1,000	1,570	0,030	0,027	69,29	0,307	0,049	0,000
	ELU-W,A	0,983	0,983	1,484	0,028	0,025	83,87	0,419	0,058	0,686
	ELU-W,B	0,983	0,983	1,484	0,028	0,025	83,86	0,419	0,058	0,000
	ELU-W,C	0,981	0,981	1,431	0,027	0,024	89,26	0,421	0,065	0,000
	ELU-W,D	0,981	0,981	1,431	0,027	0,024	89,26	0,421	0,065	0,000
	CQP	1,087	1,000	1,673	0,032	0,029	63,97	0,304	0,042	0,000
4	ELU-Vertical	0,701	0,701	1,451	0,020	0,018	63,57	0,729	0,071	0,000
	ELU-CSIX	0,918	0,918	1,501	0,027	0,024	57,64	0,491	0,025	0,000
	ELU-CSIIX	0,925	0,925	1,505	0,027	0,024	57,27	0,483	0,025	0,000
	ELU-CSIY	0,919	0,919	1,502	0,027	0,024	57,56	0,489	0,025	0,000
	ELI-CSIY	0,926	0,926	1,506	0,027	0,024	57,19	0,481	0,025	0,000
	ELU-W,A	0,747	0,747	1,484	0,021	0,019	62,40	0,678	0,069	0,777
	ELU-W,B	0,747	0,747	1,484	0,021	0,019	62,40	0,678	0,069	0,000
	ELU-W,C	0,747	0,747	1,359	0,020	0,018	67,11	0,678	0,075	0,000
	ELU-W,D	0,747	0,747	1,359	0,020	0,018	67,11	0,678	0,075	0,000
	CQP	0,920	0,920	1,673	0,030	0,027	55,90	0,488	0,062	0,000

Tabela 8.35 - Aço Inoxidável: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção x

Pilar	Combinação	Excentricidade de 2ª ordem					Efeitos de 2ª ordem	Armadura Longit.		Armadura Trans.
		K <sub>r</sub>		K <sub>φ</sub>	1/r	e <sub>2</sub>		M <sub>0sd2</sub>	ν	
		[-]		[-]	[m <sup>-1</sup> ]	[m]	[kN.m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]
1	ELU-Vertical	1,047	1,000	1,479	0,027	0,024	39,00	0,348	0,044	0,506
	ELU-CSIX	1,128	1,000	1,563	0,028	0,025	32,22	0,259	0,038	0,701
	ELU-CSIX	1,129	1,000	1,583	0,028	0,026	31,60	0,258	0,037	0,701
	ELU-CSIIY	1,128	1,000	1,447	0,026	0,023	36,67	0,259	0,048	0,538
	ELI-CSIIY	1,145	1,000	1,450	0,026	0,023	35,72	0,240	0,047	0,524
	ELU-W,A	1,051	1,000	1,349	0,024	0,022	46,473	0,344	0,061	0,479
	ELU-W,B	1,060	1,000	1,503	0,027	0,024	37,497	0,334	0,042	0,482
	ELU-W,C	1,057	1,000	1,503	0,027	0,024	37,607	0,337	0,042	0,642
	ELU-W,D	1,057	1,000	1,503	0,027	0,024	37,607	0,337	0,042	0,642
	CQP	1,142	1,000	1,691	0,030	0,027	28,65	0,244	0,031	0,350
2	ELU-Vertical	0,978	0,978	1,604	0,016	0,015	91,16	0,424	0,048	0,163
	ELU-CSIX	1,095	1,000	1,780	0,018	0,017	70,89	0,296	0,037	0,226
	ELU-CSIX	1,095	1,000	1,803	0,019	0,017	69,45	0,295	0,036	0,225
	ELU-CSIIY	1,088	1,000	1,779	0,018	0,017	71,32	0,304	0,038	0,226
	ELI-CSIIY	1,090	1,000	1,640	0,017	0,015	82,30	0,301	0,046	0,225
	ELU-W,A	0,990	0,990	1,482	0,015	0,014	107,79	0,411	0,061	0,159
	ELU-W,B	0,998	0,998	1,650	0,017	0,015	85,86	0,402	0,045	0,155
	ELU-W,C	0,998	0,998	1,650	0,017	0,015	85,91	0,402	0,045	0,433
	ELU-W,D	0,998	0,998	1,650	0,017	0,015	85,91	0,402	0,045	0,433
	CQP	1,099	1,000	1,904	0,020	0,018	63,99	0,292	0,032	0,113
3	ELU-Vertical	0,962	0,962	4,401	0,044	0,039	61,95	0,441	0,043	1,163
	ELU-CSIX	1,078	1,000	5,782	0,060	0,054	57,57	0,314	0,040	1,548
	ELU-CSIX	1,079	1,000	5,792	0,060	0,054	57,54	0,313	0,040	1,548
	ELU-CSIIY	1,085	1,000	5,891	0,061	0,055	57,22	0,307	0,040	1,057
	ELI-CSIIY	1,085	1,000	5,894	0,061	0,055	57,21	0,307	0,040	1,036
	ELU-W,A	0,983	0,983	1,632	0,017	0,015	72,16	0,419	0,036	1,077
	ELU-W,B	0,983	0,983	4,586	0,046	0,042	61,94	0,419	0,041	1,077
	ELU-W,C	0,981	0,981	4,566	0,046	0,042	61,94	0,421	0,041	1,325
	ELU-W,D	0,981	0,981	4,566	0,046	0,042	61,94	0,421	0,041	1,325
	CQP	1,087	1,000	5,940	0,061	0,055	57,07	0,304	0,040	0,774
4	ELU-Vertical	0,701	0,701	1,914	0,014	0,012	43,63	0,729	0,030	0,212
	ELU-CSIX	0,918	0,918	2,359	0,022	0,020	40,60	0,491	0,028	0,285
	ELU-CSIX	0,925	0,925	2,381	0,023	0,020	40,45	0,483	0,028	0,285
	ELU-CSIIY	0,919	0,919	2,364	0,022	0,020	40,56	0,489	0,028	0,285
	ELI-CSIIY	0,926	0,926	2,385	0,023	0,020	40,42	0,481	0,028	0,285
	ELU-W,A	0,747	0,747	1,241	0,010	0,009	79,85	0,678	0,042	0,197
	ELU-W,B	0,747	0,747	1,984	0,015	0,014	43,22	0,678	0,029	0,197
	ELU-W,C	0,747	0,747	1,983	0,015	0,014	43,23	0,678	0,029	0,487
	ELU-W,D	0,747	0,747	1,983	0,015	0,014	43,23	0,678	0,029	0,487
	CQP	0,920	0,920	2,366	0,022	0,020	40,55	0,488	0,028	0,142

CAPÍTULO 8

Tabela 8.36 - Aço Inoxidável: Cálculo do momento de 2ª ordem - Direção y

Pilar	Combinação	Excentricidade de 2ª ordem				Efeitos de 2ª ordem	Armadura Longitt.		Armadura Transv.	
		K <sub>r</sub>		K <sub>φ</sub>	1/r	ε <sub>2</sub>	M <sub>0sd2</sub>	v	μ	A <sub>sw/s</sub>
		[-]		[-]	[m <sup>-1</sup> ]	[m]	[kN.m]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]
1	ELU-Vertical	1,047	1,000	1,467	0,026	0,024	39,52	0,348	0,046	0,490
	ELU-CSIX	1,128	1,000	1,370	0,025	0,022	41,47	0,259	0,058	0,468
	ELU-CSIIX	1,129	1,000	1,370	0,025	0,022	41,39	0,258	0,058	0,444
	ELU-CSIY	1,128	1,000	1,516	0,027	0,024	33,76	0,259	0,041	0,677
	ELI-CSIY	1,145	1,000	1,531	0,027	0,025	32,37	0,240	0,040	0,671
	ELU-W,A	1,051	1,000	1,490	0,027	0,024	38,41	0,344	0,044	0,833
	ELU-W,B	1,060	1,000	1,489	0,027	0,024	38,00	0,334	0,044	0,466
	ELU-W,C	1,057	1,000	1,414	0,025	0,023	41,69	0,337	0,052	0,464
	ELU-W,D	1,057	1,000	1,414	0,025	0,023	41,69	0,337	0,052	0,464
	CQP	1,142	1,000	1,673	0,030	0,027	28,98	0,244	0,032	0,339
2	ELU-Vertical	0,978	0,978	3,042	0,053	0,048	77,10	0,424	0,091	0,876
	ELU-CSIX	1,095	1,000	3,096	0,056	0,050	59,94	0,296	0,071	0,786
	ELU-CSIIX	1,095	1,000	3,099	0,056	0,050	59,85	0,295	0,070	0,747
	ELU-CSIY	1,088	1,000	3,074	0,055	0,050	60,97	0,304	0,072	1,166
	ELI-CSIY	1,090	1,000	3,081	0,055	0,050	60,68	0,301	0,071	1,122
	ELU-W,A	0,990	0,990	3,103	0,055	0,050	76,72	0,411	0,085	1,426
	ELU-W,B	0,998	0,998	3,154	0,056	0,051	76,45	0,402	0,085	0,811
	ELU-W,C	0,998	0,998	2,436	0,044	0,039	70,08	0,402	0,078	0,811
	ELU-W,D	0,998	0,998	2,436	0,044	0,039	70,08	0,402	0,078	0,811
	CQP	1,099	1,000	3,962	0,071	0,064	67,00	0,292	0,079	0,583
3	ELU-Vertical	0,962	0,962	1,450	0,025	0,023	85,68	0,441	0,062	0,000
	ELU-CSIX	1,078	1,000	1,456	0,026	0,024	77,25	0,314	0,061	0,000
	ELU-CSIIX	1,079	1,000	1,488	0,027	0,024	74,07	0,313	0,057	0,000
	ELU-CSIY	1,085	1,000	1,563	0,028	0,025	67,89	0,307	0,050	0,000
	ELI-CSIY	1,085	1,000	1,570	0,028	0,025	67,43	0,307	0,049	0,000
	ELU-W,A	0,983	0,983	1,484	0,026	0,024	81,50	0,419	0,058	0,686
	ELU-W,B	0,983	0,983	1,484	0,026	0,024	81,49	0,419	0,058	0,000
	ELU-W,C	0,981	0,981	1,431	0,025	0,023	86,97	0,421	0,065	0,000
	ELU-W,D	0,981	0,981	1,431	0,025	0,023	86,97	0,421	0,065	0,000
	CQP	1,087	1,000	1,673	0,030	0,027	62,00	0,304	0,042	0,000
4	ELU-Vertical	0,701	0,701	1,451	0,018	0,016	60,70	0,729	0,071	0,000
	ELU-CSIX	0,918	0,918	1,501	0,025	0,022	55,02	0,491	0,025	0,000
	ELU-CSIIX	0,925	0,925	1,505	0,025	0,022	54,67	0,483	0,025	0,000
	ELU-CSIY	0,919	0,919	1,502	0,025	0,022	54,94	0,489	0,025	0,000
	ELI-CSIY	0,926	0,926	1,506	0,025	0,023	54,59	0,481	0,025	0,000
	ELU-W,A	0,747	0,747	1,484	0,020	0,018	59,49	0,678	0,066	0,777
	ELU-W,B	0,747	0,747	1,484	0,020	0,018	59,49	0,678	0,066	0,000
	ELU-W,C	0,747	0,747	1,359	0,018	0,016	64,44	0,678	0,072	0,000
	ELU-W,D	0,747	0,747	1,359	0,018	0,016	64,44	0,678	0,072	0,000
	CQP	0,920	0,920	1,673	0,028	0,025	52,99	0,488	0,062	0,000

Tabela 8.37 - Aço Carbono: Cálculo da armadura longitudinal por flexão composta

Pilar	Combinação	Armadura Longitudinal						
		v	$\mu_x$	$\mu_y$	Verificação	$\omega_{TOT}$	$\omega_{TOT}^{max}$	$A_{TOT}$ [cm <sup>2</sup> ]
		[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	
1	ELU-Vertical	0,3	0,044	0,046	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0	0,02	0,828
	ELU-CSIX	0,3	0,038	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIX	0,3	0,037	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIY	0,3	0,048	0,041	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELI-CSIIY	0,2	0,047	0,040	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-W,A	0,3	0,061	0,044	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0,02		
	ELU-W,B	0,3	0,042	0,044	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,C	0,3	0,042	0,052	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,D	0,3	0,042	0,052	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	CQP	0,2	0,031	0,032	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
2	ELU-Vertical	0,4	0,048	0,091	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05	0,07	4,83
	ELU-CSIX	0,3	0,037	0,071	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-CSIIX	0,3	0,036	0,070	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-CSIY	0,3	0,038	0,072	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELI-CSIIY	0,3	0,046	0,071	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-W,A	0,4	0,061	0,091	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,07		
	ELU-W,B	0,4	0,045	0,090	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05		
	ELU-W,C	0,4	0,045	0,082	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05		
	ELU-W,D	0,4	0,045	0,082	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05		
	CQP	0,3	0,032	0,079	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,02		
3	ELU-Vertical	0,4	0,043	0,062	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0	0	0,00
	ELU-CSIX	0,3	0,040	0,061	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIX	0,3	0,040	0,057	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIY	0,3	0,040	0,050	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELI-CSIIY	0,3	0,040	0,049	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,A	0,4	0,036	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,B	0,4	0,043	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,C	0,4	0,043	0,065	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,D	0,4	0,043	0,065	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
CQP	0,3	0,040	0,042	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0			
4	ELU-Vertical	0,7	0,030	0,071	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19	0,21	14,48
	ELU-CSIX	0,5	0,028	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-CSIIX	0,5	0,028	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-CSIY	0,5	0,028	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELI-CSIIY	0,5	0,028	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-W,A	0,7	0,042	0,069	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,21		
	ELU-W,B	0,7	0,030	0,069	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
	ELU-W,C	0,7	0,030	0,075	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
	ELU-W,D	0,7	0,030	0,075	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
CQP	0,5	0,028	0,062	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0			

Tabela 8.38 - Aço Inoxidável: Cálculo da armadura longitudinal por flexão composta

Pilar	Combinação	Armadura Longitudinal						
		$\nu$	$\mu_x$	$\mu_y$	Verificação	$\omega_{TOT}$	$\omega_{TOT}^{max}$	$A_{STOT}$ [cm <sup>2</sup> ]
		[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	
1	ELU-Vertical	0,3	0,044	0,046	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0	0,02	0,828
	ELU-CSIX	0,3	0,038	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIX	0,3	0,037	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIY	0,3	0,048	0,041	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELI-CSIIY	0,2	0,047	0,040	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-W,A	0,3	0,061	0,044	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0,02		
	ELU-W,B	0,3	0,042	0,044	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,C	0,3	0,042	0,052	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,D	0,3	0,042	0,052	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	CQP	0,2	0,031	0,032	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
2	ELU-Vertical	0,4	0,048	0,086	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05	0,05	3,45
	ELU-CSIX	0,3	0,037	0,067	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-CSIIX	0,3	0,036	0,067	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-CSIIY	0,3	0,038	0,068	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELI-CSIIY	0,3	0,046	0,067	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-W,A	0,4	0,061	0,085	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05		
	ELU-W,B	0,4	0,045	0,085	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,05		
	ELU-W,C	0,4	0,045	0,078	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	ELU-W,D	0,4	0,045	0,078	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,01		
	CQP	0,3	0,032	0,074	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,02		
3	ELU-Vertical	0,4	0,041	0,062	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0	0	0,00
	ELU-CSIX	0,3	0,038	0,061	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIX	0,3	0,038	0,057	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-CSIIY	0,3	0,038	0,050	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELI-CSIIY	0,3	0,038	0,049	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,A	0,4	0,036	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,B	0,4	0,041	0,058	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,C	0,4	0,041	0,065	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	ELU-W,D	0,4	0,041	0,065	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
	CQP	0,3	0,038	0,042	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		
4	ELU-Vertical	0,7	0,029	0,067	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19	0,20	13,79
	ELU-CSIX	0,5	0,027	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-CSIIX	0,5	0,027	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-CSIIY	0,5	0,027	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELI-CSIIY	0,5	0,027	0,025	$\mu_1=\mu_x, \mu_2=\mu_y$	0		
	ELU-W,A	0,7	0,042	0,066	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,2		
	ELU-W,B	0,7	0,029	0,066	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
	ELU-W,C	0,7	0,029	0,072	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
	ELU-W,D	0,7	0,029	0,072	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0,19		
	CQP	0,5	0,027	0,059	$\mu_1=\mu_y, \mu_2=\mu_x$	0		

Tabela 8.39 - Aço Carbono: Verificação à flexão desviada composta

Pilar	Combinação	Flexão desviada										
		Verificação										
		$N_{Rd}$	$N_{Sd}/N_{Rd}$	$a$	$M_{Edx}$	$\phi_{TOT}$	$\mu$	$M_{Rdx}$	$M_{Edy}$	$M_{Rdy}$	Cond.	Verif.
[kN]	[-]	[-]	[kN.m]	[-]	[-]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]	[-]	[-]		
1	ELU-Vertical	2095,4	0,3	0,8	24,0	0,2	0,1	79,8	24,7	79,8	0,7	Verifica
	ELU-CSIX		0,2	0,7	20,4	0,2	0,1	79,8	31,1	79,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIIX		0,2	0,7	19,7	0,2	0,1	79,8	31,1	79,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIY		0,2	0,7	25,8	0,2	0,1	79,8	22,3	79,8	0,9	Verifica
	ELI-CSIY		0,2	0,7	25,6	0,2	0,1	79,8	21,7	79,8	0,9	Verifica
	ELU-W,A		0,3	0,8	33,0	0,2	0,1	79,8	23,5	79,8	0,8	Verifica
	ELU-W,B		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	23,5	79,8	0,7	Verifica
	ELU-W,C		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	27,8	79,8	0,8	Verifica
	ELU-W,D		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	27,8	79,8	0,8	Verifica
CQP	0,2	0,7	16,7	0,2	0,1	79,8	17,1	79,8	0,7	Verifica		
2	ELU-Vertical	3546,4	0,4	0,9	72,7	0,2	0,2	243,1	82,0	145,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIX		0,3	0,8	56,2	0,2	0,2	243,1	63,5	145,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIIX		0,2	0,7	54,6	0,2	0,2	243,1	63,4	145,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIY		0,3	0,8	56,3	0,2	0,2	243,1	64,6	145,8	0,9	Verifica
	ELI-CSIY		0,3	0,8	68,5	0,2	0,2	243,1	64,3	145,8	0,9	Verifica
	ELU-W,A		0,3	0,9	91,0	0,2	0,2	243,1	81,6	145,8	1,0	Verifica
	ELU-W,B		0,3	0,9	67,4	0,2	0,2	243,1	81,3	145,8	0,9	Verifica
	ELU-W,C		0,3	0,9	67,5	0,2	0,2	243,1	73,9	145,8	0,9	Verifica
	ELU-W,D		0,3	0,9	67,5	0,2	0,2	243,1	73,9	145,8	0,9	Verifica
CQP	0,2	0,7	48,5	0,2	0,2	243,1	71,5	145,8	0,9	Verifica		
3	ELU-Vertical	3546,4	0,4	1,0	64,3	0,2	0,2	243,1	55,8	145,8	0,7	Verifica
	ELU-CSIX		0,3	0,8	59,8	0,2	0,2	243,1	55,1	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIIX		0,3	0,8	59,8	0,2	0,2	243,1	51,5	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIY		0,3	0,8	59,5	0,2	0,2	243,1	44,7	145,8	0,7	Verifica
	ELI-CSIY		0,3	0,8	59,4	0,2	0,2	243,1	44,1	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,A		0,4	0,9	53,5	0,2	0,2	243,1	51,9	145,8	0,6	Verifica
	ELU-W,B		0,4	0,9	64,3	0,2	0,2	243,1	51,9	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,C		0,4	0,9	64,3	0,2	0,2	243,1	58,3	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,D		0,4	0,9	64,3	0,2	0,2	243,1	58,3	145,8	0,7	Verifica
CQP	0,3	0,8	59,3	0,2	0,2	243,1	37,4	145,8	0,7	Verifica		
4	ELU-Vertical	3672,1	0,6	1,3	44,8	0,2	0,2	243,1	63,6	145,8	0,4	Verifica
	ELU-CSIX		0,4	1,0	41,9	0,2	0,2	243,1	22,3	145,8	0,3	Verifica
	ELU-CSIIX		0,4	1,0	41,8	0,2	0,2	243,1	22,1	145,8	0,3	Verifica
	ELU-CSIY		0,4	1,0	41,9	0,2	0,2	243,1	22,2	145,8	0,3	Verifica
	ELI-CSIY		0,4	1,0	41,7	0,2	0,2	243,1	22,1	145,8	0,3	Verifica
	ELU-W,A		0,6	1,3	62,4	0,2	0,2	243,1	62,4	145,8	0,5	Verifica
	ELU-W,B		0,6	1,3	44,5	0,2	0,2	243,1	62,4	145,8	0,5	Verifica
	ELU-W,C		0,6	1,3	44,5	0,2	0,2	243,1	67,1	145,8	0,5	Verifica
	ELU-W,D		0,6	1,3	44,5	0,2	0,2	243,1	67,1	145,8	0,5	Verifica
CQP	0,4	1,0	41,9	0,2	0,2	243,1	55,9	145,8	0,6	Verifica		

Tabela 8.40 - Aço Inoxidável: Verificação à flexão desviada composta

Pilar	Combinação	Flexão desviada										
		Verificação										
		$N_{Rd}$	$N_{Sd}/N_{Rd}$	$a$	$M_{Edx}$	$\omega_{TOT}$	$\mu$	$M_{Rdx}$	$M_{Edy}$	$M_{Rdy}$	Cond.	Verif.
[kN]	[-]	[-]	[kN.m]	[-]	[-]	[kN.m]	[kN.m]	[kN.m]	[-]	[-]		
1	ELU-Vertical	2095,4	0,3	0,8	24,0	0,2	0,1	79,8	24,7	79,8	0,7	Verifica
	ELU-CSIX		0,2	0,7	20,4	0,2	0,1	79,8	31,1	79,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIIX		0,2	0,7	19,7	0,2	0,1	79,8	31,1	79,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIY		0,2	0,7	25,8	0,2	0,1	79,8	22,3	79,8	0,9	Verifica
	ELI-CSIIY		0,2	0,7	25,6	0,2	0,1	79,8	21,7	79,8	0,9	Verifica
	ELU-W,A		0,3	0,8	33,0	0,2	0,1	79,8	23,5	79,8	0,8	Verifica
	ELU-W,B		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	23,5	79,8	0,7	Verifica
	ELU-W,C		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	27,8	79,8	0,8	Verifica
	ELU-W,D		0,3	0,8	22,9	0,2	0,1	79,8	27,8	79,8	0,8	Verifica
	CQP		0,2	0,7	16,7	0,2	0,1	79,8	17,1	79,8	0,7	Verifica
2	ELU-Vertical	3546,4	0,4	0,9	72,7	0,2	0,2	243,1	77,1	145,8	0,9	Verifica
	ELU-CSIX		0,3	0,8	56,2	0,2	0,2	243,1	59,9	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIIX		0,2	0,7	54,6	0,2	0,2	243,1	59,9	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIY		0,3	0,8	56,3	0,2	0,2	243,1	61,0	145,8	0,8	Verifica
	ELI-CSIIY		0,3	0,8	68,5	0,2	0,2	243,1	60,7	145,8	0,9	Verifica
	ELU-W,A		0,3	0,9	91,0	0,2	0,2	243,1	76,7	145,8	1,0	Verifica
	ELU-W,B		0,3	0,9	67,4	0,2	0,2	243,1	76,4	145,8	0,9	Verifica
	ELU-W,C		0,3	0,9	67,5	0,2	0,2	243,1	70,1	145,8	0,8	Verifica
	ELU-W,D		0,3	0,9	67,5	0,2	0,2	243,1	70,1	145,8	0,8	Verifica
	CQP		0,2	0,7	48,5	0,2	0,2	243,1	67,0	145,8	0,9	Verifica
3	ELU-Vertical	3546,4	0,4	1,0	62,0	0,2	0,2	243,1	55,8	145,8	0,7	Verifica
	ELU-CSIX		0,3	0,8	57,6	0,2	0,2	243,1	55,1	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIIX		0,3	0,8	57,5	0,2	0,2	243,1	51,5	145,8	0,8	Verifica
	ELU-CSIY		0,3	0,8	57,2	0,2	0,2	243,1	44,7	145,8	0,7	Verifica
	ELI-CSIIY		0,3	0,8	57,2	0,2	0,2	243,1	44,1	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,A		0,4	0,9	53,5	0,2	0,2	243,1	51,9	145,8	0,6	Verifica
	ELU-W,B		0,4	0,9	61,9	0,2	0,2	243,1	51,9	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,C		0,4	0,9	61,9	0,2	0,2	243,1	58,3	145,8	0,7	Verifica
	ELU-W,D		0,4	0,9	61,9	0,2	0,2	243,1	58,3	145,8	0,7	Verifica
	CQP		0,3	0,8	57,1	0,2	0,2	243,1	37,4	145,8	0,7	Verifica
4	ELU-Vertical	3672,1	0,6	1,3	43,6	0,2	0,2	243,1	60,7	145,8	0,4	Verifica
	ELU-CSIX		0,4	1,0	40,6	0,2	0,2	243,1	22,3	145,8	0,3	Verifica
	ELU-CSIIX		0,4	1,0	40,5	0,2	0,2	243,1	22,1	145,8	0,3	Verifica
	ELU-CSIY		0,4	1,0	40,6	0,2	0,2	243,1	22,2	145,8	0,3	Verifica
	ELI-CSIIY		0,4	1,0	40,4	0,2	0,2	243,1	22,1	145,8	0,3	Verifica
	ELU-W,A		0,6	1,3	62,4	0,2	0,2	243,1	59,5	145,8	0,5	Verifica
	ELU-W,B		0,6	1,3	43,2	0,2	0,2	243,1	59,5	145,8	0,4	Verifica
	ELU-W,C		0,6	1,3	43,2	0,2	0,2	243,1	64,4	145,8	0,5	Verifica
	ELU-W,D		0,6	1,3	43,2	0,2	0,2	243,1	64,4	145,8	0,5	Verifica
	CQP		0,4	1,0	40,5	0,2	0,2	243,1	53,0	145,8	0,5	Verifica

Tabela 8.41 - Aço Carbono: Armadura longitudinal adotada

Pilar	Armadura Longitudinal						
	$A_{s,min}$		$A_{s,min\ max}$	$A_{s,max}$	$A_s$ necessário	Armadura adotada	$A_s$
	[cm <sup>2</sup> ]		[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]
1	1,44	1,80	1,80	36,00	1,80	6 $\phi$ 12	6,79
2	2,92	3,00	3,00	60,00	4,83	4 $\phi$ 16+4 $\phi$ 12	12,56
3	3,04	3,00	3,04	60,00	3,04	4 $\phi$ 16+4 $\phi$ 12	12,56
4	5,03	3,00	5,03	60,00	14,48	3 $\phi$ 16+3 $\phi$ 20	15,45

Tabela 8.42 - Aço Inoxidável: Armadura longitudinal adotada

Pilar	Armadura Longitudinal						
	$A_{s,min}$		$A_{s,min\ max}$	$A_{s,max}$	$A_s$ necessário	Armadura adotada	$A_s$
	[cm <sup>2</sup> ]		[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]
1	1,44	1,80	1,80	36,00	1,80	6 $\phi$ 12	6,79
2	2,92	3,00	3,00	60,00	3,45	4 $\phi$ 16+4 $\phi$ 12	12,56
3	3,04	3,00	3,04	60,00	3,04	4 $\phi$ 16+4 $\phi$ 12	12,56
4	5,03	3,00	5,03	60,00	13,79	6 $\phi$ 16+2 $\phi$ 12	14,32

Tabela 8.43 - Dados auxiliares para o cálculo da armadura transversal

Armadura Transversal			
Pilar 1		Restantes pilares	
$Z_x$ [m]	0,225	$Z_x$ [m]	0,225
$Z_y$ [m]	0,225	$Z_y$ [m]	0,405
$\cot\theta$ [-]	2	$\cot\theta$ [-]	2

Tabela 8.44 - Armadura transversal adotada

Armadura Transversal			
$A_{sw/s}$	$\phi_{cinta}$	$A_{sw/s}$ adotado	
[cm <sup>2</sup> /m]	[mm]	[cm <sup>2</sup> /m]	
1,55	6	$\phi$ 6//0,15	1,88

## C.4 Vigas

Tabela 8.45 - Características das vigas e dados auxiliares

Caraterísticas das vigas				Dados auxiliares			
Aço carbono		Aço inoxidável		Aço carbono		Aço inoxidável	
<b>b [m]</b>	0,3	<b>b [m]</b>	0,3	<b>z [m]</b>	0,405	<b>z [m]</b>	0,423
<b>h [m]</b>	0,5	<b>h [m]</b>	0,5	<b>θ [°]</b>	30	<b>θ [°]</b>	30
<b>d [m]</b>	0,45	<b>d [m]</b>	0,47	<b>cotgθ [-]</b>	1,732051	<b>cotgθ [-]</b>	1,732051
<b>d<sub>2</sub> [m]</b>	0,05	<b>d<sub>2</sub> [m]</b>	0,03				
<b>c [m]</b>	0,05	<b>c [m]</b>	0,03				

Tabela 8.46 - Aço Carbono: Armadura longitudinal adotada

			<b>M<sub>Ed</sub></b>	<b>A<sub>smin</sub></b>	<b>μ</b>	<b>ω</b>	<b>A<sub>s</sub></b>	<b>A<sub>s</sub> adot</b>	<b>Arm. superior</b>	<b>Arm. inferior</b>	<b>A<sub>s</sub></b>
			[kN.m]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]
<b>V1</b>	<b>Troço 1</b>	<b>M<sub>1</sub><sup>vão</sup></b>	64,8	2,04	0,053	0,055	3,42	3,42	-	4φ12	4,52
		<b>M<sub>B</sub><sup>esq</sup></b>	-92,9	2,04	0,076	0,080	4,99	4,99	3φ16	-	6,03
	<b>Troço 2</b>	<b>M<sub>B</sub><sup>dir</sup></b>	-79,0	2,04	0,065	0,068	4,21	4,21	3φ16	-	6,03
		<b>M<sub>2</sub><sup>vão</sup></b>	37,1	2,04	0,031	0,031	1,93	2,04	-	4φ12	4,52
		<b>M<sub>C</sub><sup>esq</sup></b>	-79,0	2,04	0,065	0,068	4,21	4,21	3φ 16	-	6,03
	<b>Troço 3</b>	<b>M<sub>C</sub><sup>dir</sup></b>	-92,9	2,04	0,076	0,080	4,99	4,99	3φ16	-	6,03
<b>M<sub>3</sub><sup>vão</sup></b>		64,8	2,04	0,053	0,055	3,42	3,42	-	4φ12	4,52	
<b>V2</b>	<b>Troço 1</b>	<b>M<sub>1</sub><sup>vão</sup></b>	94,4	2,04	0,078	0,082	5,07	5,07	-	3φ16	6,03
		<b>M<sub>B</sub><sup>esq</sup></b>	-146,4	2,04	0,120	0,131	8,12	8,12	3φ16 + 1φ20	-	9,17
	<b>Troço 2</b>	<b>M<sub>B</sub><sup>dir</sup></b>	-130,0	2,04	0,107	0,115	7,14	7,14	3φ16 + 1φ20	-	9,17
		<b>M<sub>2</sub><sup>vão</sup></b>	56,7	2,04	0,047	0,048	2,98	2,98	-	3φ16	6,03
		<b>M<sub>C</sub><sup>esq</sup></b>	-130,0	2,04	0,107	0,115	7,14	7,14	3φ16 + 1φ20	-	9,17
	<b>Troço 3</b>	<b>M<sub>C</sub><sup>dir</sup></b>	-146,4	2,04	0,120	0,131	8,12	8,12	3φ16 + 1φ20	-	9,17
<b>M<sub>3</sub><sup>vão</sup></b>		94,4	2,04	0,078	0,082	5,07	5,07	-	3φ16	6,03	
<b>V3</b>	<b>Troço 1</b>	<b>M<sub>1</sub><sup>vão</sup></b>	63,7	2,04	0,052	0,054	3,36	3,36	-	3φ16	6,03
		<b>M<sub>B</sub><sup>esq</sup></b>	-103,0	2,04	0,085	0,090	5,56	5,56	3φ16	-	6,03
	<b>Troço 2</b>	<b>M<sub>B</sub><sup>dir</sup></b>	-103,0	2,04	0,085	0,090	5,56	5,56	3φ16	-	6,03
		<b>M<sub>2</sub><sup>vão</sup></b>	63,7	2,04	0,052	0,054	3,36	3,36	-	3φ16	6,03
<b>V4</b>	<b>Troço 1</b>	<b>M<sub>1</sub><sup>vão</sup></b>	80,6	2,04	0,066	0,069	4,30	4,30	-	3φ16	6,03
		<b>M<sub>B</sub><sup>esq</sup></b>	-139,1	2,04	0,115	0,124	7,68	7,68	4φ16	-	8,04
	<b>Troço 2</b>	<b>M<sub>B</sub><sup>dir</sup></b>	-139,1	2,04	0,115	0,124	7,68	7,68	4φ16	-	8,04
		<b>M<sub>2</sub><sup>vão</sup></b>	80,6	2,04	0,066	0,069	4,30	4,30	-	3φ16	6,03

Tabela 8.47 - Aço Inoxidável: Armadura longitudinal adotada

			$M_{Ed}$	$A_{smin}$	$\mu$	$\omega$	$A_s$	$A_{s\ adot}$	Arm. superior	Arm. inferior	$A_s$
			[kN.m]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]
V1	Troço 1	$M_1^{vão}$	64,8	2,04	0,049	0,050	3,27	3,27	-	4 $\phi$ 12	4,52
		$M_B^{esq}$	-92,9	2,04	0,070	0,073	4,76	4,76	3 $\phi$ 16	-	6,03
	Troço 2	$M_B^{dir}$	-79,0	2,04	0,060	0,062	4,02	4,02	3 $\phi$ 16	-	6,03
		$M_2^{vão}$	37,1	2,04	0,028	0,028	1,85	2,13	-	4 $\phi$ 12	4,52
		$M_C^{esq}$	-79,0	2,04	0,060	0,062	4,02	4,02	3 $\phi$ 16	-	6,03
	Troço 3	$M_C^{dir}$	-92,9	2,04	0,070	0,073	4,76	4,76	3 $\phi$ 16	-	6,03
$M_3^{vão}$		64,8	2,04	0,049	0,050	3,27	3,27	-	4 $\phi$ 12	4,52	
V2	Troço 1	$M_1^{vão}$	94,4	2,04	0,071	0,075	4,83	4,83	-	3 $\Phi$ 16	6,03
		$M_B^{esq}$	-146,4	2,04	0,110	0,119	7,72	7,72	4 $\phi$ 16	-	8,04
	Troço 2	$M_B^{dir}$	-130,0	2,04	0,098	0,105	6,79	6,79	4 $\phi$ 16	-	8,04
		$M_2^{vão}$	56,7	2,04	0,043	0,044	2,85	2,85	-	3 $\phi$ 16	6,03
		$M_C^{esq}$	-130,0	2,04	0,098	0,105	6,79	6,79	4 $\phi$ 16	-	8,04
	Troço 3	$M_C^{dir}$	-146,4	2,04	0,110	0,119	7,72	7,72	4 $\phi$ 16	-	8,04
$M_3^{vão}$		94,4	2,04	0,071	0,075	4,83	4,83	-	3 $\phi$ 16	6,03	
V3	Troço 1	$M_1^{vão}$	63,7	2,04	0,048	0,050	3,21	3,21	-	3 $\phi$ 16	6,03
		$M_B^{esq}$	-103,0	2,04	0,078	0,082	5,30	5,30	3 $\phi$ 16	-	6,03
	Troço 2	$M_B^{dir}$	-103,0	2,04	0,078	0,082	5,30	5,30	3 $\phi$ 16	-	6,03
		$M_2^{vão}$	63,7	2,04	0,048	0,050	3,21	3,21	-	3 $\phi$ 16	6,03
V4	Troço 1	$M_1^{vão}$	80,6	2,04	0,061	0,063	4,10	4,10	-	3 $\phi$ 16	6,03
		$M_B^{esq}$	-139,1	2,04	0,105	0,113	7,30	7,30	4 $\phi$ 16	-	8,04
	Troço 2	$M_B^{dir}$	-139,1	2,04	0,105	0,113	7,30	7,30	4 $\phi$ 16	-	8,04
		$M_2^{vão}$	80,6	2,04	0,061	0,063	4,10	4,10	-	3 $\phi$ 16	6,03

Tabela 8.48 - Verificação à compressão

		Verificação à compressão						
		Bielas comprimidas				Apoio		
		$V_{Ed}$	$\sigma_c$	$\sigma_{c \max}$		$R/A_p$	$\sigma_{c \max}$	Verificação
		[kN]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[MPa]	[MPa]	
V1	V <sub>A</sub>	-84,1	710,6	10560,0	Verifica			
	V <sub>B</sub> <sup>esq</sup>	86,3	729,2	10560,0	Verifica	1,040	17	Verifica
	V <sub>B</sub> <sup>dir</sup>	-69,7	589,2	10560,0	Verifica			
	V <sub>C</sub> <sup>esq</sup>	69,7	589,2	10560,0	Verifica	1,040	17	Verifica
	V <sub>C</sub> <sup>dir</sup>	-86,3	729,2	10560,0	Verifica			
	V <sub>D</sub>	84,1	710,6	10560,0	Verifica			
V2	V <sub>A</sub>	-148,8	1258,4	10560,0	Verifica			
	V <sub>B</sub> <sup>esq</sup>	146,1	1235,1	10560,0	Verifica	1,786	17	Verifica
	V <sub>B</sub> <sup>dir</sup>	-121,8	1030,1	10560,0	Verifica			
	V <sub>C</sub> <sup>esq</sup>	121,8	1030,1	10560,0	Verifica	1,786	17	Verifica
	V <sub>C</sub> <sup>dir</sup>	-146,1	1235,1	10560,0	Verifica			
	V <sub>D</sub>	148,8	1258,4	10560,0	Verifica			
V3	V <sub>A</sub>	74,9	633,0	10560,0	Verifica			
	V <sub>B</sub> <sup>esq</sup>	-94,2	796,4	10560,0	Verifica	1,256	17	Verifica
	V <sub>B</sub> <sup>dir</sup>	94,2	796,4	10560,0	Verifica			
	V <sub>C</sub>	-74,9	633,0	10560,0	Verifica			
V4	V <sub>A</sub>	162,4	1373,1	10560,0	Verifica			
	V <sub>B</sub> <sup>esq</sup>	-135,4	1144,8	10560,0	Verifica	1,805	17	Verifica
	V <sub>B</sub> <sup>dir</sup>	135,4	1144,8	10560,0	Verifica			
	V <sub>C</sub>	-162,4	1373,1	10560,0	Verifica			

Tabela 8.49 - Armadura transversal adotada

		Armadura transversal						
		$\rho_{min}$	$A_{sw/s \ min}$	$A_{sw/s}$	$A_{sw/s}$	Est. 2R	A	$V_{Rdmin}$
		[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> /m]	[-]	[cm <sup>2</sup> /m]	[kN]
V1	V <sub>A</sub>	0,0009	2,63	2,75	2,75	φ8//0,30	3,36	102,5
	V <sub>B<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	2,83	2,83	φ8//0,30	3,36	102,5
	V <sub>B<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	2,28	2,63	φ8//0,30	3,36	102,5
	V <sub>C<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	2,28	2,63	φ8//0,30	3,36	102,5
	V <sub>C<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	2,83	2,83	φ8//0,30	3,36	102,5
	V <sub>D</sub>	0,0009	2,63	2,75	2,75	φ8//0,30	3,36	102,5
V2	V <sub>A</sub>	0,0009	2,63	4,88	4,88	φ8//0,20	5,03	153,5
	V <sub>B<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	4,79	4,79	φ8//0,20	5,03	153,5
	V <sub>B<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	3,99	3,99	φ8//0,20	5,03	153,5
	V <sub>C<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	3,99	3,99	φ8//0,20	5,03	153,5
	V <sub>C<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	4,79	4,79	φ8//0,20	5,03	153,5
	V <sub>D</sub>	0,0009	2,63	4,88	4,88	φ8//0,20	5,03	153,5
V3	V <sub>A</sub>	0,0009	2,63	2,45	2,63	φ8//0,30	3,35	102,2
	V <sub>B<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	3,09	3,09	φ8//0,30	3,35	102,2
	V <sub>B<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	3,09	3,09	φ8//0,30	3,35	102,2
	V <sub>C</sub>	0,0009	2,63	2,45	2,63	φ8//0,30	3,35	102,2
V4	V <sub>A</sub>	0,0009	2,63	5,32	5,32	φ10//0,125	6,28	191,6
	V <sub>B<sup>esq</sup></sub>	0,0009	2,63	4,44	4,44	φ10//0,125	6,28	191,6
	V <sub>B<sup>dir</sup></sub>	0,0009	2,63	4,44	4,44	φ10//0,125	6,28	191,6
	V <sub>C</sub>	0,0009	2,63	5,32	5,32	φ10//0,125	6,28	191,6

Tabela 8.50 - Aço Carbono: Flecha a longo prazo pelo método dos coeficientes globais

			$\alpha$	$\rho$	$\alpha\rho$	$M_{cr}$	$M_{cqp}$	$M_{cr}/M_{cqp}$	Verificação	$\eta$	$K_t$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	$\eta$	$\eta \times K_t$	$a_c$	$a_t$	$\delta_{max}$	Verificação
			[-]	[-]	[-]	[kN.m]	[kN.m]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]		[m]	[mm]	[mm]	
V1	Troço 1	Vão	6,061	0,003	0,020	36,25	44,55	0,814	Estado II	2,5	4,5	0,003	1,000	0,9	4,05	0,0018	10,0	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	64,68	0,560	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	55,37	0,655	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0013	7,2	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,003	0,020	36,25	26,70	1,358	Estado II	2,5	4,5	0,003	1,000	0,9					
V2	Troço 1	Vão	6,061	0,004	0,027	36,25	58,36	0,621	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0026	14,4	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,007	0,041	36,25	81,83	0,443	Estado II	2,5	4,5	0,007	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,007	0,041	36,25	75,74	0,479	Estado II	2,5	4,5	0,007	1,000	0,9	4,05	0,0022	12,2	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,004	0,027	36,25	32,37	1,120	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
V3	Troço 1	Vão	6,061	0,004	0,027	36,25	49,43	0,733	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0018	10,0	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	77,74	0,466	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	77,74	0,466	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0018	10,0	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,004	0,027	36,25	49,43	0,733	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
V4	Troço 1	Vão	6,061	0,006	0,036	36,25	52,84	0,686	Estado II	2,5	4,5	0,004	0,750	0,9	4,05	0,0023	12,8	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	97,29	0,373	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,333	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,027	36,25	97,26	0,373	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,333	0,9	4,05	0,0023	12,8	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,006	0,036	36,25	52,84	0,686	Estado II	2,5	4,5	0,004	0,750	0,9					

Tabela 8.51 - Aço Inoxidável: Flecha a longo prazo pelo método dos coeficientes globais

			$\alpha$	$\rho$	$\alpha\rho$	$M_{cr}$	$M_{cqp}$	$M_{cr}/M_{cqp}$	Verificação	$\eta$	$K_t$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	$\eta$	$\eta \times K_t$	$a_c$	$a_t$	$\delta_{max}$	Verificação
			[-]	[-]	[-]	[kN.m]	[kN.m]	[-]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]		[m]	[mm]	[mm]	
V1	Troço 1	Vão	6,061	0,003	0,019	36,25	44,550	0,814	Estado II	2,5	4,5	0,003	1,000	0,9	4,05	0,0018	8,8	23,2	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,026	36,25	64,68	0,560	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,026	36,25	55,37	0,655	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0013	6,3	23,2	Verifica
		Vão	6,061	0,003	0,019	36,25	26,7	1,358	Estado II	2,5	4,5	0,003	1,000	0,9					
V2	Troço 1	Vão	6,061	0,004	0,026	36,25	58,360	0,621	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0026	12,7	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,006	0,035	36,25	81,83	0,443	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,006	0,035	36,25	75,74	0,479	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,000	0,9	4,05	0,0022	10,7	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,004	0,026	36,25	32,37	1,120	Estado I	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
V3	Troço 1	Vão	6,061	0,004	0,026	36,250	49,430	0,733	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0018	8,8	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,026	36,250	77,74	0,466	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,026	36,250	77,74	0,466	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9	4,05	0,0018	8,8	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,004	0,026	36,250	49,43	0,733	Estado II	2,5	4,5	0,004	1,000	0,9					
V4	Troço 1	Vão	6,061	0,006	0,035	36,250	52,840	0,686	Estado II	2,5	4,5	0,004	0,750	0,9	4,05	0,0023	11,2	20,0	Verifica
		Apoio	6,061	0,004	0,026	36,250	97,29	0,373	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,333	0,9					
	Troço 2	Apoio	6,061	0,004	0,026	36,250	97,26	0,373	Estado II	2,5	4,5	0,006	1,333	0,9	4,05	0,0023	11,2	20,0	Verifica
		Vão	6,061	0,006	0,035	36,250	52,84	0,686	Estado II	2,5	4,5	0,004	0,750	0,9					

Tabela 8.52 - Aço Carbono: Cálculo de tensões em Estado II

		Cálculo de tensões em Estado II											
		$M_{cr}$	$M_{eqp}$	Verificação	$\rho$	$\beta$	$d_z/d$	$\alpha$	$\alpha\rho$	Cs	Cc	x	$\sigma_s$
		[kN.m]	[kN.m]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]
V1	Troço 1	36,25	44,55	Estado II	0,004	0,50	0,11	15	0,067	15,00	6,50	0,151	165,00
	Troço 2	36,25	55,37	Estado II	0,004	0,50	0,11	15	0,067	15,00	6,50	0,151	205,07
V2	Troço 1	36,25	58,36	Estado II	0,007	0,37	0,11	15	0,102	11,22	5,58	0,166	161,68
	Troço 2	36,25	75,74	Estado II	0,007	0,37	0,11	15	0,102	11,22	5,58	0,166	209,83
V3	Troço 1	36,25	49,43	Estado II	0,004	1,00	0,11	15	0,067	15,00	6,00	0,143	183,07
	Troço 2	36,25	49,43	Estado II	0,004	1,00	0,11	15	0,067	15,00	6,00	0,143	183,07
V4	Troço 1	36,25	52,84	Estado II	0,004	1,33	0,11	15	0,067	15,00	6,00	0,143	195,70
	Troço 2	36,25	52,84	Estado II	0,004	1,33	0,11	15	0,067	15,00	6,00	0,143	195,70

Tabela 8.53 - Aço Inoxidável: Cálculo de tensões em Estado II

		$M_{cr}$	$M_{eqp}$	Verificação	$\rho$	$\beta$	$d_z/d$	$\alpha$	$\alpha\rho$	Cs	Cc	x	$\sigma_s$
		[kN.m]	[kN.m]		[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]
V1	Troço 1	36,25	44,55	Estado II	0,004	0,50	0,06	15	0,064	15,00	6,50	0,151	151,26
	Troço 2	36,25	55,37	Estado II	0,004	0,50	0,06	15	0,064	15,00	6,50	0,151	187,99
V2	Troço 1	36,25	58,36	Estado II	0,006	0,37	0,06	15	0,086	13,92	6,17	0,154	183,88
	Troço 2	36,25	75,74	Estado II	0,006	0,37	0,06	15	0,086	13,92	6,17	0,154	238,64
V3	Troço 1	36,25	49,43	Estado II	0,004	1,00	0,06	15	0,064	15,00	6,00	0,143	167,82
	Troço 2	36,25	49,43	Estado II	0,004	1,00	0,06	15	0,064	15,00	6,00	0,143	167,82
V4	Troço 1	36,25	52,84	Estado II	0,004	1,33	0,06	15	0,064	15,00	6,00	0,143	179,40
	Troço 2	36,25	52,84	Estado II	0,004	1,33	0,06	15	0,064	15,00	6,00	0,143	179,40

Tabela 8.54 - Aço Carbono: Verificação da máxima abertura de fendas

		Determinação da distância máxima entre fendas						Cálculo da extensão média relativa entre aço e o betão			Cálculo do valor característico da abertura de fendas			
		$h_{c,ef}$	$A_{c,ef}$	$\rho_{p,ef}$	$k_1$	$k_2$	$\phi$	$S_{r,max}$	$k_t$	$\alpha_e$	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	$w_k$	$w_{kmax}$	Verificação
		[m]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	
V1	Troço 1	0,116	0,035	0,017	0,800	0,833	0,020	0,430	0,4	6,06061	0,00045	0,20	0,30	Verifica
	Troço 2	0,116	0,035	0,017	0,800	0,833	0,020	0,430	0,4	6,06061	0,00065	0,28	0,30	Verifica
V2	Troço 1	0,111	0,033	0,027	0,800	0,833	0,020	0,308	0,4	6,06061	0,00056	0,17	0,30	Verifica
	Troço 2	0,111	0,033	0,027	0,800	0,833	0,020	0,308	0,4	6,06061	0,00080	0,25	0,30	Verifica
V3	Troço 1	0,119	0,036	0,017	0,800	0,833	0,020	0,438	0,4	6,06061	0,00054	0,23	0,30	Verifica
	Troço 2	0,119	0,036	0,017	0,800	0,833	0,020	0,438	0,4	6,06061	0,00054	0,23	0,30	Verifica
V4	Troço 1	0,119	0,036	0,017	0,800	0,833	0,020	0,438	0,4	6,06061	0,00060	0,26	0,30	Verifica
	Troço 2	0,119	0,036	0,017	0,800	0,833	0,020	0,438	0,4	6,06061	0,00060	0,26	0,30	Verifica

Tabela 8.55 - Aço Inoxidável: Verificação da máxima abertura de fendas

		Determinação da distância máxima entre fendas						Cálculo da extensão média relativa entre aço e o betão			Cálculo do valor característico da abertura de fendas			
		$h_{c,ef}$	$A_{c,ef}$	$\rho_{p,ef}$	$k_1$	$k_2$	$\phi$	$S_{r,max}$	$k_t$	$\alpha_e$	$\epsilon_{sm}-\epsilon_{cm}$	$w_k$	$w_{kmax}$	Verificação
		[m]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	
V1	Troço 1	0,075	0,023	0,027	0,800	0,893	0,020	0,328	0,4	6,06061	0,00050	0,17	0,40	Verifica
	Troço 2	0,075	0,023	0,027	0,800	0,893	0,020	0,328	0,4	6,06061	0,00069	0,23	0,40	Verifica
V2	Troço 1	0,075	0,023	0,036	0,800	0,892	0,020	0,272	0,4	6,06061	0,00072	0,20	0,40	Verifica
	Troço 2	0,075	0,023	0,036	0,800	0,892	0,020	0,272	0,4	6,06061	0,00100	0,27	0,40	Verifica
V3	Troço 1	0,075	0,023	0,027	0,800	0,895	0,020	0,329	0,4	6,06061	0,00059	0,19	0,40	Verifica
	Troço 2	0,075	0,023	0,027	0,800	0,895	0,020	0,329	0,4	6,06061	0,00059	0,19	0,40	Verifica
V4	Troço 1	0,075	0,023	0,027	0,800	0,895	0,020	0,329	0,4	6,06061	0,00065	0,21	0,40	Verifica
	Troço 2	0,075	0,023	0,027	0,800	0,895	0,020	0,329	0,4	6,06061	0,00065	0,21	0,40	Verifica



## D. CÁLCULOS DA DURABILIDADE

### D.1 Vida Útil de Projeto das Estruturas de Betão Armado

Tabela 8.56 - Classes de exposição em função das condições ambientais [39]

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
<b>Corrosão induzida por carbonatação</b>		
XC1	Seco ou permanentemente húmido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão no interior de edifícios ou estruturas, com exceção de áreas com humidade elevada;</li> <li>▪ Betão permanentemente submerso em água não agressiva.</li> </ul>
XC2	Húmido, raramente seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado enterrado em solo não agressivo;</li> <li>▪ Betão armado sujeito a longos períodos de contacto com água não agressiva.</li> </ul>
XC3	Moderadamente húmido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento;</li> <li>▪ Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g. cozinhas, casas de banho).</li> </ul>
XC4	Ciclicamente húmido e seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem;</li> <li>▪ Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2.</li> </ul>
<b>Corrosão induzida por cloretos não provenientes do mar</b>		
XD1	Moderadamente húmido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado em partes de pontes afastadas da ação direta dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.</li> </ul>
XD2	Húmido, raramente seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; piscinas.</li> </ul>
XD3	Ciclicamente húmido e seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado diretamente afetado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos;</li> <li>▪ Betão armado em que uma das superfícies esta imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (v.g., algumas piscinas ou parte delas). Lajes de parques de estacionamento de automóveis e outros pavimentos expostos a sais contendo cloretos.</li> </ul>
<b>Corrosão induzida por cloretos da água do mar</b>		
XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com água do mar	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais;</li> <li>▪ Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200 m do mar. Esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios.</li> </ul>
XS2	Submersão permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado permanentemente submerso.</li> </ul>
XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betão armado sujeito às marés ou salpicos, desde 10 m acima do nível superior das marés (5 m na costa Sul de Portugal Continental) até 1 m abaixo do nível inferior das marés;</li> <li>▪ Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., túneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de proteção suplementares.</li> </ul>

## CAPÍTULO 8

A NP EN 1990:2009 define classes de consequências, CC, associadas a cenários de desastres a nível ambiental, humano, social e económico. A estas três classes de consequências, a NP EN 1990:2009 faz corresponder respetivamente classes de fiabilidade (RC1, RC2 e RC3), as quais, envolvem a noção de fator de segurança da vida útil,  $\gamma$  [43].

Tabela 8.57 - Definição de classes de consequências [43]

<b>Classes de consequências</b>	<b>Descrição</b>	<b>Exemplos de edifícios e de obras de engenharia civil</b>
<b>CC3</b>	Consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais ou ambientais muito importantes.	- Bancadas, edifícios públicos em que as consequências do colapso são elevadas (por exemplo, uma sala de concertos).
<b>CC2</b>	Consequência média em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais ou ambientais mediamente importantes.	- Edifícios de habitação e de escritórios, edifícios públicos em que as consequências do colapso são médias (por exemplo, um edifício de escritórios).
<b>CC1</b>	Consequência baixa em termos de perda de vidas humanas; consequências económicas, sociais ou ambientais pouco importantes ou desprezáveis.	- Edifícios agrícolas normalmente não ocupados permanentemente por pessoas (por exemplo, armazéns), estufas.

Tabela 8.58 - Fatores de segurança da vida útil  $\gamma$  [51]

<b>Fatores de segurança da vida útil <math>\gamma</math></b>	
<b>Classes de fiabilidade</b>	<b>Fator <math>\gamma</math> para o Estado Limite de Utilização</b>
RC3	2,8
RC2	2,3
RC1	2,0

**D.1.1 Carbonatação:****a. Recobrimento de 30 mm**Tabela 8.59 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XC3 e XC4 (R=30mm)

<b>Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	0,03	0,03	0,03	0,03
Fator que tem em conta as condições de ensaio da LNEC E391	<b>k<sub>0</sub></b>	3	3	3	3
Fator que tem em conta a influência da humidade relativa	<b>k<sub>1</sub></b>	0,77	0,41	0,77	0,41
Fator que tem em conta a influência da cura	<b>k<sub>2</sub></b>	1	1	1	1
Fator que tem em conta a influência da molhagem/ secagem	<b>n</b>	0,02	0,085	0,02	0,085
Período de referência (anos)	<b>t<sub>0</sub></b>	1	1	1	1
<b>Designação do betão</b>		<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>	<b>D1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	129	129	60	60
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	42	160	19	64
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	18	69	8	28
<b>Designação do betão</b>		<b>E1</b>	<b>F1</b>	<b>G1</b>	<b>H1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	190	190	85	85
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	62	255	27	97
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	27	111	12	42

Tabela 8.60 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XC3 e XC4 (R=30mm)

<b>Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	30	30	30	30
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (MPa)	$f_{cd}$	2	2,5	2	2,5
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	<b>k</b>	0,966	0,821	0,966	0,821
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	<b><math>\alpha</math></b>	2	2	2	2
<b>Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, <math>I_{corr}</math></b>					
<b>Classe de exposição ambiental</b>	$f_{cd}$	<b><math>t_p</math> (anos) calculado para <math>I_{corr}</math> (<math>\mu\text{A}/\text{cm}^2</math>)</b>			<b><math>t_p</math> estimado (anos)</b>
		0,1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,5 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	
<b>XC3</b>	2	50	-	-	50
<b>XC4</b>	2,5	43	9	4	19

Tabela 8.61 - Determinação de  $t_L$  para as classes XC3 e XC4 (R=30mm)

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC3 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>A1</b>	<b>E1</b>	<b>C1</b>	<b>G1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	18	27	8	12
Período de propagação de projeto $t_p$	50	50	50	50
Período de vida útil de projeto $t_L$	69	78	59	62
<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC4 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>B1</b>	<b>F1</b>	<b>D1</b>	<b>H1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	69	111	28	42
Período de propagação de projeto $t_p$	19	19	19	19
Período de vida útil de projeto $t_L$	88	129	46	61

## b. Recobrimento de 40 mm

Tabela 8.62 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XC3 e XC4 (R=40mm)

<b>Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		<b>CEM I; CEM II/A</b>		<b>CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V</b>	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	0,04	0,04	0,04	0,04
Fator que tem em conta as condições de ensaio da LNEC E391	<b>k<sub>0</sub></b>	3	3	3	3
Fator que tem em conta a influência da humidade relativa	<b>k<sub>1</sub></b>	0,77	0,41	0,77	0,41
Fator que tem em conta a influência da cura	<b>k<sub>2</sub></b>	1	1	1	1
Fator que tem em conta a influência da molhagem/ secagem	<b>n</b>	0,02	0,085	0,02	0,085
Período de referência (anos)	<b>t<sub>0</sub></b>	1	1	1	1
<b>Designação do betão</b>		<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>	<b>D1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	129	129	60	60
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	76	329	34	127
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	33	139	15	55
<b>Designação do betão</b>		<b>E1</b>	<b>F1</b>	<b>G1</b>	<b>H1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	190	190	85	85
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	114	509	49	193
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	49	221	21	84

Tabela 8.63 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XC3 e XC4 (R=40mm)

<b>Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	40	40	40	40
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (MPa)	$f_{cd}$	2	2,5	2	2,5
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	<b>k</b>	1,067	0,922	1,067	0,922
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	<b><math>\alpha</math></b>	2	2	2	2
<b>Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, <math>I_{corr}</math></b>					
<b>Classe de exposição ambiental</b>	$f_{cd}$	$t_p$ (anos) calculado para $I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			$t_p$ estimado (anos)
		0,1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,5 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	
<b>XC3</b>	2	56	-	-	56
<b>XC4</b>	2,5	48	10	5	21

Tabela 8.64 - Determinação de  $t_L$  para as classes XC3 e XC4 (R=40mm)

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC3 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>A1</b>	<b>E1</b>	<b>C1</b>	<b>G1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	33	49	15	21
Período de propagação de projeto $t_p$	56	56	56	56
Período de vida útil de projeto $t_L$	89	105	71	77
<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC4 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>B1</b>	<b>F1</b>	<b>D1</b>	<b>H1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	139	221	55	84
Período de propagação de projeto $t_p$	21	21	21	21
Período de vida útil de projeto $t_L$	160	242	76	105

## c. Recobrimento de 50 mm

Tabela 8.65 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XC3 e XC4 (R=50mm)

<b>Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		<b>CEM I; CEM II/A</b>		<b>CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V</b>	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
Fator que tem em conta as condições de ensaio da LNEC E391	<b>k<sub>0</sub></b>	3	3	3	3
Fator que tem em conta a influência da humidade relativa	<b>k<sub>1</sub></b>	0,77	0,41	0,77	0,41
Fator que tem em conta a influência da cura	<b>k<sub>2</sub></b>	1	1	1	1
Fator que tem em conta a influência da molhagem/ secagem	<b>n</b>	0,02	0,085	0,02	0,085
Período de referência (anos)	<b>t<sub>0</sub></b>	1	1	1	1
<b>Designação do betão</b>		<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>	<b>D1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	129	129	60	60
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	121	547	54	217
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	53	238	24	95
<b>Designação do betão</b>		<b>E1</b>	<b>F1</b>	<b>G1</b>	<b>H1</b>
Resistência à carbonatação (kg.ano/m <sup>5</sup> )	<b>R<sub>C65</sub></b>	190	190	85	85
Período de iniciação de cálculo	<b>t<sub>ic</sub></b>	181	872	78	331
Fator de segurança da vida útil (RC2)	<b>γ</b>	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	<b>t<sub>i</sub></b>	79	379	34	144

Tabela 8.66 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XC3 e XC4 (R=50mm)

<b>Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XC3 e XC4</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XC3</b>	<b>XC4</b>	<b>XC3</b>	<b>XC4</b>
Recobrimento	<b>R</b>	50	50	50	50
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (MPa)	$f_{cd}$	2	2,5	2	2,5
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	<b>k</b>	1,169	1,024	1,169	1,024
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	<b><math>\alpha</math></b>	2	2	2	2
<b>Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, <math>I_{corr}</math></b>					
<b>Classe de exposição ambiental</b>	$f_{cd}$	<b><math>t_p</math> (anos) calculado para <math>I_{corr}</math> (<math>\mu\text{A}/\text{cm}^2</math>)</b>			<b><math>t_p</math> estimado (anos)</b>
		0,1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,5 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	
<b>XC3</b>	2	61	-	-	61
<b>XC4</b>	2,5	53	11	5	23

Tabela 8.67 - Determinação de  $t_L$  para as classes XC3 e XC4 (R=50mm)

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC3 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>A1</b>	<b>E1</b>	<b>C1</b>	<b>G1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	53	79	24	34
Período de propagação de projeto $t_p$	61	61	61	61
Período de vida útil de projeto $t_L$	113	140	85	95
<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XC4 (classe de fiabilidade – RC2)</b>				
<b>Tipo de cimento</b>	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>B1</b>	<b>F1</b>	<b>D1</b>	<b>H1</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	238	379	95	144
Período de propagação de projeto $t_p$	23	23	23	23
Período de vida útil de projeto $t_L$	261	402	118	167

## D.1.2 Cloretos:

Tabela 8.68 - Cálculo de  $C_s$  e  $D$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2).

Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
<b>Cálculo da concentração de cloretos à superfície do betão, <math>C_s</math></b>									
Designação do betão		A2	B2	C2	D2	A2	B2	C2	D2
Fator que tem em conta o teor de cloretos e a temperatura da água do mar em Portugal	$C_b$	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Fator que tem em conta a razão a/c	$k_{a/c}$	1,125	1	1,375	1,125	1,125	1	1,375	1,125
Fator que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar	$k_{vert}$	0,7	1	0,7	1	0,7	1	0,7	1
Fator que tem em conta a distância à linha da costa	$k_{hor}$	1	1	1	1	0,6	0,6	0,6	0,6
Fator que tem em conta a temperatura do betão	$k_{temp}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Concentração de cloretos à superfície do betão	$C_s$	0,01575	0,03	0,01925	0,03375	0,00945	0,018	0,01155	0,02025
Concentração de cloretos à profundidade de R correspondente ao início da despassivação	$C_R$	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003
Concentração inicial de cloretos na composição do betão	$C_i$	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cálculo do coeficiente de difusão de cloretos no betão, <math>D</math></b>									
Fator que tem em conta a influência das condições de cura	$k_{D,c}$	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Fator que tem em conta a influência da HR do ambiente	$k_{D,RH}$	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1
Fator que tem em conta a influência da temperatura	$k_{D,T}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Coeficiente de difusão potencial ( $m^2/s$ )	$D_0$	3,3E-11	3,3E-11	1,1E-11	1,1E-11	3,3E-11	3,3E-11	1,1E-11	1,1E-11
Idade de referência - 28 dias (segundos)	$t_0$	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200
Fator que tem em conta o decréscimo de $D$ ( $m^2/s$ ) ao longo do tempo	$n$	0,55	0,55	0,65	0,65	0,55	0,55	0,65	0,65

CAPÍTULO 8

Tabela 8.69 - Cálculo de  $C_s$  e  $D$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2).

Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
<b>Cálculo da concentração de cloretos à superfície do betão, <math>C_s</math></b>									
Designação do betão		E2	F2	G2	H2	E2	F2	G2	H2
Fator que tem em conta o teor de cloretos e a temperatura da água do mar em Portugal	$C_b$	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03
Fator que tem em conta a razão $a/c$	$k_{a/c}$	1,125	1	1,375	1,125	1,125	1	1,375	1,125
Fator que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar	$k_{vert}$	0,7	1	0,7	1	0,7	1	0,7	1
Fator que tem em conta a distância à linha da costa	$k_{hor}$	1	1	1	1	0,6	0,6	0,6	0,6
Fator que tem em conta a temperatura do betão	$k_{temp}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Concentração de cloretos à superfície do betão	$C_s$	0,01575	0,03	0,01925	0,03375	0,00945	0,018	0,01155	0,02025
Concentração de cloretos à profundidade de $R$ correspondente ao início da despassivação	$C_R$	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003
Concentração inicial de cloretos na composição do betão	$C_i$	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Cálculo do coeficiente de difusão de cloretos no betão, <math>D</math></b>									
Fator que tem em conta a influência das condições de cura	$k_{D,c}$	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Fator que tem em conta a influência da HR do ambiente	$k_{D,RH}$	0,4	1	0,4	1	0,4	1	0,4	1
Fator que tem em conta a influência da temperatura	$k_{D,T}$	1	1	1	1	1	1	1	1
Coeficiente de difusão potencial ( $m^2/s$ )	$D_0$	2,7E-11	2,7E-11	9E-12	9E-12	2,7E-11	2,7E-11	9E-12	9E-12
Idade de referência - 28 dias (segundos)	$t_0$	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200	2419200
Fator que tem em conta o decréscimo de $D$ ( $m^2/s$ ) ao longo do tempo	$n$	0,55	0,55	0,65	0,65	0,55	0,55	0,65	0,65

### D.1.2.1 Estruturas com Aço Carbono

#### a. Recobrimento de 30 mm

Tabela 8.70 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=30mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		A2	B2	C2	D2	A2	B2	C2	D2
Recobrimento	R	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	2	0	74	1	11	0	392	2
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	1	0	32	0	5	0	170	1

Tabela 8.71 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2; R=30mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		E2	F2	G2	H2	E2	F2	G2	H2
Recobrimento	R	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	3	0	132	2	16	0	695	4
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	1	0	57	1	7	0	302	2

Tabela 8.72 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XS1 e XS3 (R=30mm)

<b>Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XS1</b>	<b>XS3</b>	<b>XS1</b>	<b>XS3</b>
Recobrimento	<b>R</b>	30	30	30	30
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (Mpa)	$f_{cd}$	3	4	3	4
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	<b>k</b>	0,676	0,386	0,676	0,386
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	<b><math>\alpha</math></b>	10	10	10	10

<b>Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, <math>I_{corr}</math></b>					
<b>Classe de exposição ambiental</b>	$f_{cd}$	$t_p$ (anos) calculado para $I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )			$t_p$ estimado (anos)
		0,1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,5 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	1 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	
<b>XS1</b>	3	-	1,4	1,4	1,4
<b>XS3</b>	4	-	-	0,4	0,4

Tabela 8.73 - Determinação de  $t_L$  para as classes XS1 e XS3 (R=30mm)

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XS1 (classe de fiabilidade – RC2)</b>								
<b>Distância à linha de costa</b>	<b>0 km</b>				<b>1 km</b>			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>A2</b>	<b>E2</b>	<b>C2</b>	<b>G2</b>	<b>A2</b>	<b>E2</b>	<b>C2</b>	<b>G2</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	0,9	1,5	32,3	57,4	4,6	7,2	170,4	302,3
Período de propagação de projeto $t_p$	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Período de vida útil de projeto $t_L$	2	3	34	59	6	9	172	304

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XS3 (classe de fiabilidade – RC2)</b>								
<b>Distância à linha de costa</b>	<b>0 km</b>				<b>1 km</b>			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>B2</b>	<b>F2</b>	<b>D2</b>	<b>H2</b>	<b>B2</b>	<b>F2</b>	<b>D2</b>	<b>H2</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	0,0	0,1	0,4	0,8	0,1	0,1	1,1	1,9
Período de propagação de projeto $t_p$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Período de vida útil de projeto $t_L$	0,4	0,5	0,8	1,2	0,5	0,5	1,5	2,3

### b. Recobrimento de 40 mm

Tabela 8.74 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=40mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		A2	B2	C2	D2	A2	B2	C2	D2
Recobrimento	R	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	8	0	384	5	38	1	2028	13
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	3	0	167	2	16	0	882	6

Tabela 8.75 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: E2, F2, G2 e H2; R=40mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		E2	F2	G2	H2	E2	F2	G2	H2
Recobrimento	R	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	12	0	682	9	59	1	3598	23
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	5	0	297	4	26	1	1564	10

Tabela 8.76 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XS1 e XS3 (R=40mm)

Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3					
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3
Recobrimento	R	40	40	40	40
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (Mpa)	$f_{cd}$	3	4	3	4
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	k	0,777	0,487	0,777	0,487
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	$\alpha$	10	10	10	10

Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, $I_{corr}$					
Classe de exposição ambiental	$f_{cd}$	$t_p$ (anos) calculado para $I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )			$t_p$ estimado (anos)
		0,1 ( $\mu A/cm^2$ )	0,5 ( $\mu A/cm^2$ )	1 ( $\mu A/cm^2$ )	
XS1	3	-	1,6	1,6	1,6
XS3	4	-	-	0,5	0,5

Tabela 8.77 - Determinação de  $t_L$  para as classes XS1 e XS3 (R=40mm)

Determinação de $t_L$ para a classe XS1 (classe de fiabilidade – RC2)								
Distância à linha de costa	0 km				1 km			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Designação do betão	A2	E2	C2	G2	A2	E2	C2	G2
Período de iniciação do projeto $t_i$	3,4	5,3	167,1	296,5	16,5	25,7	881,8	1564,4
Período de propagação de projeto $t_p$	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Período de vida útil de projeto $t_L$	5	7	169	298	18	27	883	1566

Determinação de $t_L$ para a classe XS3 (classe de fiabilidade – RC2)								
Distância à linha de costa	0 km				1 km			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Designação do betão	B2	F2	D2	H2	B2	F2	D2	H2
Período de iniciação do projeto $t_i$	0,1	0,2	2,2	3,9	0,3	0,5	5,5	9,8
Período de propagação de projeto $t_p$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Período de vida útil de projeto $t_L$	1	1	3	4	1	1	6	10

## c. Recobrimento de 50 mm

Tabela 8.78 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões; A2, B2, C2 e D2; R=50mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		A2	B2	C2	D2	A2	B2	C2	D2
Recobrimento	R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((C_s - C_r)/C_s)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	21	1	1376	18	102	2	7259	46
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	9	0	598	8	44	1	3156	20

Tabela 8.79 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões E2, F2, G2 e H2; R=50mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		E2	F2	G2	H2	E2	F2	G2	H2
Recobrimento	R	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Inverso da função erro $\text{erf}^{-1}((C_s - C_r)/C_s)$	$\xi$	0,807	1,061	0,891	1,203	0,566	0,863	0,666	1,023
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	33	1	2441	32	159	3	12878	81
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	14	1	1061	14	69	1	5599	35

Tabela 8.80 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XS1 e XS3 (R=50mm)

Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3					
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3
Recobrimento	R	50	50	50	50
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (Mpa)	$f_{cd}$	3	4	3	4
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	k	0,879	0,589	0,879	0,589
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	$\alpha$	10	10	10	10
Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, $I_{corr}$					
Classe de exposição ambiental	$f_{cd}$	$t_p$ (anos) calculado para $I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )			$t_p$ estimado (anos)
		0,1 ( $\mu A/cm^2$ )	0,5 ( $\mu A/cm^2$ )	1 ( $\mu A/cm^2$ )	
XS1	3	-	1,8	1,8	1,8
XS3	4	-	-	0,6	0,6

Tabela 8.81 - Determinação de  $t_L$  para as classes XS1 e XS3 (R=50mm)

Determinação de $t_L$ para a classe XS1 (classe de fiabilidade – RC2)								
Distância à linha de costa	0 km				1 km			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Designação do betão	A2	E2	C2	G2	A2	E2	C2	G2
Período de iniciação do projeto $t_i$	9,2	14,3	598,2	1061,3	44,4	69,3	3155,9	5599,2
Período de propagação de projeto $t_p$	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Período de vida útil de projeto $t_L$	11	16	600	1063	46	71	3158	5601
Determinação de $t_L$ para a classe XS3 (classe de fiabilidade – RC2)								
Distância à linha de costa	0 km				1 km			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Designação do betão	B2	F2	D2	H2	B2	F2	D2	H2
Período de iniciação do projeto $t_i$	0,4	0,6	7,8	13,9	0,9	1,4	19,8	21,2
Período de propagação de projeto $t_p$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Período de vida útil de projeto $t_L$	1	1	8	15	2	2	20	36

## D.1.2.2 Estruturas com Aço Inoxidável

## a. Triplo do Teor Crítico de Cloretos

Tabela 8.82 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões: A2, B2, C2 e D2; R=30mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		A2	B2	C2	D2	A2	B2	C2	D2
Recobrimento	R	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Inverso da função erro $\text{erf-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,214	0,595	0,347	0,785	0,1	0,305	0,1	0,541
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	795	1	16260	11	23372	21	19893594	94
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	346	0	7069	5	10162	9	8649389	41

Tabela 8.83 - Cálculo de  $t_i$  para as classes XS1 e XS3 (Betões E2, F2, G2 e H2; R=30mm)

Cálculo do período de iniciação da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3									
Distância à linha de costa		0 km				1 km			
Tipo de cimento		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
Classe de exposição ambiental		XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3	XS1	XS3
Designação do betão		E2	F2	G2	H2	E2	F2	G2	H2
Recobrimento	R	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Inverso da função erro $\text{erf-1}((Cs-Cr)/Cs)$	$\xi$	0,214	0,595	0,347	0,785	0,244	0,305	0,0345	0,541
Período de iniciação de cálculo (anos)	$t_{ic}$	1241	2	28848	20	36506	34	35295045	166
Fator de segurança da vida útil (RC2)	$\gamma$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
Período de iniciação de projeto (anos)	$t_i$	540	1	12543	9	15872	15	15345672	72

Tabela 8.84 - Cálculo de  $t_p$  para as classes XS1 e XS3 (R=30mm)

<b>Cálculo do período de propagação mínimo da corrosão para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3</b>					
<b>Tipo de cimento</b>		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Classe de exposição ambiental</b>		<b>XS1</b>	<b>XS3</b>	<b>XS1</b>	<b>XS3</b>
Recobrimento	<b>R</b>	30	30	30	30
Diâmetro inicial das armaduras passivas (mm)	$\phi_0$	12	12	12	12
Resistência à compressão diametral do betão (Mpa)	$f_{cd}$	3	4	3	4
Valor de redução relativa do raio das armaduras responsável pelo início da fendilhação do betão	<b>k</b>	0,676	0,386	0,676	0,386
Fator que considera a influência da corrosão quando este é do tipo uniforme	<b><math>\alpha</math></b>	10	10	10	10
<b>Cálculo do período de propagação mínimo através da intensidade da corrente de corrosão eletroquímica, <math>I_{corr}</math></b>					
<b>Classe de exposição ambiental</b>	<b><math>f_{cd}</math></b>	<b><math>t_p</math> (anos) calculado para <math>I_{corr}</math> (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>			<b><math>t_p</math> estimado (anos)</b>
		0,1 ( $\mu A/cm^2$ )	0,5 ( $\mu A/cm^2$ )	1 ( $\mu A/cm^2$ )	
<b>XS1</b>	3	-	1,4	1,4	1,4
<b>XS3</b>	4	-	-	0,4	0,4

Tabela 8.85 - Determinação de  $t_L$  para as classes XS1 e XS3 (R=30mm)

<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XS1 (classe de fiabilidade – RC2)</b>								
<b>Distância à linha de costa</b>	<b>0 km</b>				<b>1 km</b>			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>A2</b>	<b>E2</b>	<b>C2</b>	<b>G2</b>	<b>A2</b>	<b>E2</b>	<b>C2</b>	<b>G2</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	345,5	539,7	7069,5	12542,6	10161,8	15872,3	8649388,5	15345671,9
Período de propagação de projeto $t_p$	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Período de vida útil de projeto $t_L$	347	541	7071	12544	10163	15874	8649390	15345673
<b>Determinação de <math>t_L</math> para a classe XS3 (classe de fiabilidade – RC2)</b>								
<b>Distância à linha de costa</b>	<b>0 km</b>				<b>1 km</b>			
	CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V		CEM I; CEM II/A		CEM II/B; CEM III; CEM IV; CEM V	
<b>Designação do betão</b>	<b>B2</b>	<b>F2</b>	<b>D2</b>	<b>H2</b>	<b>B2</b>	<b>F2</b>	<b>D2</b>	<b>H2</b>
Período de iniciação do projeto $t_i$	0,5	0,7	4,9	8,6	9,3	14,6	40,8	72,3
Período de propagação de projeto $t_p$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Período de vida útil de projeto $t_L$	1	1	5	9	10	15	41	73