

DM

**A Construção em Betão Armado  
com Armaduras de GFRP  
e o seu Benefício Financeiro  
a Longo Prazo**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Juan Carlos de Freitas Gouveia**  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

fevereiro | 2017

**A Construção em Betão Armado  
com Armaduras de GFRP  
e o seu Benefício Financeiro  
a Longo Prazo**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Juan Carlos de Freitas Gouveia**

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR  
Paulo Miguel de Macedo França



# **Agradecimento**

No culminar deste longo percurso acadêmico, agradeço a cooperação a todos aqueles, que de uma forma ou de outra, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Para a minha família, uma gratificação muito especial aos meus pais, irmãos, tios e primos, pelo apoio, pela paciência e compreensão.

Ao meu orientador, Professor Doutor Paulo Miguel de Macedo França, pela sua orientação, dedicação e pela sua disponibilidade manifestada durante a minha orientação e ao longo do percurso acadêmico.

Aos amigos e colegas, pelo apoio e pela ajuda prestada.

Às pessoas que contribuíram na investigação desta dissertação: Sr. Eng. Pedro Macedo Camacho; Sr. Eng. Roberto Nepomuceno; Sr. Eng. Erik Ulrix; Sr. Aniello Giamundo; Sra. Silke Friedrich; Sr. Mark Gouveia e Sr. Rui Azevedo.



# Resumo

No sector da Engenharia Civil, a degradação de infraestruturas torna-se cada vez mais visível e evidente com o evoluir do tempo. De modo a evitar esta degradação, ou pelo menos minimizar o avanço progressivo que está patente, a intervenção do engenheiro civil é fundamental para garantir o bom funcionamento das mesmas. A origem desta degradação pode-se associar principalmente à exposição ambiental, devido ao desgaste provocado pelas condições atmosféricas, mas também em grande parte por erro humano, nomeadamente, o recobrimento utilizado, a má aplicação do betão em obra, entre outras causas de erros a nível de projeto e de execução. Como o avanço das novas tecnologias está cada vez mais presente no nosso quotidiano, uma das técnicas inovadoras é a introdução dos varões de fibra de vidro “GFRP”, material que garante um melhor desempenho estrutural no que diz respeito a todas as agravantes causadas pela deterioração das armaduras.

Contudo, na aplicação deste material, assim como em qualquer outro material inovador, há que ter em conta características mais ou menos vantajosas. No que diz respeito às mais benéficas, sublinha-se a corrosibilidade nula, a elevada resistência à tração, a não condutividade eletromagnética e baixo peso próprio. Por outro lado, o comportamento frágil, baixo módulo de elasticidade e principalmente o elevado custo inicial são aspetos que dificultam a introdução da aplicação das armaduras de GFRP na construção civil.

Nesta dissertação, pretende-se avaliar o custo inicial de construir/reabilitar as estruturas de betão armado deterioradas com armaduras de GFRP e o custo a longo prazo das reparações necessárias para as construções tradicionais em betão armado. Para isso, foram elaborados diversos trabalhos, os quais passaram pela análise da causa de corrosão das armaduras, pela determinação do tempo de vida útil, pela análise do comportamento das estruturas em betão armado com GFRP e pela análise do dimensionamento de acordo com a Norma Americana do ACI [1]. Seguidamente, na pesquisa do dimensionamento, aplicou-se o conceito a uma estrutura localizada na ilha da Madeira.

Posteriormente, foram realizadas as análises de custo-benefício na estrutura mencionada, tendo sido concebidos quatro cenários de degradação diferentes, sendo que cada um deles varia de acordo com o tipo de cimento e recobrimento utilizado e a classe de exposição ambiental. A análise de custo-benefício tem em conta a comparação entre reabilitar/construir em varões de aço e em fibra de vidro.

Em função desta análise, concluiu-se que, para estruturas de betão armado expostas as condições ambientais XS1 e XS3, onde os recobrimentos mínimos exigidos pela Norma Europeia EC2 [2] são cumpridos e utilizando os cimentos de tipo CEM I ou CEM II/A, a opção de utilizar armaduras em GFRP se torna mais proveitosa, mesmo que o custo inicial seja superior ao do aço. Porém, para o caso de o tipo de cimento ser CEM II/B até V, para os mesmos critérios referidos, a aplicação das armaduras de aço a longo prazo torna-se mais vantajosa, ao contrário do GFRP.

**PALAVRA-CHAVE:** Corrosão das armaduras, GFRP, Reabilitação, Dimensionamento, Custo.



# Abstract

In the Civil Engineering sector, infrastructure degradation becomes more and more visible and evident in time. In order to avoid this anomaly or at least minimize the progressive advance of this degradation, the intervention of the civil engineer is fundamental to guarantee the correct functioning of such. The origin of this anomaly can be mainly associated to environmental exposure due to the corrosion provoked by atmospheric conditions, but also greatly due to human error, such as the cover used, and the wrong application of reinforced concrete, among other causes of error related to the project and its execution. As new technologies develop and become more cemented in our daily life, an innovative technique is the introduction of glass bar “GFRP”, material which ensures a better structural performance in terms of all aggravating factors caused by deterioration of the steel.

However, in the application of this material as well as in any other innovative material, you must take into consideration the characteristics that can be more advantageous or disadvantageous. In terms of the most beneficial, is highlight the high tensile strength, non-magnetic conductivity and low own weight. On the other hand, the fragile behavior, the low modulus of elasticity and most of all the high initial cost, are aspects that make it difficult to introduce the application of the GFRP reinforcements on the civil construction.

In this dissertation, it is intended to evaluate the initial cost of the building /rehabilitating the structures concrete reinforced deteriorated with GFRP bar and the long-term cost repairs required for traditional reinforced concrete constructions. For this, several tasks were elaborated in which they went through the analysis of the cause of reinforcement corrosion, by the determination of the lifetime span, by the analysis of the behavior of reinforced concrete structures with GFRP and by the analysis of the design in accordance with the American Standard ACI[1]. Following the survey of design, the concept was applied to a structure found on the island of Madeira.

Subsequently, cost-benefit analyzes were carried out in the aforementioned structure, where four different degradation scenarios were conceived, each of which varying according to the type of cement and cover used and the class of environmental exposure. The cost-benefit analysis takes into account the comparison between building /rehabilitating on steel bars and fiber glass bars.

Based on this analysis, it was concluded that for exposed reinforced concrete structures the environmental conditions XS1 and XS3, where the minimum cover required by the European Standard EC2 [2] are met and using a type CEM I or CEM II / A cements, the option of using GFRP reinforcements becomes more profitable, even if the initial cost is higher than that of steel. However, in the case of cement type being CEM II / B to V, for the same criteria, the application of long-term steel reinforcement becomes more advantageous than GFRP.

**KEY WORDS:** Corrosion of reinforcement, GFRP, Rehabilitation, Dimensioning, Cost.



# Índice

---

<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1 Enquadramento Geral .....	1
1.2 Objetivo do Trabalho .....	2
1.3 Organização do Documento .....	2
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>5</b>
Corrosão das armaduras e aplicação do GFRP (como alternativa) .....	5
2.1 Corrosão das armaduras .....	5
2.1.1 Despassivação das armaduras .....	7
2.1.2 Corrosão das armaduras por ação dos Cloretos .....	7
2.1.3 Corrosão das armaduras por ação da Carbonatação .....	8
2.1.4 Mecanismo de corrosão das armaduras .....	9
2.1.5 Corrosão da armadura versus vida útil da estrutura .....	9
2.1.6 Modelação da deterioração do betão armado por corrosão do Aço .....	11
2.1.6.1 Modelo de cálculo do período de iniciação devido aos cloretos .....	12
2.1.6.2 Modelo para cálculo do período de propagação .....	14
2.1.7 Aplicação da metodologia empregue pela norma E465 .....	15
2.2 Varões de GFRP como alternativa dos varões de aço .....	18
2.2.1 Fibra .....	19
2.2.2 Matriz .....	20
2.2.3 Propriedades Físicas, Mecânicas e Geométricas: .....	21
2.2.3.1 Densidade dos Varões .....	21
2.2.3.2 Coeficiente de dilatação térmica .....	21
2.2.3.3 Resistência à tração .....	21
2.2.3.4 Resistência à Compressão .....	22
2.2.3.5 Resistência ao Corte .....	22
2.2.3.6 Aderência .....	22
2.2.3.7 Fluência .....	23
2.2.3.8 Relaxação .....	23
2.2.3.9 Fadiga .....	24
2.2.3.10 Efeito da temperatura e do fogo .....	24

2.2.3.11 Geometria .....	24
2.2.3.12 Durabilidade .....	24
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>27</b>
Dimensionamento.....	27
3.1 Estimativa das propriedades do Material (varões de GFRP) .....	27
3.1.1 Valor de cálculo da resistência à tração.....	27
3.1.2 Valor de cálculo da extensão do material .....	28
3.2 Estado Limite Último .....	28
3.2.1 Momento fletor resistente .....	28
3.2.2 Modos de rotura por flexão.....	29
3.2.2.1 Rotura por esmagamento do betão .....	30
3.2.2.2 Rotura dos varões de GFRP .....	30
3.2.3 Fator de redução da resistência à flexão .....	31
3.2.4 Taxa de armadura.....	31
3.2.5 Taxa de armadura “equilibrada” .....	32
3.2.6 Armadura mínima longitudinal.....	32
3.3 Estado Limite de Serviço .....	32
3.3.1 Abertura de fendas máxima .....	32
3.3.2 Determinação do controlo de deformação (método direto) .....	33
3.3.2.1 Momento da inércia de uma secção não fendilhada.....	33
3.3.2.2 Momento de inércia de uma secção fendilhada .....	33
3.3.2.3 Momento de inércia efetivo.....	34
3.3.2.4 Momento de fendilhação .....	34
3.3.3 Limitações da fluência e da fadiga .....	35
3.4 Resistência ao Corte .....	35
3.4.1 Resistência ao corte do betão.....	35
3.4.2 Resistência ao corte dos estribos de GFRP .....	36
3.4.3 Armadura de cálculo.....	36
3.4.4 Armadura mínima ao esforço transversal .....	36
3.5 Detalhes construtivos .....	37
3.5.1 Determinação da altura útil.....	37
3.5.2 Distância livre/mínima entre armaduras .....	37
3.5.3 Comprimentos de amarração dos varões GFRP .....	37

3.5.4 Comprimentos de emendas dos varões de GFRP .....	38
3.6 Fluxograma “Verificação ao ELU e ELS do momento fletor” .....	38
3.7 Aplicação do GFRP na reabilitação de estrutura em estudo .....	41
3.7.1 Dados de Base .....	41
3.7.2 Descrição do caso em estudo .....	41
3.7.3 Estrutura do Cais reabilitado.....	43
3.7.3.1 Modelo de cálculo utilizado .....	43
3.7.3.2 Ações de dimensionamento .....	45
3.7.3.3 Combinações de ações.....	45
3.7.3.4 Material.....	45
3.7.3.5 Resultados finais.....	46
3.7.4 Peças desenhadas .....	48
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>59</b>
Análise de custos-benefícios .....	59
4.1 Análise de custos de reparação com/sem a utilização de GFRP .....	59
4.1.1 Estimativa do custo de reparação em aço .....	60
4.1.2 Estimativa do custo de reparação em GFRP .....	62
4.2 Análise de custos a longo prazo .....	65
4.2.1 Resultados finais dos custos a longo prazo .....	67
4.2.2 Análise a variação das taxas.....	83
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>89</b>
Conclusão e Desenvolvimentos futuros .....	89
5.1 Conclusões.....	89
5.2 Desenvolvimentos futuros .....	90
<b>Bibliografia.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo A1 .....</b>	<b>93</b>
Imagens/Resultados do relatório de Oz .....	93
<b>Anexo A2 .....</b>	<b>113</b>
Cálculos justificativos/ Metodologia utilizada pela especificação E 465.....	113



# Índice de Figuras

Figura 1.1 – Corrosão das armaduras nas abóbadas de contenção do aeroporto da Madeira.....	1
Figura 2.1 – Ilustração de um pilar danificado pela corrosão das armaduras.....	6
Figura 2.2 – Efeitos da corrosão das armaduras [1]. .....	6
Figura 2.3 – Representação da despasseiração das armaduras [5] .....	7
Figura 2.4 – Mecanismos de transporte dos cloretos [5].....	8
Figura 2.5 – Estrutura de betão armado contaminada pela ação da carbonatação .....	8
Figura 2.6 – Representação do processo de corrosão.....	9
Figura 2.7 – Gráfico do desenvolvimento da deterioração no tempo [3] .....	10
Figura 2.8 – Conceito da vida útil das estruturas de betão, tomando-se por referência o fenómeno da corrosão [8] .....	11
Figura 2.9 – Estimativa do teor de cloretos na massa de cimento na zona 3 [9]......	12
Figura 2.10 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C35/40.....	17
Figura 2.11 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C40/50.....	17
Figura 2.12 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C30/37.....	18
Figura 2.13 – Representação Tensão-Deformação adaptada da referência [15] e [16]......	19
Figura 2.14 – Representação característica da resisitência entre o GFRP e o Aço .....	22
Figura 2.15 – Representação dos tipos de varões de GFRP utilizados.....	23
Figura 3.1 – Rotura por esmagamento do betão.....	29
Figura 3.2 – Rotura dos varões de GFRP .....	29
Figura 3.3 – Factor de redução da resistência em função ao rácio das armaduras .....	31
Figura 3.4 – Fluxograma do dimensionamento dos varões de GFRP .....	40
Figura 3.5 – Imagem aérea da área de construção fornecidas pela APRAM .....	41
Figura 3.6 – Ilustração da área de corrosão das armaduras [5]. .....	42
Figura 3.7 – Modelo de cálculo para a laje .....	43
Figura 3.8 – Modelo de cálculo para as vigas .....	44
Figura 3.9 – Linha de influência dos momentos fletores .....	44
Figura 4.1 – Taxa de juros Euribor [33]. .....	66
Figura 4.2 – Taxa de inflação entre o ano 1999 e 2016 [33]......	67
Figura 4.3 – Esquema representativo dos custos totais possíveis.....	68
Figura 4.4 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C35/45 e rec. 5,5cm. ....	70
Figura 4.5 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C40/50 e rec. 4,5cm. ....	71
Figura 4.6 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm. ....	72

Figura 4.7 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C35/45 e rec. 4,5cm.....	74
Figura 4.8 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C40/50 e rec. 3,5cm.....	75
Figura 4.9 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm.....	76
Figura 4.10 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C40/50 e rec. 4,5cm.....	77
Figura 4.11 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C35/45 e rec. 4,5cm.....	79
Figura 4.12 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C30/37 e rec. 5,5cm.....	80
Figura 4.13 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C40/50 e rec. 3,5cm.....	81
Figura 4.14 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm.....	82
Figura A2.1 – Representação das cargas para o veículo tipo e para carga pontual. ....	116

# Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Concentração de cloretos, $C_R$ (% em massa do cimento).....	13
Tabela 2.2 – Valores dos parâmetros $K_{vert}$ e $K_{hor}$ para o cálculo $C_s$ .....	13
Tabela 2.3 – Valores de $K_{temp}$ .....	13
Tabela 2.4 – Valores dos parâmetros $K_{D,C}$ , $K_{D,RH}$ , $K_{D,T}$ e $n$ .....	14
Tabela 2.5 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil .....	16
Tabela 2.6 – Propriedades das fibras de vidro adaptada de [15]. .....	19
Tabela 2.7 – Propriedade das resinas termoplásticas .....	20
Tabela 2.8 – Propriedade das resinas .....	20
Tabela 2.9 – Propriedade geométricas dos varões GFRP.....	24
Tabela 3.1 – Características geométricas dos elementos estruturais.....	44
Tabela 3.2 – Determinação da linha de influência .....	44
Tabela 3.3 – Resultado do dimensionamento da laje ao corte.....	46
Tabela 3.4 – Resultado do dimensionamento da laje à flexão.....	47
Tabela 3.5 – Resultado do dimensionamento das vigas à flexão .....	47
Tabela 4.1 – Quadro de resumo do orçamento para as vigas. ....	61
Tabela 4.2 – Quadro de resumo do orçamento para a laje maciça. ....	62
Tabela 4.3 – Tabela de custo dos varões de GFRP. ....	63
Tabela 4.4 - Quadro de resumo do orçamento para as vigas em GFRP .....	64
Tabela 4.5 - Quadro de resumo do orçamento para a laje maciça em GFRP.....	64
Tabela 4.6 – Custos totais para a reabilitação das 2 vigas e da laje. ....	65
Tabela 4.7 – Variação de taxas.....	67
Tabela 4.8 – Valores do recobrimento mínimo, $c_{min,dur}$ , requerido relativos à durabilidade das armaduras para betão armado, de acordo com a EN 10080 [13]. .....	69
Tabela 4.9 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 5,5cm. ....	70
Tabela 4.10 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm. ....	71
Tabela 4.11 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm. ....	72
Tabela 4.12 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm. ....	73
Tabela 4.13 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm. ....	74
Tabela 4.14 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm. ....	75
Tabela 4.15 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm. ....	77
Tabela 4.16 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm. ....	78
Tabela 4.17 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 5,5cm. ....	79
Tabela 4.18 – Custo Final para o 4º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm. ....	81
Tabela 4.19 – Custo Final para o 4º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm. ....	82
Tabela 4.20 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 5,5cm.....	83
Tabela 4.21 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm.....	84

Tabela 4.22 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.....	84
Tabela 4.23 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm.....	85
Tabela 4.24 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm.....	85
Tabela 4.25 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.....	86
Tabela A2.1 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil.....	120
Tabela A2.2 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil, continuação.....	121
Tabela A2.3 - Cálculo do $t_{ic}$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V. ....	122
Tabela A2.4 - Cálculo do $t_{ic}$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para o tipo de cimento CEM I até V, continuação.....	123
Tabela A2.5 - Cálculo do $t_{ic}$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.....	124
Tabela A2.6 Cálculo do $t_p$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V. ....	125
Tabela A2.7 – Cálculo do $t_p$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.....	126
Tabela A2.8 – Cálculo do $t_p$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.....	127
Tabela A2.9 – Cálculo do $t_L$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V. ....	128
Tabela A2.10 - Cálculo do $t_L$ para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.....	129

# Lista de Símbolos

## Siglas e Acrónimos

ACI	American Concrete Institute
EC0	Norma Europeia EN 1990
EC2	Norma Europeia EN 1992-1-1
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Ultimo
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
RAM	Região Autónoma da Madeira
XS	Corrosão induzida por cloreto presentes na água do mar
VAL	Valor atual líquido
APRAM	Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira
ISIS	Intelligent Sensing for Innovative Structures
PEEK	Polyether Ether Ketone
PPS	Polyphenylene Sulphide
PSUL	Polysulfone

## Notações Latinas (Minúsculas)

$(\Delta_i)_{sus}$	Flecha elástica devida ao conjunto de cargas atuantes
$b$	Largura da secção
$b_w$	Largura da alma da secção
$c$	Recobrimento das armaduras
$d$	Altura útil da secção
$d_b$	Diâmetro do varão de GFRP
$d_c$	Distância entre a fibra externa tracionada e o centro de gravidade das armaduras
$d_g$	Máxima dimensão dos agregados
$erf$	Função erro: $erf(z)=w$
$f_{fu}^*$	Valor característico da resistência à tração (MPa)
$f_c$	Resistência ultima a compressão do betão

$f_{cd}$	Representa a resistência à compressão diametral do betão, com o valor de 2 e 2,5 MPa nos betões para a carbonatação e 3 e 4 MPa nos betões para os cloretos
$f_{fb}$	Tensão resistente na zona de dobragem
$f_{fu}$	Valor de cálculo da resistência à tração (MPa)
$h$	Altura da secção
$k_{a/c}$	Factor que tem em conta a razão água/ cimento
$k_{hor}$	factor que tem em conta a distância à linha de costa
$k_{temp}$	factor que tem em conta a temperatura do betão
$k_{vert}$	factor que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar
$l_a$	Comprimento de amarração além do centro do apoio
$l_e$	Comprimento do varão embebido no betão
$n$	Número de varões longitudinais
$n$	Factor que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo
$n_f$	É razão entre o modulo de elasticidade dos varões de GFRP e o modulo de elasticidade do betão.
$\varnothing_{est}$	Diâmetro dos estribos
$\varnothing_{long}$	Diâmetro dos varões longitudinais
$\phi$	Factor de redução da resistência
$\phi_0$	Diâmetro inicial das armaduras passivas
$r_b$	Raio de curvatura dos varões de GFRP dobrados
$s$	Distância entre o centro de gravidade de cada varão de GFRP longitudinalmente
$t_g$	Período de vida útil pretendida
$t_i$	Período de iniciação de projeto
$t_L$	Período de vida útil de projeto
$t_p$	Período de propagação de projeto
$\alpha$	Factor de modificação da localização do varão
$\gamma$	Factor de segurança da vida útil
$\rho_f$	Taxa de armadura
$\gamma_g$	Coefficiente de segurança relativo às ações permanentes

$\gamma_q$	Coeficiente de segurança relativo às ações variáveis
$\xi$	Factor que depende do tempo para as cargas permanentes

### Notações Latinas (Maiúsculas)

$A_f$	Área de armadura dos varões de GFRP
$A_{f,min}$	Armadura mínima longitudinal
$A_{fv}$	Armadura de cálculo a resistência ao corte
$A_{fv,min}$	Armadura mínima a resistência ao corte
$C$	Cobertura para o centro do betão
$C(x,t)$	Concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, a profundidade $x$ (m) após decorrido o tempo $t$ (em s) de exposição aos cloretos
$C_b$	Factor que tem em conta o teor de cloretos e a temperatura da água do mar
$C_E$	Factor de redução ambiental
$C_i$	Custo no ano de referência
$C_{i,j}$	Custo ao fim de $j$ anos
$C_R$	Concentração de cloretos na massa do cimento
$C_S$	Concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão ( $X=0$ )
$D$	Coeficiente de difusão dos cloretos do betão
$D_0$	Coeficiente de difusão potencial
$E_f$	Modulo de elasticidade dos varões de GFRP
$\epsilon_{fu}^*$	Valor característico da extensão do material
$\epsilon_{cu}$	Extensão ultima do betão
$\epsilon_{fu}$	Valor de cálculo da extensão do material
$F_r$	Modulo de elasticidade do betão
$G$	Esforço resultante de uma ação permanente
$I_{cr}$	Momento da inércia de uma secção fendilhada
$I_e$	Momento de inércia efetivo
$I_g$	Momento da inércia de uma secção não fendilhada
$K_d$	Coeficiente de aderência entre o betão e a armadura de GFRPS
$K_{D,c}$	Factor que tem em conta a influência das condições de cura
$K_{D,RH}$	Factor que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente
$K_{D,T}$	Factor que tem em conta a influência da temperatura
$M_a$	Máximo momento aplicado
$M_{cr}$	Momento de fendilhação
$M_{Ed}$	Momento atuante
$M_{Rd}$	Momento resistente
$M_s$	Momento de serviço devido às cargas prolongadas

Q	Esforço resultante de uma ação variável
R	Recobrimento das armaduras
S	Distância entre o centro de gravidade de cada varão de GFRP longitudinalmente
$V_c$	Resistência ao corte do betão
$V_{Ed}$	Esforço transversal actuante
$V_f$	Resistência ao corte dos estribos de GFRP
$V_{Rd}$	Esforço transversal resistente

# Capítulo 1

---

## Introdução

### 1.1 Enquadramento Geral

A presente dissertação de mestrado enquadra-se na área da reabilitação/construção das estruturas de betão armado expostas a condições ambientais muito agressivas, com aplicação de um novo material de reforço de nome fibra de vidro.

Ao longo dos anos, o betão armado (constituído pela combinação entre dois materiais, tais como o betão e o aço) tornou-se um dos mais importantes elementos na construção civil devido à combinação das características resistentes entre elas, sendo utilizado em estruturas nomeadamente em pontes, viadutos, cais, edifícios entre outros.

Pela sua utilização, porém, com o passar dos tempos, começaram a surgir os primeiros problemas. O aparecimento de manchas de ferrugem e o destacamento do betão, demonstraram as fragilidades desta combinação. Com o decurso do tempo, muitas estruturas começaram a apresentar problemas de durabilidade devido à corrosão das armaduras, sendo que o tempo de vida útil estimado pelo dono de obra se revelou inferior ao tempo de vida útil da estrutura para as condições ambientais expostas.

Atualmente, verifica-se que este tempo é controlado pelo recobrimento empregue nos elementos estruturais e pela resistividade do betão. Para isso, seria necessário ter uma maior atenção na execução dos projetos e também na fase de construção. Na Região Autónoma da Madeira, devido às suas condições ambientais agressivas com predomínio dos cloretos provenientes da água do mar, têm-se diversas estruturas em que a representação da durabilidade das mesmas é questionada, isto é, o estado de degradação é superior ao tempo de vida útil da mesma. Na Figura 1.1, podemos observar o elevado estado da degradação nas abóbadas de contenção do aeroporto da Madeira, nas quais se verifica o destacamento do betão e a corrosão das armaduras.



Figura 1.1 – Corrosão das armaduras nas abóbadas de contenção do aeroporto da Madeira

Devido à descoberta de algumas “falhas” que o betão armado teria ao longo da vida útil das estruturas por causa da corrosão das armaduras, os engenheiros das áreas das ciências dos materiais canalizaram os seus conhecimentos para encontrar uma alternativa às armaduras em aço, e eis que surgem os materiais compósitos, os chamados FRP (do inglês Fiber Reinforced Polymer), sendo a fibra de vidro uns dos materiais compósitos mais utilizados para a reabilitação.

As armaduras em fibras de vidro para condições ambientais tais como as da Ilha da Madeira exibem uma vantagem grande quando comparadas com os varões de aço, pois estes materiais não apresentam problemas de corrosão devido aos cloretos. A sua elevada resistência e o seu baixo peso volúmico favorecem a sua aplicação; porém, o seu elevado custo e sua condição de rotura (comportamento frágil) não contribuem para a aceitação do material.

## **1.2 Objetivo do Trabalho**

Dadas as inúmeras situações observadas na Região Autónoma da Madeira, em que os elementos de betão armado apresentam um estado de degradação elevado, devido ao ambiente agressivo em que a ilha está inserida, o objetivo principal nesta dissertação será demonstrar que a utilização do betão armado com armaduras em GFRP apresenta melhores benefícios financeiros a longo prazo, quando comparados com betão armado tradicional.

O principal objetivo passará pela análise dos seguintes tópicos:

- Estudar o dimensionamento e a construção de estruturas em betão armado com armaduras de GFRP;
- Pesquisar os custos de construções com armaduras de aço e de GFRP;
- Pesquisar os custos de reabilitação de estruturas em betão armado deterioradas pela corrosão das armaduras;
- Encontrar na RAM (Região Autónoma da Madeira) estruturas de betão armado deterioradas pela corrosão das armaduras de aço e simular o seu custo de reabilitação e/ou encontrar estruturas já reabilitadas e analisar os seus custos;
- Demonstrar os benefícios financeiros a longo prazo da utilização de armaduras em GFRP em substituição das armaduras em aço, devido aos custos de reabilitação da deterioração causada pela corrosão.

## **1.3 Organização do Documento**

De forma a cumprir todos os objetivos propostos para esta dissertação, achou-se bem dividir este documento em 5 capítulos, incluindo o capítulo da introdução e da conclusão. A concluir este documento,

são apresentadas todas as referências bibliográficas nele utilizadas e os cálculos efetuados, nos respectivos Anexos e Bibliografia.

O 1º capítulo está constituído inicialmente pela introdução do enquadramento geral; de seguida, são mencionados os objetivos principais a cumprir neste documento, sendo que um deles passa pela verificação de que o custo inicial da utilização dos varões de GFRP será inferior ao custo final de todas as reparações necessária devido à corrosão dos varões de aço. E, para finalizar o capítulo, temos uma breve descrição da organização do documento.

No 2º capítulo apresenta-se o chamado “Estado de Arte”; esta parte do documento tem por finalidade descrever resumidamente os estudos científicos realizados, face aos quais nesta dissertação o capítulo se subdividiu em duas partes. A primeira reporta-se ao processo despassivação das armaduras, aos dois possíveis mecanismos de corrosão (quer seja pela ação da carbonatação ou pela ação dos cloretos) e numa parte final deste primeiro subcapítulo recorre-se à metodologia utilizada na especificação E 465 [2], de forma a prever o tempo de vida útil de uma estrutura em betão armado, tendo-se procedido a algumas conclusões. No segundo subcapítulo, temos o conceito dos varões de fibra de vidro (GFRP), em que são mencionadas algumas propriedades físicas, mecânicas e geométricas.

No 3º capítulo, descreve-se a metodologia de dimensionamento dos elementos de betão armado com GFRP utilizada pela norma do ACI [1]. De igual modo, foi elaborado um fluxograma com conceito de dimensionamento pesquisado, em que é demonstrado todo o processo efetuado para cálculo do betão armado com GFRP. A finalizar o capítulo, está patente a descrição do caso em estudo e, posteriormente, foi realizada uma análise de dimensionamento, que é complementada pela pormenorização das armaduras em GFRP.

No 4º capítulo serão apresentadas as análises de custo-benefício na utilização do GFRP como armadura. Iremos abordar o conceito “valor atual líquido”, em que será efetuado um estudo comparativo entre a utilização do betão armado com GFRP e o betão armado tradicional. Esta análise comparativa incidirá nos custos iniciais da utilização do GFRP e nos custos a longo prazo das possíveis eventuais reparações necessárias para as estruturas contaminadas pelos cloretos, num período de vida útil de 50 anos.

No 5º capítulo serão apresentadas as conclusões gerais, tendo em conta o objetivo da dissertação em proceder à verificação dos benefícios a longo prazo da utilização dos varões de GFRP e, para finalizar, serão apresentadas possíveis sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.



# Capítulo 2

---

## Corrosão das armaduras e aplicação do GFRP (como alternativa)

A história do betão remonta ao início das civilizações humanas, nos tempos antigos. Mas foi num século mais recente (século XIX) que o homem começou a reforçar o betão com varões e outros materiais resistentes, para o efeito. Apesar da elevada resistência à compressão, o betão apresentava limitações de resistência à tração.

No fim do século XIX, os materiais de reforço, tais como a barra de aço ou os varões aço, começaram a ser utilizados juntamente com o betão, para aumentar a resistência à tração do mesmo. Os varões de aço hoje em dia são utilizados como materiais de reforço comuns; com o decorrer do tempo, porém, um dos principais problemas das construções em betão armado tem sido a deterioração das estruturas provocada pela corrosão das armaduras. A corrosão das armaduras nas estruturas de betão armado é devida aos cloretos ou às corrosões químicas, que resultam de uma deterioração da estrutura, requerendo, por isso, uma constante manutenção ou uma inspeção periódica ao longo do tempo da vida útil da mesma.

A intervenção ou inspeção periódica ao longo do tempo apresenta custos adicionais. Como alternativa a este tipo de problema, é apresentada nesta dissertação a utilização dos varões de fibra de vidro, com o objetivo de combater os problemas relacionados com a corrosão das armaduras e com o custo adicional provocado pelas intervenções realizadas durante o tempo útil de vida da mesma.

### 2.1 Corrosão das armaduras

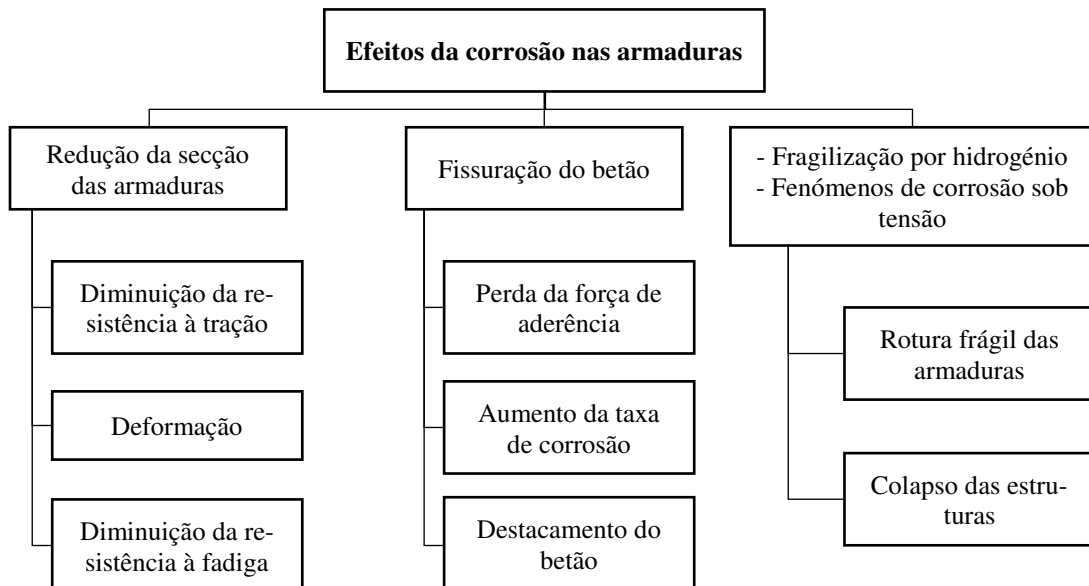
A corrosão das armaduras é um processo eletroquímico de que resultam o óxidos e hidróxidos de ferro, os quais originam um aumento de volume à superfície dos varões. Ora, tal aumento é impedido pelo betão envolvente nas armaduras, dando origem à ocorrência da força expansiva consideráveis que geram trações no betão, que por fim se traduzem numa fendilhação ou delaminação [3]. Na Figura 2.1, temos um exemplo de corrosão das armaduras, num pilar de uma moradia situada no conselho de Santa Cruz e que apresenta alguns problemas de corrosão. Numa parte desse pilar, podemos observar a delaminação do betão que esta representado pela zona A e a fendilhação do betão representado pela zona B.

A corrosão das armaduras pode pôr em causa o desempenho de uma estrutura: a perda de secção das armaduras provoca uma redução da sua resistência, o que implica que qualquer elemento estrutural que apresente corrosão significativa colocará em risco o comportamento da estrutura; isto é, em casos críticos poderá dar-se o colapso do elemento estrutural.



**Figura 2.1 – Ilustração de um pilar danificado pela corrosão das armaduras**

Na Figura 2.2 está ilustrada a representação esquemática dos efeitos causados pela corrosão das armaduras em estruturas de betão armado e as suas consequências. De uma maneira simplificada, a corrosão das armaduras é identificada pelos pontos de ferrugem que surgem à superfície do betão, ou através dos danos causados pela expansão das armaduras, provocando a destruição do recobrimento (fendilhação ou delaminação). Estes efeitos têm consequências na alteração das características mecânicas do aço e no comportamento do material aço/betão (perda da força de aderência).



**Figura 2.2 – Efeitos da corrosão das armaduras [1].**

O processo de corrosão das armaduras, está relacionado com os seguintes elementos: a despassivação das armaduras, provocada pela ação dos cloretos ou pela ação da carbonatação e o mecanismo de corrosão.

## 2.1.1 Despassivação das armaduras

No caso do betão não contaminado pela ação dos cloretos ou pela ação da carbonatação, as armaduras nele presentes apresentam um estado passivo, isto é, as armaduras estão protegidas pela alcalinidade do betão (a alcalinidade do betão assume valor de 12,5 a 13,5) ou pelo baixo teor de cloretos presente no betão.

O processo de despassivação das armaduras ocorre devido à dissolução da película passiva provocada pela diminuição do pH do betão para valores de 10-11, ou pelo teor de cloretos no betão ultrapassar o teor de cloretos críticos. Segundo a referência [4], o teor de cloretos considerado crítico para a indução de corrosão, em estruturas de betão armado, é de 0,4% (massa cimento). Na Figura 2.3 ilustra-se a representação do processo de despassivação das armaduras, em que podemos observar a dissolução da película passiva na zona alaranjada, que representa a zona de betão contaminada, quer seja pelos cloretos ou pela carbonatação e, com cor verde (à volta do varão de aço) temos representada a película passiva que tem a funcionalidade de proteção “anti-corrosiva”. Com isto, se o pH for inferior ou teor de cloretos for superior aos valores acima referidos, temos a despassivação das armaduras e, em concomitância com a presença de humidade e de oxigénio, teremos a iniciação da corrosão das armaduras.

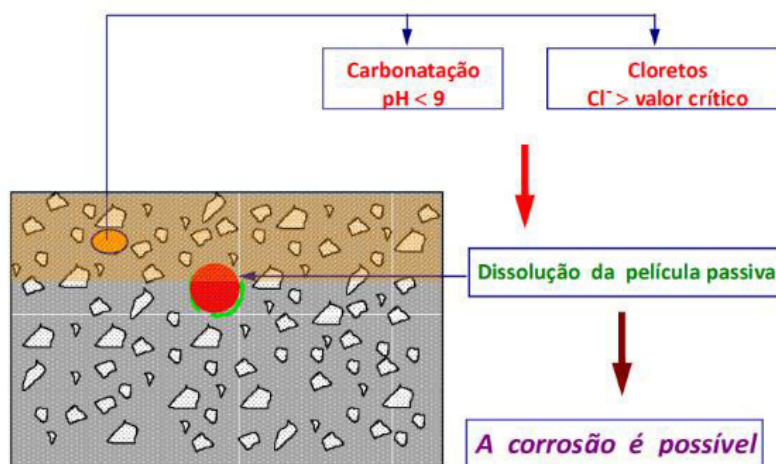


Figura 2.3 – Representação da despassivação das armaduras [5]

## 2.1.2 Corrosão das armaduras por ação dos Cloretos

A corrosão das armaduras por ação dos cloretos ocorre devido ao transporte meio líquido; este tipo de mecanismo de transporte de cloretos para o interior do betão está classificado em três tipos: permeação; absorção e difusão. Da referência [6], temos que somente a profundidades que garantam pressões hidrostáticas relativamente elevadas existe penetração substancial de cloretos por permeação e que, na superfície de betão em contacto com a atmosfera, o fenómeno preponderante é a absorção e, no interior, a difusão. Na Figura 2.4 estão ilustrados em ambientes marítimos os três mecanismos de transporte dos cloretos.

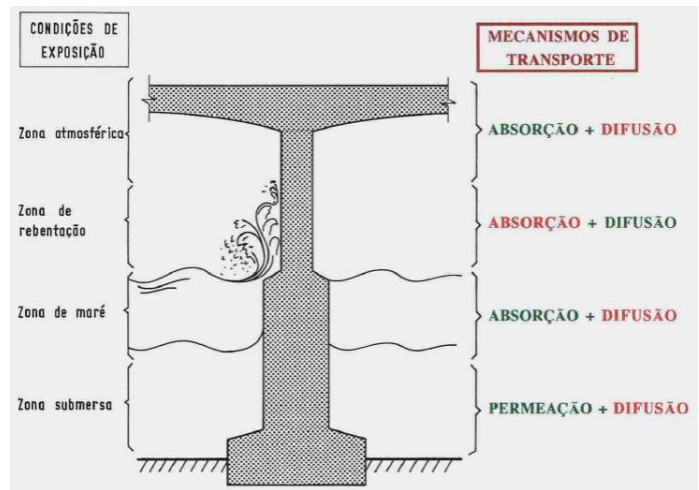


Figura 2.4 – Mecanismos de transporte dos cloretos [5]

### 2.1.3 Corrosão das armaduras por ação da Carbonatação

A carbonatação do betão ocorre quando o dióxido de carbono na atmosfera penetra o betão; o mecanismo de transporte é um processo de difusão em meio gasoso. De acordo com [7], a carbonatação resulta da reação do dióxido de carbono [ $CO_2$ ] com os hidróxidos do betão, conduzindo à lenta modificação da sua estrutura, com redução do pH. Uma vez introduzido no betão, o  $CO_2$  reage em primeiro lugar com os hidróxidos de sódio e potássio [ $NaOH$  e  $KOH$ ] presentes em menor quantidade no cimento e depois com o hidróxido de cálcio [ $Ca(OH)_2$ ], presente em maior quantidade. A longo prazo, o  $CO_2$  reage posteriormente com os outros compostos do cimento hidratado, silicatos e aluminatos de cálcio. Na Figura 2.5, observamos o efeito da corrosão das armaduras nos elementos da estrutura (pilar, vigas e laje).



Figura 2.5 – Estrutura de betão armado contaminada pela ação da carbonatação

## 2.1.4 Mecanismo de corrosão das armaduras

O mecanismo de corrosão das armaduras é um processo eletroquímico, que envolve reações químicas e correntes elétricas. Para que este processo se possa desenvolver, é necessária a presença dos seguintes elementos: ânodo, cátodo, condutor elétrico e o eletrólito.

A corrosão eletroquímica pressupõe a formação de uma pilha eletroquímica de corrosão, em que há a presença de um ânodo, o qual se caracteriza pela passagem do material do estado metálico para o estado iônico (oxidação); um cátodo, onde são consumidos os elétrons gerados na região anódica (redução); uma diferença de potencial entre ambos, sendo o ânodo de potencial mais eletronegativo; e uma ligação externa caracterizada pela condução iônica através do eletrólito (betão) [8]. A Figura 2.6 representa o fenômeno de corrosão das armaduras.

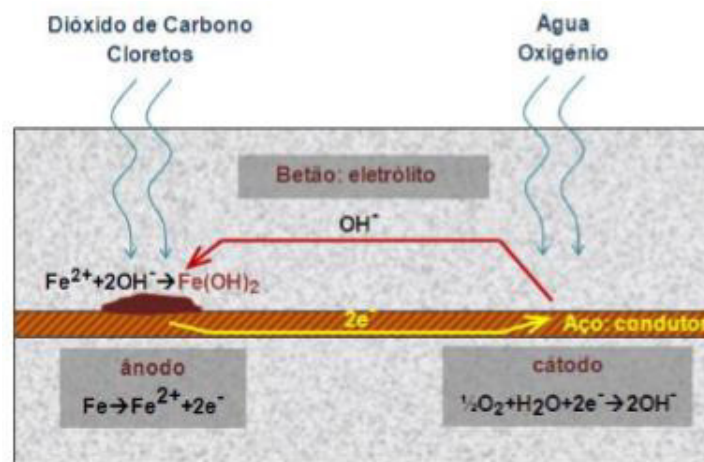


Figura 2.6 – Representação do processo de corrosão

A presença de humidade é também um fator que influencia o mecanismo de corrosão, quer seja porque a água é necessária para a ocorrência da reação catódica, quer porque opera influência na resistividade do betão. De acordo com a referência [8], à medida que a humidade interna do betão aumenta, a resistividade do betão diminui, pelo que o processo de corrosão pode desenvolver-se, caso a armadura esteja despassivada. É também referido que, quando os poros de betão estão saturados de água, a resistividade é a menor possível; porém, o oxigénio encontra maior dificuldade para chegar até a armadura, o processo de corrosão está controlado pelo acesso de oxigénio, ou seja, controlado catodicamente. A velocidade de corrosão é geralmente elevada no caso dos cloretos e baixa no caso da carbonatação. No caso da carbonatação, a velocidade de corrosão é controlada pela resistividade do betão [5].

## 2.1.5 Corrosão da armadura versus vida útil da estrutura

A vida útil de uma estrutura pode ser considerada como o período de tempo em que uma estrutura conserva os requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionamento e estética, sem custos de manutenção não previstos. A vida útil das estruturas de betão armado baseia-se no estado de conservação

de uma estrutura, na qual pode ser afetada pela corrosão das armaduras e esta representada através da Figura 2.7, constatando-se:

Iniciação – não ocorre deterioração significativa e a penetração dos agentes agressivos vai aumentando até um valor crítico [5].

Propagação – a fase de “propagação” é o período em que o processo de corrosão se desenvolve com maior ou menor velocidade, dependendo da resistividade do betão, da presença de oxigênio e das características do ambiente em termos de humidade e temperatura [8].

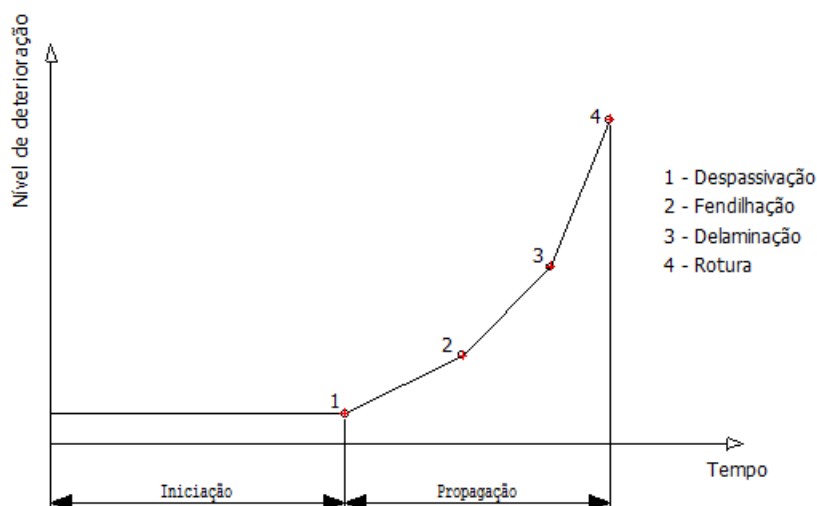


Figura 2.7 – Gráfico do desenvolvimento da deterioração no tempo [3]

Na Figura 2.8, temos a representação gráfica do conceito de vida útil de acordo [8], em que a parte do gráfico que é representada pela “vida útil de projeto” se denomina iniciação do processo despassivação das armaduras. O período de tempo “vida útil de serviço 1” representa o momento que aparecem as machas de corrosão na superfície do betão. Durante este período, a estrutura não apresenta problemas no que diz respeito ao seu funcionamento. O período de tempo “vida útil de serviço 2” representa o momento em que ocorrem a fissuração no betão de recobrimento e ainda o destacamento do betão de recobrimento. Neste período de tempo, as armaduras e betão começam a perder propriedades físicas e mecânicas. O período de tempo que vai até à rotura e colapso parcial ou total da estrutura é denominado de vida útil última ou total, o qual corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da secção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura/betão [8].

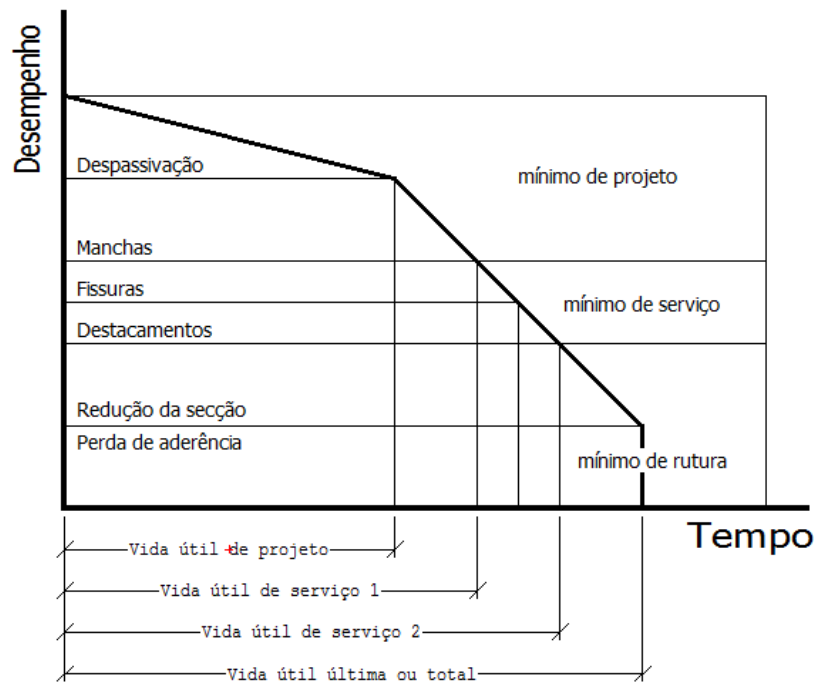


Figura 2.8 – Conceito da vida útil das estruturas de betão, tomando-se por referência o fenómeno da corrosão [8]

### 2.1.6 Modelação da deterioração do betão armado por corrosão do Aço

A metodologia utilizada na especificação E 465 [2], diz-nos que para se garantir uma durabilidade de um projeto em cada estado limite e para a vida útil pretendida  $t_g$ . A vida útil  $t_L$  de uma estrutura tem de ser superior à vida útil pretendida  $t_g$ , em que  $t_L$  representa o somatório entre o período de iniciação e o período de propagação, com esta ilustrado na Figura 2.7 do subcapítulo (2.1.5).

$$t_L - t_g > 0 \Leftrightarrow t_L > t_g \Leftrightarrow t_i + t_p > t_g \quad [2.1]$$

De acordo com a especificação [2], a condição 2.1 baseia-se na estimativa das propriedades de desempenho, recorrendo ao fator de segurança da vida útil  $\gamma$ , de forma semelhante ao que é feito no cálculo estrutural. Desta forma, o valor da “vida útil de cálculo” é obtido através da equação 2.2.

$$t_d = \gamma \cdot t_g \quad [2.2]$$

Para determinação do período de iniciação, a norma E465 propõe-nos dois modelos de cálculo para os distintos tipos de corrosão, quer seja devido à ação da carbonatação, quer devido à ação dos cloretos. Optou-se apenas por estudar o modelo de cálculo devido à ação dos cloretos, pois no caso da estrutura analisada, de acordo com o relatório efetuado pela empresa Oz L<sup>da</sup> [9], verificou-se que, na totalidade das zonas de ensaios, os valores de teor de cloretos obtidos, à profundidade média das armaduras e a profundidades superiores, na massa de cimento ultrapassava o valor limite. Na Figura 2.9, podemos observar a representação gráfica do ensaio realizado na zona 3, que representa a face inferior da viga de bordadura e em que se pode observar a posição das armaduras e a profundidade dos cloretos na massa de

cimento e também através da planta de localização esquemática das zonas de ensaio, apresentada no anexo A1, página 109 (o ensaio faz referência ao caso de estudo analisado da reabilitação da estrutura marítima localizada na Ilha da Madeira, no concelho do Funchal). De acordo com o mesmo relatório, foi analisada a profundidade de carbonatação no betão, em que concluíram que a ação da carbonatação no betão foi inferior ao recobrimento médio das armaduras em todas as zonas de ensaiadas.

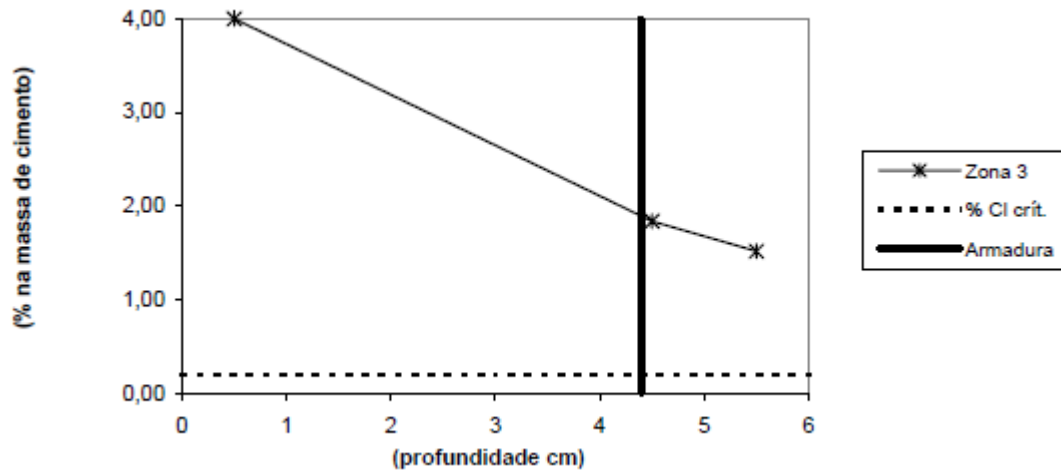


Figura 2.9 – Estimativa do teor de cloretos na massa de cimento na zona 3 [9].

### 2.1.6.1 Modelo de cálculo do período de iniciação devido aos cloretos

O modelo de cálculo do período de iniciação tem como objetivo definir a resistência à penetração dos cloretos do betão, de modo a que, no fim do período de iniciação  $t_i$ , a profundidade do teor crítico seja igual ao recobrimento [5]. Na equação 2.3 está representado o método utilizado pela norma E 465, sendo que neste, para a determinação da concentração de cloretos  $C_s$  e do coeficiente de difusão  $D$ , a norma propõe as equações 2.6 e 2.7.

$$C(x, t) = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \cdot \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \quad [2.3]$$

Que, reorganizada, dá

$$X = 2\xi\sqrt{D \cdot t} \text{ ou } D = \frac{x^2}{4 \cdot t \cdot \xi^2} \quad [2.4]$$

Com

$$\xi = \operatorname{erf}^{-1} \frac{C_s - C(x,t)}{C_s} \quad [2.5]$$

Onde:

$D$  – é o coeficiente de difusão dos cloretos do betão, em  $m^2/s$ ;

$C(x,t)$  – é a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, a profundidade  $x$  (m) após decorrido o tempo  $t$  (em s) de exposição aos cloretos. No caso de  $x$ =recobrimento  $R$  e de haver iniciação da despassivação das armaduras e com um tempo de exposição igual ao período de iniciação (independentemente da classe de exposição)  $t = t_i$  é  $C(R,t) = C_R$ ;

$C_s$  – é a concentração dos cloretos, em % da massa de ligante, na superfície do betão ( $X=0$ ), para  $t=0$ ;

erf – é a função erro: erf ( $z$ )= $w$ ;

$C_R$  – é concentração de cloretos na massa do cimento e os valores estão representado pela tabela 1.

**Tabela 2.1 – Concentração de cloretos,  $C_R$  (% em massa do cimento)**

Água/ cimento	XS1; XS2	XS3
$a/c \leq 0,30$	0,6	0,5
$0,30 < a/c \leq 0,40$	0,5	0,4
$a/c > 0,40$	0,4	0,3

$$C_s = C_b \cdot K_{a/c} \cdot K_{vert} \cdot K_{hor} \cdot K_{temp} \quad [2.6]$$

Em que:

$C_b$  – é igual a 3,0% nas classes de exposição XS2 e XS3 e igual a 2,0% na XS1. O  $C_b$  tem em conta o teor de cloretos da água do mar em Portugal (21g/l) e a temperatura da água do mar de ( $16 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

$K_{a/c}$  – é obtida através da multiplicação do fator de 2.5 vez a razão água/cimento;

$K_{vert}$  e  $K_{hor}$  – são obtidos através da tabela (2);

$K_{temp}$  – é obtida de acordo com a tabela (3).

**Tabela 2.2 – Valores dos parâmetros  $K_{vert}$  e  $K_{hor}$  para o cálculo  $C_s$**

Classe de exposição		$K_{vert}$
XS1		0,7
XS2	a 1 m de profundidade	1,0
	a 24 m de profundidade*	1,4
XS3		1,0
Distância à linha de costa*		$K_{hor}$
0		1
1 km		0,6

**Tabela 2.3 – Valores de  $K_{temp}$**

0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
2,2	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6

$$D_a(t) = K_{D,c} \cdot K_{D,RH} \cdot K_{D,T} \cdot D_0 \cdot (t_0/t)^n \quad [2.7]$$

Onde:

$K_{D,c}$  – é um fator que tem em conta a influência das condições de cura;

$K_{D,RH}$  – é um fator que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente;

$K_{D,T}$  – é um fator que tem em conta a influência da temperatura;

$D_0$  – é o coeficiente de difusão potencial ( $m^2/s$ ), determinado em laboratório de acordo com a Especificação LNEC E 463, com o betão na idade de referência  $t_0 = 28$  dias;

$n$  – é um fator que tem em conta o decréscimo de  $D$  ao longo do tempo.

Todos estes parâmetros podem ser observados na tabela?

**Tabela 2.4 – Valores dos parâmetros  $K_{D,c}$ ,  $K_{D,RH}$ ,  $K_{D,T}$  e  $n$**

Números de dias de cura		$K_{D,c}$
Normalizada		2,4
Em contacto permanente com água		0,75
Cofragem de permeabilidade controlada e 3 dias de cura húmida		1,0
Classe de exposição		$K_{D,RH}$
XS1		0,4
XS2		1,0
XS3		1,0
Temperatura do betão (°C)		$K_{D,T}$
30°C		1,5
25°C		1,2
20°C		1,0
15°C		0,8
10°C		0,75
0°C		0,4
Classe de exposição	N	
	CEM I/II*	CEM III/ IV/V
XS1	0,55	0,65
XS2	0,45	0,55
XS3	0,55	0,65

### 2.1.6.2 Modelo para cálculo do período de propagação

Na especificação E465 [2], o modelo utilizado baseia-se na taxa de corrosão das armaduras, sendo que estes modelos são empíricos e modelam, de acordo com a experiência nórdica.

A equação 2.8 descreve o modelo com base na intensidade da corrente eletroquímica. Este modelo tem como principal objetivo estimar o tempo de propagação mínimos, de forma a maximizar o período de iniciação e estimar as propriedades de desempenho do betão relacionadas com o período de propagação.

$$t_p = K \cdot \phi_0 / (1,15 \cdot \alpha \cdot I_{corr}) \quad [2.8]$$

Em que:

$$K = 0,1 \cdot (74,5 + 7,3R/\phi_0 - 17,4 \cdot f_{cd}) / (\phi_0/2) \quad [2.9]$$

Onde:

$\phi_0$  – é o diâmetro inicial das armaduras passivas (mm);

R – representa o recobrimento das armaduras;

$f_{cd}$  – representa a resistência à compressão diametral do betão, com o valor de 2 e 2,5 MPa nos betões para a carbonatação e 3 e 4 MPa nos betões para os cloretos;

$\alpha$  – é igual a 2 quando a corrosão é uniforme, que é o caso da provocada pela carbonatação, e igual a 10 quando a corrosão é por picadas, caso da corrosão por cloretos.

### 2.1.7 Aplicação da metodologia empregue pela norma E465

Com base nos dados da tabela 2.5, e em concordância com o subcapítulo 2.1.6, foram determinados os tempos de vida útil, por aplicação da norma E465 para as classes de exposição ambiental XS1 e XS3, as quais estão representadas nos gráficos das Figuras 2.10, 2.11 e 2.12. Na tabela 2.5, para efeitos dos valores da razão água cimento e do coeficiente de difusão, foram adotados os valores utilizados pelo artigo “the new LNEC specifications on reinforced concrete durability” [10]. Neste artigo, a determinação do coeficiente de difusão foi obtido através de ensaios em betões com diferentes tipos de cimentos (CEM I até CEM V), em condições ambientais XS1 e XS2 durante cinco anos, período durante o qual a penetração dos cloretos foi registada e as propriedades de desempenho correspondentes foram determinadas.

A escolha do recobrimento das armaduras na tabela 2.5 tem como base a análise do relatório feito pela Oz L<sup>da</sup> [9], na qual foram ensaiados através de um equipamento chamado “Micro-Covermeter” 12 zonas em que, de acordo com o relatório, os recobrimentos obtidos variam entre os valores de 3,5cm e 6,0cm. Para além do documento acima referido, também foi tido em conta o documento da Memória Descritiva e Justificativa [11], no qual os elementos de betão armado rehabilitados deverão ter apresentado um recobrimento mínimo de 5,5 cm.

Os valores dos recobrimentos de 2,5cm e 3,5cm adotados na tabela 2.5, têm base nos erros associados, nas lacunas da pormenorização das armaduras e na execução em obra, isto é, uma pormenorização inadequada em que o número de varões é elevado, sendo a sua consequência, quando colocado em obra na ocasião da betonagem das armaduras, poderem ficar à mostra e, consequentemente,

termos o aparecimento das armaduras ou um betão com um índice de vazio elevado. Quanto à lacuna de execução em obra, de um modo geral, trata-se num inadequado posicionamento dos espaçadores, como podemos observar através do caso de estudo em que se verificou uma variação do seu recobrimento ao longo da estrutura (em anexo A1 estão representados a zonas de ensaio).

As classes de resistência C35/45 e C40/50 fazem referência aos documentos analisados, nos quais, para a construção/reabilitação da estrutura, foram utilizadas estas duas classes. A classe de resistência C30/37 representa a classe de resistência mínima para um tipo de cimento CEM II/B até V expostos às condições ambientais XS1.

Outro fator que se teve em conta, e que não está referido na tabela 2.5, foi o fator de segurança da vida útil, que toma o valor de 2,8 e que corresponde à classe de fiabilidade RC3 “Consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; ou consequências económicas, sociais ou ambientais muito importantes. [12]”.

De acordo com a Norma Europeia EC2 [13], o recobrimento mínimo para uma estrutura S4 que representa um período de vida útil de 50 anos e na qual estão expostas as condições ambientais XS1 e XS3, os valores mínimos atribuídos são de 3,5cm e 4,5cm.

**Tabela 2.5 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil**

Designação do betão / Classe de exposição ambiental	Classe de Resistência	Razão a/c	Tipo de cimento	Coefficiente de difusão - D <sub>0</sub> [m <sup>2</sup> /s. 10 <sup>-12</sup> ]	Recobrimento das armaduras [cm]
A1/XS1	C35/45	0,42	CEM I ou II/A	20,4	2,5
A2/XS1			CEM II/B até V	7,2	3,5
B1/XS3			CEM I ou II/A	20,4	4,5
B2/XS3			CEM II/B até V	7,2	5,5
C1/XS1	C40/50	0,40	CEM I ou II/A	17,8	2,5
C2/XS1			CEM II/B até V	6,4	3,5
D1/XS3			CEM I ou II/A	17,8	4,5
D2/XS3			CEM II/B até V	6,4	5,5
E1/XS1	C30/37	0,46	CEM I ou II/A	26,4	2,5
E2/XS1			CEM II/B até V	8,8	3,5
F1/XS3			CEM I ou II/A	26,4	4,5
F2/XS3			CEM II/B até V	8,8	5,5

Nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 temos a representação gráfica dos resultados finais obtidos da metodologia utilizada pela norma E465. Em que para os tipos de cimento CEM I ou II/A estão representados pelos caracteres A1, B1, C1, D1, E1 e F1, e para os tipos de cimento CEM II/b até V estão representado pelos caracteres A2, B2, C2, D2, E2 e F2.

A representar um betão armado com varões de aço, temos a barra de cor azul, amarela, verde clara e verde escura, com os respetivos recobrimentos de 2,5cm, 3,5cm, 4,5cm e de 5,5cm. A representar com uma linha laranja temos o limite do tempo de vida útil para classe S4.

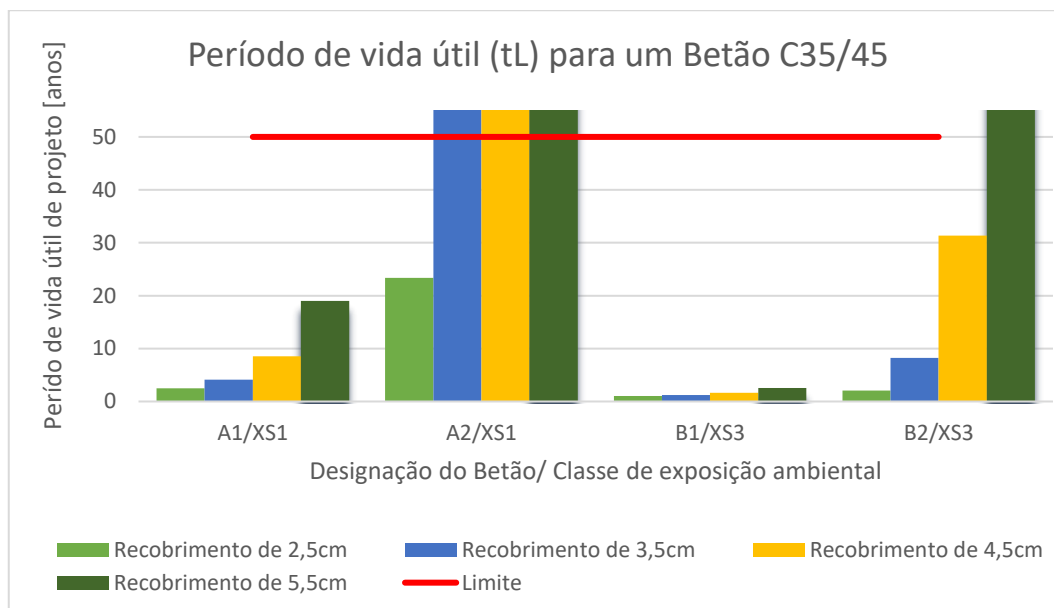


Figura 2.10 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C35/40

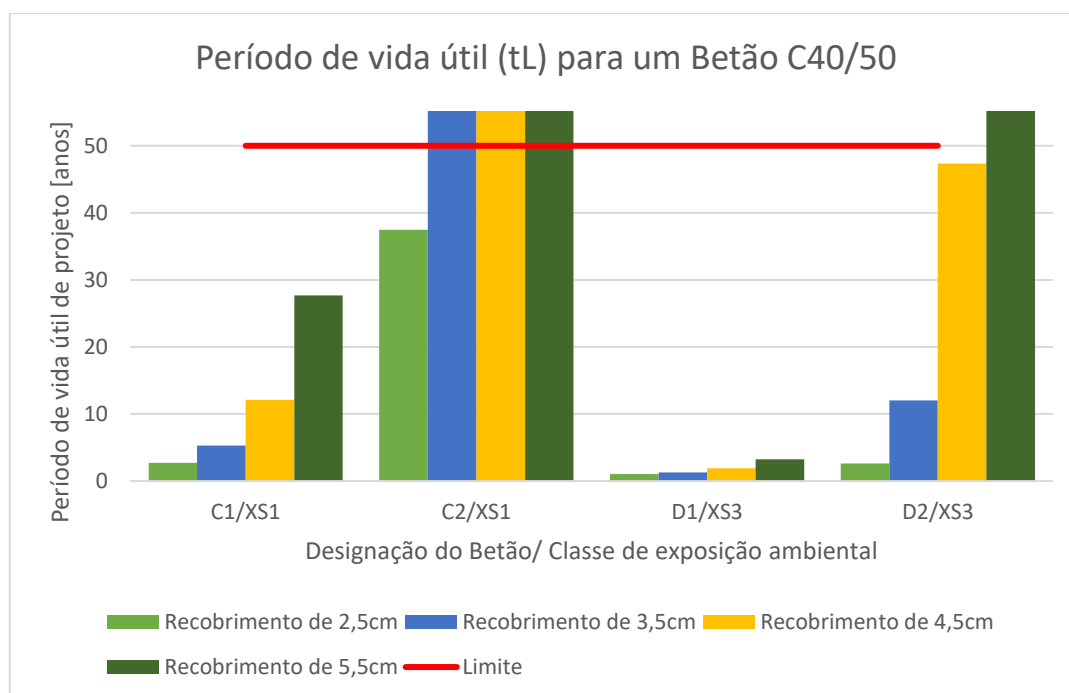
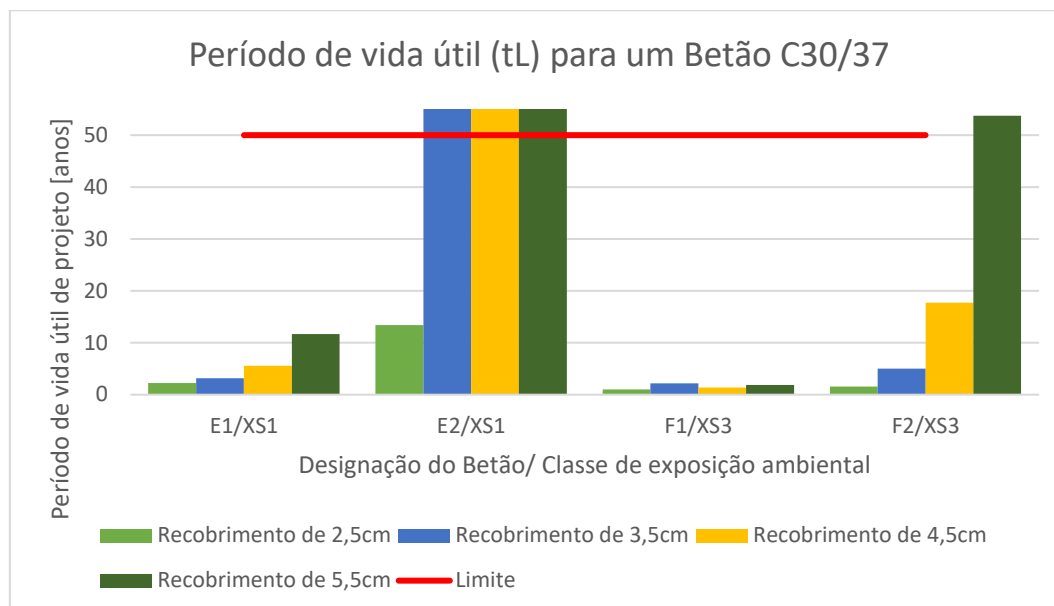


Figura 2.11 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C40/50



**Figura 2.12 – Representação gráfica do período de vida útil para um betão C30/37**

Das representações gráficas anteriormente ilustradas pode-se concluir que, para uma estrutura de classe S4, em que o betão utilizado é de classe C35/45, C40/50 ou de classe C30/37 e com um recobrimento mínimo de 3,5cm ou 4,5cm e em condições de exposição ambiental XS “corrosão induzida por cloretos presente na água do mar”, os valores obtidos demonstram que para um betão com um tipo de cimento CEM I ou II/A ou até para um cimento CEM II/b até V, o tempo de vida útil de uma estrutura pode ser inferior ao pretendido. Neste caso, o custo associado à construção de uma obra será superior ao custo calculado inicialmente, o que implica que quanto maior for o número de reparações maior será o seu custo.

## 2.2 Varões de GFRP como alternativa dos varões de aço

Para poder solucionar o problema da deterioração das estruturas provocada pela corrosão das armaduras, uma solução mais viável passaria pela substituição dos varões tradicionais (varões de aço) pelos varões de fibra de vidro (GFRP), visto que a característica do material não apresenta problemas relacionados com a corrosão.

Os varões de fibra de vidro - GFRP (do inglês, Glass Fiber Reinforced Polymer) são derivados dos materiais compósitos FRP (Fiber Reinforced Polymer), os materiais compósitos pela sua vez estão divididos em dois elementos: a fibra e a matriz (como podemos observar através da Figura 2.13). As fibras garantem a necessária resistência e rigidez ao compósito, enquanto a matriz protege as fibras da ação direta de agentes ambientais, assegurando uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evitando a micro-encurvadura das fibras quando o compósito é submetido a esforço de compressão [14]. Na Figura 2.13 representam-se as curvas de tensão-deformação da fibra, da matriz e do compósito FRP (matriz + fibra). Podemos observar, na Figura 2.13, que no caso do comportamento isolado da matriz e da fibra, estes apresentam comportamentos diferentes, sendo que a fibra exibe uma elevada resistência à tração, o que não se verifica na matriz; pelo contrário, a matriz apresenta uma extensão última muito superior à da fibra.

Contudo, quando ambos os materiais ficam interligados entre si o chamado “compósito FRP”, estes exibem um comportamento perfeitamente elástico até à rotura.

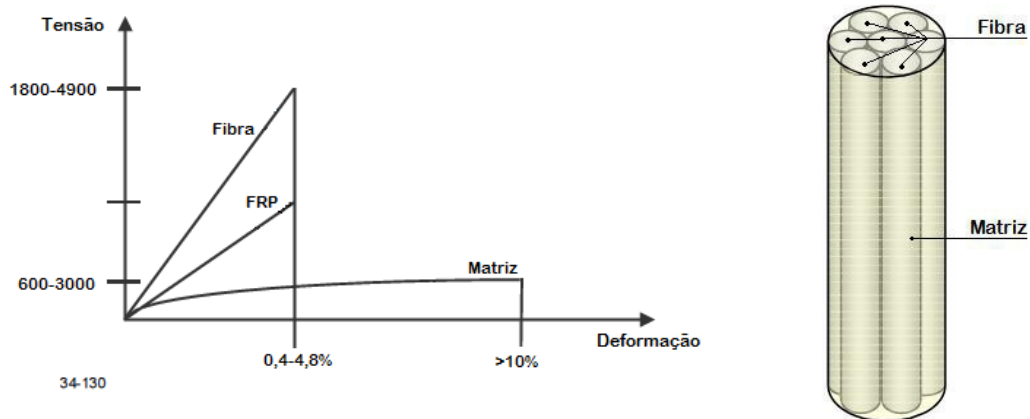


Figura 2.13 – Representação Tensão-Deformação adaptada da referência [15] e [16].

### 2.2.1 Fibra

Como já tinha sido referido no parágrafo anterior, as fibras representam a maior resistência do compósito de FRP, existindo quatro tipos de fibras: as fibras de vidro (G), de carbono (C), de aramida (A) e de Basalto (B). Nesta dissertação, só serão aprofundadas as fibras de vidro, sendo que o comportamento das outras três fibras se assemelha ao das fibras de vidro. Tanto as fibras de carbono, como as de aramida apresentam características diferentes, sendo que, no caso das fibras de carbono, apresentam uma maior resistência quando comparadas com as outras três, apresentando, contudo, um maior custo quando comparadas com as fibras de vidro.

Na referência [17] consta-se que as fibras de vidro (Glass Fibres) estão divididas em diferentes classes: E-Glass, S-2 Glass, AR-Glass, A-Glass, C-Glass, D-Glass, R-Glass e ECR-Glass, sendo as mais comuns as E-Glass devido ao seu baixo custo quando relacionado com os outros tipos de fibras de vidro, as S-Glass devido à sua elevada resistência à tração e ao seu elevado módulo de elasticidade e as AR-Glass devido à sua capacidade de ajudar a prever a corrosão por ataques alcalino do cimento. Na Tabela 2.6, podemos observar as propriedades mecânicas para os três tipos de fibra de vidro.

Tabela 2.6 – Propriedades das fibras de vidro adaptada de [15].

Tipos de Fibras	Densidade	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade	Resistência última à tração
	(Kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(GPa)	(%)
<b>E-glass</b>	2500	3450	72.4	2.4
<b>S-glass</b>	2500	4580	85.5	3.3
<b>Alkali resistant glass</b>	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0

## 2.2.2 Matriz

A matriz ou resina faz parte do elemento de ligação dos varões GFRP; existem, então, dois tipos de resina: as termoendurecíveis e as termoplásticas.

As resinas termoendurecíveis são polímeros reticulados formados através de reações químicas irreversíveis, não fundem quando aquecidos [18]. Este tipo de resina está dividida em três: a resina epoxy, a resina poliéster e a resina vinyl ester. A resina epoxy exibe elevadas propriedades mecânicas, baixa retração durante a cura, boa adesão a uma grande variedade de fibras e elevada resistência à corrosão, sendo menos afetada pela água e pelo calor do que as outras matrizes poliméricas [19]. A resina polyester apresenta baixa viscosidade e pode ser produzida de forma a apresentar elevada resistência aos raios ultravioleta, sendo um isolante elétrico [19]. A resina vinyl ester apresenta maior resistência do que a resina poliéster, exibe boa adesão às fibras de vidro e uma elevada resistência aos ácidos, peróxidos e álcalis [19].

As resinas termoplásticas fundem quando aquecidas e assumem formas específicas neste estado que retêm quando arrefecem [18]. Este tipo de resina está dividida em três: PEEK (Polyether Ether Ketone), PPS (Polyphenylene Sulphide) e PSUL (Polysulfone). A resina PEEK é mais comum para aplicações de elevado desempenho, uma vez que apresenta elevada dureza, o que é importante para a tolerância ao dano do compósito. Esta resina apresenta, ainda, reduzida absorção de água [19]. A PPS é uma resina com elevada resistência química, enquanto a PSUL é uma resina com elevada extensão na rotura e excelente estabilidade sob condições secas e molhadas [19]. Nas Tabelas 2.7 e 2.8 estão representados os valores característicos das propriedades relativas a cada uma das resinas acima expostas.

**Tabela 2.7 – Propriedade das resinas termoendurecíveis**

Propriedade	Matriz		
	Polyester	Epoxy	Vinyl ester
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Resistência à Tração (MPa)	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 - 3,45	2,75 - 4,10	3,0 - 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 - 0,39	0,38 - 0,40	0,36 - 0,39
Coefficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Humidade (%)	0,15 - 0,60	0,08 - 0,15	0,14 - 0,30

**Tabela 2.8 – Propriedade das resinas termoplásticas**

Propriedade	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1320	1360	1240
Resistência à tração (MPa)	100	82,7	70,3
Módulo de elasticidade (GPa)	3,24	3,30	2,48
Extensão (%)	50	5	75
Coefficiente de Poisson	0,40	0,37	0,37
Coefficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	47	49	56

## 2.2.3 Propriedades Físicas, Mecânicas e Geométricas:

### 2.2.3.1 Densidade dos Varões

A densidade ( $\rho_c$ ) do compósito FRP pode ser obtida através da relação entre as densidades dos constituintes fibra e matriz ( $\rho_f$  e  $\rho_m$ ) e dos volumes das mesmas, pode-se observar através da equação 2.10 o conceito de densidade.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad [2.10]$$

A densidade dos varões de aço é aproximadamente  $7.8 \text{ g/cm}^3$  e a dos varões de fibra de vidro é de  $2.2 \text{ g/cm}^3$ , o que implica que a densidade dos varões de GFRP exibe um quarto da densidade dos varões de aço, que, por sua vez, facilita o processo de manuseamento em obra e reduz o custo do transporte do material.

### 2.2.3.2 Coeficiente de dilatação térmica

O Coeficiente de dilatação térmica dos varões de FRP depende do tipo de fibra, da resina e do volume dos constituintes. A matriz polímera e a fibra de vidro podem ser consideradas como um material isotrópico [15]. O coeficiente de dilatação térmica longitudinal é denominado pelo ( $\alpha_L$ ), enquanto o coeficiente de dilatação térmica transversal é denominado pelo ( $\alpha_T$ ). Geralmente, as fibras de vidro ocupam 50 a 70% do volume total do varão [20].

De acordo com a referência [19] é constatável que se o volume da fibra na mistura aumenta, o coeficiente de dilatação térmica linear do varão se aproxima do exibido pelas fibras isoladas, enquanto que a diminuição do volume das fibras na mistura leva a um coeficiente próximo do valor exibido pela resina isolada.

### 2.2.3.3 Resistência à tração

A resistência à tração dos varões de fibra apresenta um comportamento perfeitamente elástico até à rotura, não exibindo nenhum comportamento plástico (não apresenta tensão de cedência) como no caso das armaduras em aço, que exibem um comportamento elástico-plástico. Na Figura 2.14, podemos observar o comportamento para os diferentes tipos de materiais (aço e GFRP). De acordo com [15] e [1], os principais fatores que influenciam as propriedades de tração dos varões de FRP são: a distribuição dos constituintes (fibra de vidro e matriz), do seu volume, da sua interação física e química, do processo de fabrico e do controlo de qualidade.

A resistência à tração dos varões de GFRP de diferentes fornecedores demonstra que a sua resistência diminui aproximadamente 40% do menor diâmetro para o maior (6mm para 32mm), isto é, com o aumento do diâmetro os varões de GFRP apresenta-se uma diminuição da sua resistência. Esta diminuição é devida ao “retardamento” (shear lag) da transferência das tensões interlaminares, em que as fibras que estão mais perto do centro da seção não estão sujeitas a esforços tão elevados como as que estão junto da superfície exterior [21].

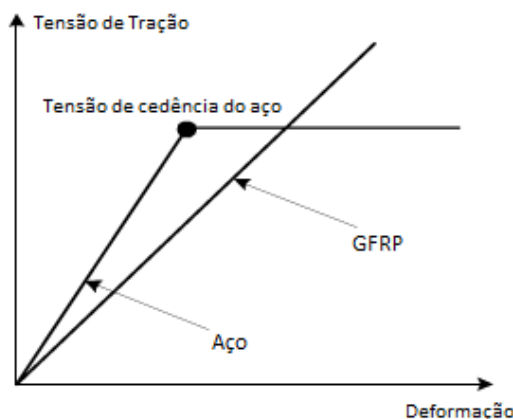


Figura 2.14 – Representação característica da resistência entre o GFRP e o Aço

### 2.2.3.4 Resistência à Compressão

No caso da resistência à compressão dos varões de FRP segundo [15] e [1], não é recomendada a sua utilização, devido à baixa capacidade resistente do material. De acordo com diversos documentos analisados, verificou-se que os materiais de FRP, quando solicitados à compressão, apresentam uma rotura dos compósitos que estão associados à microencurvatura das fibras. De acordo com a referência [1], a força de compressão dos varões de FRP varia entre 55, 78 e 20% da força de tração.

### 2.2.3.5 Resistência ao Corte

O comportamento dos varões de GFRP ao corte apresenta uma reduzida resistência devido à falta de reforço das fibras entre camadas [22]. No entanto, é possível melhorar o comportamento ao corte dos varões, alterando a orientação das fibras de maneira a que estas formem um ângulo de desvio relativamente ao eixo [22].

### 2.2.3.6 Aderência

No que diz respeito à aderência dos varões de GFRP, estes dependem do design dos varões (geometria da sua superfície), do processo de fabrico, das propriedades mecânicas e das condições ambientais [1]. Os tipos de varões de GFRP comercializados, podem ser encontrados em três formatos:

nervurados – a), revestido com areia – b), enrola e revestido com areia – c), através a Figura 2.11 pode-se observar alguns exemplos de varões de fibra de vidro, de diferentes fornecedores.

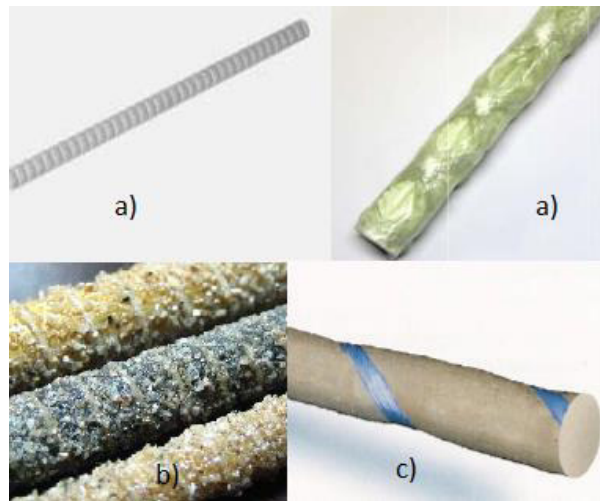


Figura 2.15 – Representação dos tipos de varões de GFRP utilizados.

### 2.2.3.7 Fluência

A fluência é caracterizada pela deformação permanente do material quando sujeita a cargas ou tensões constantes em função do tempo. Esta propriedade depende essencialmente da resistência última a curto prazo; no entanto, as condições ambientais (elevadas temperaturas, radiação ultravioleta, elevada alcalinidade do meio, ciclos de molhagem-secagem, ciclos de gelo-degelo) naturalmente aceleram este processo [20]. As fibras de vidro apresentam uma excelente resistência à fluência, característica que em geral não acontece com a maior parte das resinas [21]. A orientação e o volume das fibras têm uma influência determinante nas características de fluência dos varões.

Em ensaios de fluência em varões de GFRP, efetuados na Alemanha por Bundelmann & Rostasy em 1993, demonstram que não haverá rotura por fluência, se as solicitações permanentes se limitam a níveis inferiores a 60 % da resistência [21].

### 2.2.3.8 Relaxação

O fenómeno de relaxação consiste na redução das tensões no tempo por ação de uma deformação imposta com valor constante [20]. A taxa de relaxação pode ser determinada dividindo a carga medida num ensaio de relaxação pela carga inicial, o que representa a percentagem de redução da carga versus o seu valor inicial após um determinado período de tempo [15]. Resultados de ensaios mostram que quanto maior a temperatura maior a relaxação, sendo os varões de AFRP (varões de aramida) os mais afetados por este fenómeno [19].

### 2.2.3.9 Fadiga

A fadiga é um fenómeno que se caracteriza pela degradação da integridade do material resultante de repetidos carregamentos cíclicos [19]. A resistência à fadiga dos varões de GFRP é relativamente elevada, estado dependente das propriedades e quantidades dos constituintes dos varões e das condições ambientais [20].

### 2.2.3.10 Efeito da temperatura e do fogo

De acordo com a referência [20], o comportamento dos varões de GFRP a elevadas temperaturas pauta-se por alterações relevantes ao nível da ligação entre as fibras e a matriz, diminuindo consequentemente a rigidez, a resistência à tração, à flexão e ao corte. É também referido que a envolvimento dos varões de GFRP com o betão não é suficiente para garantir uma proteção térmica adequada.

Por sua vez, as baixas temperaturas também são prejudiciais para os varões de GFRP, podendo neste caso provocar o endurecimento e a microfendilhação da matriz, resultando na degradação da aderência entre a fibra e a resina [20].

### 2.2.3.11 Geometria

As características geométricas dos varões de GFRP encontram-se disponíveis em diâmetros que variam entre os 6 mm aos 32 mm, como já é conhecido dos varões de aço, sendo que, no estudo realizado em diversas empresas com que houve contacto, verificou-se que é possível obter varões de diâmetro superior ao referido. Na Tabela 2.9 temos a representação da geometria dos varões de GFRP, segundo a empresa Schöck ComBar.

**Tabela 2.9 – Propriedade geométricas dos varões GFRP**

Diâmetro	Designação do Diâmetro (ACI/ CSA)	Diâmetro (mm)	Área da secção transversal (mm <sup>2</sup> )	Peso específico (Kg/m)
φ 8	M8	8	50,3	0,13
φ 12	M13	12	113	0,3
φ 16	M15	16	201	0,52
φ 20	M20	20	314	0,8
φ 25	M25	25	491	1,22
φ 32	M32	32	804	1,95

### 2.2.3.12 Durabilidade

De acordo com o documento [15] existem três componentes dentro do material compósito que influencia as suas propriedades a longo prazo, que são as seguintes:

- A matriz

- A fibra
- A interação da fibra/ matriz

Cada um destes elementos pode ser suscetível ao ataque por diversos ambientes agressivos, mas os três deveriam continuar a funcionar totalmente ao longo da vida do compósito. A matriz é inerentemente resistente ao meio agressivo; por conseguinte, evita a deterioração das fibras e da região da interface, fornecendo uma barreira contra o betão e o meio ambiente externo.

Para garantir a durabilidade adequada do compósito (GFRP), é necessário, na escolha da resina, ter em atenção os seguintes aspetos [19]:

- A resina deve ser capaz de resistir ao ataque pelos álcalis;
- Deve possuir rigidez suficiente para resistir à micro-fendilhação;
- Ser suficientemente impermeável para resistir à penetração de agentes ambientais;
- Ser fácil de aplicar para minimizar as variações de qualidade;
- Ser compatível com as fibras para garantir boa aderência entre estas e a matriz.



# Capítulo 3

---

## Dimensionamento

O presente capítulo visa essencialmente o dimensionamento dos elementos de betão armado com GFRP, tendo a descrição do procedimento de cálculo sido fundamentada com base nos documentos científicos do ACI (American Concrete Institute) e das dissertações de Vítor Reis [19] e de Lisandra Camacho [20]. A filosofia de dimensionamento assemelha-se à utilizada no de betão armado, em que os cálculos se baseiam no princípio do equilíbrio internos das forças e nas compatibilidades das extensões. A principal diferença entre utilizar o aço ou GFRP nos cálculos passa pela verificação do ELS (estado limite de serviço), isto porque, quando utilizamos o GFRP como armadura, uma das condicionantes deste elemento é a seu baixo módulo de elasticidade, o que afeta significativamente a verificação da deformada. Desta maneira, a verificação ao ELS adquire uma maior importância do que a verificação ao ELU (estado limite último).

De seguida, serão apresentados os métodos utilizados para a determinação das propriedades dos materiais, da resistência ao momento fletor e ao corte. E, para finalizar, demonstrar-se o processo de cálculo efetuado por meio de um fluxograma.

### 3.1 Estimativa das propriedades do Material (varões de GFRP)

As propriedades dos varões de GFRP variam de acordo com o fornecedor (depende da relação entre a percentagem de resina e na percentagem de fibra de vidro). Nesta etapa inicial do dimensionamento, não são considerados os efeitos do longo prazo, nem as condições ambientais. De acordo com o manual de design ACI 440 [1] para a determinação dos valores de design da tração e extensão do material, o documento recomenda as equações 3.1 e 3.2, que tem em consideração o efeito da redução ambiental.

#### 3.1.1 Valor de cálculo da resistência à tração

Da equação 3.1 obtém-se o valor da resistência à tração, que tem em consideração o efeito da exposição ambiental, e é obtido através da relação entre o fator de redução ambiental e o valor da resistência à tração. O valor do fator de redução depende das condições ambientais e tipo de fibra utilizado. Para os varões de fibra de vidro (GFRP), este fator pode tomar os valores de 0.8 ou 0.7, consoante as condições ambientais. O valor característico da resistência à tração dos varões GFRP de acordo com a ACI 440 [1], é obtido através da média dos valores de ensaios  $f_{u,ave}$  subtraindo três vezes o desvio padrão ( $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$ ).

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad [3.1]$$

$f_{fu}^*$  – Valor característico da resistência à tração (MPa);

$C_E$  – Fator de redução ambiental.

### 3.1.2 Valor de cálculo da extensão do material

O valor de cálculo da extensão última do material (equação 3.2) é obtido do mesmo modo que o valor de cálculo da resistência à tração.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad [3.2]$$

$\varepsilon_{fu}^*$  - Valor característico da extensão do material.

## 3.2 Estado Limite Último

O estado limite último corresponde à máxima capacidade suportada por uma estrutura. Nesta fase do dimensionamento, as cargas aplicadas para análise das estruturas, irão ser majoradas e as resistências dos materiais serão minoradas, de forma a garantir uma reserva da capacidade resistentes dos materiais em utilização. No que diz respeito ao coeficiente de majoração das cargas ( $\gamma$  – equação 3.3), foram utilizados os coeficientes de acordo com Norma Europeia EC0 [12], em que para as ações permanentes o valor é igual a 1,35 e para as ações variáveis o valor é igual a 1,50. Os coeficientes de minoração utilizados foram de acordo com o documento ACI 440 [1].

$$S_{Ed} = G \cdot \gamma_g + Q \cdot \gamma_q \quad [3.3]$$

$G$  – Esforço resultante de uma ação permanente (kN/m ou kN/m<sup>2</sup>);

$Q$  – Esforço resultante de uma ação variável (kN/m ou kN/m<sup>2</sup>);

$\gamma_g$  – Coeficiente de segurança relativo às ações permanentes;

$\gamma_q$  – Coeficiente de segurança relativo às ações variáveis.

### 3.2.1 Momento fletor resistente

A resistência à flexão pode ser determinada com base na compatibilidade das extensões, do equilíbrio interno das forças e controlando o modo de rotura [19]. O cálculo do momento fletor resistente é obtido através da multiplicação do momento resistente pelo fator de redução da resistência, em que este deve apresentar um valor igual ou superior ao momento atuante (equação 3.4). O momento fletor resistente ( $M_{Rd}$ , será analisado na secção 3.2.2.1 e 3.2.2.2) e fator de redução da resistência ( $\Phi$ , será analisado na secção 3.2.) depende do modo de rutura.

$$\Phi \times M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad [3.4]$$

$M_{Rd}$  – Momento resistente (kN.m ou kN.m/m);

$M_{Ed}$  – Momento atuante (kN.m ou kN.m/m);

$\Phi$  – Factor de redução da resistência.

### 3.2.2 Modos de rotura por flexão

O modo de rotura de uma secção de betão armado com varões de fibra de vidro pode ser devido ao esmagamento do betão ou pela rotura dos varões de GFRP. A rotura por esmagamento do betão ocorre quando a extensão última do betão atingem o seu valor máximo de rutura ( $\epsilon_{cu} = 3,0\text{‰}$ ), do mesmo modo, a rotura dos varões de GFRP ocorre quando a extensão última dos varões atingem a sua rutura, em que sua extensão vai depender do diâmetro do varão (quanto maior o diâmetro, menor a extensão última).

Para a determinação dos diferentes casos, o documento do ACI [1], propõe as seguintes condições:

- Se a percentagem de armadura for superior à percentagem da armadura “equilibrada” ( $\rho_f > \rho_{fb}$ ), temos uma rotura por esmagamento do betão. Na Figura 3.1 está representado o modo rotura esmagamento do betão;

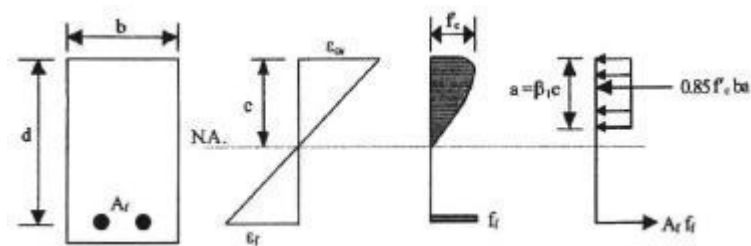


Figura 3.1 – Rotura por esmagamento do betão

- Se a percentagem de armadura for inferior à percentagem da armadura “equilibrada” ( $\rho_f < \rho_{fb}$ ), temos uma rotura dos varões de GFRP. Na Figura 3.2 está representado o modo rotura dos varões de GFRP.

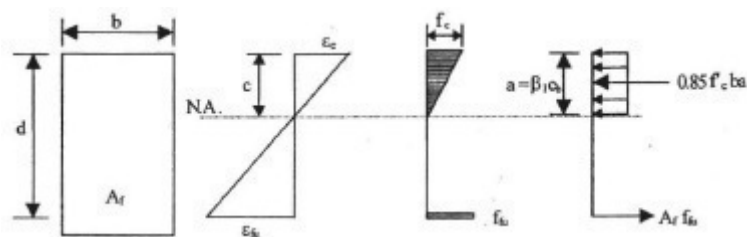


Figura 3.2 – Rotura dos varões de GFRP

### 3.2.2.1 Rotura por esmagamento do betão

Para que a determinação do momento resistente de uma secção devido o modo de rotura por esmagamento do betão, o documento do ACI [1] propõe-nos a seguinte equação 3.5, sendo que também nos propõe a equação 3.6 para determinação da tensão das armaduras de GFRP.

$$M_{Rd} = \rho_f \cdot f_f \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) bd \quad [3.5]$$

Onde:

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad [3.6]$$

$\rho_f$  – Taxa de armadura;

$f'_c$  – Resistência última à compressão do betão (MPa);

$b$  – Largura da secção (m);

$d$  – Altura útil da secção (m);

$E_f$  – Módulo de elasticidade dos varões de GFRP (GPa);

$\varepsilon_{cu}$  – Extensão última do betão;

$\beta_1$  – Factor de redução que é igual a 0,85 para  $f'_c \geq 28$  MPa e para  $f'_c < 28$  MPa; este factor reduz 0,05 por cada 7 MPa;

### 3.2.2.2 Rotura dos varões de GFRP

Da mesma maneira, para o modo de rotura dos varões de GFRP, o documento do ACI [1] propõe a equação 3.7 para a determinação do momento resistente.

$$M_{Rd} = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 \cdot C_d}{2} \right) \quad [3.7]$$

Onde:

$$C_d = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad [3.8]$$

$A_f$  – Área de armadura dos varões de GFRP (m<sup>2</sup>);

$\varepsilon_{fu}$  – Extensão ultima dos varões de GFRP.

### 3.2.3 Fator de redução da resistência à flexão

Devido aos FRP não exibirem um comportamento dúctil, o que apresenta uma desvantagem na sua utilização, o fator de redução da resistência tem como objetivo aumentar a reserva da resistência dos materiais de FRP. Para a determinação do fator de redução da resistência, o ACI 440-1R baseia-se no documento do ACI 318-05 (documento de dimensionamento para estruturas de betão armado), em que o fator ( $\phi$ ) assume o valor de 0,65 para o controlo das roturas por esmagamento do betão e de 0,55 para o controlo da rotura pelos varões de fibra de vidro.

De acordo com o documento analisado, o valor do fator ( $\phi$ ) devido a rotura pelos varões de GFRP é inferior devido ao baixo modulo de elasticidade dos varões de GFRP, sendo que, quando comparado com o modo de rotura por esmagamento do betão, este apresenta uma maior deformabilidade da secção. Na Figura 3.3 temos a representação do fator de redução da resistência em função ao rácio das armaduras. Para podermos determinar a equação da reta, o documento do ACI propõe a seguinte equação [3.9]:

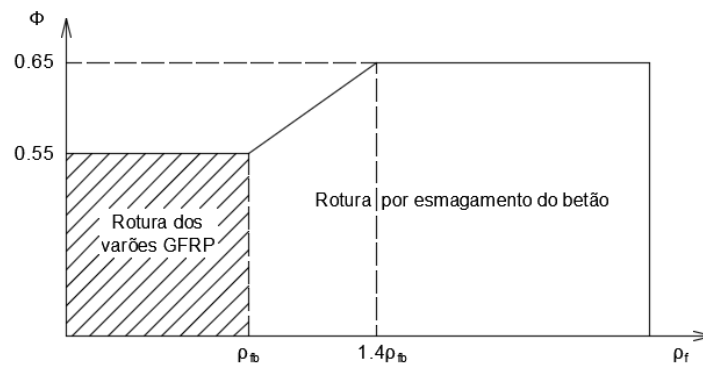


Figura 3.3 – Factor de redução da resistência em função ao rácio das armaduras

$$\phi \begin{cases} 0,55 & \text{para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \cdot \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{para } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad [3.9]$$

### 3.2.4 Taxa de armadura

A taxa de armadura representa a quantidade de armadura disponível numa secção betão armado com varões de GFRP e pode ser obtida através da equação 3.10.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad [3.10]$$

### 3.2.5 Taxa de armadura “equilibrada”

A taxa de armadura “equilibrada” representa a percentagem de armadura necessária para existir uma rutura simultânea do betão e do GFRP e pode ser determinada através da equação 3.11.

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad [3.11]$$

### 3.2.6 Armadura mínima longitudinal

O cálculo da armadura mínima longitudinal das secções de betão armado com varões de GFRP pode ser determinado através da equação 3.12. Este cálculo ocorre quando o modo de rotura é o do GFRP ( $\rho_f < \rho_{fb}$ ), que resulta de uma alteração da fórmula já existente no documento do ACI 318 (esta alteração é devida ao facto do fator ( $\phi$ ) do betão armado ser superior ao do GFRP). Se o modo de rotura for pelo esmagamento do betão, a armadura mínima longitudinal a considerar resulta do valor obtido através da equação 3.8.

$$A_{f,min} = \frac{0,41 \cdot \sqrt{f'_c}}{f_{fu}} \cdot b_w d \geq \frac{2,3}{f_{fu}} b_w d \quad [3.12]$$

$b_w$  – Largura da alma da secção (m).

## 3.3 Estado Limite de Serviço

Tal como é utilizado nos elementos de betão armado, o estado limite de serviço em elementos de betão armado com GFR, deve garantir diversas condições, tais como o comportamento da estrutura, a sua durabilidade e a aparência. De forma a garantir estes requisitos, o documento do ACI 440 propõe a análise das limitações das deformações, o controlo das aberturas de fendas e as limitações da fluência e da fadiga.

Para a verificação do estado limite de serviço, as cargas utilizadas não deverão ser majoradas, de forma a simular o comportamento real de uma estrutura. Nos subcapítulos 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3 serão esclarecidos os métodos utilizado pelo documento em análise.

### 3.3.1 Abertura de fendas máxima

O controlo da abertura de fendas máxima tem com objetivo garantir que os elementos constituintes no betão armado não apresentem aberturas significativas de modo a pôr em causa o processo de corrosão das armaduras. Este problema não acontece quando a secção de betão armado é constituída por varões de GFRP; porém, o documento em análise sugere a equação 3.13 para determinação da abertura de fendas máxima, sendo que limita os valores para 0,5mm no caso de estar exposto ao exterior e 0,7mm no caso exposto ao interior.

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \cdot \beta \cdot K_b \cdot \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad [3.13]$$

$\beta$  – Razão entre a distância da linha neutra à fibra externa e a distância da linha neutra ao centro de gravidade das armaduras de GFRP;

$K_b$  – Coeficiente de aderência entre o betão e a armadura de GFRP;

$d_c$  – Distância entre a fibra externa tracionada e o centro de gravidade das armaduras (m);

$S$  – Distância entre o centro de gravidade de cada varão de GFRP longitudinalmente (m).

### 3.3.2 Determinação do controlo de deformação (método direto)

O método utilizado para a determinação do controlo de deformação foi o método direto, que consiste na determinação da flecha máxima através da equação 3.14. O documento do ACI 440 [1] sugere também para a determinação do controlo de deformação o método indireto. Este método consiste na determinação da espessura mínima do elemento através da limitação vão/altura.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6\xi(\Delta i)_{sus} \quad [3.14]$$

$(\Delta i)_{sus}$  – Flecha elástica devida ao conjunto de cargas atuantes (mm);

$\xi$  – Fator que depende do tempo para as cargas permanentes;

#### 3.3.2.1 Momento da inércia de uma secção não fendilhada

Para secções com geometria retangular de betão armado com varões de GFRP que não exibem fendilhação, o momento de inércia é calculado através da equação 3.15.

$$I_g = bh^3/12 \quad [3.15]$$

#### 3.3.2.2 Momento de inércia de uma secção fendilhada

No caso das secções se apresentarem fendilhadas, o momento de inércia fendilhado é determinado através da equação 3.16. Este caso ocorre quando o momento em serviço excede o momento de fendilhação (equação 3.19), isto é quando  $M_{serviço} > M_{cr}$ .

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} \cdot k^3 + n_f \cdot A_f \cdot d^2(1 - k)^2 \quad [3.16]$$

Em que:

$$k = \sqrt{2\rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f \quad [3.17]$$

$n_f$  – É razão entre o módulo de elasticidade dos varões de GFRP e o módulo de elasticidade do betão.

### 3.3.2.3 Momento de inércia efetivo

A equação do momento de inércia efetivo tem conta o facto de algumas zonas das vigas de betão armado apresentarem fissuramento e outras não. Desta maneira, o ACI propõe a equação 3.18 para a determinação do momento de inércia efetivo, em que o coeficiente  $\beta_d$  (equação 3.19) representa o coeficiente de redução que está relacionado com a diminuição da tensão da resistência exibida pelo betão armado com GFRP.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d \cdot I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad [3.18]$$

Em que:

$$\beta_d = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0 \quad [3.19]$$

$I_g$  – Momento de inércia de uma secção não fendilhada ( $m^4$ );

$I_{cr}$  – Momento de inércia de uma secção fendilhada ( $m^4$ );

$M_{cr}$  – Momento de fendilhação (kN.m ou kN.m/m);

$M_a$  – Máximo momento aplicado (kN.m ou kN.m/m);

$\rho_{fb}$  – Taxa de armadura “equilibrada”.

### 3.3.2.4 Momento de fendilhação

Para a determinação do momento de fendilhação numa secção de betão armado com varões de GFRP, o documento em análise sugere a equação 3.20. Esta equação é da mesma maneira determinada para as secções de betão armado, em que  $\sigma = M/w$ , onde  $\sigma$  representa a resistência à tração do betão, o  $w$  representa o momento de inércia a dividir pela distância do eixo de referência ao centroide, e  $M$  representa o momento de fendilhação.

$$M_{cr} = \frac{2f_r \cdot I_g}{h} \quad [3.20]$$

Em que:

$$F_r = 0,62\sqrt{f'_c} \quad [3.21]$$

$h$  – Altura da secção (m).

### 3.3.3 Limitações da fluência e da fadiga

As limitações da fluência e da fadiga dos varões de GFRP podem ser determinadas de acordo com a equação 3.22. Através desta equação, podemos evitar a rotura sob a ações de cargas prolongadas ou ciclo de cargas e fadigas das armaduras [1]. O documento em estudo sugere que, devido ao facto dos níveis de tensão das armaduras estarem na fase elástica, os cálculos das tensões podem ser determinados através de uma análise elástica. O valor de limite para rotura por fluência ou fadiga é de 20% do valor de cálculo da resistência à tração ( $f_{f,s} \leq 0.20 \cdot f_{fu}$ ).

$$f_{f,s} = M_s \frac{n_f \cdot d(1 - k)}{I_{cr}} \quad [3.22]$$

$M_s$  – Momento de serviço devido às cargas prolongadas (kN.m ou kN.m/m).

## 3.4 Resistência ao Corte

Para determinar da resistência ao corte dos elementos de betão com varões de GFRP, o documento do ACI 440, propõe as fórmulas utilizadas no regulamento de betão armado do ACI 318-05, em que o princípio de verificação da resistência ao corte é obtido através da equação 3.23, sendo que o esforço transversal resistente advém do somatório da contribuição da resistência ao corte do betão e da resistência ao corte dos estribos de GFRP.

$$\emptyset \cdot V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad [3.23]$$

$V_{Rd}$  – Esforço transversal resistente (kN ou kN/m);

$V_{Ed}$  – Esforço transversal actuante (kN ou kN/m).

### 3.4.1 Resistência ao corte do betão

A contribuição da resistência ao corte do betão e a posição da linha neutra pode ser obtida através das equações 3.24 e 3.25.

$$V_c = 2/5 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot c \quad [3.24]$$

Em que:

$$c = k \cdot d \quad [3.25]$$

### 3.4.2 Resistência ao corte dos estribos de GFRP

O cálculo da contribuição da resistência ao corte dos estribos de GFRP deverá ser obtida pela equação 3.26, em que a equação 3.27 apresenta a tensão última resistente à tração dos estribos de GFRP. A resistência ao corte deve ser limitada pela equação 3.28, de forma a controlar a abertura de fendas, manter a integridade do betão e evitar a rotura da porção dobrada do estribo [23] e [19].

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s} \quad [3.26]$$

Onde:

$$f_{fv} = 0.004E_f \leq f_{fb} \quad [3.27]$$

$$f_{fb} = \left( 0.05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad [3.28]$$

$f_{fb}$  – Tensão resistente na zona de dobragem (MPa);

$r_b$  – Raio de curvatura dos varões de GFRP dobrados (m);

$d_b$  – Diâmetro do varão de GFRP (m).

### 3.4.3 Armadura de cálculo

Da equação 3.29, pode-se calcular a armadura e espaçamento necessário para os estribos perpendiculares ao eixo da peça.

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi \cdot V_c)}{\phi \cdot f_{fv} \cdot d} \quad [3.29]$$

$V_u$  – Representa o esforço transversal resistente  $V_u = V_{Rd}$  (kN ou kN/m).

### 3.4.4 Armadura mínima ao esforço transversal

No que diz respeito ao cálculo da armadura mínima necessária para o esforço transversal, o documento do ACI 440 remete-nos ao regulamento de betão armado o ACI 318, que nos indica a quantidade de armadura mínima que é necessária quando o esforço transversal resistente  $V_u$  excede metade da resistência de corte do betão  $\phi V/2$ . Desta maneira, para evitar a rotura por corte em elemento de betão armado com varões de GFRP o ACI 318, propõe a equação 3.30.

$$A_{fv, \min} = 0.35 \frac{b_w \cdot s}{f_{fv}} \quad [3.30]$$

$b_w$  - Espessura da alma da secção (m).

### 3.5 Detalhes construtivos

#### 3.5.1 Determinação da altura útil

A altura útil de uma secção é representada pela distância entre o eixo do varão tracionado até ao topo/base da superfície da secção, e é determinada através da equação 3.31.

$$d = h - c - \phi_{\text{est}} - \frac{\phi_{\text{long}}}{2} \quad [3.31]$$

$c$  – Representa o recobrimento das armaduras (mm);

$\phi_{\text{est}}$  – Representa o diâmetro dos estribos (mm);

$\phi_{\text{long}}$  – Representa o diâmetro dos varões longitudinais (mm).

#### 3.5.2 Distância livre/mínima entre armaduras

O espaçamento livre entre armadura tem como principal objetivo facilitar o processo de betonagem/vibração do betão, de modo a garantir um bom envolvimento entre as armaduras e o betão. Da equação 3.32, obtemos o espaçamento livre entre armaduras  $s$ , da equação 3.33, o espaçamento mínimo entre armaduras, de acordo com regulamento Canadano ISIS Manual [24]].

$$s = \frac{b - 2c - 2\phi_{\text{est}} - n \cdot \phi_{\text{long}}}{n - 1} \quad [3.32]$$

$$s_{\text{mín}} = \text{máx}\{1.4d_b; 1.4d_g; 30\text{mm}\} \quad [3.33]$$

$n$  – Número de varões longitudinais;

$d_g$  – Máxima dimensão dos agregados (mm).

#### 3.5.3 Comprimentos de amarração dos varões GFRP

O cálculo do comprimento de amarração dos varões de GFRP estudado nesta dissertação corresponde aos seguintes: a equação 3.34 para os casos dos varões em que a zona de ancoragem é reta (os varões não são dobrados) e a equação 3.36 para os casos dos varões serem dobrados na zona de ancoragem.

A equação 3.35 representa a tensão dos varões de GFRP para um comprimento embebido de  $l_e$ . No respeitante ao comprimento de amarração no caso dos varões curvos equação 3.36, o seu valor não deve ser inferior a 12 vezes o diâmetro ou 23mm.

Devido ao reduzido fator de resistência quando comparado com o aço, nos casos das amarrações para as armaduras positivas nos pontos de inflexão e nos apoios simples, esta deve ser limitada pela equação 3.37.

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083 \cdot \sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \quad [3.34]$$

$$f_{fe} = \frac{0.083 \cdot \sqrt{f'_c}}{\alpha} \left( 13.6 \cdot \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \cdot \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad [3.35]$$

$$l_{bhf} = \begin{cases} 165 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{para } f_{fu} \leq 520 \text{ MPa} \\ \frac{f_{fu}}{3.1} \cdot \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{para } 520 < f_{fu} < 1040 \text{ MPa} \\ 330 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{para } f_{fu} \geq 1040 \text{ MPa} \end{cases} \quad [3.36]$$

$$l_d \leq \frac{\phi \cdot M_n}{V_u} + l_a \quad [3.37]$$

$l_a$  – Representa o comprimento de amarração além do centro do apoio (m);

$l_e$  – Representa o comprimento do varão embebido no betão (m);

$C$  – Cobertura para o centro do betão;

$\alpha$  – Factor de modificação da localização do varão.

### 3.5.4 Comprimentos de emendas dos varões de GFRP

O comprimento de emendas em varões de GFRP, de acordo com o regulamento do ACI, deve ser limitado pelo valor de 1,3 vezes o comprimento de amarração.

## 3.6 Fluxograma “Verificação ao ELU e ELS do momento fletor”

De forma a simplificar todo ao processo de cálculo efetuado nesta dissertação, optou-se por representar, através de um fluxograma, o método realizado para a verificação do estado limite último e o estado limite de serviço do momento fletor, podendo observar todo o processo necessário para a construção de um elemento estrutura, quer seja uma viga, quer uma laje. Este processo também foi o utilizado para o cálculo da resistência ao corte dos varões de GFRP.

Inicialmente, este processo passa pela escolha de um número de varões e respetivo diâmetro, através da equação 3.1 e 3.2 em que se determina a tensão máxima dos varões de GFRP e a sua extensão. Em seguida, calcula-se a percentagem de armadura e percentagem de armadura “equilibrada”. Desta forma, através da comparação entre as equações 3.11 e 3.12, podemos determinar o modo de rotura do elemento de betão armado com varões de GFRP. Após a conclusão do tipo de rotura, determina-se o momento

resistente e compara-se com o momento atuante - equação 3.4. Caso esta condição não se verifique, será necessário aumentar o número de varões ou o seu diâmetro.

Após termos verificados os estados limites últimos (ELU), recorre-se à verificação dos estados limites de serviço (ELS), em se verificam três condições:

1ª verificação: consiste na determinação da abertura de fenda - equação 3.12. Esta verificação deve estar limitada pelos valores 0.5mm e 0.7mm, que correspondem ao caso das exposições exteriores e interiores do elemento estrutural estudado.

2ª verificação: consiste na determinação da deformação do elemento estrutural - equação 3.14, a qual deve ser limitada pela razão de entre o vão e 240, que corresponde às condições de “construção de telhados ou pavimentos que suportam ou estão ligados a elementos não estruturais suscetíveis de serem danificados por grandes deformações” [ACI].

3ª verificação: consiste na determinação do efeito da fluência e da fadiga nos varões de GFRP, equação 3.22. Tal como acontece nas outras duas verificações, o efeito da fluência e da fadiga nos varões de GFRP é limitado pelo valor de 20% da sua resistência à tração inicial - equação 3.1.

No caso de um dos processos do estado limite de serviço não se verificar, será necessário retomar o processo desde o início, alterando o número de varões a utilizar ou aumentando o seu diâmetro, de forma a verificar os três métodos do ELS. Na Figura 3.4, podemos observar todo este processo.

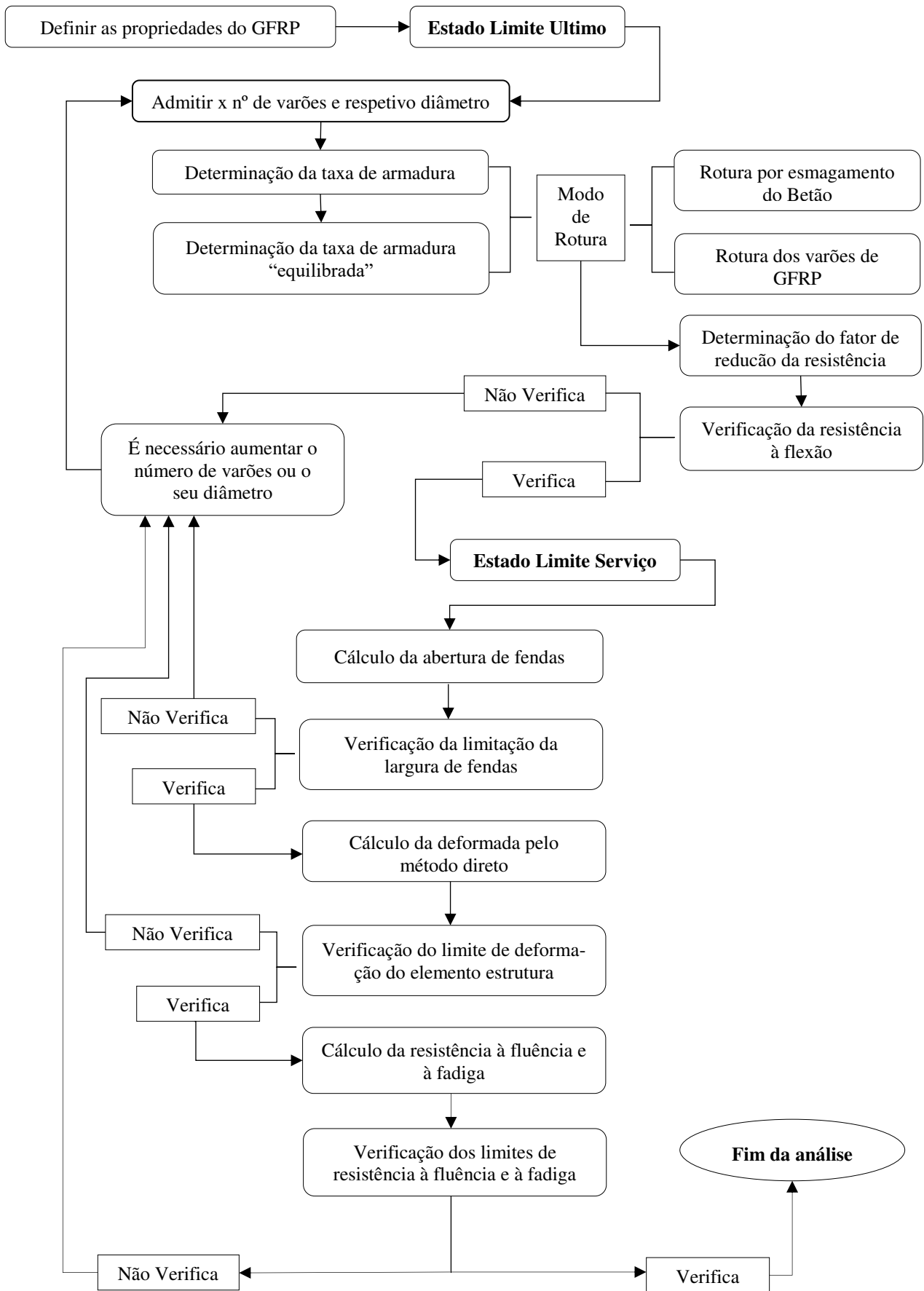


Figura 3.4 – Fluxograma do dimensionamento dos varões de GFRP

## 3.7 Aplicação do GFRP na reabilitação da estrutura em estudo

### 3.7.1 Dados de Base

De forma a facilitar a compreensão do trabalho efetuado na reabilitação do cais norte do Funchal, a APRAM (Administração dos Portos da Região Autónoma da Madeira) forneceu-nos os seguintes documentos:

- Memória descritiva e justificativa da ampliação e reabilitação do cais norte do porto do Funchal;
- Levantamento fotográfico e videográfico do cais Norte;
- Alguns desenhos da estrutura da estrutura existente (Cais antigo);
- Relatório da OZ;
- A estimativa do orçamento na reabilitação/ ampliação do cais;
- Peças desenhadas.

### 3.7.2 Descrição do caso em estudo

O caso em estudo trata-se de uma reabilitação de uma estrutura marítima, já efetuada no concelho do Funchal no ano de 2015, localizada na zona portuária, como se pode visualizar na Figura 3.5. O cais antigo apresenta uma frente de cais com 260 metros de desenvolvimento e com uma largura de cerca de 15 metros. O cais tem uma conceção de ponte cais (constituído por elementos pré-fabricados), numa extensão de cerca de 200 metros, e de caixotões nos restantes 60 metros na extremidade Nordeste.



Figura 3.5 – Imagem aérea da área de construção fornecidas pela APRAM

No concernente à fração da estrutura representada pela ponte cais (elementos pré-fabricados), o tabuleiro do cais apoia-se sobre 23 alinhamentos de 3 pilares estaca afastados entre si cerca de 5,40 metros, sendo que o afastamento entre alinhamentos cerca de 8,5 metros.

De acordo com o relatório efetuado pela empresa Oz, L.<sup>da</sup> Diagnóstico, Levantamento e Controle de Qualidade em Estruturas e Fundações [9], o estudo realizado teve em vista a avaliação do estado de conservação da ponte cais entre os cabeços de amarração 15 e 29 (ver anexo A1), sendo baseada na inspeção das partes emersas e imersas da Estrutura. Foram também realizados ensaios não destrutivos ou reduzidamente intrusivos, nomeadamente a extração de carotes para avaliação da resistência à compressão do betão, a deteção das armaduras, avaliação dos seus diâmetros e medição dos recobrimentos, a medição da profundidade da frente de carbonatação e a avaliação do teor de cloretos.

Com base na análise efetuada, verificou-se que a estrutura emersa apresentava um conjunto de anomalias relacionadas com a patologia da corrosão das armaduras. As anomalias encontradas foram observadas em diferentes elementos estruturais (carlingas, vigas de bordo, laje pré-fabricadas e laje maciça), sendo as áreas afetadas particularmente significativas na viga de bordadura exterior e na laje maciça do tabuleiro, Figura 3.6. Também foi observado que a laje maciça apresentava um grau de severa deterioração que poderia comprometer significativamente a segurança da estrutura, podendo incorrer em risco de colapso.



**Figura 3.6 – Ilustração da área de corrosão das armaduras [5].**

Com base nos ensaios à compressão efetuados nos carotes extraídos das vigas de bordadura exteriores, estimou-se que o betão pertencia à classe de resistência C40/50. Quanto ao recobrimento mínimo das armaduras, de acordo com o regulamento de betão armado atual, os requisitos não foram cumpridos (recobrimento mínimo de acordo com o Norma Europeia EC2 [13] é de 4,5cm, para a classe de exposição

ambiental XS, que corresponde aos ataques por cloretos), relativamente aos valores médios em metade das zonas de ensaios.

Na execução desta dissertação, optou-se apenas por analisar dois elementos estruturais acima referidos (viga de bordadura exterior e a laje maciça), e não a reabilitação geral da estrutura, devido ao facto de que o documento fornecido (a estimativa do orçamento na reabilitação/ ampliação do cais) não apresentar de forma discriminada o custo dos trabalhos efetuados para as diferentes zonas.

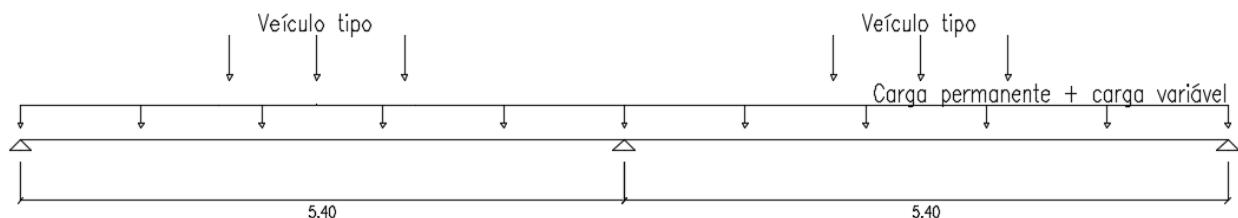
Para se efetuar uma análise de custo a longo prazo entre dois materiais distintos como o aço e GFRP, foram estudadas duas vigas de bordaduras e uma laje maciça. As duas vigas e a laje maciça reabilitadas foram escolhidas de acordo com relatório efetuado pela Oz, que pode ser observado no anexo A1 da página 109, através da planta de “Levantamento esquemático de anomalias da estrutura emersa”, estando assinaladas as áreas de corrosão das armaduras e de delaminação do betão de recobrimento a cor alaranjada, com maior avanço da corrosão das armaduras. Estas duas vigas e a laje maciça estão representadas entre os seguintes cabeços de amarração:

- Viga 1 – Cabeço de amarração 17;
- Viga 2 – Cabeço de amarração 21;
- Laje maciça – Cabeço de amarração 25.

### 3.7.3 Estrutura do Cais reabilitado

#### 3.7.3.1 Modelo de cálculo utilizado

O modelo de barra foi o modelo utilizado na laje, este modelo é aplicável devido à condição entre vãos ser inferior a 2, o que implica que a laje está a orientar as suas cargas numa só direção. As condições de apoio da laje maciça baseiam-se em três apoios simples afastados por 5,40 metros, como está ilustrado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Modelo de cálculo para a laje**

O modelo utilizado nas vigas é igual ao modelo utilizado na laje devido à estrutura estar dividida por juntas de dilatação a cada 34,40 metros (4x8,60m). As condições de apoios das vigas são de cinco apoios simples afastados por 8,60 metros, como podemos observar através da Figura 3.8. Na Tabela 3.1, temos representadas as características geométricas das secções.

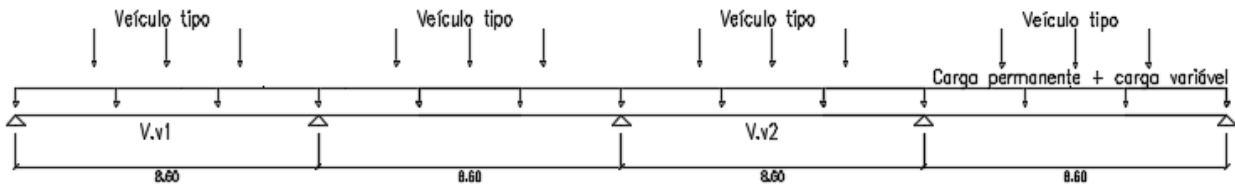


Figura 3.8 – Modelo de cálculo para as vigas

Tabela 3.1 – Características geométricas dos elementos estruturais

Elemento estrutural	Base [m]	Altura [m]
Viga	1,60	1,10
Laje	1,85	0,45

Quanto à aplicação das cargas na laje e nas vigas, estas seguem o conceito ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8. No que diz respeito ao posicionamento da carga “Veículo tipo”, foi necessário elaborar um modelo igual ao da Figura 3.7 e 3.8, em que aplicámos uma carga unitária móvel ao longo da viga, de forma a determinar a linha de influência dos momentos fletores positivos e negativos.

Tabela 3.2 – Determinação da linha de influência

Barra	Distância ao eixo x	Classe	Msd <sup>+</sup>	Msd <sup>-</sup>
	[m]		[kN.m]	[kN.m]
1	0,00	Vc.1	0,00	0,00
	0,54	Vc.2	-0,13	0,41
	1,08	Vc.3	-0,26	0,81
	1,62	Vc.4	-0,37	1,02
	2,16	Vc.5	-0,45	1,12
	2,70	Vc.6	-0,50	1,10
	3,24	Vc.7	-0,52	0,99
	3,78	Vc.8	-0,48	0,80
	4,32	Vc.9	-0,39	0,49
	4,86	Vc.10	-0,23	0,22
	5,40	Vc.11	0,00	0,00

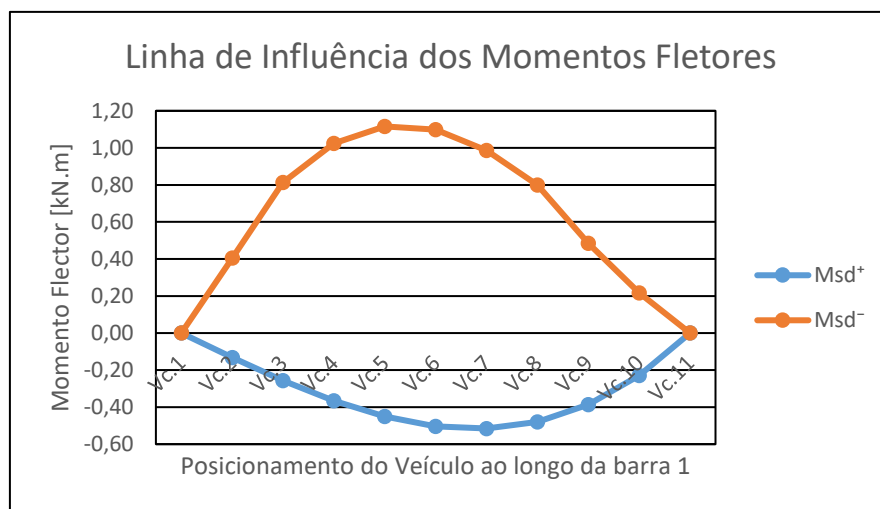


Figura 3.9 – Linha de influência dos momentos fletores

Desta maneira, através da Tabela 3.2 e do gráfico representado na Figura 3.9, obtivemos a distância e o momento máximo no qual o veículo apresenta uma maior deformação na laje, para posteriormente ser aplicado no modelo de estudo. Da mesma maneira, foi elaborada uma tabela e o respetivo gráfico para as vigas.

### 3.7.3.2 Ações de dimensionamento

As ações de dimensionamento foram utilizadas as mesmas ações proposta pela Memória descritiva e justificava da Ampliação e reabilitação do cais norte do porto do Funchal.

- **Ações permanentes:**
  - Peso volúmico do betão armado ----- 25 kN/m<sup>3</sup>
- **Sobrecarga vertical:**
  - Sobrecarga uniformemente distribuída ----- 20 kN/m<sup>2</sup>
  - Veículo tipo definido pelo RSA para pontes de classe I ----- 600 kN

### 3.7.3.3 Combinações de ações

Nos coeficientes de combinação das ações foram considerados os referidos pela Norma Europeia EC0 [12], tendo-se considerado na verificação do estado limite último os efeitos não favoráveis das ações e para a verificação do estado limite de serviço optámos pela combinação quase permanente dos seguintes coeficientes:

- $\gamma_g = 1.35$  para o peso próprio dos elementos estruturais;
- $\gamma_q = 1.50$  para as ações variáveis;
- $\psi_2 = 0.80$  para combinação quase permanente, em zonas de armazenamento.

Para a verificação da segurança relativamente ao estado limite último e ao estado limite de serviço considerou-se a seguintes combinações:

$$S_{Ed} = \gamma_g \cdot S_{GK} + \gamma_q \cdot S_{QK}$$

$$S_{cqp} = S_{GK} + \psi_g \cdot S_{QK}$$

### 3.7.3.4 Material

- Betão

O Betão a ser utilizado nesta estrutura por razões de qualidade e durabilidade da obra foi o seguinte:

Nas vigas C40/50; XS3-C1 0.20-D máx.20

Na laje C35/45; XS3-C1 0.20-D máx.20

Seguindo as especificações da Norma Europeia EC2 [13], o recobrimento mínimo exigido seria de 45 centímetros para a classe de exposição ambiental XS3, sendo que na Memória Descritiva e Justificativa [11], são sugeridas as especificações da Norma Portuguesa NP EN 206-1 e da Especificação E-464 do LNEC para a determinação do recobrimento mínimo, que toma o valor de 55 centímetros.

▪ Armaduras:

A especificação das armaduras, estas estão divididas de acordo com a sua utilização: no caso do betão armado tradicional, temos varões de aço e, no caso do betão armado com varões de GFRP, temos os varões de fibras de vidro, os quais são referidos seguidamente:

Aço A500 NR

GFRP Fabricantes: Schöck ComBar, ATP Composite e Aslan 100.

### 3.7.3.5 Resultados finais

Com base no método utilizado no capítulo 3, determina-se as armaduras necessárias para a reabilitação da laje e das duas vigas. Nas Tabelas 3.3 e 3.4, estão representados o dimensionamento ao corte e à flexão da laje maciça. No caso das vigas, apenas foi feito o dimensionamento à flexão, visto que assumimos que apenas houve deterioração da parte inferior dos estribos. E, de acordo com um estudo efetuado pela Eng.<sup>a</sup> Patrícia Escórcio sobre “Experimental study of a rehabilitation solution that uses GFRP bars to replace the steel bars of reinforced concrete beams” [25], o comportamento das vigas com ausência da parte inferior dos estribos não influencia o comportamento à flexão dos varões de GFRP.

Tabela 3.3 – Resultado do dimensionamento da laje ao corte

Elemento estrutural/ Fabricante			Pré-Laje	Pré-Laje	Pré-Laje	
			Schöck ComBAR	ATP-frp	Aslan 100	
<b>Armaduras</b>			φ12//0,100	φ13//0,100	φ13//0,100	
<b>ELU</b>	<b>Área da secção</b>	<b>cm<sup>2</sup>/m</b>	1,06/8 ramos	1,30/8 ramos	1,27/8 ramos	
	<b>Verificação da Resistência</b>	<b>V<sub>Ed</sub></b>	<b>kN</b>	584	584	584
		<b>V<sub>Rd</sub></b>	<b>kN</b>	757	700	773
	<b>Área mínima de armadura</b>	<b>cm<sup>2</sup>/m</b>	2,94	4,05	5,28	

Tabela 3.4 – Resultado do dimensionamento da laje à flexão

Elemento estrutural/ Fabricante				Pré-Laje	Laje	Pré-Laje	Laje	Pré-Laje	Laje
				Schöck	ComBar	ATP-frp		Aslan 100	
ELU	Armaduras			23 $\phi$ 16	24 $\phi$ 16	26 $\phi$ 19	28 $\phi$ 19	25 $\phi$ 19	27 $\phi$ 19
	Área da secção		cm <sup>2</sup>	46,23	48,24	72,80	78,40	71,25	76,95
	Verificação da Resistência	M <sub>Ed</sub>	kN.m	463	-479	463	-479	463	-479
		M <sub>Rd</sub>	kN.m	771	806	703	761	683	738
	Armadura mínima			14 $\phi$ 16		18 $\phi$ 19		14 $\phi$ 19	
	Área mínima de armadura		cm <sup>2</sup>	28,14		50,40		39,90	
	Armadura de distribuição			$\phi$ 12//0,100		$\phi$ 16//0,100		$\phi$ 16//0,100	
Área de Armadura de distribuição		cm <sup>2</sup> /m	11,31		20,11		20,11		
ELS	Verificação da fendilhação	w	mm	0,47	0,48	0,43	0,42	0,39	0,38
		Limite	mm	0,50					
	Verificação da deformada	$\Delta_{LT}$	mm	9,90	-	11,5	-	12,4	-
		Limite	mm	22					
	Resistência à fluência e à fadiga	f <sub>t,s</sub>	MPa	148	152	94	93	96	95
Limite		MPa	168		97		97		

Tabela 3.5 – Resultado do dimensionamento das vigas à flexão

Elemento estrutural/ Fabricante				Viga - V.v1	Viga - V.v2	Viga - V.v1	Viga - V.v2	Viga - V.v1	Viga - V.v2
				Schöck	ComBar	ATP-frp		Aslan 100	
ELU	Armaduras			14 $\phi$ 25	12 $\phi$ 25	22 $\phi$ 25	21 $\phi$ 25	22 $\phi$ 25	20 $\phi$ 25
	Área da secção		cm <sup>2</sup>	68,74	58,92	107,8	102,9	111,47	101,34
	Verificação da Resistência	M <sub>Ed</sub>	kN.m	1279	742	1279	742	1279	742
		M <sub>Rd</sub>	kN.m	2813	2411	2456	2344	2496	2269
	Armadura mínima			12 $\phi$ 25		21 $\phi$ 25		20 $\phi$ 25	
Área mínima de armadura		cm <sup>2</sup>	58,92		102,9		101,34		
ELS	Verificação da fendilhação	w	mm	0,36	0,26	0,28	0,17	0,24	0,15
		Limite	mm	0,50					
	Verificação da deformada	$\Delta_{LT}$	mm	0,90	0,60	0,90	0,60	0,90	0,60
		Limite	mm	36					
	Resistência à fluência e à fadiga	f <sub>t,s</sub>	MPa	7,80	4,50	5,20	3,00	5,90	3,40
Limite		MPa	154		87		87		

Na Tabela 3.6, está representado o dimensionamento dos detalhes construtivos para à laje e para às vigas.

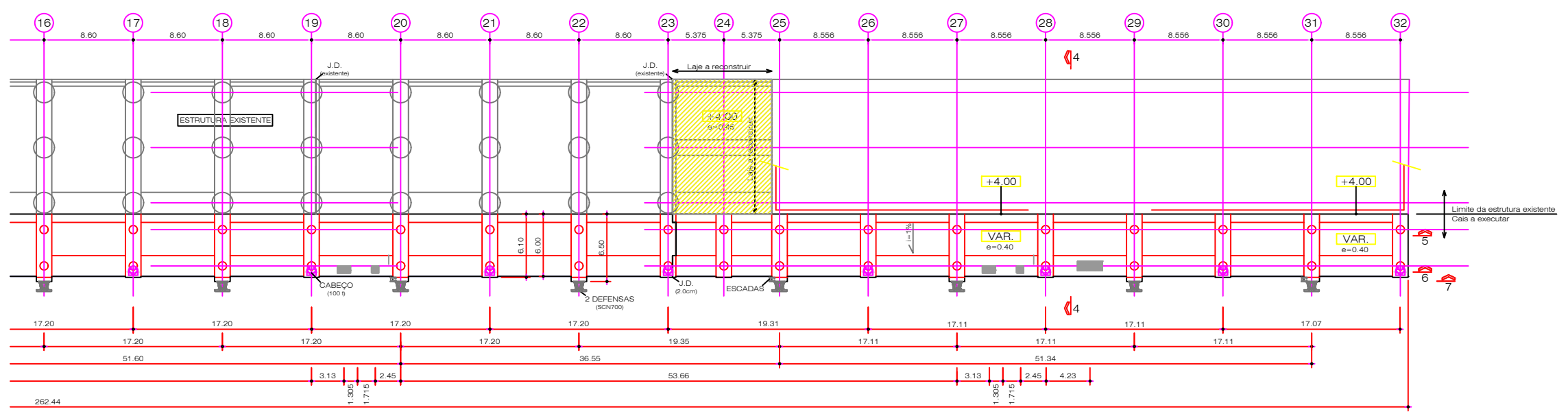
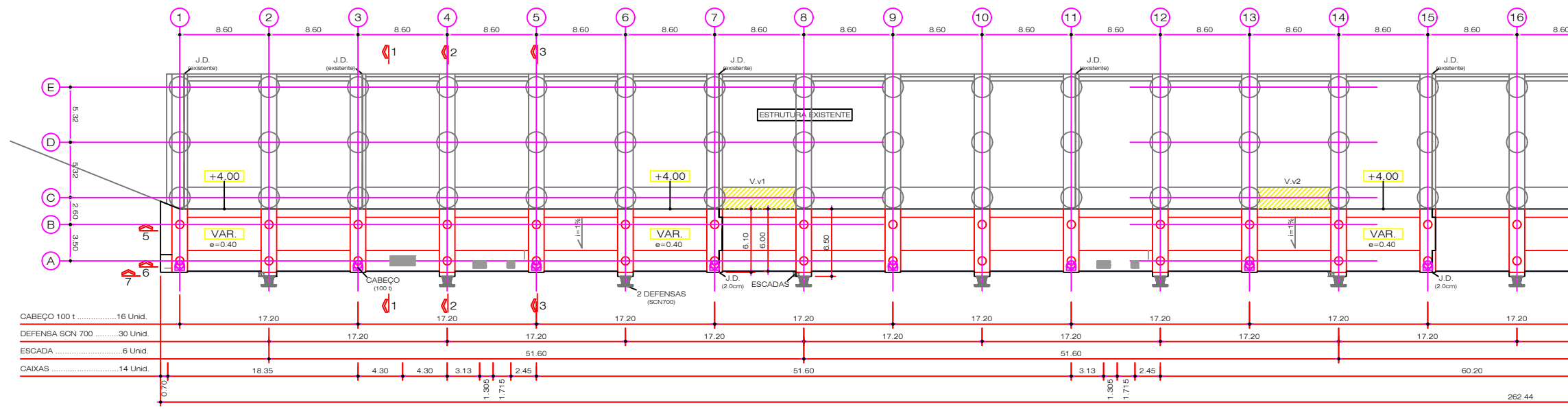
Tabela 3.6 – Resultado do dimensionamento dos detalhes construtivos.

Detalhes construtivos		
Elemento estrutural/ Fabricante	Comprimento de amarração reto [m]	Comprimento de amarração curvo [m]
Laje - Schöck ComBAR	1,4	0,46
Laje – ATP-frp	0,81	0,38
Laje Aslan 100	0,82	0,38
Viga - Schöck ComBAR	1,84	-
Viga – ATP-frp	0,84	-
Viga Aslan 100	0,84	-

### 3.7.4 Peças desenhadas

No presente subcapítulo serão ilustrados os desenhos de betão armado relativamente aos cálculos efetuados para os varões de fibra de vidro do fabricante ATP-frp e para reabilitação já efetuada em varões de aço, em que a ordem das peças desenhadas é a seguinte:

- Folha nº.01 – Planta da Estrutura Pré-Fabricada;
- Folha nº.02 – Reparação da Estrutura em Aço;
- Folha nº.03 – Reparação da Estrutura em GFRP;
- Folha nº.04 – Betão Armado\_Pré-Lales em Aço;
- Folha nº.05 – Betão Armado\_Pré-Lajes em GFRP.



**Planta da Estrutura Pré-Fabrica**  
 Escala: 1:500

**LEGENDA:**  
 Área de reparação.

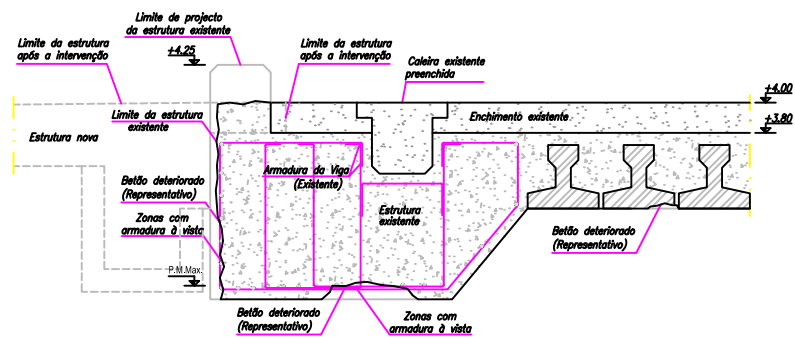
<b>Título:</b> A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo.	
<b>Estudante:</b> Juan Carlos de Freitas Gouveia <b>Orientador:</b> Paulo Miguel de Macedo França	
<b>Escala:</b> 1:500	<b>Designação:</b> Planta da Estrutura Pré-Fabricada

**Nº.Desenho:** 01

**Data:** 02/2017 **Folha:** 49

Situação actual

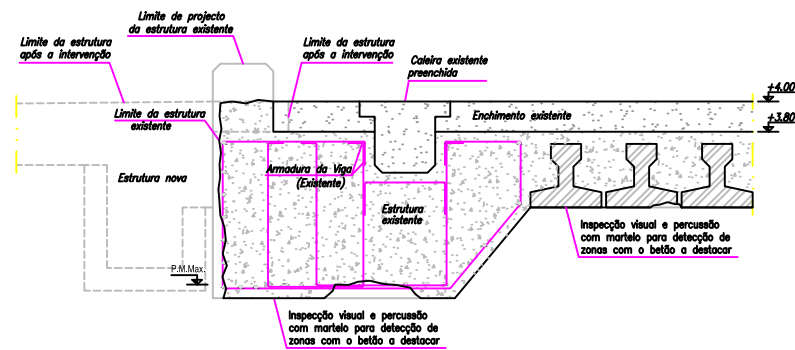
Escala: 1:50



FASE 1

Identificação e marcação das zonas danificadas (face inferior do cais existente)

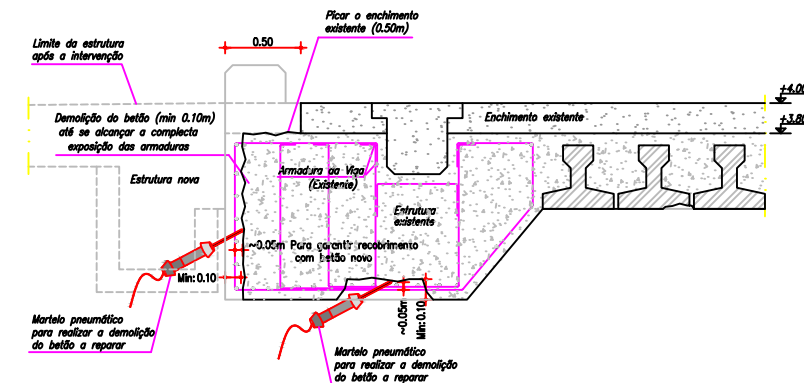
Escala: 1:50



FASE 2

Demolição do betão com martelo pneumático (face lateral e zonas da face inferior com patologia)

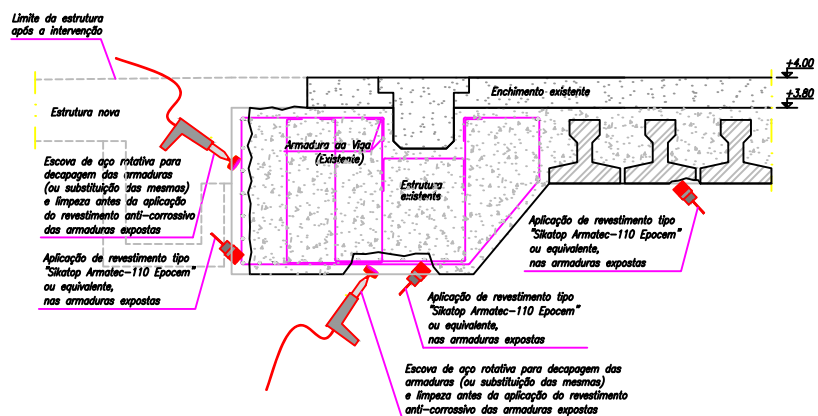
Escala: 1:50



FASE 3 (só nas áreas com armadura)

Decapagem das armaduras com escova de aço rotativa ou substituição (face lateral e zonas da face inferior com patologia)

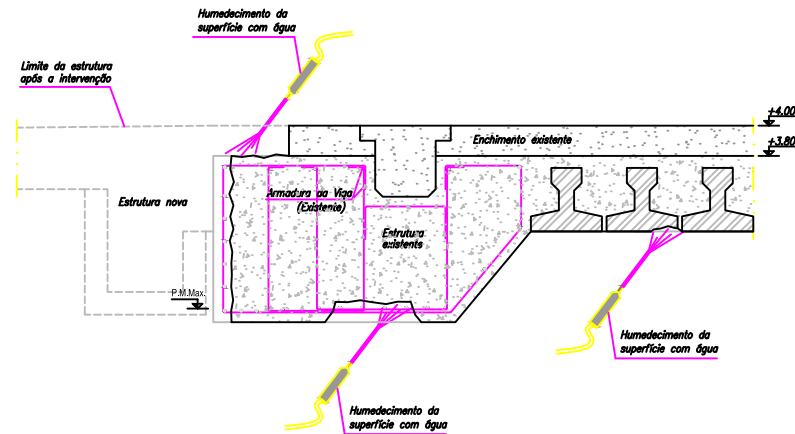
Escala: 1:50



FASE 4

Humedecimento da superfície com água

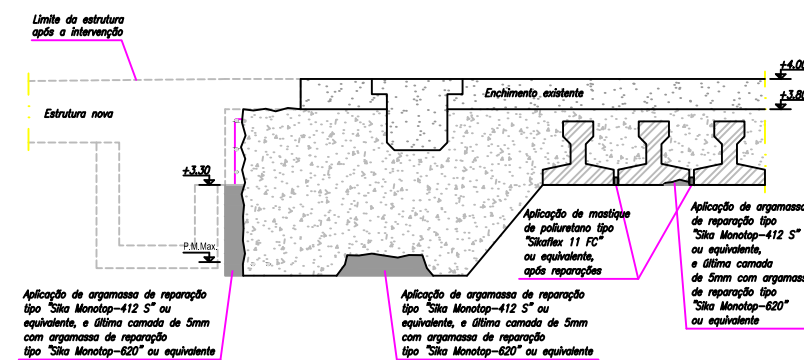
Escala: 1:50



FASE 5a (zona corrente - laje)

Preenchimento das zonas demolidas com argamassa de reparação e das juntas entre pré-vigas da laje com mastique

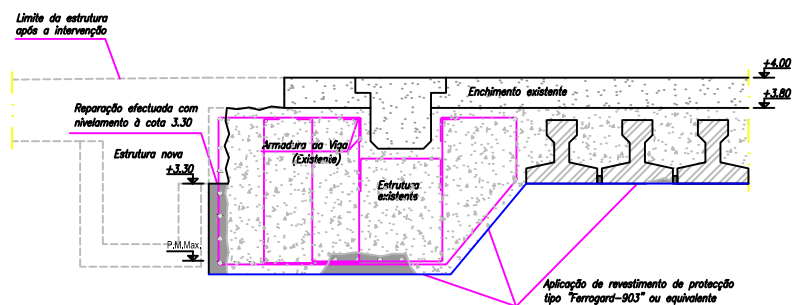
Escala: 1:50



FASE 6a (zona corrente - laje)

Após a reparação, pintura de todas as superfícies de betão à vista da estrutura do cais existente

Escala: 1:50

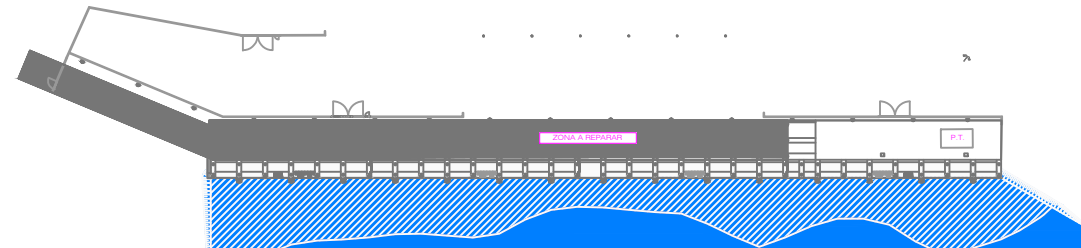


NOTAS:

- O BETÃO DETERIORADO DEVERÁ SER RETIRADO ATÉ SE ENCONTRAR A SUPERFÍCIE DO BETÃO SÃO, DEVENDO RESPEITAR-SE UMA ESPESURA MÍNIMA DE DEMOLIÇÃO DE 0.10m APROXIMADAMENTE EXCEPTO NAS ZONAS MAIS DETERIORADAS.
- A SUBSTITUIÇÃO DE ARMADURAS É DISPENSADA SE A PERDA DE SECÇÃO FOR INFERIOR A 20%.
- EM CASO DE NECESSIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE ARMADURAS DEVERÁ SER GARANTIDO O COMPRIMENTO MÍNIMO DE AMARRAÇÃO.

Planta

Escala: 1:2500



Título: A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo.

Estudante: Juan Carlos de Freitas Gouveia

Orientador: Paulo Miguel de Macedo França

Escala: 1:50/1:2500

Designação: Reparação da Estrutura em Aço



Nº.Desenho:

02

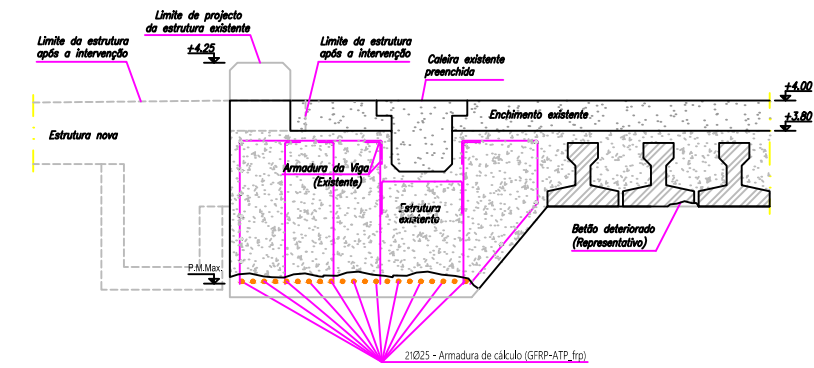
Data: 02/2017

Folha: 51

**FASE 3 (só nas áreas com armadura)**

Substituição das armaduras de aço pela armaduras de GFRP (zonas da face inferior das vigas com patologia)

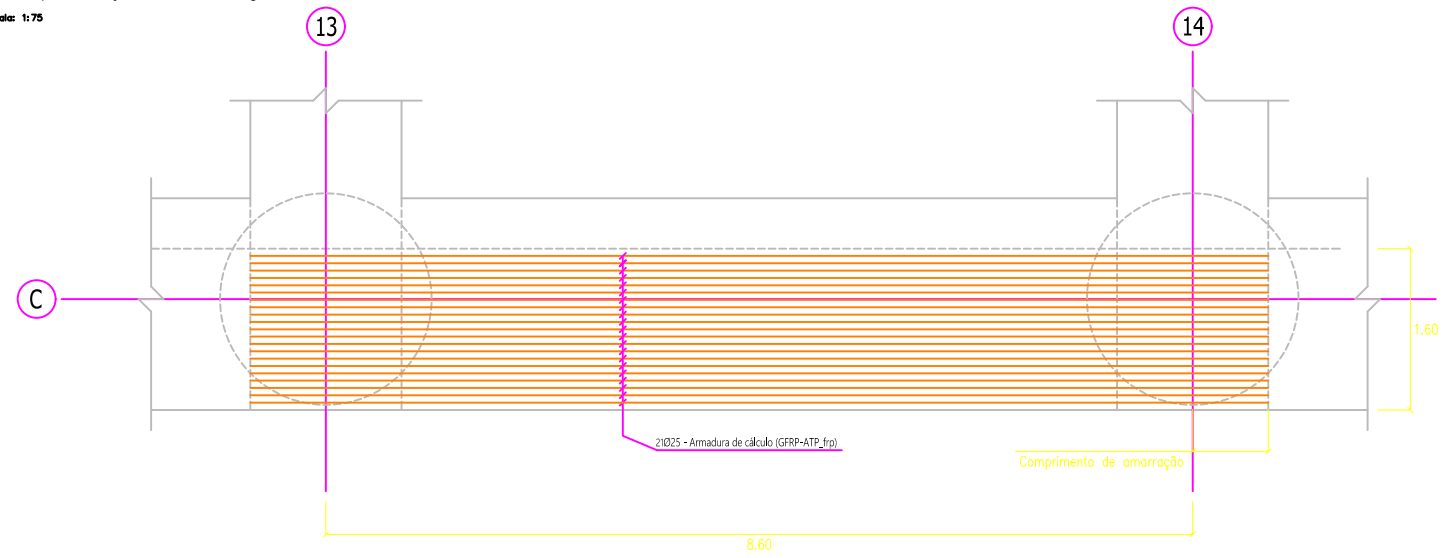
Escala: 1:50



**FASE 3 (Viga V.v2)**

Planta de pormenorização da face inferior da viga analisada

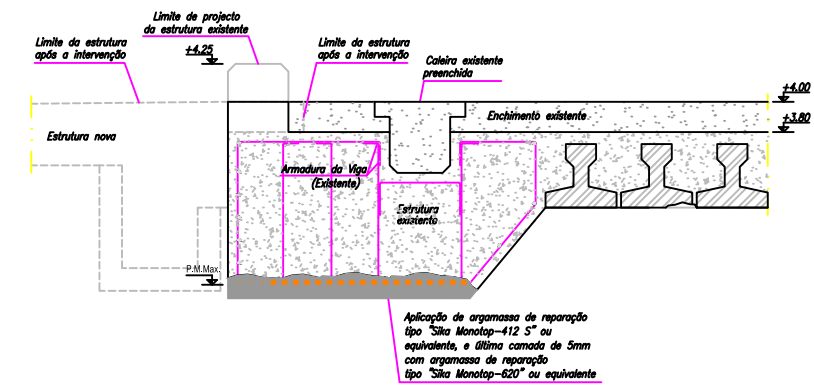
Escala: 1:75



**FASE 5a**

Preenchimento das zonas demolidas com argamassa de reparação

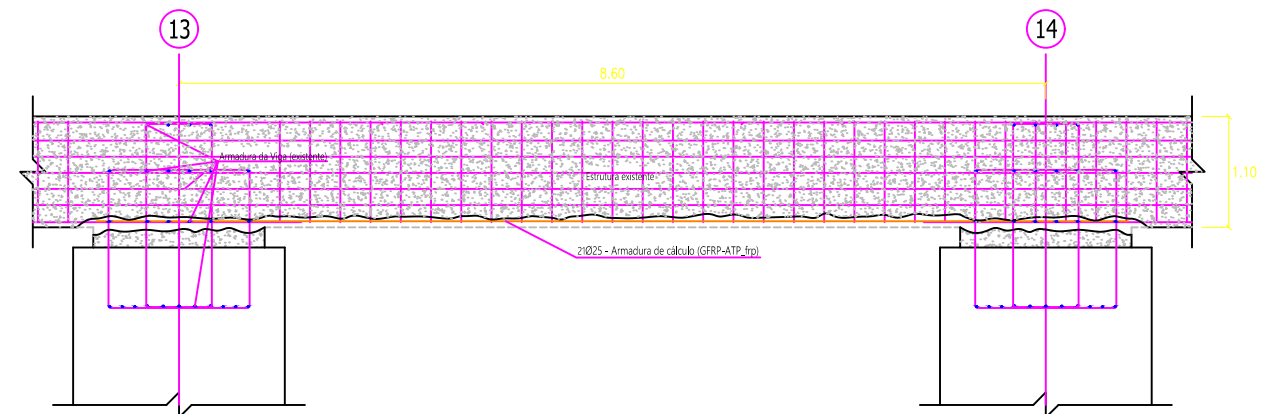
Escala: 1:50



**FASE 3**

Corte transversal tipo da viga

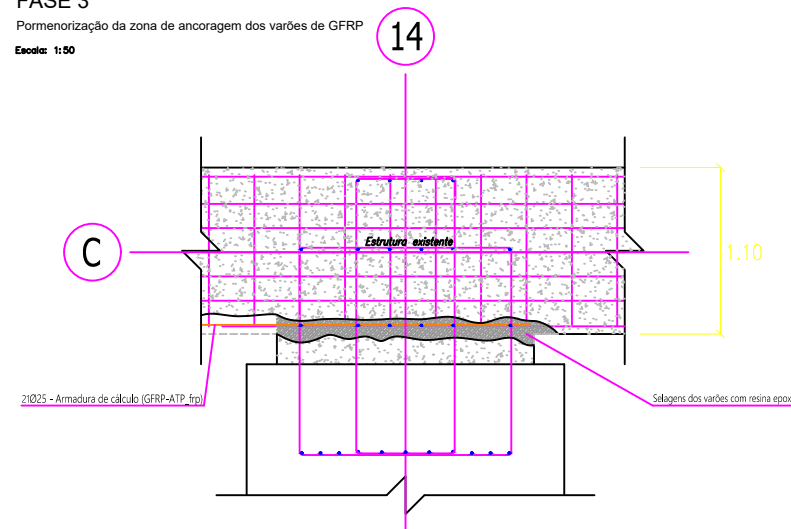
Escala: 1:75



**FASE 3**

Pormenorização da zona de ancoragem dos varões de GFRP

Escala: 1:50



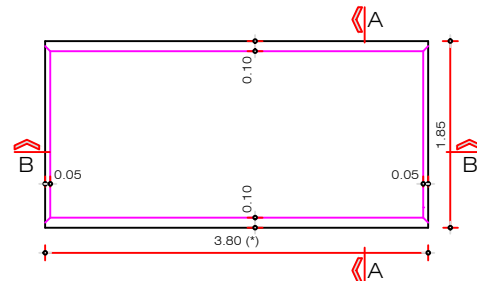
**NOTAS:**

1 - Para elaboração da reabilitação da viga em GFRP, o processo de reparação seguem o mesmo conceito utilizado na folha de desenho nº.2, na qual são adicionados as Fases 1 e 4 as restantes fases representas nesta folha.

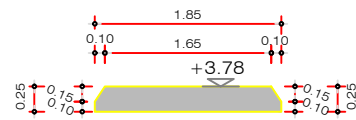
<b>Título:</b> A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo.			
<b>Estudante:</b> Juan Carlos de Freitas Gouveia		<b>Nº.Desenho:</b> 03	
<b>Orientador:</b> Paulo Miguel de Macedo França		<b>Data:</b> 02/2017	<b>Folha:</b> 53
<b>Escala:</b> 1:50/1:75	<b>Designação:</b> Reparação da Estrutura em GFRP		

Pré - Laje PL4 (5 Unidades)

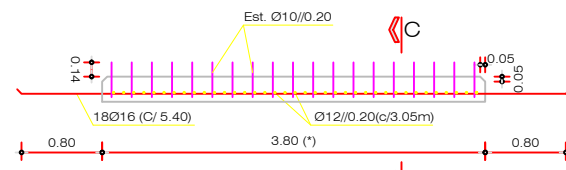
Esc 1:50



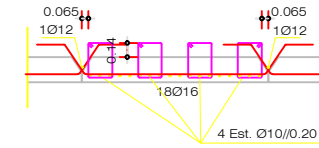
Geometria em Planta



Corte A-A



Corte B-B - Armadura



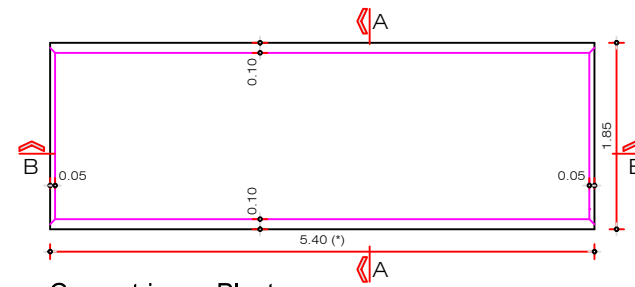
Corte C-C - Armadura



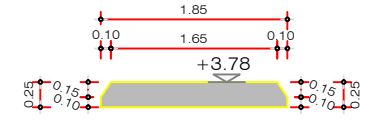
Planta esquemática da Laje maciça  
Escala: 1:150

Pré - Laje PL3 (5 Unidades)

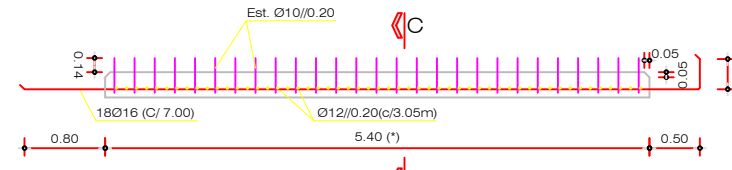
Esc 1:50



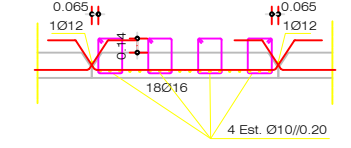
Geometria em Planta



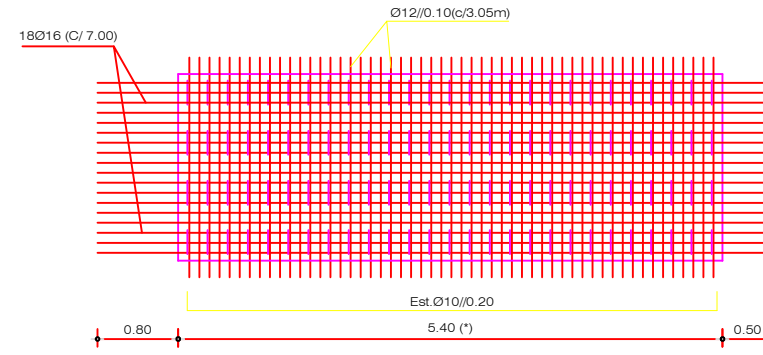
Corte A-A



Corte B-B - Armadura

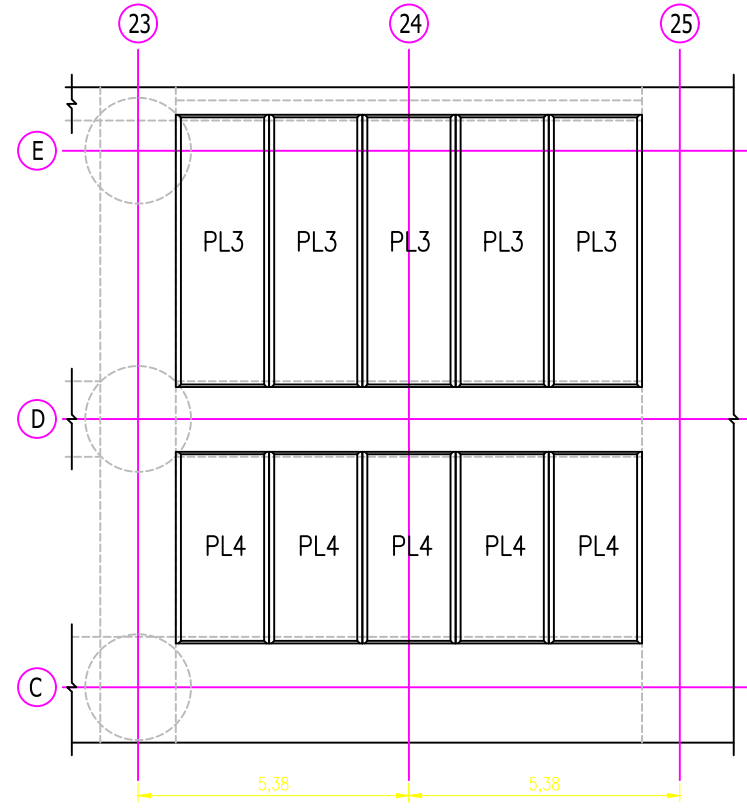


Corte C-C - Armadura



**MATERIAIS:**

- BETÃO:  
NP-EN 206-1:  
C35/45 - XS3 - CIO,2 - Dmax 20-S3
- ARMADURAS:  
AÇO: A500NR
- RECOBRIMENTO DE ARMADURAS:  
EM LAJES: 5,5 cm



**Título:** A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo.

**Estudante:** Juan Carlos de Freitas Gouveia

**Orientador:** Paulo Miguel de Macedo França

**Escala:** 1:50/1:150

**Designação:** Betão Armado\_Pré-lajes em Aço

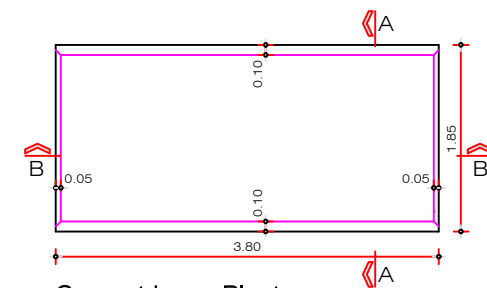


**Nº.Desenho:**  
04

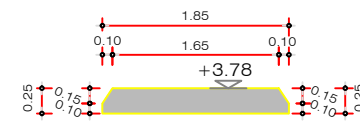
**Data:** 02/2017  
**Folha:** 55

### Pré - Laje PL4 (5 Unidades)

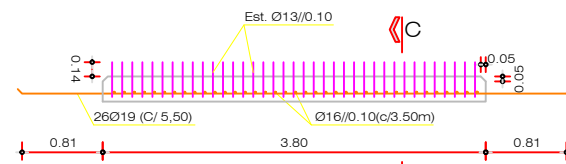
Esc 1:50



Geometria em Planta

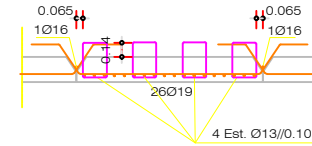


Corte A-A

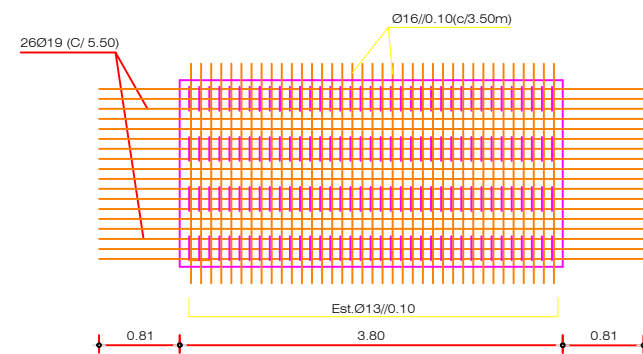


Corte B-B - Armadura

Esc. 1:50

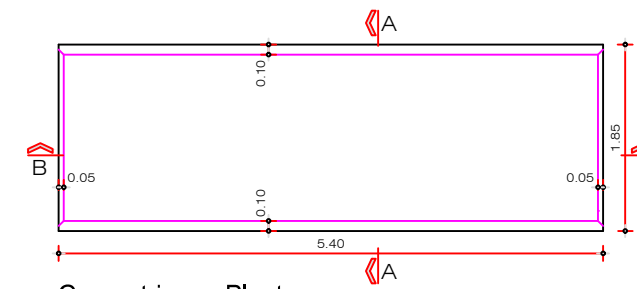


Corte C-C - Armadura

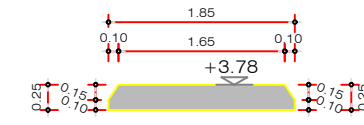


### Pré - Laje PL3 (5 Unidades)

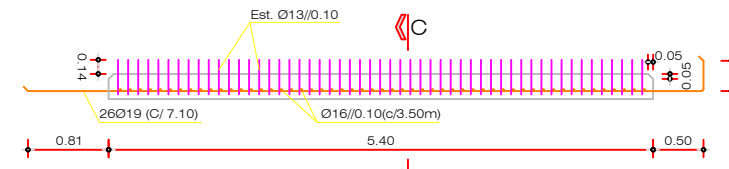
Esc 1:50



Geometria em Planta

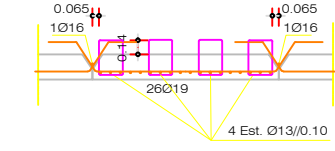


Corte A-A

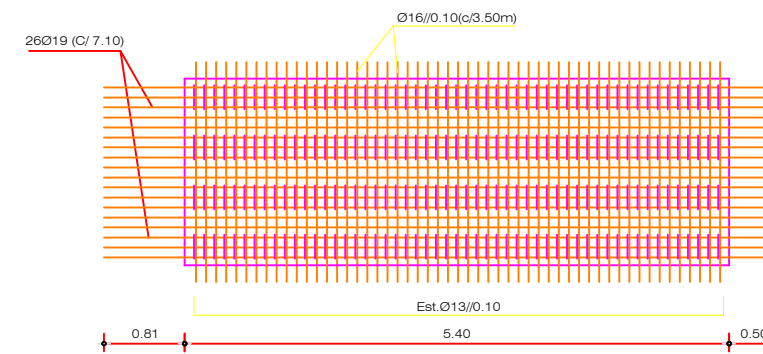


Corte B-B - Armadura

Esc. 1:50



Corte C-C - Armadura



#### MATERIAIS:

- BETÃO:  
NP-EN 206-1:  
C35/45 - XS3 - CIO,2 - Dmax 20-S3
- ARMADURAS:  
GFRP: RWB-V rebar
- RECOBRIMENTO DE ARMADURAS:  
EM LAJES: 5,5 cm

**Título:** A construção em betão armado com armaduras de GFRP e o seu benefício financeiro a longo prazo.

**Estudante:** Juan Carlos de Freitas Gouveia

**Orientador:** Paulo Miguel de Macedo França

**Escala:** 1:500

**Designação:** Betão Armado\_Pré-lajes em GFRP



**Nº.Desenho:**

05

**Data:**  
02/2017

**Folha:**  
57

# Capítulo 4

---

## Análise de custos-benefícios

Para podermos demonstrar os benefícios financeiros a longo prazo da utilização das armaduras em GFRP em substituição das armaduras em aço devido aos custos que estão relacionados com a deterioração das armaduras, tivemos de fazer inicialmente duas análises. A primeira análise consistiu na abordagem dos custos de reparação da estrutura estudada, em que podemos observar, através das peças desenhadas do subcapítulo 3.7.1, os trabalhos realizados na reparação do cais. O custo associado à primeira análise vai depender do tipo de intervenção efetuado, reportando-se os valores obtidos ao caso estudado. Na segunda análise, abordou-se o conceito de “Valor atual líquido”. Este conceito tem como objetivo determinar o custo a longo prazo das reparações efetuadas, sendo que este valor irá variar dependendo da taxa de atualização e do ano da reparação, uma vez que na reabilitação dos elementos estruturais com varões de aço há a necessidade de se efetuar diversas reparações com o passar do tempo, como foi demonstrado no subcapítulo 2.1.6. Para podermos verificar os benefícios financeiros entre dois tipos de materiais com características diferentes como o aço e o GFRP, serão comparados os custos totais de cada material, os quais correspondem ao somatório dos custos de construção com os custos de reabilitação. Devido às armaduras em GFRP não serem produzidas em Portugal, será ainda necessário considerar o custo de transporte do material do país de produção para o país da reabilitação/construção.

### 4.1 Análise de custos de reparação com/sem a utilização de GFRP

Para a análise do custo inicial de reparação da estrutura em estudo, a primeira tarefa realizada foi examinarmos os valores obtidos pela matriz de orçamento na reabilitação/ampliação do cais, fornecido pela APRAM. Verificou-se que, no caso da reabilitação das vigas do cais, os valores apresentados não faziam referência aos trabalhos realizados e também não estavam representados os custos para cada operação realizada. Dessa maneira, optou-se por estudar o custo de cada operação de modo a representar o custo final da intervenção realizada.

Para ultrapassar a falta de dados acima referida, foi necessário a ajuda do Eng. Roberto Nepomuceno, da empresa JAP (José Avelino Pinto, Construção e Engenharia S.A), que nos forneceu os custos discriminados para cada operação, sendo que estão representados através da Tabela 4.1 os custos dos trabalhos realizados na reabilitação da estrutura, podendo-se visualizar, através das peças desenhadas do subcapítulo 3.7.5, os trabalhos efetuados.

Para o caso da reparação da laje, os valores dos custos da sua reabilitação estão representados na Tabela 4.2. Nesta reabilitação optou-se pela reconstrução da laje devido ao elevado estado de deterioração e da dificuldade da realização de trabalhos na parte inferior do cais. Os valores consubstanciados na Tabela 4.2 foram obtidos de acordo com a matriz de orçamento fornecida pela APRAM.

### 4.1.1 Estimativa do custo de reparação em aço

Para a estimativa do custo de reabilitação em aço no caso da estrutura analisada, o custo da reparação das armaduras corroídas apresenta duas hipóteses diferentes, como já tinha sido referido. Para a reabilitação das vigas, o custo total da intervenção efetuada tem o valor de 187,63€/m<sup>2</sup>. Esta intervenção passa pela remoção do betão e das armaduras contaminadas pelos cloretos, sendo posteriormente aplicado um novo recobrimento. Através da Tabela 4.1, podemos observar o custo de cada operação efetuada na reabilitação das vigas, estando representadas pelos artigos de 1.1 até 1.3 as seguintes descrições:

1.1 Inspeção visual, percussão com martelo para deteção de zonas com o betão a destacar e marcação das zonas danificadas;

1.2.1 Demolição do betão a reparar com martelo pneumático;

1.2.2 Decapagem das armaduras com escova de aço rotativa (ou substituição das mesmas) e limpeza antes da aplicação do revestimento anti-corrosivo das armaduras expostas;

1.2.3 Aplicação do revestimento anti-corrosivo para as armaduras do tipo "Sikatop Armatec-110 Epocem" ou equivalente, nas armaduras expostas;

1.2.4 Humedecimento da superfície com água;

1.2.5 Aplicação de argamassa de reparação estrutural tipo "Sika Monotop-412 S" com 4cm de espessura, e última camada de 15mm com argamassa de reparação estrutural tipo "Sika Monotop-620" ou equivalente);

1.3 Aplicação de revestimento de proteção tipo "Sika Ferrogard-903" ou equivalente (O Sika FerroGard-903 é uma impregnação tipo emulsão, com propriedades inibidoras de corrosão, destinada a superfícies de betão armado.).

A representar as categorias de 1 a 3 na secção da mão-se-obra da Tabela 4.1 (que corresponde à designação do profissional de trabalho) e as designações de 1 a 4 na secção dos equipamentos da mesma tabela (que corresponde na designação dos equipamentos a utilizar), temos:

Cat.1 1 Pedreiro;

Cat.2 1 Pedreiro e 1 Servente

Cat.3 1 Pedreiro e 2 Serventes

Des.1 Considerando um martelo pneumático e respetivo equipamento, acessórios;

Des.2 Considerando um martelo elétrico e respetivo equipamento, acessórios;

Des.3 Considerando um martelo elétrico com rotação e misturador.

Tabela 4.1 – Quadro de resumo do orçamento para as vigas.

Artigo		1.1	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4	1.2.5	1.3	
Unidade		m <sup>2</sup>							Un.
Quantidade		1							1
Matéria Prima	Un			kg	kg		Kg	kg	
	Rendimento			20	2		19	2,02	0,5
	Preço Unitário (€/rend.)			1,45	7,50		24,65	20,50	8,11
	Preço Total (€)			5,80	15,00		93,67	31,06	4,06
Mão-de-Obra	Categoria	Cat.1	Cat.2	Cat.2	Cat.2	Cat.2	Cat.3	Cat.3	
	Un	h	h	h	h	H	h	h	
	Rendimento	0,08	0,32	0,40	0,40	0,02	0,40	0,27	
	Preço Unitário (€/rend.)	9,50	16,00	16,00	16,00	16,00	22,50	22,50	
	Preço Total (€)	0,76	5,12	6,40	6,40	0,32	9,00	6,00	
Equipamento	Designação		Des.1	Des.2	Des.3		Des.3		
	Un		h	h	h		h		
	Rendimento		0,32	0,4	0,4		0,4		
	Preço Unitário (€/rend.)		3,26	2,50	2,50		2,50		
	Preço Total (€)		1,04	1,00	1,00		1,00		
Custo Un. do Art.º (€/m <sup>2</sup> )		0,76	6,16	13,20	22,40	0,32	105,64	10,06	
Custo Total (€/m <sup>2</sup> )									187,63

Para finalizar a análise do custo da reparação das vigas, temos de salientar que os valores da Tabela 4.1 não têm em conta o custo da necessidade de consideração de andaimes ou de outras plataformas de trabalho, e que os valores apresentados corresponderam a preço secos, ou seja, sem inclusão de custos gerais de estaleiro, custo indiretos e margens de lucro da empreitada.

Para o caso da laje, o custo de reparação apresenta valores diferentes dos da reabilitação das vigas e podem ser demonstrados, através da Tabela 4.2, os trabalhos realizados para reconstrução da laje maciça. O custo apurado na seguinte tabela tem em conta o custo de fabrico dos elementos pré-fabricados, a colocação em obra e a aplicação dos restantes elementos de reforço. Esta laje é constituída por 10 painéis pré-fabricados.

Para a obtenção destes valores, foi necessário realizar uma pesquisa na matriz de orçamento realizada pela empresa de construção civil CONSULMAR para efeitos da reabilitação/ampliação do cais norte do Funchal, sendo que, para as subsequentes descrições dos trabalhos realizados, a matriz nos apresenta os seguintes valores obtidos (Tabela 4.2). Ao contrário da análise de custo da reabilitação das vigas para a reabilitação da laje, os custos apresentados correspondem ao preço com margens de lucro.

Tabela 4.2 – Quadro de resumo do orçamento para a laje maciça.

Artigo	Descrição	Un	Quantidade	Preço Un.	Parciais	Totais
<b>1</b>	Betões					
<b>1.1</b>	Pré-Fabricados					
<b>1.1.1</b>	Betão C35 / 45 XS3, para armar, incluindo cofragens, fabrico e colocação em obra, em pré-lajes	m <sup>3</sup>	20,542	300,00 €	6 162,63 €	
<b>1.1.2</b>	Armazenamento, transporte e colocação de pré-lajes em obra, incluindo carga e descarga	Un	10	100,00 €	1 000,00 €	
<b>1.2</b>	"In situ"					
<b>1.2.1</b>	Betão C35 / 45 XS3, para armar, incluindo cofragens, fabrico e colocação em obra, em lajes	m <sup>3</sup>	30,757	130,00 €	3 998,40 €	
						11 161,02 €
<b>2</b>	Armaduras					
<b>2.1</b>	Armaduras em aço A500 NR, incluindo moldagem, sobreposições, perdas, acessórios de montagem e colocação:					
<b>2.1.1</b>	Em pré-Lajes	kg	3 854,26	1,00 €	3 854,26 €	
<b>2.1.2</b>	Em lajes	kg	13 535,22	1,00 €	13 535,22 €	
						17 389,48 €
<b>Custo total da operação</b>						<b>28 550,50 €</b>

#### 4.1.2 Estimativa do custo de reparação em GFRP

Para a análise da estimativa do custo de reparação em GFRP - devido à falta de informação resultante do facto de se tratar de um material novo, que na área da reabilitação em Portugal não tem tido uma aceitação por causa do seu custo inicial ser elevado quando comparado com o custo dos varões aço, optou-se, tanto no caso das vigas como no da laje, por assumir os mesmos custos de reparação utilizados nas Tabelas 4.1 e 4.2, sendo que foi necessário realizar algumas alterações, as quais passariam pela determinação do custo do material e do custo de transporte.

Para poder-se determinar o custo dos varões de GFRP, foi necessário realizar uma pesquisa a diferentes tipos de fabricantes, tendo chegado a uma conclusão, patente na Tabela 4.3. Para obtenção dos valores da Tabela 4.2, foi necessário mantermos contacto com os responsáveis do departamento comercial de cada uma das empresas sondadas. Assim, no caso dos varões ASLAN, temos em Portugal um representante que é o BIU Internacional [26] e que está representado pelo Sr. Eng. Erik Ulrix. No caso dos varões ATP-frp [27], o representante é o Sr. Aniello Giamundo e a comercialização dos varões Schöck ComBar, está representada pelo Sra. Silke Friedrich [28].

**Tabela 4.3 – Tabela de custo dos varões de GFRP.**

Diâmetro (mm)	Custo (€/m)		
	ATP-frp	Schöck ComBar	Aslan 100
6	-	-	1,30
8	-	2,45	1,50
9	-	-	2,00
10	1,97	-	-
12	2,27	4,70	3,05
14	2,62	-	-
16	-	6,30	4,15
18	3,03	-	-
19	3,49	-	5,50
20	4,00	9,70	-
22	5,00	-	7,60
24	5,62	-	-
25	5,92	13,80	8,80
26	6,30	-	-
28	7,03	-	-
30	7,82	-	-
32	8,66	21,30	-

Os valores referentes ao custo de transporte foram obtidos através da recolha de informações de um transitário na Ilha da Madeira “i9plano” [29], sendo que de acordo com algumas especificações (peso, volume, o destino e o destinatário) pedidas pelo Sr. Mark Gouveia e Sr. Rui Azevedo, elementos responsáveis pela análise de custo de transporte, foram obtidos os seguintes os valores (os valores abaixo descritos correspondem aos elementos de GFRP representados nas peças desenhadas do subcapítulo 3.7.4):

1º orçamento – Transporte terrestre/marítimo (Itália/ Lisboa, Lisboa/ Funchal); 22 Volume de 4 186 kg; Cbm: 46,30 m<sup>3</sup>; custo total do frete terrestre mais frete marítimo: 6 055,75€;

2º orçamento – Transporte terrestre/marítimo (Alemanha/ Lisboa, Lisboa/ Funchal); 22 Volume de 3 443 kg; Cbm: 53,78 m<sup>3</sup>; custo total do frete terrestre mais frete marítimo: 5 768,45€;

Após conhecer-se o custo dos varões de fibra de vidro e custo de transporte, seria necessário realizar algumas alterações nos artigos das Tabelas 4.1 e 4.2, de maneira a determinarmos o custo final para a reabilitação do elemento analisados com GFRP. No caso da reabilitação das vigas com varões de GFRP, umas das alterações passava pela exclusão dos artigos 1.2.3 e 1.3 da Tabela 4.1 (que representam a aplicação do revestimento anti-corrosivo nas armaduras e o revestimento de proteção a penetração dos cloretos no betão) e pelo adição de dois novos artigos - 2.1.1 e 2.2 (que representam o custo da reparação com GFRP e custo de transporte e colocação das armaduras de GFRP em obra). Na Tabela 4.4, está representado o custo total da reabilitação das duas vigas, com varões de GFRP Schöck. No caso da determinação do custo da reabilitação da laje maciça, optámos por utilizar o mesmo conceito das vigas reabilitadas com varões de GFRP, sendo que na Tabela 4.5 podemos observar as alterações efetuadas, a estes valores se devendo incluir o custo do betão da Tabela 4.2.

Tabela 4.4 - Quadro de resumo do orçamento para as vigas em GFRP

Artigo		2.1.1	2.2
Descrição		Substituição dos varões de aço por varões de fibra de vidro GFRP	Transporte e colocação das armaduras de GFRP em obra, incluindo carga e descarga
Un		m <sup>2</sup>	kg
Quantidade		14,91	315,30
Matérias Primas	Un	m	
	Quantidade	215,88	
	Preço Unitário	5,96 €/m	
	Preço Total	1 286,64 €	634,53 €
Mão-de-Obra	Categoria	1 Pedreiro e 1 Servente	
	Un	H	
	Rendimento	0,4	
	Preço Unitário	16,00 €	
	Preço Total	6,40 €/m <sup>2</sup>	
Equipamento	Designação	Considerando um martelo elétrico e respetivo equipamento, acessório.	
	Un	H	
	Rendimento	0,4	
	Preço Unitário	2,50 €	
	Preço Total	1,00 €/m <sup>2</sup>	
Custo Unitário		1 396,98 €	634,53 €
Custo Total da operação		8 096,59 €	

Tabela 4.5 - Quadro de resumo do orçamento para a laje maciça em GFRP.

2.2	Armaduras em GFRP, incluindo sobreposições, acessórios de montagem e colocação:				
2.2.1	Em pré-Lajes (Schöck Combar)	m			
	Ø16 -	1 506,50	6,30 €	9 490,95 €	
	Ø12 -	4 169,74	5,80 €	24 184,49 €	
					33 675,44 €
2.2.2	Em Lajes (Schöck Combar)	m			
	Ø16 -	1 257,72	6,30 €	7 923,64 €	
	Ø12 -	1 462,50	5,80 €	8 482,50 €	
					16 406,14 €
2.2.3	Transporte e colocação das armaduras de GFRP em obra, incluindo carga e descarga	kg			
	Schöck Combar				
		3 127,07		5 133,92 €	5 133,92 €
	<b>Custo total</b>				<b>55 215,50 €</b>

Representados na Tabela 4.6, tem-se os custos finais para a reabilitação das 2 vigas e da laje em aço e em GFRP. Verificamos que o valor do custo inicial da reabilitação das vigas com armaduras de GFRP é aproximadamente 1,5 vezes superior ao da reabilitação com armaduras de aço. No caso da laje de GFRP, o seu custo é aproximadamente 2 vezes superior ao da laje com armaduras em aço.

**Tabela 4.6 – Custos totais para a reabilitação das 2 vigas e da laje.**

<b>Elemento estrutural/ fornecedor</b>	<b>Custo Total [€]</b>
Viga em Aço	5 595,00
Viga em GFRP (ATP-frp)	7 196,28
Viga em GFRP (ASLAN)	8 400,07
Viga em GFRP (Schöck ComBar)	8 096,59
Laje em Aço	28 550,50
Laje em GFRP (ATP-frp)	44 414,73
Laje em GFRP (ASLAN)	51 257,72
Laje em GFRP (Schöck ComBar)	66 376,52

## 4.2 Análise de custos a longo prazo

O processo de apuramento do custo a longo prazo, nesta dissertação implica analisar todos os custos relacionados com as reabilitações efetuadas nas estruturas de betão armado durante o seu período de vida útil e compará-los com o custo inicial da utilização dos varões de GFRP como substituto dos varões de aço, atendendo a que, em condições ambientais desfavoráveis, as construções de betão armado ao longo do tempo tendem a sofrer algumas incorreções devido à corrosão das armaduras. Estas incorreções não são inicialmente esclarecidas ao dono de obra; desta maneira, o custo final de uma construção passaria pela contabilização do custo inicial da construção mais o custo de uma eventual inspeção periódica ou de uma possível reparação.

Para se poder simular o valor total dos gastos implicados nas inúmeras reparações que serão necessárias realizar ao longo da vida útil de um projeto, optou-se por estudar o mesmo conceito já investigado pelas dissertações do Tomás da Silva [30] e da Cláudia Canha [31], sendo conceito abordado é designado como “Valor atual líquido (VAL)”. O VAL (em inglês Net Present Value – NPV) é a soma do valor das receitas e custos provenientes de um dado projeto ao longo do seu tempo de vida útil, descontados para o presente a uma taxa de atualização dada [32].

Para determinarmos o valor atual líquido (equação 4.1), é necessário, numa primeira fase, fazer uma análise da taxa de atualização (equação 4.2). Este fator tem como objetivo atualizar todos os custos para um determinado ano de referência, que normalmente é o ano em que são efetuados os investimentos [30] e [31].

$$C_i = C_{i,j}/(1 + r)^t \quad [4.1]$$

Em que:

$C_i$  – Custo no ano de referência (€);

$C_{i,j}$  – Custo ao fim de j anos (€);

t – Intervalo de tempo entre o ano de referência e o ano em que é tido o encargo (anos);

r – Taxa de atualização (%).

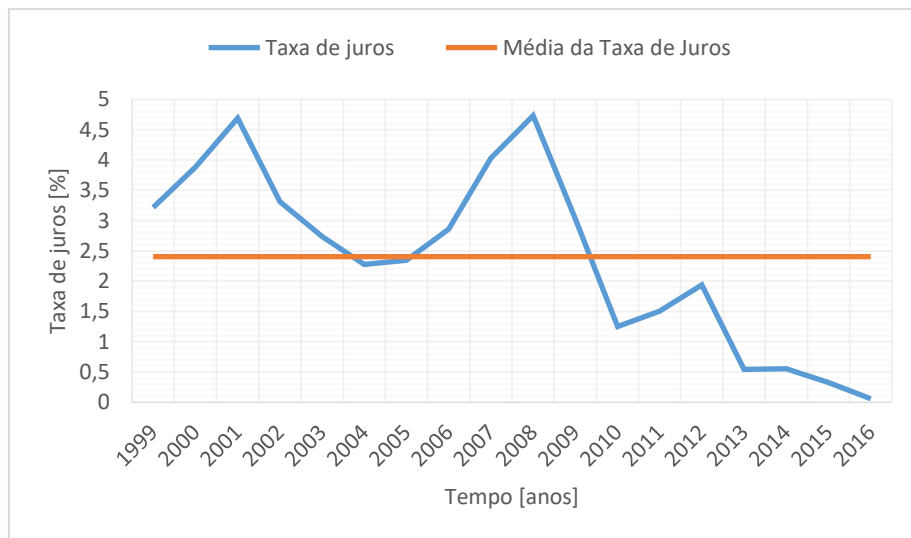
$$r = \frac{1 + r_{\text{juros}}}{1 + r_{\text{inflação}}} - 1 \quad [4.2]$$

Onde:

$r_{\text{juros}}$  – Taxa de juros (%);

$r_{\text{inflação}}$  – Taxa de inflação (%).

A taxa de atualização está dividida em duas partes: a primeira parte faz referência à taxa de juros, que corresponde ao preço ou valor do dinheiro. Esta taxa pode ser obtida através da taxa Euribor (Euribor é a taxa de juros média utilizada por um grupo representativo de bancos nos empréstimos mútuos realizados em euros [33]), a qual pode ser observada através da representação gráfica da Figura 4.1, em que se visualiza uma variação da taxa de juros ao longo de um período de 17 anos, verificando uma contínua variação do seu valor entre os 0% e 5%. Foi também necessário determinar uma média da taxa de juros referente ao período compreendido entre 1999 e 2016, que apresenta o valor de 2,4%.



**Figura 4.1 – Taxa de juros Euribor [33].**

A segunda parte reporta-se à taxa inflação, que representa o parâmetro que indica o ganho ou perda do poder de compra do valor pecuniário que o dono de obra tem em sua posse [30]. Para a obtenção do seu valor, recorreu-se ao IPC (índice de preços ao consumidor). Este indicador dá-nos o valor referente a taxa

de inflação em Portugal no período entre 1999 e 2016, em que se verificou uma variação de 4% aos -0,5%, como se pode observar na Figura 4.2. Do mesmo modo a que se procedeu relativamente à taxa de juro, foi necessário determinar o valor médio da taxa de inflação, tendo o seu valor sido de 2,01%.

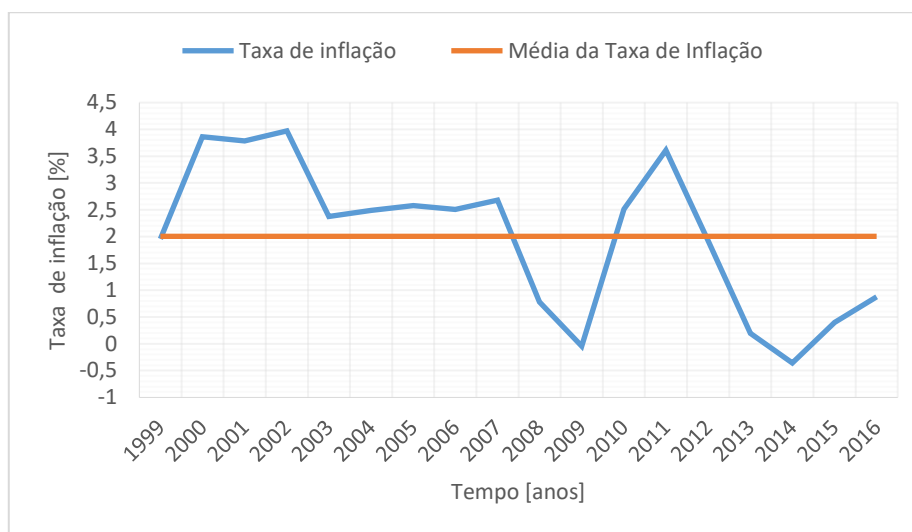


Figura 4.2 – Taxa de inflação entre o ano 1999 e 2016 [33].

Devido à incerteza dos valores futuros da taxa de inflação e da taxa de juros, será necessário fazer uma análise de sensibilidade das médias acima referidas, na qual ira-se variar as taxas em 1% de diferença entre elas, obtendo o resultado da Tabela 4.7. Assim sendo, na coluna “variação das taxas”, o significado de “+1 / -1” representa o aumento de +1% para a taxa de juros e a diminuição de -1% para taxa de inflação e o vice-versa acontece com o “-1 / +1”.

Tabela 4.7 – Variação de taxas

Variação das Taxas [%]	Ano	Taxa de juros [%]	Taxa de inflação [%]	Taxa de atualização [%]
Sem variação		2,40	2,01	0,39
" +1 / -1 "	1999 até 2016	3,40	1,01	2,37
" -1 / +1 "		1,40	3,01	-1,55

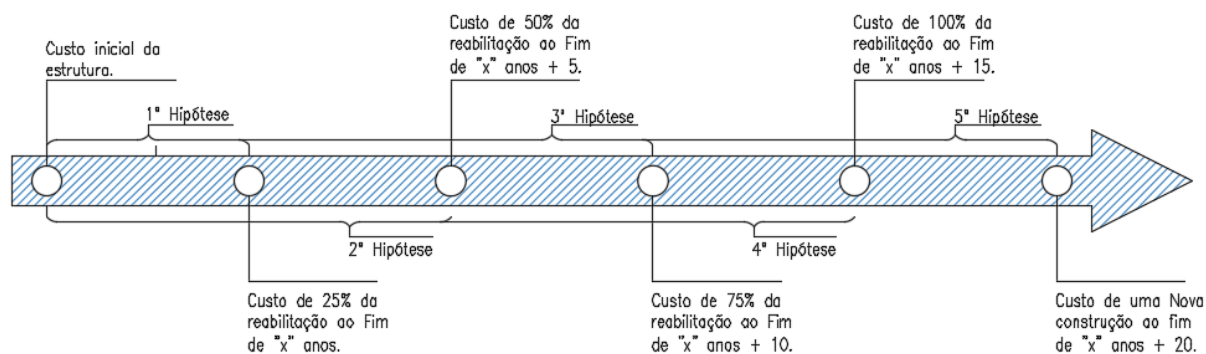
#### 4.2.1 Resultados finais dos custos a longo prazo

Para finalizarmos a análise do capítulo 4, recorrendo aos subcapítulos 2.1.6 e 4.2, onde se irá demonstrar os benefícios financeiros da utilização dos varões de GFRP. Seguidamente, serão representados quatro possíveis cenários de degradação nas estruturas em betão armado, sendo que cada cenário apresentará 5 hipóteses de prováveis custos finais de reabilitação.

Para cada hipótese, teremos o custo inicial da estrutura em betão armado mais o custo da percentagem de área reabilitada para a mesma estrutura ao fim de “x” anos de deterioração; o tempo de deterioração é determinado de acordo com a especificação E 465 [2]. Dado que a especificação não faz referência ao estado ou percentagem de degradação dos elementos de betão armado, considerou-se que os

resultados obtidos para o tempo de vida útil determinado no ponto 2.1.7 do 2º capítulo corresponderiam à percentagem de degradação de 25% do elemento estrutural. Desta maneira, para a 1ª hipótese da reabilitação/construção ter-se-ia o custo total da construção em aço mais o custo da reabilitação de 25% do elemento construído, cujo conceito podemos observar através da Figura 4.3.

Para as restantes hipóteses (da 2ª até 5ª) serão adicionados os valores de 5, 10, 15 e 20 (em anos) de forma a simular o estado deterioração de 50%, 75% e 100% e da construção de uma nova estrutura, expostas às mesmas condições ambientais da 1ª hipótese.



**Figura 4.3 – Esquema representativo dos custos totais possíveis.**

Devido aos resultados obtidos dos gráficos das Figuras 2.10, 2.11 e 2.12, para a análise dos custos a longo prazo apenas foram considerados os tempos de vida útil para os tipos de cimentos expostos às seguintes condições ambientais: XS1 (CEM I ou II/A) e XS3 (CEM II/B até V). Para os mesmos tipos de cimentos expostos a condições ambientais diferentes, os valores obtidos não influenciaram os resultados da análise económica, visto que, para o caso do tipo de cimento CEM II/B até V exposto à condição ambiental XS1, o tempo de vida útil é superior ao o tempo de vida útil pretendido (50 anos), o que torna o uso dos varões de GFRP economicamente desvantajoso, mas no caso do tipo de cimento CEM I ou II/A exposto à condição ambiental XS3, a situação inverte-se, apresentando uma solução vantajosa a aplicação da fibra de vidro.

Nas seguintes tabelas dos custos finais para cada cenário, estarão apresentadas as percentagens de intervenções realizadas, o custo inicial das construções ou reparações, os custos das reabilitações atualizadas (que corresponde à equação 4.1) e o custo final (que representa o somatório do custo inicial ao custo por cada reparação efetuada até ao fim do tempo de vida útil da estrutura). A acompanhar as tabelas ter-se-á a representação gráfica dos valores exibidos nas tabelas, sendo que nos gráficos subsequentes estarão ilustrados os custos atualizados para cada intervenção efetuada na estrutura com varões de aço, o custo em reabilitar a mesma estrutura com GFRP e custo de construir de raiz uma nova estrutura em betão armado.

Os custos das reparações ou das construções fazem referência ao ano de 2016; contudo a reabilitação da estrutura foi efetuada no ano de 2015. Dado que, na diferença entre os anos, não houve uma

variação brusca da taxa de inflação ou de juros, admitir-se-á que os valores de custos pesquisados para a reabilitação, seja com varões de aço ou de GFRP, foram iguais no ano da reabilitação da estrutura.

Para elaborar-se uma análise de custo-benefício para cada cenário, as conclusões retiradas consistiram na análise comparativa dos recobrimentos utilizados nesta dissertação para os diferentes cenários com os recobrimentos mínimos referenciados pela Norma Europeia EC2 [13]. Na Tabela 4.8, podemos observar os valores mínimos recomendados para as diferentes classes estruturais, sendo que, no caso em estudo, correspondem à classe S4 (relativa a um período de vida útil de 50 anos), face à qual os recobrimentos serão de 3,5cm para a classe de exposição ambiental XS1 e de 4,5cm para a classe XS3.

**Tabela 4.8 – Valores do recobrimento mínimo,  $c_{min,dur}$ , requerido relativos à durabilidade das armaduras para betão armado, de acordo com a EN 10080 [13].**

Classe Estrutural	Classe de Exposição Ambiental						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

No 1º e 2º cenários, uma vez que a estrutura em análise (a Laje) foi totalmente recuperada, isto é, foi feita uma nova construção, os valores atribuídos para as eventuais reparações da laje seguem os mesmos procedimentos de reabilitação das vigas Tabela 4.1.

**1º cenário** – tem-se o custo da construção mais o custo das possíveis reparações necessárias para a reabilitação da laje maciça, sendo que nesta primeira situação, foram admitidos os seguintes critérios:

- Utilização do tipo cimento (CEM I ou II/A);
- Classe de exposição ambiental XS1 (que corresponde à situação do betão armado estar exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contacto direto com a água do mar [13]);
- Recobrimentos de 4,5cm e 5,5cm;
- Classes de resistência C35/45, C40/50 e C30/37;
- Período de vida útil da estrutura de 50 anos.

Devido à utilização deste tipo de cimento, este 1º apresentaram um maior número de reparações necessárias durante o período de vida útil da estrutura, como já tinha sido demonstrado na Figura 2.11.

Tabela 4.9 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 5,5cm.

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação/ nova construção	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	38 367,96 €
	2053	4 390,30 €	0,39%	5 090,16 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	48 775,31 €
	2063	8 780,61 €	0,39%	10 584,40 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	43 295,30 €
	2044	10 779,51 €	0,39%	14 744,80 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	48 596,60 €
	2049	13 170,91 €	0,39%	20 046,10 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	61 781,35 €
	2054	28 550,50 €	0,39%	33 230,85 €	

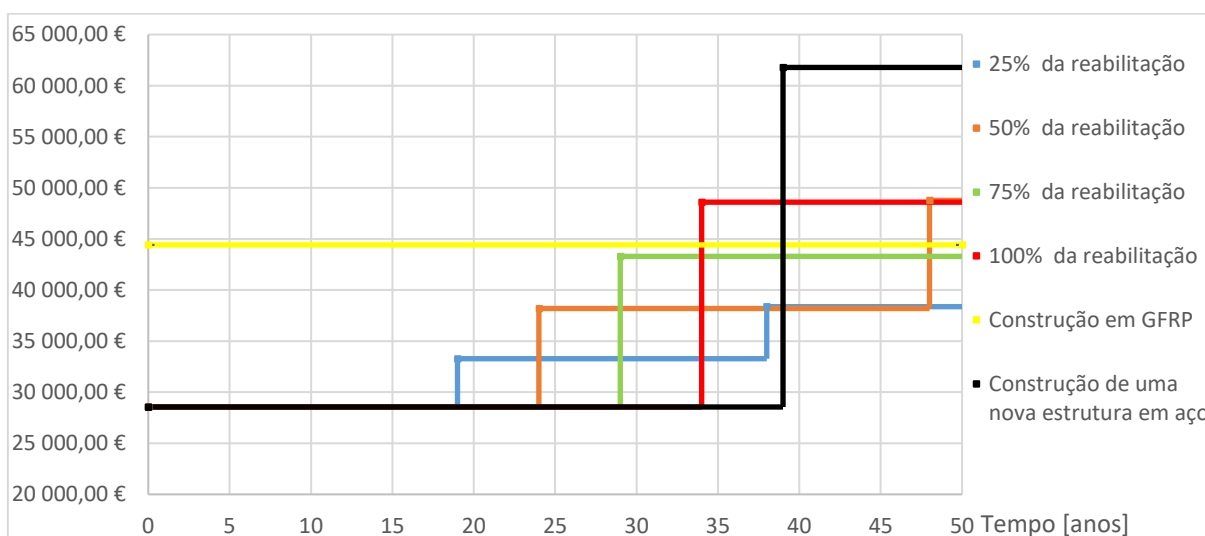


Figura 4.4 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C35/45 e rec. 5,5cm.

Relativamente ao betão de classe de resistência C35/45, em que o recobrimento utilizado seria de 5,5cm para a classe de exposição ambiental e o tipo de cimento anteriormente referido, no respeitante à utilização das fibras de vidro para a estrutura analisada que cumpra com os critérios, apenas se torna vantajosa a sua aplicação se houver uma nova reabilitação da estrutura de 50% (linha de cor laranja-Figura 4.4) ou 100% (linha de cor vermelha-Figura 4.4) do elemento estrutural ou ainda se for necessário reconstruir de novo a mesma estrutura (linha de cor negra-Figura 4.4). Para o caso de se construir em aço e apenas ser reparado 25% (linha de cor azul-Figura 4.4) ou 75% (linha de cor verde-Figura 4.4), a aplicação dos varões de GFRP torna-se economicamente desvantajosa. É de salientar ainda que para o mesmo betão, sendo o recobrimento empregue de 4,5cm, o uso dos varões de fibra de vidro se torna vantajoso a longo prazo quando comparado com os varões de aço, mesmo que apresentem um valor inicial de construção superior ao da construção em aço. Através da Tabela 4.9 podemos observar os valores obtidos referentes ao custo de reparação e ao custo de reparação atualizado para o 1º cenário.

Tabela 4.10 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm.

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação/ nova construção	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	46 519,66 €
	2063	3 991,74 €	0,39%	4 811,76 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	45 135,93 €
	2049	7 983,48 €	0,39%	9 113,13 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	55 808,64 €
	2059	11 975,21 €	0,39%	14 212,26 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	46 286,85 €
	2042	15 966,95 €	0,39%	17 736,35 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	60 888,14 €
	2047	28 550,50 €	0,39%	32 337,64 €	

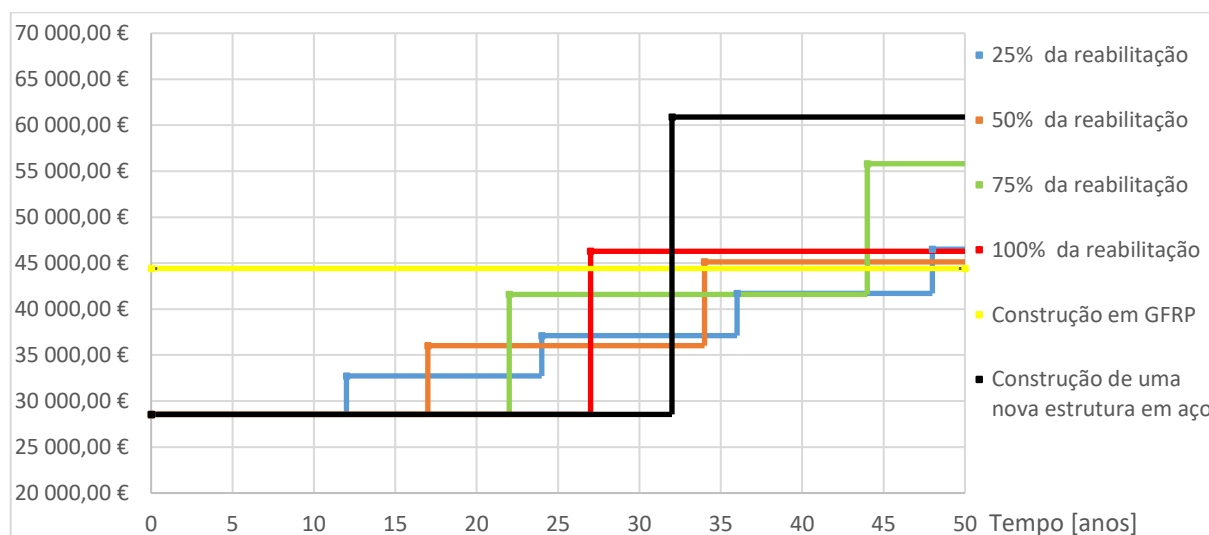


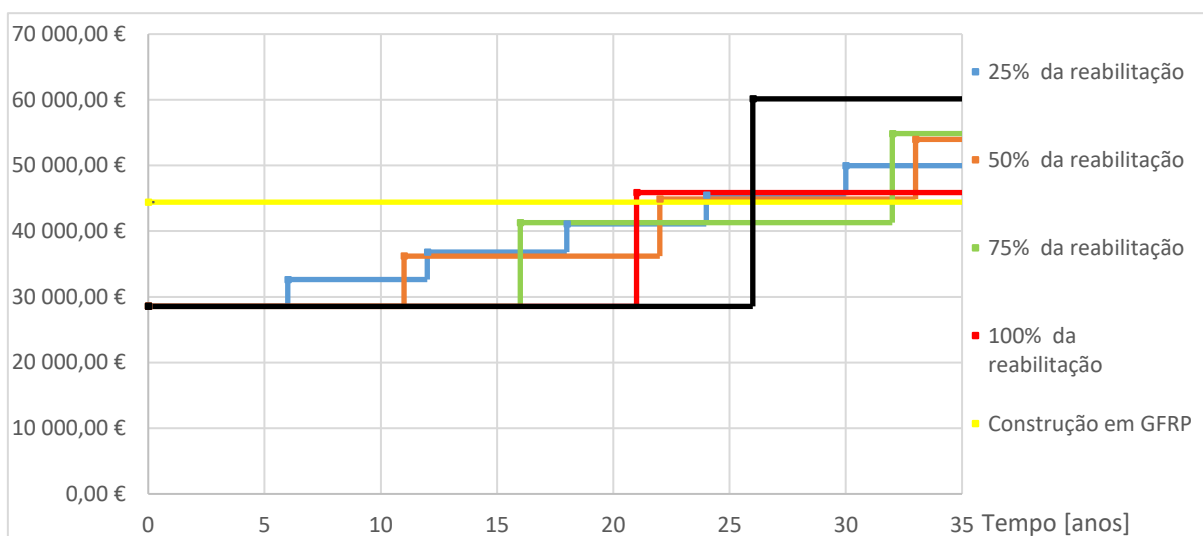
Figura 4.5 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C40/50 e rec. 4,5cm.

Da Figura 4.4 e da Tabela 4.10, retiram-se as seguintes conclusões. Conclui-se que a utilização do GFRP como elemento a substituir os varões de aço, para um cenário como o primeiro, em que o betão e o recobrimento utilizados sejam de classe resistente C40/50 e com 4,5cm de espessura, o custo do uso dos varões de fibra de vidro a longo prazo é inferior ao custo final de uma construção inicial com aço e de uma reabilitação ao longo do tempo em aço.

Pode-se observar, através do gráfico Figura 4.4, que apenas são necessárias 5 reabilitações de 25% do elemento estrutural (linha de cor azul) para que o custo de utilizar o GFRP seja benéfico em relação ao custo de reabilitar com varões de aço. É de salientar ainda que, qualquer que seja o estado de degradação do elemento estrutural, a reabilitação com varões em aço num período de vida útil de 50 anos e nos critérios acima referidos o seu custo de reparação apresenta algumas desvantagens a longo prazo.

**Tabela 4.11 – Custo Final para o 1º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da construção/ reparação.	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	49 969,39 €
	2045	3 991,74 €	0,39%	4 486,17 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	53 974,34 €
	2048	7 983,48 €	0,39%	9 077,72 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	54 858,92 €
	2047	11 975,21 €	0,39%	13 563,69 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	64 680,16 €
	2057	15 966,95 €	0,39%	18 802,74 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	60 141,66 €
	2041	28 550,50 €	0,39%	31 591,16 €	



**Figura 4.6 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 1º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm.**

Da Figura 4.6 e da Tabela 4.11, conclui-se que em 35 anos do período de vida útil da estrutura, em que é utilizado um betão C30/37 com um recobrimento de 4,5cm, os valores obtidos não beneficiam a utilização dos varões de aço para o tipo de cimento (CEM I ou II/A) expostos às condições ambientais XS1. Como já tinha sido demonstrado na figura anterior, a longo prazo, os elementos de reforço em GFRP garantem um melhor custo-benefício.

Conclusões do 1º cenário:

As conclusões a retirar do primeiro cenário, em que o betão utilizado é representado pela classe de resistência C35/45, C40/50 ou C30/37, e com um tipo de cimento (CEM I ou CEM II) exposto às condições ambientais XS1 para um recobrimento mínimo exigido pela Norma Europeia, que é de 3,5cm para a classe estrutural S4, são que os valores obtidos para qualquer dos recobrimentos analisados garantem que, para uma laje exposta às condições anteriormente referidas, a utilização das armaduras de GFRP apresenta uma vantagem a longo prazo ao nível económico, mesmo considerando o seu valor inicial superior ao do aço.

**2º cenário** – temos o mesmo conceito mencionado na primeira situação, havendo uma pequena alteração em três critérios:

- Utilização do tipo cimento (CEM II/B até V);
- Classe de exposição ambiental XS3 (que corresponde à situação do betão armado estar exposto a zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima [13]);
- Recobrimentos de 3,5cm e 4,5cm;
- Classes de resistência C35/45, C40/50 e C30/37;
- Período de vida útil da estrutura de 50 anos.

**Tabela 4.12 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação/ nova construção	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	33 054,17 €
	2046	3 991,74 €	0,39%	4 503,66 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	37 734,85 €
	2051	7 983,48 €	0,39%	9 184,35 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	42 597,77 €
	2056	11 975,21 €	0,39%	14 047,27 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	47 648,28 €
	2061	15 966,95 €	0,39%	19 097,78 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	28 550,50 €
	2066	-	-	-	

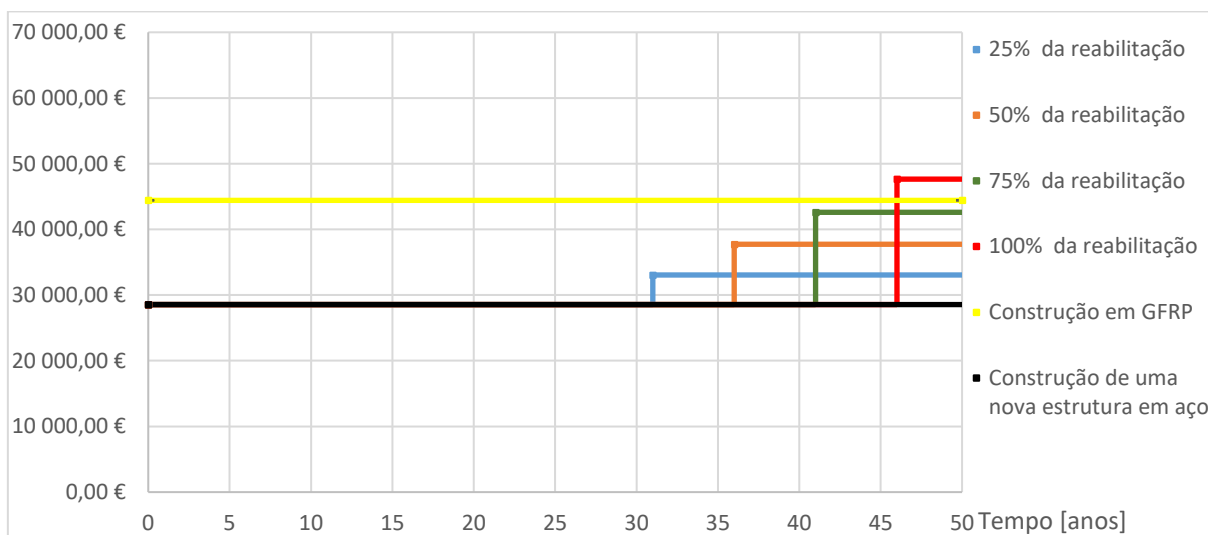
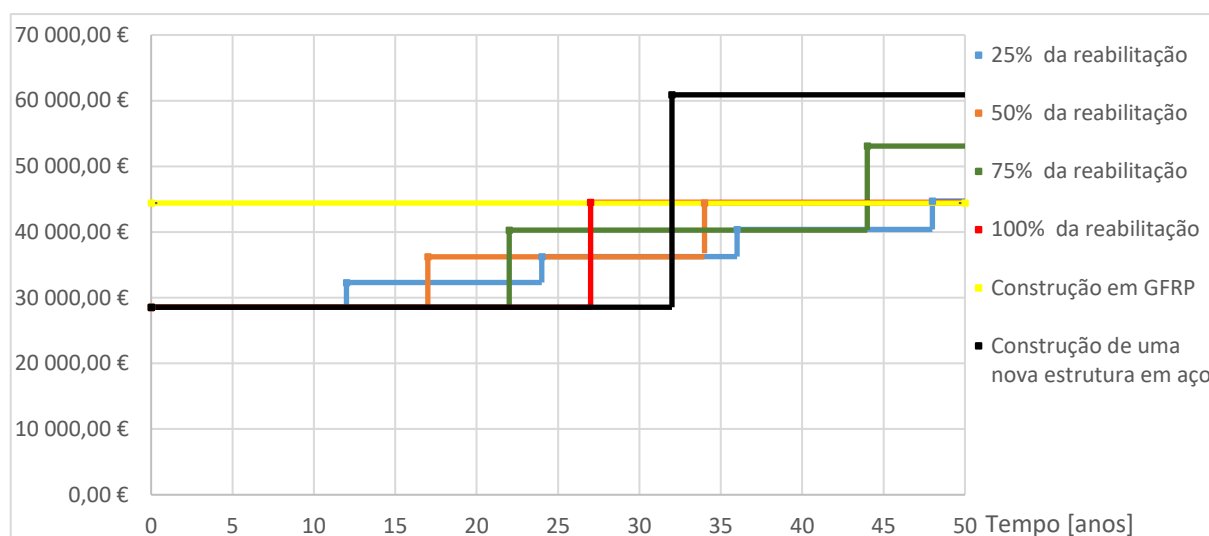


Figura 4.7 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C35/45 e rec. 4,5cm.

Para as lajes com recobrimentos de 4,5cm, os valores apresentados na Tabela 4.12 e na Figura 4.7 não favorecem a utilização do GFRP na reabilitação de estruturas de betão armado expostas aos critérios do 2º cenário. Enquanto o estado de degradação não ultrapassar a percentagem de 75% do elemento estrutural (linhas de cor verde-Figura 4.7), teremos um custo de reparação inferior ao custo inicial da reparação com os varões de fibra de vidro; caso contrário, para uma reparação de 100% do elemento estrutural, este conceito inicial não se aplica.

Tabela 4.13 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm.

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação/ nova construção	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	44 725,47 €
	2063	3 593,17 €	0,39%	4 331,31 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	44 431,65 €
	2049	7 186,34 €	0,39%	8 203,20 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	53 086,97 €
	2059	10 779,51 €	0,39%	12 793,19 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	44 515,91 €
	2042	14 372,68 €	0,39%	15 965,41 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	60 888,14 €
	2047	28 550,50 €	0,39%	32 337,64 €	

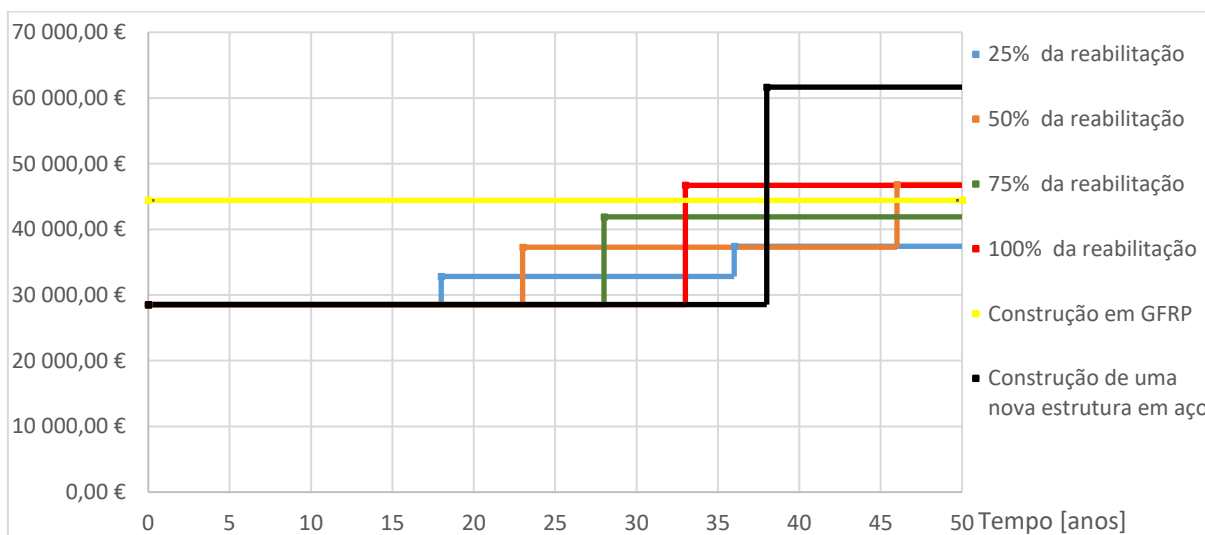


**Figura 4.8 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C40/50 e rec. 3,5cm.**

Para um betão C40/50 em que o recobrimento empregue é de 3,5cm, os valores demonstrados na Tabela 4.13 e na Figura 4.8 indicam que atendendo aos custos finais, a longo prazo, de reabilitar com armaduras de aço - mesmo que se aproximem do valor inicial da construção em GFRP, se torna desvantajosa a aplicação dos varões de aço para este tipo de situação.

**Tabela 4.14 – Custo Final para o 2º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação/ nova construção	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	37 424,12 €
	2051	3 593,17 €	0,39%	4 592,17 €	
50% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	46 830,56 €
	2061	7 186,34 €	0,39%	9 548,89 €	
75% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	41 904,64 €
	2043	10 779,51 €	0,39%	13 354,14 €	
100% da reabilitação	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	46 705,95 €
	2048	14 372,68 €	0,39%	18 155,45 €	
Construção em GFRP	2015	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
Construção de uma nova estrutura em aço	2015	28 550,50 €	0,39%	28 550,50 €	61 652,26 €
	2053	28 550,50 €	0,39%	33 101,75 €	



**Figura 4.9 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 2º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm.**

Para uma laje em que a classe de resistência é de C30/37 e em que o recobrimento utilizado é de 4,5cm, o resultado final demonstrado pela Tabela 4.14 e pela Figura 4.9, indica que aplicação do GFRP como elemento estrutural a substituir as armaduras de aço apenas se torna benéfico se a percentagem da estrutura a reabilitar for de 50% (linha de cor laranja) ou 100% (linha de cor vermelha) ou, ainda, se for feita uma nova construção (linha de cor negra). Para os outros casos de intervenção, a fibra de vidro apresenta uma desvantagem económica.

Conclusões do 2º cenário:

A conclusões finais retiradas do segundo cenário, em que o elemento estrutural é uma laje constituída por um betão de classe de resistência C35/45 ou C40/50 ou C30/37, e em que a composição do cimento está classificada entre o tipo de cimento CEM II/B até V exposto a uma condição ambiental XS3, apontam para que os valores obtidos, de acordo como o recobrimento mínimo exigido pela Norma Europeia EC2 que é de 4,5cm, não favorecem a aplicação dos varões de GFRP, visto que, para o caso da análise do custo a longo prazo para o recobrimento de 4,5cm (Figura 4.7), os custos apresentados da reabilitação com varões de aço para as diferentes intervenções apresentam maiores benefícios económicos. É de referir que apenas é demonstrado o benefício financeiro da utilização das armaduras em GFRP quando o recobrimento das armaduras for igual ou inferior a 3,5cm.

**3º cenário** – temos o custo total das possíveis reparações necessárias para a reabilitação das duas vigas estudadas, em que nesta situação foram considerados os mesmos critérios do 1º cenário:

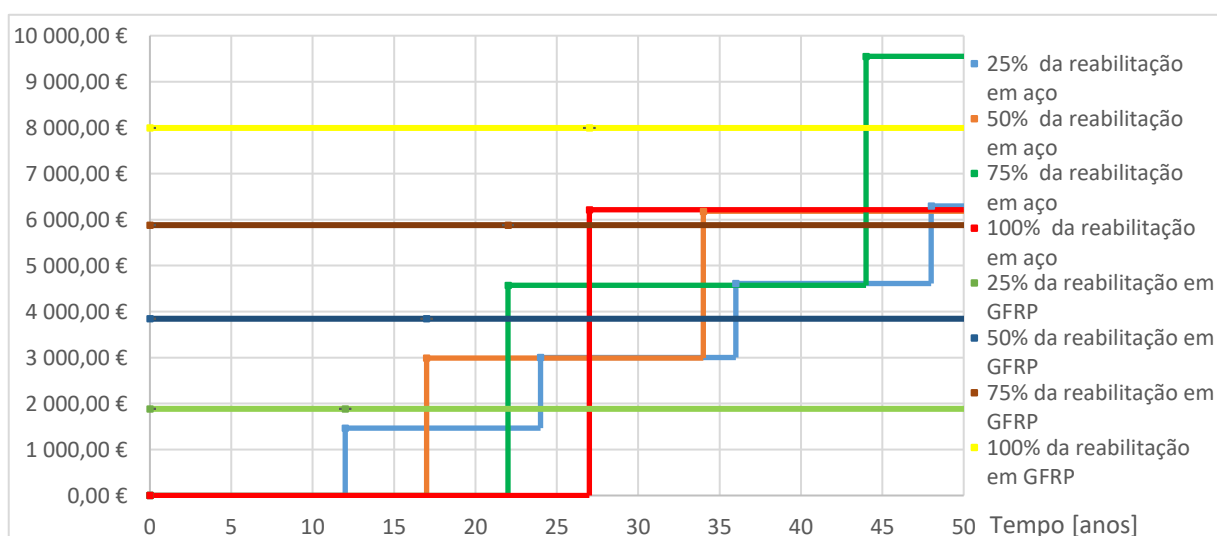
- Utilização do tipo cimento (CEM I ou II/A);
- Classe de exposição ambiental XS1 (que corresponde a situação do betão armado estar exposto ao sal transportado pelo ar, mas não em contacto direto com a água do mar [13]);
- Recobrimentos de 4,5cm e 5,5cm;

- Classes de resistência C35/45, C40/50 e C30/37;
- Período de vida útil da estrutura de 50 anos.

Para o 3º e 4º ira-se abordar um conceito diferente dos cenários anteriormente referidos: apenas serão considerados as reabilitações efetuadas em GFRP e Aço. Nestes dois cenários, não serão contabilizados o custo da construção do elemento de betão armado estudado, nem o custo da reparação de uma nova estrutura. Somente será elaborada uma comparação do custo entre as duas reabilitações. É de salientar ainda que cada percentagem do elemento estrutural em GFRP reabilitado será efetuada de acordo com a percentagem de degradação da estrutura em betão armado.

**Tabela 4.15 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 296,59 €
	2063	1 398,75 €	0,39%	1 686,09 €	
50% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 182,22 €
	2049	2 797,50 €	0,39%	3 193,34 €	
75% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	9 551,56 €
	2059	4 196,25 €	0,39%	4 980,14 €	
100% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 215,02 €
	2042	5 595,00 €	0,39%	6 215,02 €	
25% da reabilitação em GFRP	2027	1 799,07 €	0,39%	1 885,10 €	1 885,10 €
50% da reabilitação em GFRP	2032	3 598,14 €	0,39%	3 844,29 €	3 844,29 €
75% da reabilitação em GFRP	2037	5 397,21 €	0,39%	5 879,76 €	5 879,76 €
100% da reabilitação em GFRP	2042	7 196,28 €	0,39%	7 993,75 €	7 993,75 €

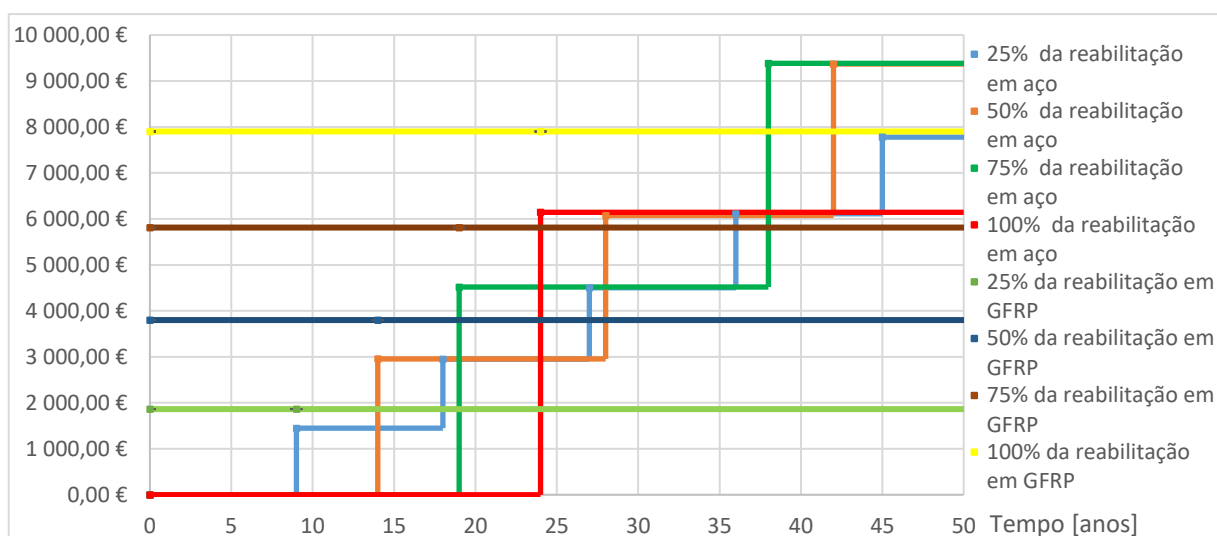


**Figura 4.10 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C40/50 e rec. 4,5cm.**

Da Tabela 4.15 e da Figura 4.10 retira-se as seguintes conclusões: para um betão C40/50 em que o recobrimento mínimo utilizado é de 4,5cm, a reabilitação com varões em GFRP torna-se benéfica se a percentagem do elemento estrutural em aço apresenta sempre uma deterioração no mesmo lugar, isto é, se a mesma área em aço necessitar de uma reparação constante ao longo do tempo de vida útil da estrutura. Dessa maneira, teremos um custo a longo prazo da reabilitação em aço (linha de cor azul) superior ao custo inicial da reabilitação em GFRP (linha de cor verde-claro). Por outro lado, se a área de reabilitação variar ao longo do elemento estrutural, será necessário fazer, para o caso de 25% da reabilitação em GFRP, 4 reparações, sendo que se demonstra que a utilização dos varões de fibra de vidro para este caso apresenta um custo superior, ao invés da utilização dos varões em aço. Para as restantes intervenções em aço e GFRP, verifica-se o mesmo conceito. É de ressaltar que, para o caso da área reabilitada em aço de 75% (linha de cor verde-escuro), o seu custo a longo prazo torna-se superior ao de reabilitar 100% em GFRP (linha de cor amarela).

**Tabela 4.16 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	7 778,31 €
	2060	1 398,75 €	0,39%	1 666,52 €	
50% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	9 368,15 €
	2043	2 797,50 €	0,39%	3 294,35 €	
75% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	9 383,53 €
	2053	4 196,25 €	0,39%	4 865,18 €	
100% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 142,87 €
	2039	5 595,00 €	0,39%	6 142,87 €	
25% da reabilitação em GFRP	2024	1 799,07 €	0,39%	1 863,21 €	1 863,21 €
50% da reabilitação em GFRP	2029	3 598,14 €	0,39%	3 799,66 €	3 799,66 €
75% da reabilitação em GFRP	2034	5 397,21 €	0,39%	5 811,50 €	5 811,50 €
100% da reabilitação em GFRP	2039	7 196,28 €	0,39%	7 900,94 €	7 900,94 €



**Figura 4.11 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C35/45 e rec. 4,5cm.**

Para um betão C35/45 na qual são aplicados os critérios do 3º cenário, os resultados obtidos da Figura 4.11 assemelham-se os valores obtidos na Figura 4.10. Também se verificou que para as reabilitações de 75% e 50% do elemento estrutural em aço, o seu custo a longo prazo se torna superior ao custo inicial de reabilitar 100% em GFRP.

**Tabela 4.17 – Custo Final para o 3º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 5,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 925,30 €
	2063	1 538,41 €	0,39%	1 854,45 €	
50% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 799,50 €
	2049	3 076,83 €	0,39%	3 512,19 €	
75% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	10 505,26 €
	2059	4 615,24 €	0,39%	5 477,39 €	
100% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 835,58 €
	2042	6 153,65 €	0,39%	6 835,58 €	
25% da reabilitação em GFRP	2027	1 799,07 €	0,39%	1 885,10 €	1 885,10 €
50% da reabilitação em GFRP	2032	3 598,14 €	0,39%	3 844,29 €	3 844,29 €
75% da reabilitação em GFRP	2037	5 397,21 €	0,39%	5 879,76 €	5 879,76 €
100% da reabilitação em GFRP	2042	7 196,28 €	0,39%	7 993,75 €	7 993,75 €

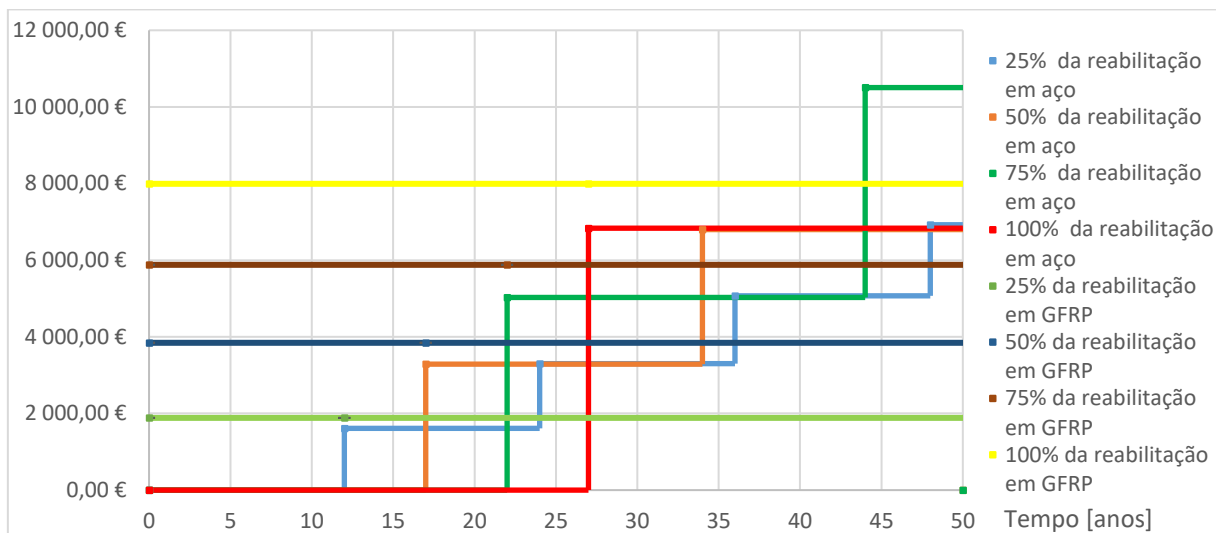


Figura 4.12 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C30/37 e rec. 5,5cm.

Na Figura 4.12, em que o betão utilizado é da classe resistente C30/37 e o recobrimento de 5,5cm, os valores obtidos assemelham-se às conclusões retiradas para os outros dois tipos de betões, sendo que a utilização do GFRP se torna vantajosa se, e só se, a área de aço deteriorado for sempre a mesma.

Conclusões do 3º cenário:

Para o terceiro cenário conclui-se que, para um elemento estrutural com as características analisadas nesta dissertação como a da viga, em que a classe de resistência do betão é C40/50 ou C35/45 ou ainda C30/37 e na qual o tipo de cimento utilizado é um CEM I ou II/A, exposto a uma condição ambiental XS1, os resultados finais obtidos para o caso da reabilitação da viga favorecem a utilização dos varões de fibra de vidro se forem considerados o lugar/posição do elemento estrutural a reabilitar, for o mesmo ao longo do período de vida útil da estrutura. Caso contrário, esta condição não se aplica.

**4º cenário** – temos novamente o custo total das reparações das vigas, assim como é relatado no 3º cenário. Os critérios utilizados neste cenário foram os mesmos utilizados no cenário 2, os quais são os seguintes:

- Utilização do tipo cimento (CEM II/ até V);
- Classe de exposição ambiental XS3 (que corresponde a situação do betão armado estar exposto a zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima [13]);
- Recobrimento de 3,5cm;
- Classes de resistência C40/50 e C30/37;
- Período de vida útil da estrutura de 50 anos.

Tabela 4.18 – Custo Final para o 4º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm.

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	5 667,89 €
	2063	1 259,09 €	0,39%	1 517,74 €	
50% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	5 564,94 €
	2049	2 518,18 €	0,39%	2 874,49 €	
75% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	8 597,86 €
	2059	3 777,26 €	0,39%	4 482,88 €	
100% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	5 594,46 €
	2042	5 036,35 €	0,39%	5 594,46 €	
25% da reabilitação em GFRP	2027	1 799,07 €	0,39%	1 885,10 €	1 885,10 €
50% da reabilitação em GFRP	2032	3 598,14 €	0,39%	3 844,29 €	3 844,29 €
75% da reabilitação em GFRP	2037	5 397,21 €	0,39%	5 879,76 €	5 879,76 €
100% da reabilitação em GFRP	2042	7 196,28 €	0,39%	7 993,75 €	7 993,75 €

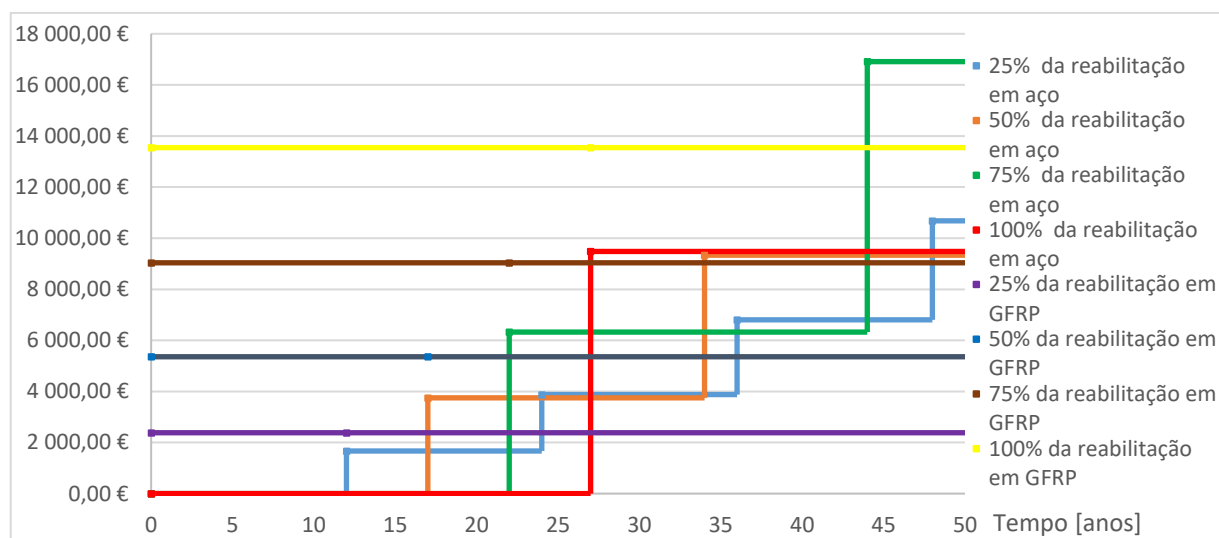
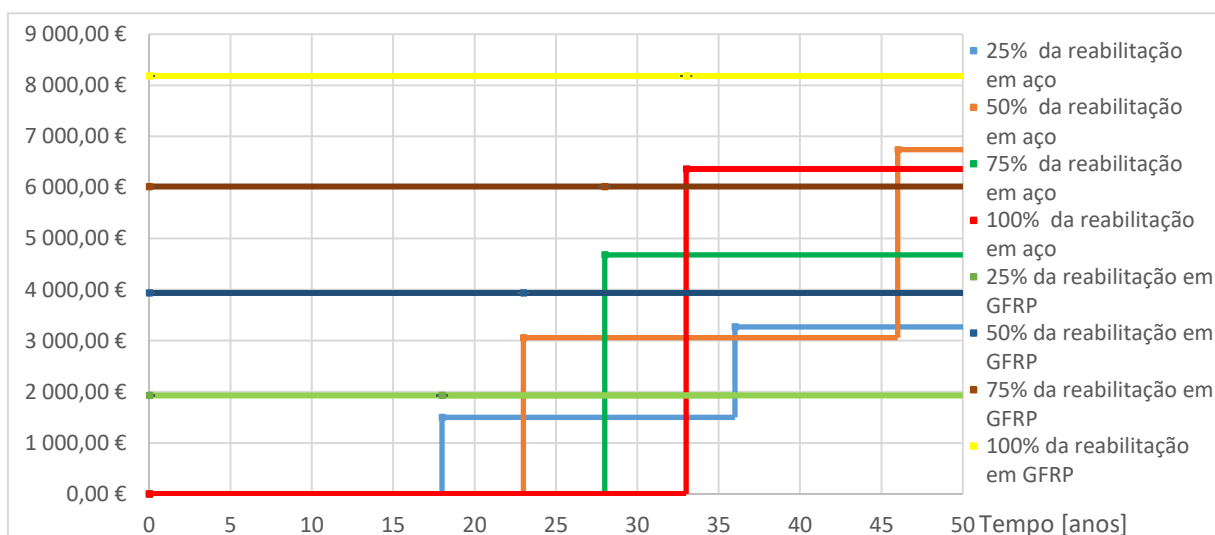


Figura 4.13 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C40/50 e rec. 3,5cm.

Às conclusões a retirar das Figuras 4.13 e 4.14, seguem o mesmo raciocínio apresentado no 3º cenário.

**Tabela 4.19 – Custo Final para o 4º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Ano da 1ª e última reparação	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	3 270,09 €
	2051	1 259,09 €	0,39%	1 769,82 €	
50% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 739,64 €
	2061	2 518,18 €	0,39%	3 680,13 €	
75% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	4 679,44 €
	2043	3 777,26 €	0,39%	4 679,44 €	
100% da reabilitação em aço	2015	0,00 €	0,39%	0,00 €	6 361,87 €
	2048	5 036,35 €	0,39%	6 361,87 €	
25% da reabilitação em GFRP	2033	1 799,07 €	0,39%	1 929,64 €	1 929,64 €
50% da reabilitação em GFRP	2038	3 598,14 €	0,39%	3 935,12 €	3 935,12 €
75% da reabilitação em GFRP	2043	5 397,21 €	0,39%	6 018,69 €	6 018,69 €
100% da reabilitação em GFRP	2065	7 196,28 €	0,39%	8 182,63 €	8 182,63 €



**Figura 4.14 – Representação do custo final para um período de vida útil de 50 anos. 3º cenário: Betão C30/37 e rec. 4,5cm.**

Conclusões do 4º cenário:

Conclui-se que, para a reabilitação de uma estrutura em que os critérios do tipo de cimento, recobrimento e classe de exposição ambiental estão em conformidade com os critérios apresentados no 4º cenário, apenas é demonstrado o seu benefício de custo a longo prazo se o betão utilizado for da classe resistente C30/37 e se a área de betão armado a reabilitar for sempre a mesma. Caso contrário, a aplicação dos varões de GFRP na reabilitação de estruturas exposta a estes critérios torna-se desvantajosa.

## 4.2.2 Análise a variação das taxas

Neste subcapítulo realizou-se uma análise da variação das taxas. Como foi demonstrado no subcapítulo 4.2, a taxa de juros e taxa de inflação tendem em variar de ano após ano. Deste modo, para as seguintes tabelas, serão apresentados os custos totais a longo prazo atualizados para cada intervenção realizada, nos quatros cenários anteriormente mencionados.

Para a análise da taxa de atualização, unicamente será avaliada a variação da taxa atualizada para o caso da laje. No que diz respeito à análise da variação da taxa atualização para o caso da reabilitação das vigas, este conceito não será abordado, visto que o custo total atualizado da percentagem da área de intervenção em aço ou GFRP compreende que foram realizadas no mesmo tempo, o que implica que a variação das taxas para 2,37% e -1.55% não irá alterar os resultados obtidos anteriormente.

**Tabela 4.20 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 5,5cm.**

Intervenção realizada	Custo da re- paração	Taxa de atualiza- ção	Custo da re- paração atua- lizado	Custo Total
25% da reabilitação	4 390,30 €	0,39%	5 090,16 €	38 367,96 €
		2,37%	10 691,96 €	46 093,80 €
		-1,55%	2 424,89 €	34 238,21 €
50% da reabilitação	8 780,61 €	0,39%	10 584,40 €	48 775,31 €
		2,37%	27 028,02 €	70 983,79 €
		-1,55%	4 148,38 €	38 734,23 €
75% da reabilitação	13 170,91 €	0,39%	14 744,80 €	43 295,30 €
		2,37%	25 979,10 €	54 529,60 €
		-1,55%	8 372,82 €	36 923,32 €
100% da reabilitação	17 561,21 €	0,39%	20 046,10 €	48 596,60 €
		2,37%	38 942,73 €	67 493,23 €
		-1,55%	10 324,97 €	38 875,48 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
		2,37%		
		-1,55%		
Construção de uma nova estru- tura em aço	28 550,50 €	0,39%	33 230,85 €	61 781,35 €
		2,37%	71 178,56 €	99 729,06 €
		-1,55%	15 524,83 €	44 075,33 €

Tabela 4.21 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 4,5cm.

Intervenção realizada	Custo da re- paração	Taxa de atualiza- ção	Custo da re- paração atua- lizado	Custo Total
25% da reabilitação	3 991,74 €	0,39%	4 811,76 €	46 519,66 €
		2,37%	12 287,17 €	62 404,74 €
		-1,55%	1 885,89 €	38 764,24 €
50% da reabilitação	7 983,48 €	0,39%	9 113,13 €	45 135,93 €
		2,37%	17 703,69 €	51 615,32 €
		-1,55%	4 693,82 €	43 656,10 €
75% da reabilitação	11 975,21 €	0,39%	14 212,26 €	55 808,64 €
		2,37%	33 564,65 €	82 163,69 €
		-1,55%	6 022,47 €	43 065,35 €
100% da reabilitação	15 966,95 €	0,39%	17 736,35 €	46 286,85 €
		2,37%	30 052,80 €	58 603,30 €
		-1,55%	10 472,40 €	39 022,91 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
		2,37%		
		-1,55%		
Construção de uma nova estru- tura em aço	28 550,50 €	0,39%	32 337,64 €	60 888,14 €
		2,37%	60 414,37 €	88 964,87 €
		-1,55%	17 318,76 €	45 869,26 €

Tabela 4.22 – Análise a variação das taxas, 1º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.

Intervenção realizada	Custo da re- paração	Taxa de atualiza- ção	Custo da re- paração atua- lizado	Custo Total
25% da reabilitação	3 991,74 €	0,39%	4 486,17 €	49 969,39 €
		2,37%	8 060,15 €	59 580,54 €
		-1,55%	2 498,24 €	43 749,78 €
50% da reabilitação	7 983,48 €	0,39%	9 077,72 €	53 974,34 €
		2,37%	17 293,83 €	65 380,12 €
		-1,55%	4 767,72 €	48 460,04 €
75% da reabilitação	11 975,21 €	0,39%	13 563,69 €	54 858,92 €
		2,37%	25 340,18 €	71 310,62 €
		-1,55%	7 264,17 €	45 141,52 €
100% da reabilitação	15 966,95 €	0,39%	18 802,74 €	64 680,16 €
		2,37%	42 704,68 €	97 367,70 €
		-1,55%	8 284,80 €	48 336,74 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
		2,37%		
		-1,55%		
Construção de uma nova estru- tura em aço	28 550,50 €	0,39%	31 591,16 €	60 141,66 €
		2,37%	52 493,32 €	81 043,82 €
		-1,55%	19 020,52 €	47 571,03 €

Tabela 4.23 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C35/45 e recobrimento de 4,5cm.

Intervenção realizada	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	3 991,74 €	0,39%	4 503,66 €	33 054,17 €
		2,37%	8 251,17 €	36 801,68 €
		-1,55%	2 459,51 €	31 010,02 €
50% da reabilitação	7 983,48 €	0,39%	9 184,35 €	37 734,85 €
		2,37%	18 552,79 €	47 103,30 €
		-1,55%	4 549,44 €	33 099,94 €
75% da reabilitação	11 975,21 €	0,39%	14 047,27 €	42 597,77 €
		2,37%	31 287,01 €	59 837,51 €
		-1,55%	6 311,43 €	34 861,93 €
100% da reabilitação	15 966,95 €	0,39%	19 097,78 €	47 648,28 €
		2,37%	46 899,30 €	75 449,80 €
		-1,55%	7 782,97 €	36 333,47 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
		2,37%		
		-1,55%		
Construção de uma nova estrutura em aço	28 550,50 €	0,39%	-	28 550,50 €
		2,37%	-	28 550,50 €
		-1,55%	-	28 550,50 €

Tabela 4.24 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C40/50 e recobrimento de 3,5cm.

Intervenção realizada	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	3 991,74 €	0,39%	4 331,31 €	44 725,47 €
		2,37%	11 060,32 €	59 024,46 €
		-1,55%	1 697,59 €	37 744,42 €
50% da reabilitação	7 983,48 €	0,39%	8 203,20 €	44 431,65 €
		2,37%	15 936,01 €	55 187,99 €
		-1,55%	4 225,15 €	38 285,95 €
75% da reabilitação	11 975,21 €	0,39%	12 793,19 €	53 086,97 €
		2,37%	30 213,29 €	76 810,52 €
		-1,55%	5 421,14 €	41 616,07 €
100% da reabilitação	15 966,95 €	0,39%	15 965,41 €	44 515,91 €
		2,37%	27 052,09 €	55 602,59 €
		-1,55%	9 426,75 €	37 977,26 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%	44 414,73 €	44 414,73 €
		2,37%		
		-1,55%		
Construção de uma nova estrutura em aço	28 550,50 €	0,39%	32 337,64 €	60 888,14 €
		2,37%	60 414,37 €	88 964,87 €
		-1,55%	17 318,76 €	45 869,26 €

**Tabela 4.25 – Análise a variação das taxas, 2º Cenário: Betão C30/37 e recobrimento de 4,5cm.**

Intervenção realizada	Custo da reparação	Taxa de atualização	Custo da reparação atualizado	Custo Total
25% da reabilitação	3 991,74 €	0,39%	4 592,17 €	37 424,12 €
		2,37%	9 276,40 €	43 912,04 €
		-1,55%	2 274,72 €	33 838,54 €
50% da reabilitação	7 983,48 €	0,39%	9 548,89 €	46 830,56 €
		2,37%	23 449,65 €	65 682,61 €
		-1,55%	3 891,48 €	38 015,81 €
75% da reabilitação	11 975,21 €	0,39%	13 354,14 €	41 904,64 €
		2,37%	23 073,79 €	51 624,29 €
		-1,55%	7 732,56 €	36 283,06 €
100% da reabilitação	15 966,95 €	0,39%	18 155,45 €	46 705,95 €
		2,37%	34 587,66 €	63 138,16 €
		-1,55%	9 535,44 €	38 085,94 €
Construção em GFRP	44 414,73 €	0,39%		
		2,37%	44 414,73 €	44 414,73 €
		-1,55%		
Construção de uma nova estrutura em aço	28 550,50 €	0,39%	33 101,75 €	61 652,26 €
		2,37%	69 530,68 €	98 081,18 €
		-1,55%	15 769,25 €	44 319,76 €

Da Tabela 4.20 até a Tabela 4.22 pode-se concluir que para o 1º cenário, mesmo havendo uma variação das taxas de juro ou da taxa inflação, e em que o recobrimento mínimo necessário para a classe de exposição ambiental XS1 é de 3,5cm, os custos apurados para um recobrimento de 4,5cm e no qual o betão utilizado é da classe resistente C30/37, não beneficiam a utilização dos varões de aço como elemento de reparação em estruturas expostas aos critérios acima descrito. Para um recobrimento de 5,5cm e 4,5 em que o betão utilizado é um C35/45 ou C40/50, os valores obtidos beneficiam a aplicação dos varões de GFRP se a taxa de atualização for de 2,37% e prejudicam se a taxa de atualização for de -1,55%.

No 2º cenário teremos a mesma conclusão retirada no 1º cenário, em que a utilização do GFRP se torna desvantajosa quando a taxa de atualização for igual a -1,55%, e vantajosa quando for igual 2,37%.

#### Conclusão final:

A conclusão final a retirar para o cenário em que o betão de classe de resistência C35/45 ou C40/50 ou C30/37 exposto às condições ambientais XS1 e XS3, e no qual o tipo de cimento utilizado seria o CEM I ou CEM II/A, aponta para que os valores dos custos finais alcançados para o recobrimento mínimo necessário legitimam a verificação de que é possível substituir os varões de aço pelos varões de fibra de vidro, mesmo que a construção inicial em aço seja mais vantajosa economicamente. Porém, no caso de construir ou reabilitar em GFRP a longo prazo em que tempo de vida útil de uma estrutura de classe S4 é limitado a um período de 50 anos, devido às inúmeras reabilitações necessárias dos elementos de betão armado, o custo final da reparação em GFRP terá uma razão de custo-benefício superior.

Para as mesmas classes de exposição ambiental, recobrimento mínimos e classe de resistência acima referidas, em que o tipo de cimento utilizado seria CEM II/B até V, os resultados finais obtidos não beneficiam a utilização das armaduras de GFRP, sempre e quando sejam cumpridos os recobrimentos mínimos exigidos pelas normas.



# Capítulo 5

---

## Conclusão e Desenvolvimentos futuros

### 5.1 Conclusões

Neste último capítulo, pretende-se mostrar as principais conclusões retidas ao longo da execução do documento. O trabalho realizado nesta dissertação estudou a comparação de custos da construção entre os varões de aço e de GFRP na Região Autónoma da Madeira.

Em função disso, realizou-se um estudo comparativo entre construir/reabilitar a estrutura de betão armado analisada em aço e em fibra de vidro, com a finalidade de se contabilizar a quantidade de armadura necessária para cada intervenção. Verificou-se, no caso da estrutura em betão armado com GFRP, um sobredimensionamento da sua resistência à flexão, isto devido ao facto dos varões de fibra de vidro apresentarem um baixo módulo de elasticidade e com essa consequência não verificarem os estados limites de serviço. Por outro lado, o baixo peso volúmico e o facto de não apresentarem problemas de corrosão torna as armaduras de GFRP um ótimo substituto dos varões de aço.

Ao longo das pesquisas efetuadas aos problemas relacionados com a corrosão das armaduras de aço, verificou-se que o tempo de vida útil destes tipos de estruturas não atingiam os valores pretendidos pelo dono de obra. Concluiu-se que os fatores associados a estes tipos de problemas estavam relacionados com os tipos de cimentos e recobrimentos utilizados. Devido às adversidades referidas, as estruturas de betão armado necessitaram de um maior número de intervenções ao longo do tempo de vida útil da construção, ao passo que, para as estruturas em GFRP, são dispensáveis estes tipos de reparações.

No que diz respeito ao custo de reabilitar/construir a estrutura analisada, notou-se que os valores obtidos inicialmente para as armaduras de GFRP foram superiores ao do aço, numa ordem de grandeza de 1,5 vezes, para o caso da reabilitação, e 2 vezes, para o caso da construção. Atendendo a tal, a solução dos varões em fibras de vidro, a curto prazo, tornava-se financeiramente desvantajoso.

Dado que o custo inicial do GFRP é superior, foi necessário realizar uma análise, a longo prazo, dos custos de reparação para as estruturas de betão armado tradicionais, na qual se apurou que, para as classes de exposições ambientais XS1 e XS3 em que os tipos de cimentos utilizados fossem o CEM I ou CEM II/A, considerando os custos obtidos para os recobrimentos mínimos exigidos pela Norma Europeia EC2 [13] e para as classes de betão utilizadas (C35/45, C40/50 e C30/37) apresenta-se como uma opção económica utilizar as armaduras de GFRP. Porém, no caso da utilização dos cimentos CEM II/B até V, para os critérios enunciados anteriormente, os valores finais alcançados apresentavam-se desfavoráveis à aplicação dos varões de fibra de vidro.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

O objetivo deste subcapítulo foca-se em algumas sugestões a serem desenvolvidas em trabalhos futuros, tais como:

- Realização de ensaios para a determinação rigorosa da concentração de cloretos na Região Autónoma da Madeira, de forma a poder-se determinar o tempo de vida útil das estruturas de betão armado na Ilha;
- Analisar o custo financeiro a longo prazo de uma estrutura em que tenha sido efetuado diversas reparações durante o seu período de vida útil e na qual não tenham sido respeitados os recobrimentos mínimos exigidos;
- Aplicar o estudo realizado desta dissertação, para outros casos de estudo, tais como nas abóbadas de contenção do aeroporto da Madeira, em pontes e em pequenas construções efetuadas perto da costa;
- Realização uma nova investigação aos modelos utilizados para a determinação dos custos a longo prazo de um material;
- Avaliar a percentagem dos custos de produção dos varões de GFRP, que devem reduzir-se de modo a garantirem uma melhor opção de utilização quando comparados com os varões de aço.

# Bibliografia

---

- [1] ACI 440.1R-03, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", American Concrete Institute: ACI Committee 440, 2006.
- [2] N. d. E. C. Laboratório, E 465 - "Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçados sob as exposições ambientais", Lisboa, Novembro de 2007.
- [3] T. M. H. d. Santos, "Corrosão das Armaduras do Betão Armado, Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade", Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Novembro 2014.
- [4] P. C. e. Z. L. Henrique Alves, ""Reabilitação de uma Estrutura Contaminada por Cloretos Utilizado a Técnica da Dessalinização", " Novembro 2012.
- [5] P. França, "Apotamentos Teóricos", Reabilitação e Reforços de Estruturas.
- [6] J. P. d. S. Ferreira, "Construção de Edifícios em Ambiente Aquático", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil: Universidade Técnica de Lisboa, Outubro de 2009.
- [7] M. d. S. L. Simas, "Sistemas de protecção do betão face à carbonatação", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Novembro de 2007.
- [8] G. R. M. Enio J. Pazini Figueiredo, "Corrosão das armaduras de concreto", Boletín Técnico, Março 2013.
- [9] D. L. e. C. d. Q. e. E. e. F. Oz, "Ponte Cais, No Funchal: Relatório com os resultados da inspecção e dos ensaios," Lisboa, Abril de 2009.
- [10] A. B. R. e. M. J. E. F. Arlindo F. Gonçalves, "The new LNEC specifications on reinforced concrete durability," RILEM Publications SARL, 2013.
- [11] P. e. C. L. CONSULMAR, ""Ampliação e reabilitação do cais norte do porto do Funchal", " Lisboa, Dezembro de 2014.
- [12] C. E. d. N. CEN, Eurocódigo - Base para o projecto de estruturas, Bruxelas, Dezembro 2009.
- [13] C. E. d. N. CEN, Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Bruxelas, Março de 2010.
- [14] J. A. O. d. Barros, Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão - Parte I: Propriedades e Técnicas.
- [15] Fib-Bulletin 40, Technical report "FRP reinforcement in RC structures", Federation Internationale du beton, Task Group, Setembro 2007.
- [16] J. P. Busel, Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites Rebar, Composites Growth Initiative American Composites Manufacturers Association, Julia de 2012.
- [17] V. S. Bhise, Strength Degradation of GFRP Bars, Setembro 2001.
- [18] S. C. Fonseca, Utilização de materiais compósitos de matriz polimérica na reabilitação urbana, LNEC-Lisboa, Junho 2012.
- [19] V. L. F. Reis, "Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP", Dissertação do Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Julho de 2009.
- [20] L. D. F. C. Camacho, "A utilização de Varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado", Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, 2014.
- [21] A. 100. [Online]. Available: [https://www.dropbox.com/sh/8ts8442eviugeic/AAAr\\_i546YixcYDDwGYEPZnoa/Aslan100.4.doc?dl=0](https://www.dropbox.com/sh/8ts8442eviugeic/AAAr_i546YixcYDDwGYEPZnoa/Aslan100.4.doc?dl=0).

- [22] J. F. G. Gonçalves, "*Aderência de Varões GFRP no Betão*", Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Dezembro de 2013.
- [23] L. L. G. Correia, "*Dimensionamento de um Edifício em Betão Armado com Varões de GFRP e Análise dos Seus Custos*", Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade da Madeira, 2012.
- [24] I. C. Corporation, *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual No.3, Version 2, September 2007.
- [25] P. Escórcio, ""Experimental study of a rehabilitation slution that uses GFRP bars to replace the steel bars of reinforced concrete beams", "*Engineering Structures*, Setembro de 2016.
- [26] "BIU Internacional," [Online]. Available: <http://www.biu.pt/home/pt>. [Acedido em Janeiro 2016].
- [27] "ATP-frp," [Online]. Available: <http://www.atp-frp.com/index.html>. [Acedido em Janeiro 2016].
- [28] "schöck," [Online]. Available: <http://www.schoeck-combar.com/>. [Acedido em Janeiro 2016].
- [29] "PLANO i9," [Online]. Available: <http://plano-i9.pai.pt/>. [Acedido em Outubro 2016].
- [30] T. P. d. V. N. d. Silva, "*Análise técnico-económica de alguns tipos de reparação de estruturas de betão armado expostas a um ambiente marítimo*", Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Outubro de 2007.
- [31] C. L. Canha, "*Análise da viabilidade da aplicação do aço inoxidável na ilha da Madeira*", *Disertação de Mestrado*, Universidade da Madeira, Dezembro de 2015.
- [32] J. A. M. d. Sousa, "*Avaliação económica de projectos de energias renováveis*", MERCEUS | FCT/UNL.
- [33] "Global-rates," [Online]. Available: <http://www.pt.global-rates.com/>. [Acedido em 12 01 2017].
- [34] P. M. d. M. França, *Betão Armado I - Volume 4 - Tabelas de Cálculo*.
- [35] R. S. D. B. Pedro Romano, "*Estudo da degradação de estruturas de betão armado expostas ao ataque por sulfatos*", 2012.
- [36] E. P. D. Antunes, "*Efeitos Estruturais das Reações Químicas Expansivas no Betão*", 2010.
- [37] L. V. Mendonça, "Durabilidade de Estruturas de Betão Armado, Degradação do Betão e Corrosão de Armaduras e Importância da Inspeção Periódica," *Arte e Cimento*, pp. 70-73, Out. 2005.
- [38] L. A. V. C. e. A. M. A. J. Teixeira, Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção.
- [39] J. P. d. S. Ferreira, *Construção de Edifícios em Ambiente Aquático*, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Outubro de 2009.
- [40] A. S. Guangling Sang, *Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction*, July 1998.
- [41] J. M. M. F. d. Silva, "*Métodos Electroquímicos para Prevenção da Deterioração e Reparação de Estruturas de Betão Armado, Protecção Catódica, Dessalinização e Recalcalização*", Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil: Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

# **Anexo A1**

---

## **Imagens/Resultados do relatório de Oz**



Fig. 1 – Vista geral da ponte cais.



Fig. 2 – Idem.



Fig. 3 – Vista inferior do tabuleiro.



Fig. 4 – Face superior da viga de bordadura. Fissura de delaminação.



Fig. 5 – Idem. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento.



Fig. 6 – Idem. Idem. De realçar a redução da secção dos varões devido à corrosão, levando inclusivamente ao seu desaparecimento.



Fig. 7 – Idem. Idem. Idem.

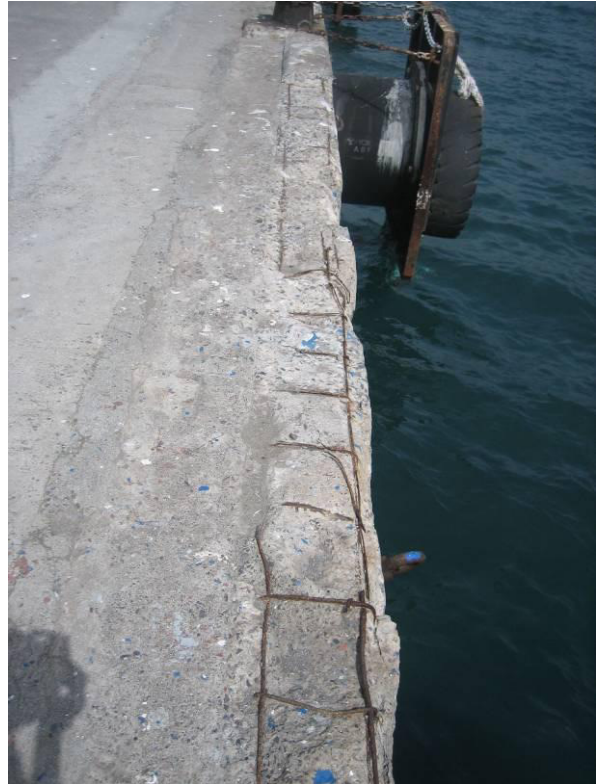


Fig. 8 – Idem. Idem ao longo de uma grande extensão.



Fig. 9 – Idem. Lacunas.



Fig. 10 – Idem. Idem.



Fig. 11 – Idem. Reparação na qual aparentemente foi utilizado betão corrente.



Fig. 12 – Idem. Idem.



Fig. 13 – Face lateral da viga de bordadura. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento.



Fig. 14 – Idem. Idem. De realçar a redução da secção dos varões devido à corrosão, levando inclusivamente ao seu desaparecimento.



Fig. 15 – Idem. Idem. Idem.



Fig. 16 – Face inferior da viga de bordadura. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento.



Fig. 17 – Idem. Idem. De realçar a redução da secção dos varões devido à corrosão, levando inclusivamente ao seu desaparecimento.



Fig. 18 – Idem. Idem. Idem.



Fig. 19 – Carlinga. Fissuras de delaminação nas faces lateral e inferior.



Fig. 20 – Idem. Fissura de delaminação na face lateral e manchas indiciando corrosão de armaduras.



Fig. 21 – Idem. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento da face inferior. De realçar a ocorrência de infiltrações na laje.



Fig. 22 – Idem. Idem. Idem.



Fig. 23 – Idem. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento da face lateral.



Fig. 24 – Laje constituída por vigas pré-fabricadas. Corrosão das armaduras e delaminação do betão de recobrimento da face inferior.



Fig. 25 – Idem. Idem e fissuras de delaminação na mesma face.



Fig. 26 – Idem. Idem.



Fig. 27 – Idem. Ocorrência de infiltrações.



Fig. 28 – Laje maciça. Corrosão das armaduras e delaminação geral do betão de recobrimento da face inferior.



Fig. 29 – Idem. Idem. Pormenor evidenciando a delaminação do betão entre dois níveis de armadura a diferentes profundidades.



Fig. 30 – Viga de bordadura interior. Fissuras de delaminação na face lateral e manchas indiciando corrosão de armaduras.



Fig. 31 – Pilar. Lacuna de grandes dimensões (ver também desenho da inspeção subaquática).



Fig. 32 – Extração de carote a partir de plataforma suspensa.



Fig. 33 – Zona de ensaios Z1 na face lateral da viga de bordadura. Disposição da malha de armaduras levantada com o detetor e sondagem para confirmação do diâmetro dos varões e medição da profundidade de carbonatação.



Fig. 34 – Zona de ensaios Z2 na face inferior da viga de bordadura. Idem.



Fig. 35 – Zona de ensaios Z3 na face inferior da viga de bordadura. Idem.



Fig. 36 – Zona de ensaios Z4 na face lateral da viga de bordadura. Idem.



Fig. 37 – Zona de ensaios Z5 em pilar. Idem.



Fig. 38 – Zona de ensaios Z6 na face lateral da carlinga, sobre o apoio. Idem.



Fig. 39 – Zona de ensaios Z7 na face inferior da viga pré-fabricada da laje. Idem.



Fig. 40 – Zona de ensaios Z8 em pilar. Idem.



Fig. 41 – Zona de ensaios Z9 na face inferior da viga pré-fabricada da laje. Idem.



Fig. 44 – Zona de ensaios Z12 na face inferior da carlinga. Idem.



Fig. 43 – Zona de ensaios Z11 em pilar. Idem.



Fig. 45 – Aspeto dos carotes extraídos da estrutura, destinadas ao ensaio de rotura à compressão.



Fig. 42 – Zona de ensaios Z10 na face lateral da carlinga, sobre o apoio. Idem

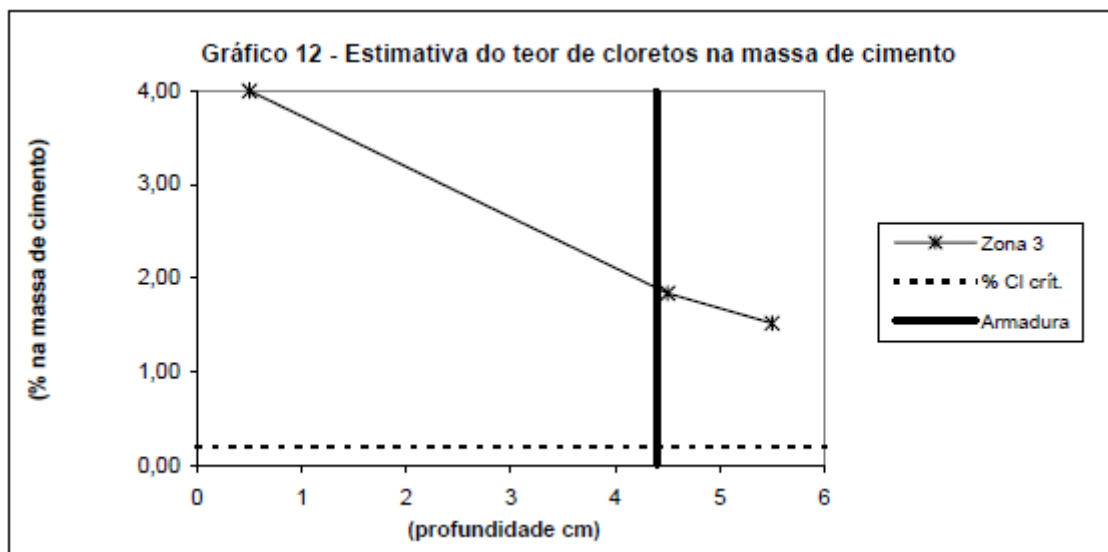
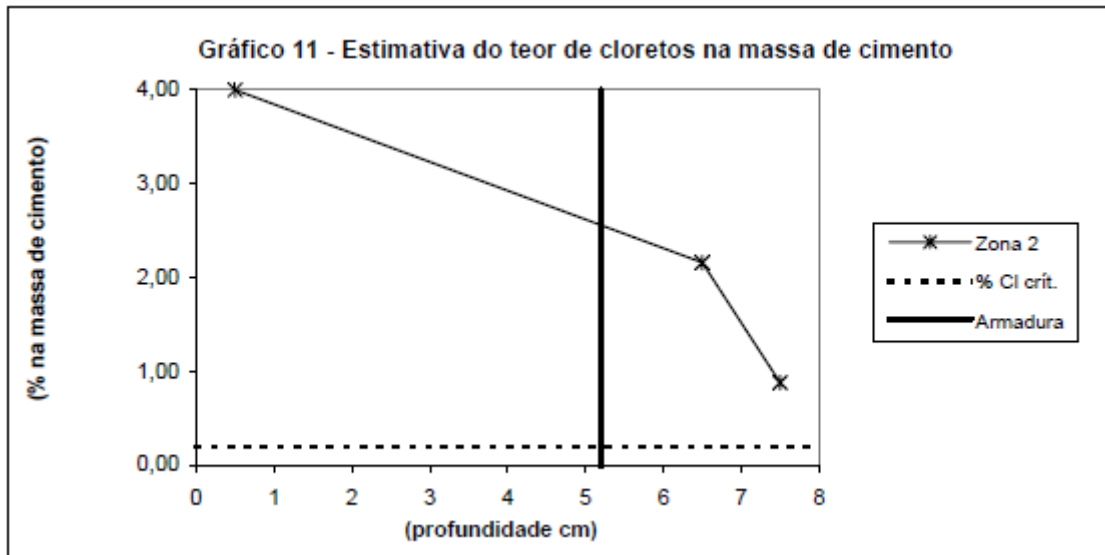
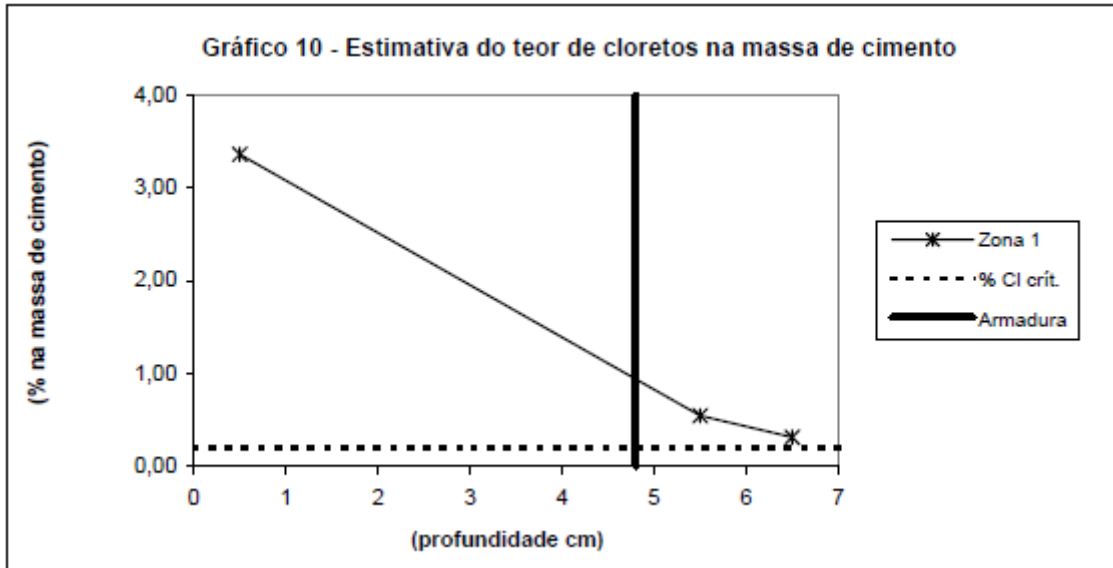
**Quadro 4 - Resultados dos ensaios para estimativa do teor de cloretos a várias profundidades**

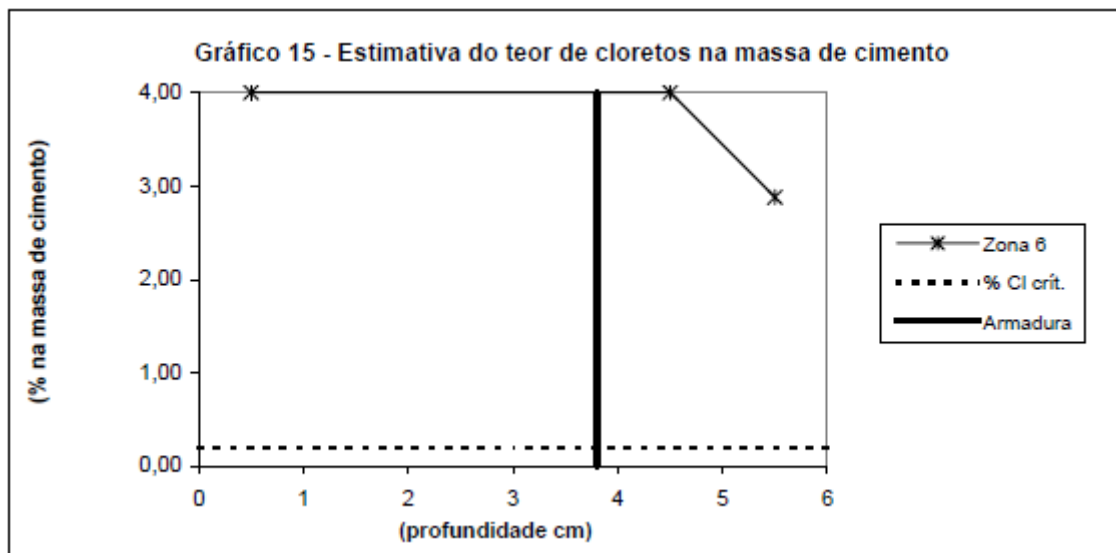
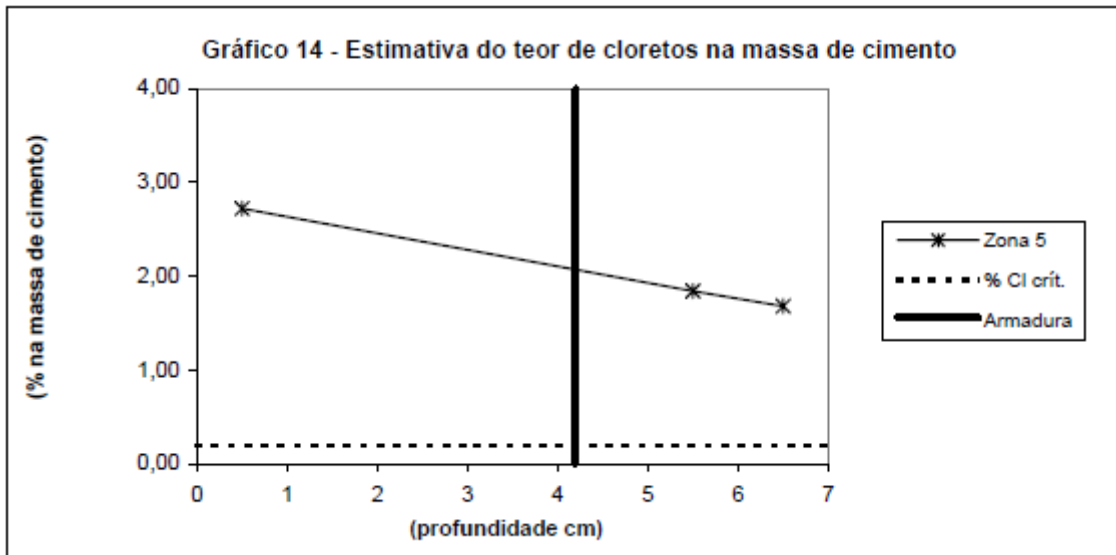
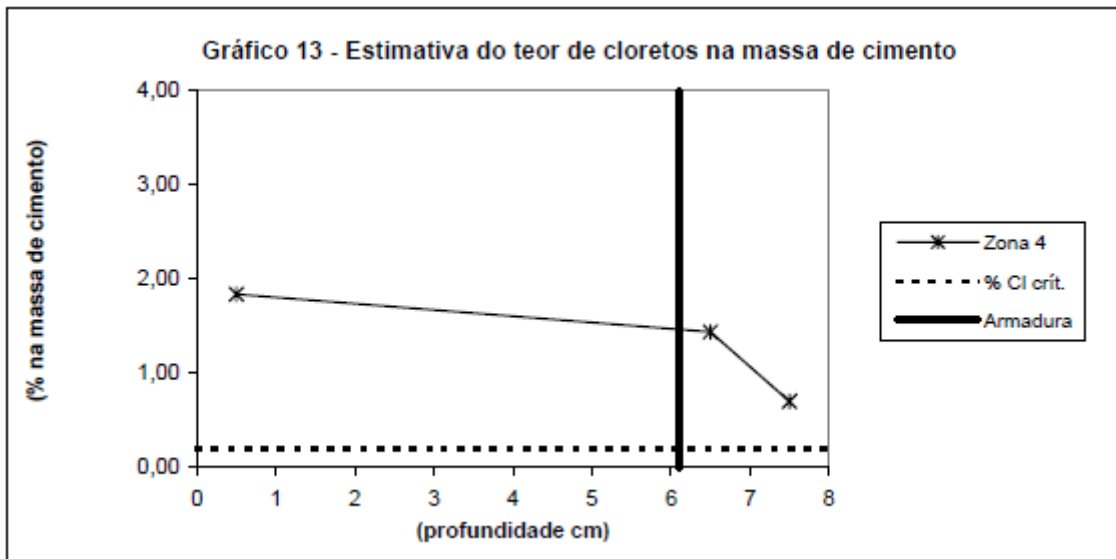
Zona	Elemento	Perfil [cm]	Percentagem em relação à massa de	
			betão	cimento *
1	Viga de bordadura (face lateral)	0,0 - 1,0	0,420	3,36
		5,0 - 6,0	0,068	0,54
		6,0 - 7,0	0,039	0,31
2	Viga de bordadura (face inferior)	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		6,0 - 7,0	0,270	2,16
		7,0 - 8,0	0,110	0,88
3	Viga de bordadura (face inferior)	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		4,0 - 5,0	0,230	1,84
		5,0 - 6,0	0,190	1,52
4	Viga de bordadura (face lateral)	0,0 - 1,0	0,230	1,84
		6,0 - 7,0	0,180	1,44
		7,0 - 8,0	0,088	0,70
5	Pilar	0,0 - 1,0	0,340	2,72
		5,0 - 6,0	0,230	1,84
		6,0 - 7,0	0,210	1,68
6	Carlinga (apoio)	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		4,0 - 5,0	0,500	4,00
		5,0 - 6,0	0,360	2,88
7	Viga pré- fabricada da laje	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		4,0 - 5,0	0,500	4,00
		5,0 - 6,0	0,470	3,76
8	Pilar	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		3,0 - 4,0	0,340	2,72
		5,0 - 6,0	0,210	1,68
9	Viga pré- fabricada da laje	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		4,0 - 5,0	0,500	4,00
		6,0 - 7,0	0,500	4,00
10	Carlinga (apoio)	0,0 - 1,0	0,500	4,00
		6,0 - 7,0	0,340	2,72
		7,0 - 8,0	0,260	2,08
11	Pilar	0,0 - 1,0	0,360	2,88
		5,0 - 6,0	0,310	2,48
		6,0 - 7,0	0,260	2,08
12	Carlinga (face inferior)	0,0 - 1,0	0,360	2,88
		4,0 - 5,0	0,500	4,00
		6,0 - 7,0	0,180	1,44

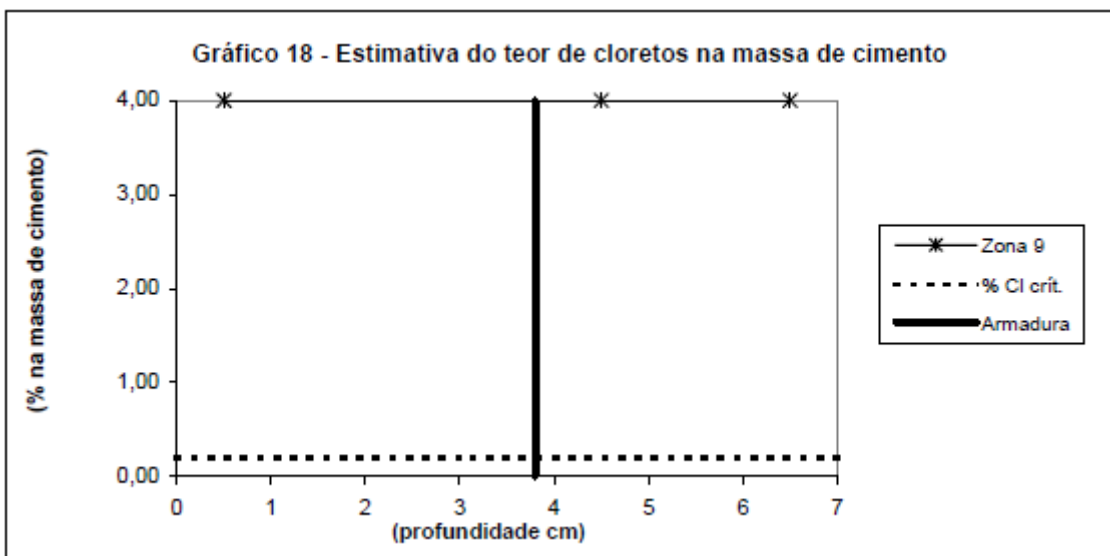
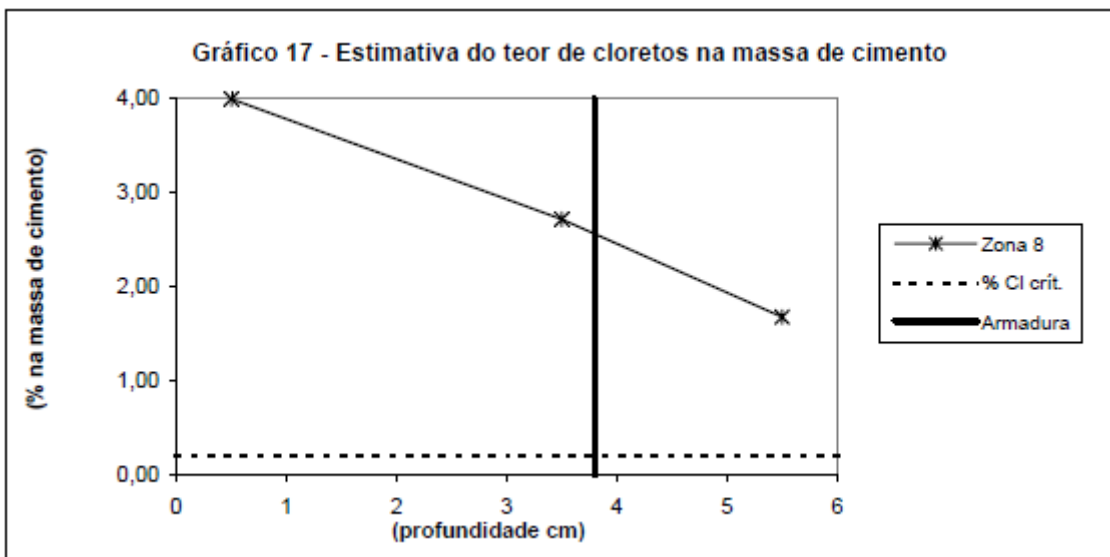
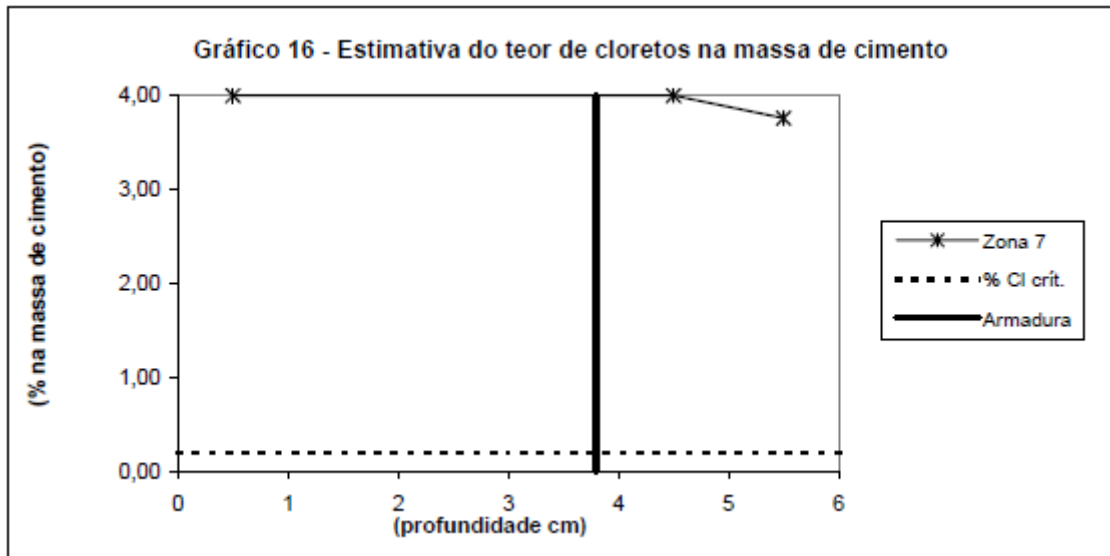
Notas:

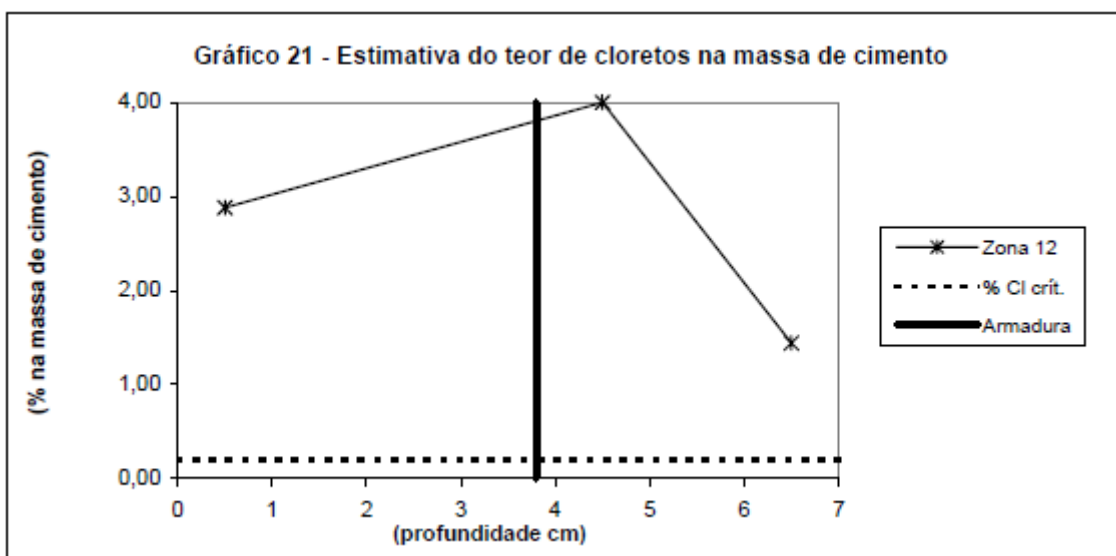
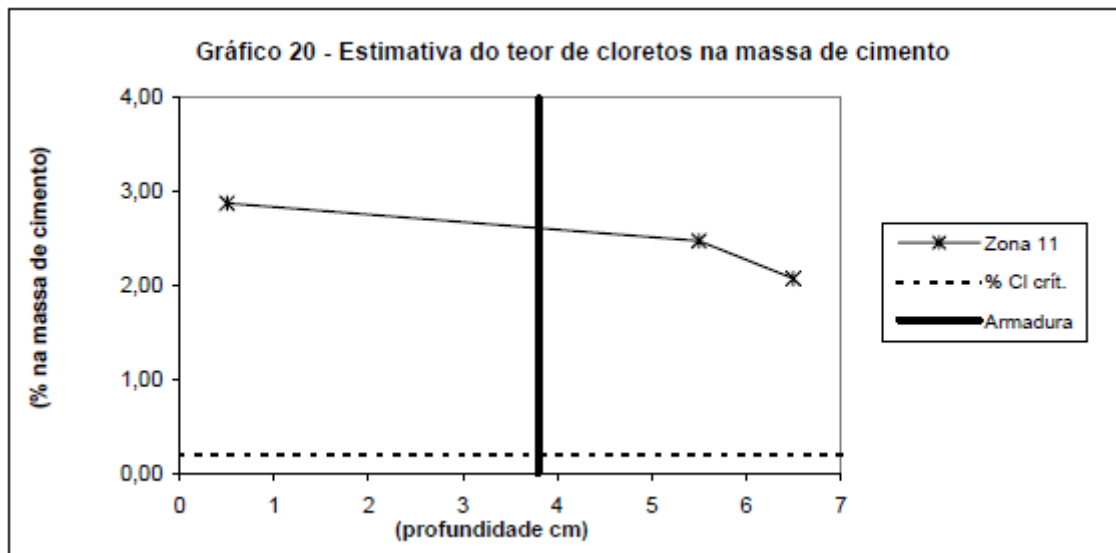
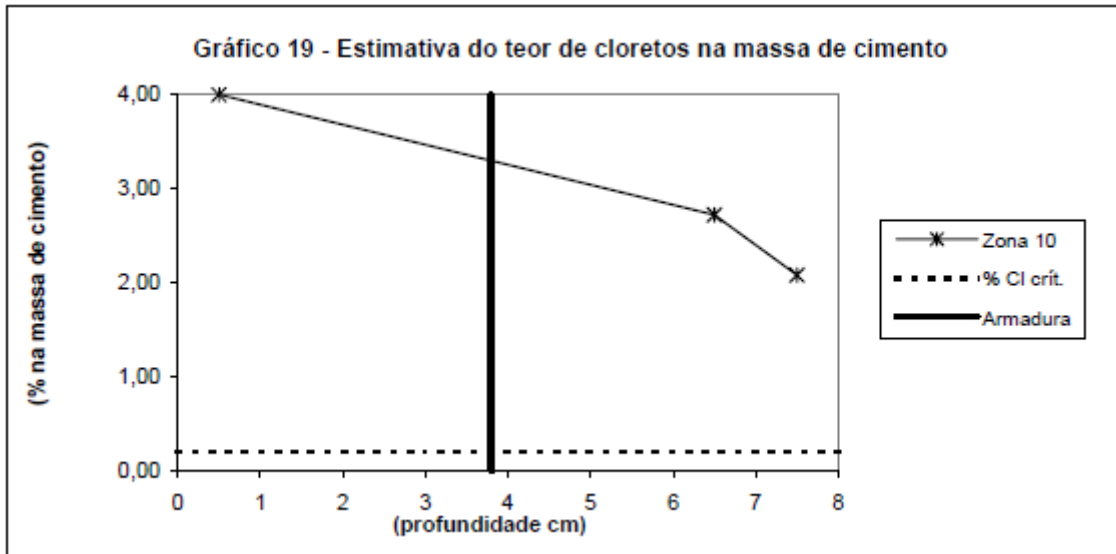
(\*) - Admite-se uma dosagem de 300 kg de cimento por m<sup>3</sup> de betão.

- Para teores de cloretos superiores a 0,50% (em relação à massa de betão), considerou-se um teor de cloretos igual a 0,50%.





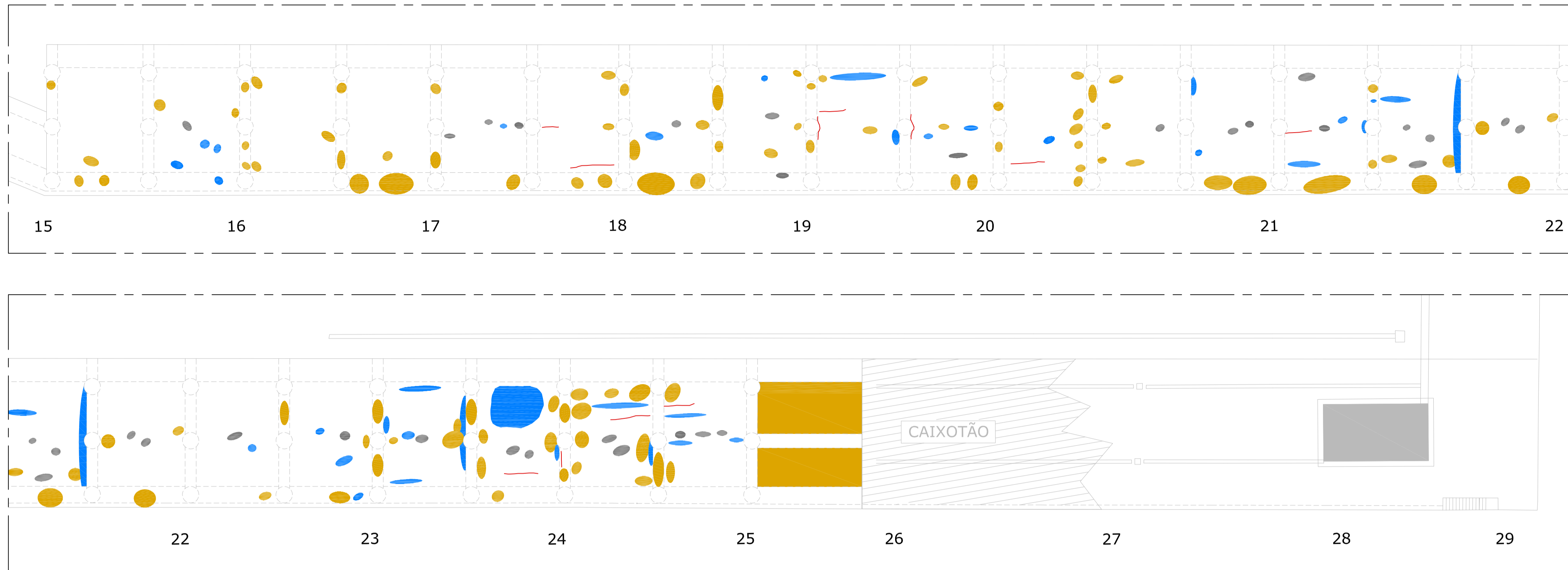






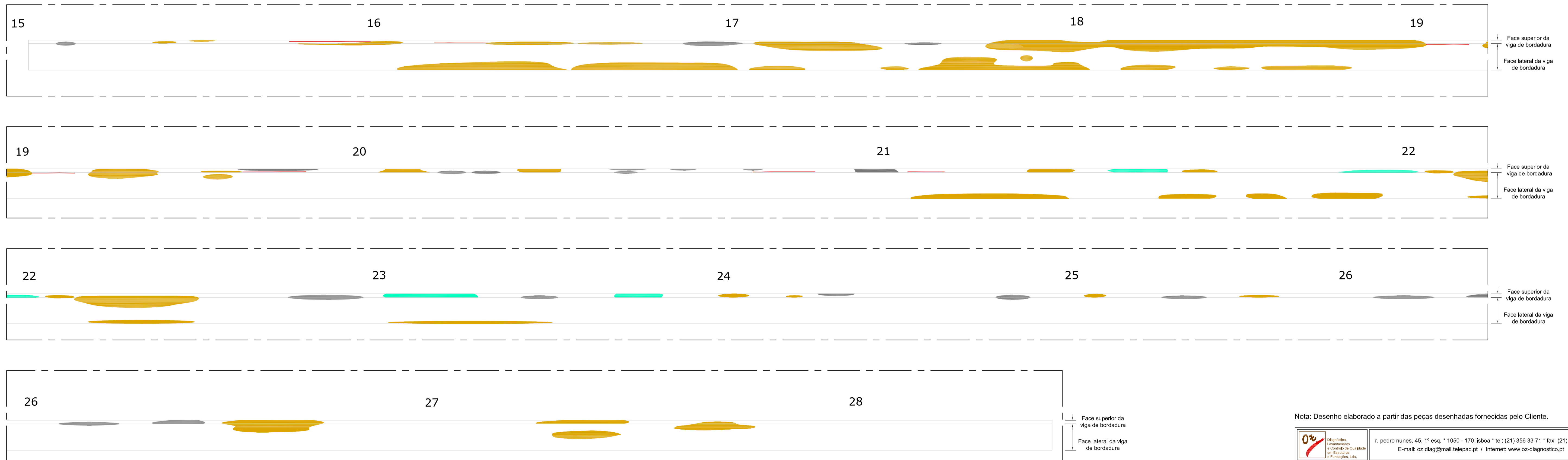
ANOMALIAS NA FACE INFERIOR DO TABULEIRO

Escala: 1: 250



ANOMALIAS NAS FACES SUPERIOR E LATERAL DA VIGA DE BORDADURA

Escala: 1: 100

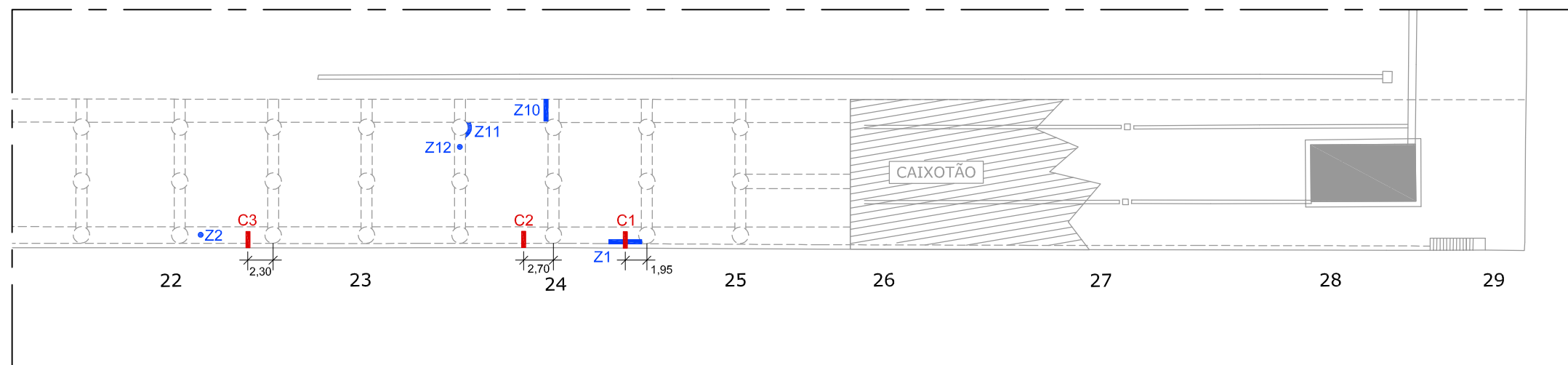
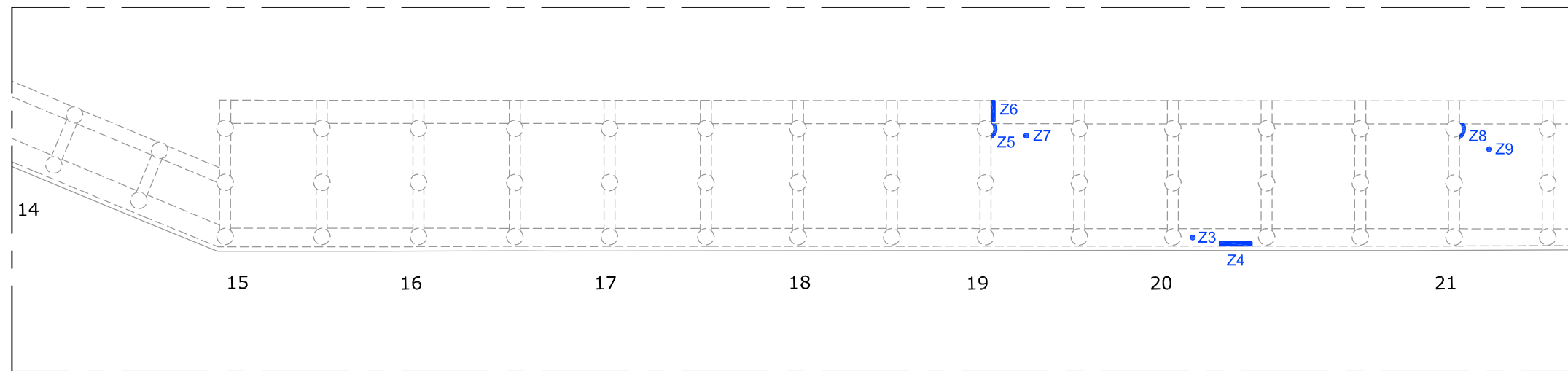


- Legenda :
- Fissura de delaminação
  - Corrosão de armaduras e delaminação do betão de recobrimento
  - Lacuna na secção de betão
  - Infiltração
  - Reparação com betão corrente

Nota: Desenho elaborado a partir das peças desenhadas fornecidas pelo Cliente.

	r. pedro nunes, 45, 1º esq., * 1050 - 170 lisboa * tel: (21) 356 33 71 * fax: (21) 315 35 50 E-mail: oz.ddiag@mail.telepac.pt / Internet: www.oz-diagnostico.pt	
	Proc. 1051	Ponte cais, no Funchal
Escalas 1: 100 1: 250	Relatório com os resultados da Inspeção e dos ensaios	
Data Abr./09	Levantamento esquemático de anomalias da estrutura emersa	Des. N.º 2
subst. por		subst. por
Este desenho é da exclusiva autoria e propriedade da OZ - diagnóstico, levantamento e controlo de qualidade em estruturas e fundações, lda. As informações nele contidas são, no entanto, livremente utilizáveis pelo Cliente, que poderá, com esse fim, reproduzir este desenho no todo ou em parte.		






**Legenda:**

- Z1 - Detecção e medição do recobrimento das armaduras e determinação da profundidade de carbonatação do betão
- C1 - Furo de extracção da carote

Notas: Desenho elaborado a partir das peças desenhadas fornecidas pelo Cliente.

 <small>Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda.</small>	<small>r. pedro nunes, 45, 1º esq. * 1050 - 170 lisboa * tel: (21) 356 33 71 * fax: (21) 315 35 50 E-mail: oz.diag@mail.telepac.pt / Internet: www.oz-diagnostico.pt</small>											
<small>Proc. 1051</small>	<b>Ponte cais, no Funchal</b>  <b>Relatório com os resultados da inspeção e dos ensaios</b>											
<small>Escala 1: 500</small>	<b>Planta da face inferior do tabuleiro</b>  <b>Localização esquemática das zonas de ensaio</b>	<b>Des. N.º 3</b>										
<small>Data Abr./ 09</small>	<table border="1" style="width: 100%; height: 20px;"> <tr> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> </table> <small>subst. subst. por</small>											

Este desenho é da exclusiva autoria e propriedade da Oz - diagnóstico, levantamento e controlo de qualidade em estruturas e fundações, lda. As informações nele contidas são, no entanto, livremente utilizáveis pelo Cliente, que poderá, com esse fim, reproduzir este desenho no todo ou em parte.



# **Anexo A2**

---

**Cálculos justificativos/ Metodologia utilizada pela especificação E 465**

Caso de Estudo: reabilitação da viga V.v2

A Viga V.v2 encontra-se representada no capítulo 3 das peças desenhadas, sendo que o seu dimensionamento será realizado de acordo com a Figura 3.8. O elemento estrutural possui uma espessura de 1.10m e uma base de 1,60, no qual foi considerado uma altura útil de 1,05m. O betão a utilizar é de classe resistência C40/50 e as armaduras de GFRP (os valores atribuídos às resistências dos elementos de GFRP podem ser consultados nos respetivos sites dos fornecedores). No anexo A2, os valores de cálculos justificativos fazem referência à utilização dos varões de GFRP do fabricante Schöck ComBar.

Para a elaboração de este e outros projetos, será necessário realizar um pré-dimensionamento ao elemento de betão armado com GFRP. De acordo com os critérios de deformação do ACI [1], para as vigas em que as condições de apoio forem as representadas na Figura 3.8 o valor mínimo atribuído à altura da viga é dada por:

$$h_{\min} = \frac{l}{16} \Leftrightarrow h = \frac{8,60}{16} = 0,54 \text{ m} < 1,1 \text{ m} \quad \text{OK} \quad [\text{A2.1}]$$

Cálculo dos Estados Limite Últimos (momento positivo viga V.v2):

- Esforços condicionantes (valores obtidos através da utilização do programa de elemento finitos SAP2000).

$$M_{sd}(\text{max, vão, viga v1}) = 742 \text{ kN.m}$$

$$M_{sd,cqp}(\text{max, vão, viga v1}) = 429 \text{ kN.m}$$

A Determinação das propriedades do material (Resistência à tração e extensão última) assume os seguintes valores, para o diâmetro de 25mm:

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C_E \cdot f_{fu}^* \Leftrightarrow f_{fu} = 0,7 \cdot 1100 = 770 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{fu} &= C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \Leftrightarrow \varepsilon_{fu} = 0,7 \cdot 0,018 = 0,013 \end{aligned} \quad [\text{A2.2}]$$

- Taxa de armadura:

O procedimento para determinação da taxa de armadura, consiste em admitir uma quantidade de armaduras e certificar-se que a secção verifica os Estados Limites Últimos. Para o caso em estudo, admitiu-se inicialmente 12Ø25 na qual corresponde a uma área de 58,92cm<sup>2</sup>.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} = \frac{5892}{1600 \cdot 1050} = 0,0035 \quad [\text{A2.3}]$$

- Taxa de armadura “equilibrada”:

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot \frac{40}{770} \cdot \frac{60 \cdot 10^3 \cdot 0,013}{60 \cdot 10^3 \cdot 0,013 + 770} = 0,0071 \quad [\text{A2.4}]$$

Dado que a percentagem das armaduras de GFRP é maior que percentagem das armaduras equilibradas, a rotura da secção ocorre pela rotura das armaduras.

- Cálculo do momento resistente devido a rotura dos varões de GFRP:

$$M_{Rd} = A_f \cdot f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 \cdot C_d}{2} \right) \Leftrightarrow$$

$$M_{Rd} = 5892 \cdot 770 \left( 1050 - \frac{0,85 \cdot 197}{2} \right) = 43,84 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm} = 4384 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad [\text{A2.5}]$$

$$C_d = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \Leftrightarrow C_b = \left( \frac{0,003}{0,003 + 0,013} \right) \cdot 1050 = 197 \text{ m}$$

- Verificação do momento resistente:

$$\Phi \times M_{Rd} \geq M_{Sd} = 0,55 \cdot 4384 = 2411 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rd} \geq M_{Sd} \Leftrightarrow 4384 \text{ kN} \cdot \text{m} > 2411 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{OK} \quad [\text{A2.6}]$$

- Armadura mínima:

$$A_{f,\min} = \frac{0,41 \cdot \sqrt{f'_c}}{f_{fu}} \cdot b_w d \geq \frac{2,3}{f_{fu}} b_w d \Leftrightarrow$$

$$A_{f,\min} = \frac{0,41 \cdot \sqrt{40}}{770} \cdot 1600 \cdot 1050 \geq \frac{2,3}{770} \cdot 1600 \cdot 1050 \Leftrightarrow$$

$$5657 \text{ mm}^2 \geq 5018 \text{ mm}^2 \quad [\text{A2.7}]$$

Armadura mínima a utilizar é de 12Ø25, que corresponde a uma área de 58,92 cm<sup>2</sup>.

#### Cálculo dos Estados Limite Serviços (momento positivo viga v1)

- Verificação da Fendilhação:

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \cdot \beta \cdot K_b \cdot \sqrt{d_c^2 + \left( \frac{S}{2} \right)^2} \Leftrightarrow$$

$$w = 2 \cdot \frac{72}{60 \cdot 10^3} \cdot 1,05 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{50^2 + \left( \frac{90}{2} \right)^2} = 0,26 \text{ mm} < 0,50 \text{ mm} \quad \text{OK} \quad [\text{A2.8}]$$

$$k = \sqrt{2\rho_f \cdot n_f + (\rho_f \cdot n_f)^2} - \rho_f \cdot n_f \Leftrightarrow k = \sqrt{2 \cdot 0,0035 \cdot 2 + (0,0035 \cdot 2)^2} - 0,0035 \cdot 2$$

$$= 0,112$$

$$n_f = \frac{E_f}{4750 \sqrt{f'_c}} = \frac{60 \cdot 10^3}{4750 \cdot \sqrt{40}} = 2 \quad [\text{A2.9}]$$

$$f_f = \frac{M_{ser}}{A_f \cdot d(1 - k/3)} \Leftrightarrow f_f = \frac{429}{5892 \cdot 10^6 \cdot 1,05 \cdot (1 - 0,121/3)} = 72 \text{ MPa}$$

$$\beta = \frac{1100 - 0,121 \cdot 1030}{1030 \cdot (1 - 0,121)} = 1,08$$

$$d_c = 1100 - 1030 = 70 \text{ mm}$$

A determinação do fator de  $\beta$  corresponde ao gradiente de extensão usado para transformar o nível de extensão da armadura para perto da superfície da viga onde a fendilhação é esperada [19].

- Verificação da deformada:

Cálculo do momento de inercia da secção.

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{1600 \cdot 1100^3}{12} = 1,775 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4 \quad [\text{A2.10}]$$

Cálculo do momento de fendilhação.

$$M_{cr} = \frac{2 \cdot f_r \cdot I_g}{h} = \frac{2 \cdot (0,62\sqrt{40}) \cdot 1,775 \cdot 10^{11}}{1100} = 1,265 \text{ MN} \cdot \text{m} = 1265 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad [\text{A2.11}]$$

$$M_{cr} > M_{serv.cqp} \Leftrightarrow 1265 \text{ kN} \cdot \text{m} > 429 \text{ kN} \cdot \text{m} \text{ secção não fendilhada}$$

Cálculo da deformada (Método direto).

Para a determinação da flecha elástica da viga Vv.2, optou-se por calcular a flecha elástica pelo método do PTV (Princípio dos trabalhos virtuais) para o caso da carga do veículo e pelo método das tabelas (tabelas de cálculo [34]) para as cargas permanentes e sobrecargas. O método do PTV consiste na aplicação de uma carga unitária, no ponto onde pretendemos determinar ao seu deslocamento, e através dos diagramas dos momentos fletores, determina-se o integral entre o momento para combinação quase permanente e momento com carga unitária.

Cálculo da flecha através das tabelas [34]:

$$a_{pp} = k \cdot \frac{PL^4}{EI} \Leftrightarrow a_{pp} = \frac{1}{384} \cdot \frac{77,6 \cdot 8,6^4}{30042 \cdot 0,1775} = 0,00012 \text{ m} = 0,12 \text{ mm}$$

$$a_{sc} = k \cdot \frac{PL^4}{EI} \Leftrightarrow a_{sc} = \frac{1}{384} \cdot \frac{(42 \cdot 0,8) \cdot 8,6^4}{30042 \cdot 0,1775} = 0,00009 \text{ m} = 0,09 \text{ mm} \quad [\text{A2.12}]$$

Cálculo da flecha através do teorema do PTV:

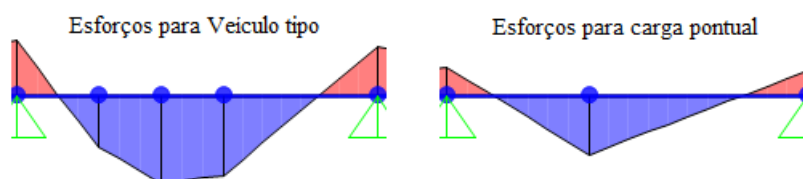


Figura A2.1 – Representação das cargas para o veículo tipo e para carga pontual.

$$EI = 4750\sqrt{40} \cdot 10^3 \cdot 0,1775 = 5332390 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$a = \int \frac{M \cdot \dot{M}}{EI} dx$$

$$\begin{aligned}
 a_{Vc} = \frac{1}{EI} & \left[ \frac{1,94}{3} (-145,5 \cdot (2 \cdot (-0,6) - 0,27) - 137(-0,6 - 2 \cdot 0,27)) \right. \\
 & + \frac{1,5}{6} (235,5 \cdot (2 \cdot 0,95 + 0,27) + 137 \cdot (0,95 + 2 \cdot 0,27)) \\
 & + \frac{1,16}{6} (235,5 \cdot (2 \cdot 1,5 + 0,95) + 218,8 \cdot (1,5 + 2 \cdot 0,95)) \\
 & + \frac{0,34}{6} (218,8 \cdot (2 \cdot 1,5 + 1,29) + 213,9 \cdot (1,5 + 2 \cdot 1,29)) + \frac{3,66}{6} (213, \\
 & \cdot (2 \cdot 1,19 - (-0,7)) - (-131,5) \cdot (1,29 - 2 \cdot (-0,7))) \left. \right] = 0,000238 \text{ m} \\
 & = 0,24 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{A2.13}$$

Flecha elástica Total:

$$a_{\text{Total}} = a_{pp} + a_{sc} + a_{Vc} \Leftrightarrow a_{\text{Total}} = 0,12 + 0,09 + 0,24 = 0,45 \text{ mm} \tag{A2.14}$$

Cálculo da flecha a longo prazo (através do ACI):

$$\begin{aligned}
 \Delta_{LT} &= (\Delta i)_{LL} + \lambda [(\Delta i)_{DL} + 0,2(\Delta i)_{LL}] \Leftrightarrow \\
 \Delta_{LT} &= (0,09 + 0,24) + (0,6 \cdot 2) \cdot [0,12 + 0,2 \cdot (0,09 + 0,24)] = 0,60 \text{ mm} \\
 \Delta_{LT} &\geq \frac{L}{240} \Leftrightarrow \Delta_{LT} \geq \frac{8600}{240} \Leftrightarrow 0,60 \text{ mm} \geq 36 \text{ mm} \quad \text{OK}
 \end{aligned} \tag{A2.15}$$

- Verificação das Limitações da resistência à fluência e à fadiga

$$\begin{aligned}
 f_{f,s} &= M_s \frac{n_f \cdot d(1-k)}{I_{cr}} \Leftrightarrow f_{f,s} = 429 \cdot \frac{2 \cdot 1,03 \cdot (1 - 0,121)}{0,1775} = 4,7 \text{ MPa} \\
 f_{f,s} &< 0,2 \cdot f_{fu} \Leftrightarrow f_{f,s} < 0,2 \cdot 770 \Leftrightarrow 4,7 \text{ MPa} < 154 \text{ MPa} \quad \text{OK}
 \end{aligned} \tag{A2.16}$$

O processo de dimensionamento à flexão para os restantes elementos estruturais (Viga V.v1 e Laje maciça) torna-se equivalente ao processo utilizado pela viga V.v2.

#### Cálculo da Resistência ao Corte (Laje maciça):

O dimensionamento da laje maciça segue o conceito da Figura 3.7 do capítulo 3, sendo que o elemento estrutural possui uma espessura de 0,45m, onde foi considerado uma altura útil de 0,40m. O betão a utilizar é de classe resistência C35/45 e as armaduras em GFRP. Da mesma maneira ao que foi feito no cálculo da resistência à flexão, as características resistentes do material GFRP, fazem referência ao fabricante Schöck ComBar.

- Esforços condicionantes (valores obtidos através da utilização do programa de elemento finitos SAP2000).

$$V_{sd}(\text{max, no apoio central}) = 584 \text{ kN.m}$$

- A Determinação das propriedades do material (Resistência à tração e extensão ultima) assume os seguintes valores, para o diâmetro de 12mm:

$$\begin{aligned} f_{fu} &= C_E \cdot f_{fu}^* \Leftrightarrow f_{fu} = 0,7 \cdot 1000 = 700 \text{ MPa} \\ \varepsilon_{fu} &= C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \Leftrightarrow \varepsilon_{fu} = 0,7 \cdot 0,018 = 0,013 \end{aligned} \quad [\text{A2.17}]$$

- Cálculo da resistência ao corte do betão:

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{2}{5} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot c \Leftrightarrow V_c = \frac{2}{5} \cdot \sqrt{40} \cdot 1850 \cdot 60 = 280810 \text{ N} = 281 \text{ kN} \\ c &= k \cdot d \Leftrightarrow c = 0,149 \cdot 400 = 60 \text{ mm} \end{aligned} \quad [\text{A2.18}]$$

- Cálculo da resistência ao corte dos estribos de GFRP:

Para a determinação das forças resistentes ao corte nos estribos, foi necessário admitir-se “x” números de varões e o seu espaçamento de forma a verificar a resistência ao corte, para tal admitiu-se inicialmente o valore de Ø12//0,100.

$$\begin{aligned} V_f &= \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s} \Leftrightarrow V_f = \frac{(106 \cdot 8) \cdot 220 \cdot 400}{100} = 746240 \text{ N} = 746 \text{ KN} \\ f_{fv} &= 0,004E_f \leq f_{fb} \Leftrightarrow f_{fv} = 0,004 \cdot (55 \cdot 10^3) = 220 \text{ MPa} \leq 368 \text{ MPa} \\ f_{fb} &= \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \Leftrightarrow \\ f_{fb} &= \left(0,05 \cdot \frac{54}{12} + 0,3\right) \cdot 700 = 368 \text{ MPa} \leq 700 \text{ MPa} \end{aligned} \quad [\text{A2.19}]$$

- Cálculo da verificação da resistência ao corte:

$$\begin{aligned} \emptyset \cdot V_{Rd} &\geq V_{Sd} \\ \emptyset \cdot (V_c + V_f) &\geq V_{Sd} \Leftrightarrow 0,75 \cdot (281 + 746) \geq 548 \\ 1027 \text{ kN} &> 580 \text{ kN} \quad \text{OK} \end{aligned} \quad [\text{A2.20}]$$

- Cálculo da armadura ao esforço transverso:

$$A_{fv,\min} = 0,35 \frac{b_w \cdot s}{f_{fv}} \Leftrightarrow A_{fv,\min} = 0,35 \frac{1850 \cdot 100}{220} = 249 \text{ mm}^2/\text{m} \quad [\text{A2.21}]$$

#### Disposições constitutivas (Laje maciça):

- Cálculo do comprimento de amarração dos varões de GFRP rectos:

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083 \cdot \sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b \Leftrightarrow \quad [A2.22]$$

$$l_d = \frac{1 \frac{840}{0.083 \cdot \sqrt{35}} - 340}{13.6 + \frac{33,5}{25}} 25 = 1397 \text{ mm} = 1,4 \text{ m}$$

$$C = \text{mín} \left( \text{recobrimento} + \frac{1}{2} \text{ diâmetro do varão}; \frac{1}{2} \text{ do espaçamento do varão} \right) \Leftrightarrow \quad [A2.23]$$

$$C = \text{mín} \left( 50\text{mm} + \frac{1}{2} \cdot 25\text{mm}; \frac{1}{2} \cdot 67\text{mm} \right) = 33,5\text{mm}$$

- Cálculo da tensão dos varões de GFRP para um comprimento embebido de  $l_e=1/2$ :

$$f_{fr} = f_{fe} = \frac{0.083 \cdot \sqrt{f'_c}}{\alpha} \left( 13.6 \cdot \frac{l_e}{d_b} + \frac{C}{d_b} \cdot \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \Leftrightarrow$$

$$f_{fe} = \frac{0.083 \cdot \sqrt{35}}{1} \left( 13.6 \cdot \frac{(\frac{5400}{2})}{25} + \frac{33,5}{25} \cdot \frac{(\frac{5400}{2})}{25} + 340 \right) \leq f_{fu} \Leftrightarrow \quad [A2.24]$$

$$1467 \text{ MPa} \leq f_{fu} = 840 \text{ MPa}$$

KO, a tensão à tração dos varões de GFRP será limitada pelo valor de 840 MPa

- Verificação do comprimento de amarração para as armaduras positivas no apoio simples:

$$l_d \leq \frac{\phi \cdot M_n}{V_u} + l_a \Leftrightarrow l_d \leq \frac{0,59 \cdot 1302}{584} + 0 \Leftrightarrow 1,4 \text{ m} \leq 1,7 \text{ m} \quad \text{OK} \quad [A2.25]$$

- Cálculo do comprimento de amarração para os varões de GFRP curvos:

$$l_{bhf} = \begin{cases} \frac{f_{fu}}{3.1} \cdot \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} & \text{para } 520 \text{ MPa} < f_{fu} < 1040 \text{ MPa} \Leftrightarrow \end{cases} \quad [A2.26]$$

$$l_{bhf} = \left\{ \frac{700}{3.1} \cdot \frac{12}{\sqrt{35}} = 458 \text{ mm} \right.$$

Este valor não deve ser inferior a  $12d_b=12(12\text{mm}) = 144\text{mm}$  ou  $230\text{mm}$ .

Metodologia utilizada pela especificação E 465

Nas tabelas seguintes temos os procedimentos de cálculo para a determinação do tempo de vida útil, sendo que os recobrimentos utilizados foram 2,5cm, 3,5cm, 4,5cm e 5,5cm, expostos às condições ambientais XS, e os tipos de cimentos utilizados foram CEM I ou II/A e CEM II/B até V.

Tabela A0.1 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil

Designação do betão / Classe de exposição ambiental	Classe de Resistência	Razão a/c	Tipo de cimento	Coefficiente de difusão - D <sub>0</sub> [m <sup>2</sup> /s. 10 <sup>-12</sup> ]	Recobrimento das armaduras [m]
A1/XS1	C35/45	0,42	CEM I ou II/A	20,4	0,025
A2/XS1			CEM II/B até V	7,2	
B1/XS3			CEM I ou II/A	20,4	
B2/XS3			CEM II/B até V	7,2	
A1/XS1			CEM I ou II/A	20,4	0,035
A2/XS1			CEM II/B até V	7,2	
B1/XS3			CEM I ou II/A	20,4	
B2/XS3			CEM II/B até V	7,2	
A1/XS1			CEM I ou II/A	20,4	0,045
A2/XS1			CEM II/B até V	7,2	
B1/XS3			CEM I ou II/A	20,4	
B2/XS3			CEM II/B até V	7,2	
A1/XS1			CEM I ou II/A	20,4	0,055
A2/XS1			CEM II/B até V	7,2	
B1/XS3			CEM I ou II/A	20,4	
B2/XS3			CEM II/B até V	7,2	
C1/XS1	C40/50	0,40	CEM I ou II/A	17,8	0,025
C2/XS1			CEM II/B até V	6,4	
D1/XS3			CEM I ou II/A	17,8	
D2/XS3			CEM II/B até V	6,4	
C1/XS1			CEM I ou II/A	17,8	0,035
C2/XS1			CEM II/B até V	6,4	
D1/XS3			CEM I ou II/A	17,8	
D2/XS3			CEM II/B até V	6,4	
C1/XS1			CEM I ou II/A	17,8	0,045
C2/XS1			CEM II/B até V	6,4	
D1/XS3			CEM I ou II/A	17,8	
D2/XS3			CEM II/B até V	6,4	
C1/XS1			CEM I ou II/A	17,8	0,055
C2/XS1			CEM II/B até V	6,4	
D1/XS3			CEM I ou II/A	17,8	
D2/XS3			CEM II/B até V	6,4	

Tabela A0.2 – Dados necessários para determinação do tempo de vida útil, continuação.

Designação do betão / Classe de exposição ambiental	Classe de Resistência	Razão a/c	Tipo de cimento	Coefficiente de difusão - $D_0$ [ $m^2/s \cdot 10^{-12}$ ]	Recobrimento das armaduras [m]
E1/XS1	C30/37	0,46	CEM I ou II/A	26,4	0,025
E2/XS1			CEM II/B até V	8,8	
F1/XS3			CEM I ou II/A	26,4	
F2/XS3			CEM II/B até V	8,8	
E1/XS1			CEM I ou II/A	26,4	0,035
E2/XS1			CEM II/B até V	8,8	
F1/XS3			CEM I ou II/A	26,4	
F2/XS3			CEM II/B até V	8,8	
E1/XS1			CEM I ou II/A	26,4	0,045
E2/XS1			CEM II/B até V	8,8	
F1/XS3			CEM I ou II/A	26,4	
F2/XS3			CEM II/B até V	8,8	
E1/XS1			CEM I ou II/A	26,4	0,055
E2/XS1			CEM II/B até V	8,8	
F1/XS3			CEM I ou II/A	26,4	
F2/XS3			CEM II/B até V	8,8	

Tabela A0.3 - Cálculo do  $t_{ic}$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_{ic}$ [seg.]	R [m]	erf	$C_R$	$C_s$	$C_b$	$K_{a/c}$	$K_{vert}$	$K_{hor}$	$K_{temp}$	K	$K_{D,c}$	$K_{D,RH}$	$K_{D,T}$	$D_0$ [ $m^2/s \cdot 10^{-12}$ ]	n	$t_0$ [seg.]
A1/XS1	42425621,3	0,025	0,725	0,004	0,0176	0,02	1,050	0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	20,4	0,55	2419200
A2/XS1	1885052265,1		0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	7,2	0,65	
B1/XS3	4093472,3		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	20,4	0,55	
B2/XS3	93246770,1		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	7,2	0,65	
A1/XS1	189271902,5	0,035	0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	20,4	0,55	
A2/XS1	12892606949,1		0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	7,2	0,65	
B1/XS3	18262061,2		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	20,4	0,55	
B2/XS3	637750994,1		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	7,2	0,65	
A1/XS1	578325947,7	0,045	0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	20,4	0,55	
A2/XS1	54203012586,4		0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	7,2	0,65	
B1/XS3	55800273,0		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	20,4	0,55	
B2/XS3	2681228497,5		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	7,2	0,65	
A1/XS1	1410934303,8	0,055	0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	20,4	0,55	
A2/XS1	170617835963,7		0,725	0,004	0,0176	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	7,2	0,65	
B1/XS3	136135201,4		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	20,4	0,55	
B2/XS3	8439851996,0		0,807	0,003	0,0378	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	7,2	0,65	

Notações:  $t_{ic}$  – período de iniciação de cálculo; erf – função de erro;  $C_R$  – concentração dos cloretos à profundidade do recobrimento;  $C_s$  – concentração dos cloretos à superfície do betão;  $C_b$  – percentagem de teor de cloretos proveniente da água do mar;  $K_{a/c}$  – factor que tem em conta a razão água/ ligante;  $K_{temp}$  – factor que tem em conta a temperatura do betão;  $K_{D,c}$  – factor que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar;  $K_{hor}$  – factor que tem em conta a distância à linha de costa;  $K_{D,c}$  – factor que tem em conta a influência das condições de cura;  $K_{D,RH}$  – factor que tem em conta a influência da humidade relativa do ambiente;  $K_{D,T}$  – factor que tem em conta a influência da temperatura;  $D_0$  – coeficiente de difusão potencial; n – factor que tem em conta o decréscimo de  $D$  ao longo do tempo;  $t_0$  – Idade de referência 28 dias.

Tabela A0.4 - Cálculo do  $t_{ic}$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para o tipo de cimento CEM I até V, continuação.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_{ic}$ [seg.]	R [m]	erf	$C_R$	$C_s$	$C_b$	$K_{a/c}$	$K_{vert}$	$K_{hor}$	$K_{temp}$	K	$K_{D,c}$	$K_{D,RH}$	$K_{D,T}$	$D_0$ [ $m^2/s \cdot 10^{-12}$ ]	n	$t_0$ [seg.]
C1/XS1	65602248,2	0,025	0,679	0,005	0,0168	0,02	1,000	0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	17,8	0,55	2419200
C2/XS1	3130942382,1		0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	6,4	0,65	
D1/XS3	5925836,0		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	17,8	0,55	
D2/XS3	142289203,8		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	6,4	0,65	
C1/XS1	292668956,8	0,035	0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	17,8	0,55	
C2/XS1	21413734917,9		0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	6,4	0,65	
D1/XS3	26436719,4		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	17,8	0,55	
D2/XS3	973171307,6		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	6,4	0,65	
C1/XS1	894258733,8	0,045	0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	17,8	0,55	
C2/XS1	90027482251,1		0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	6,4	0,65	
D1/XS3	80778185,3		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	17,8	0,55	
D2/XS3	4091400354,0		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	6,4	0,65	
C1/XS1	2181711418,9	0,055	0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	17,8	0,55	
C2/XS1	283384510675,4		0,679	0,005	0,0168	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	6,4	0,65	
D1/XS3	197073489,5		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	17,8	0,55	
D2/XS3	12878728342,8		0,791	0,004	0,0360	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	6,4	0,65	

Notações:  $t_{ic}$  – período de iniciação de cálculo; erf – função de erro;  $C_R$  – concentração dos cloretos à profundidade do recobrimento;  $C_s$  – concentração dos cloretos à superfície do betão;  $C_b$  – percentagem de teor de cloretos proveniente da água do mar;  $K_{a/c}$  – fator que tem em conta a razão água/ ligante;  $K_{temp}$  – fator que tem em conta a temperatura do betão;  $K_{D,c}$  – fator que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar;  $K_{hor}$  – fator que tem em conta a distância à linha de costa;  $K_{D,c}$  – 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; n – fator que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo;  $t_0$  – Idade de referência 28 dias.

Tabela A0.5 - Cálculo do  $t_{ic}$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_{ic}$ [seg.]	R [m]	erf	$C_R$	$C_s$	$C_b$	$K_{a/c}$	$K_{vert}$	$K_{hor}$	$K_{temp}$	K	$K_{D,c}$	$K_{D,RH}$	$K_{D,T}$	$D_0$ [ $m^2/s \cdot 10^{-12}$ ]	n	$t_0$ [seg.]
E1/XS1	22967612,7	0,025	0,737	0,004	0,0193	0,02	1,150	0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	26,4	0,55	2419200
E2/XS1	1008298636,4		0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	8,8	0,65	
F1/XS3	2269907,4		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	26,4	0,55	
F2/XS3	51440814,7		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	8,8	0,65	
E1/XS1	102464586,9	0,035	0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	26,4	0,55	
E2/XS1	6896147256,3		0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	8,8	0,65	
F1/XS3	101266656,6		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	26,4	0,55	
F2/XS3	351823775,8		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	8,8	0,65	
E1/XS1	313083603,7	0,045	0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	26,4	0,55	
E2/XS1	28992736535,7		0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	8,8	0,65	
F1/XS3	30942301,5		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	26,4	0,55	
F2/XS3	1479135183,6		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	8,8	0,65	
E1/XS1	763826001,8	0,055	0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	26,4	0,55	
E2/XS1	91262048552,9		0,737	0,004	0,0193	0,02		0,7	1	1,2	0,768	2,4	0,4	0,8	8,8	0,65	
F1/XS3	75489531,2		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	26,4	0,55	
F2/XS3	4655956045,2		0,810	0,003	0,0414	0,03		1	1	1,2	1,920	2,4	1	0,8	8,8	0,65	

Notações:  $t_{ic}$  – período de iniciação de cálculo; erf – função de erro;  $C_R$  – concentração dos cloretos à profundidade do recobrimento;  $C_s$  – concentração dos cloretos à superfície do betão;  $C_b$  – percentagem de teor de cloretos proveniente da água do mar;  $K_{a/c}$  – fator que tem em conta a razão água/ ligante;  $K_{temp}$  – fator que tem em conta a temperatura do betão;  $K_{D,c}$  – fator que tem em conta o posicionamento em relação ao nível do mar;  $K_{hor}$  – fator que tem em conta a distância à linha de costa;  $K_{D,c}$  – 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; n – fator que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo;  $t_0$  – Idade de referência 28 dias.

Tabela A0.6 Cálculo do  $t_p$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_p$ [anos]	Classe de exposição ambiental	$k$	$\phi_0$ [mm]	$\alpha$	$I_{corr}$ [ $\mu A/cm^2$ ]	$R$ [mm]	$f_{cd}$ [MPa]
A1/XS1	1,57	XS1	1,128	8	10	0,5	25	3
A2/XS1	1,57	XS1	1,128			0,5	25	3
B1/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
B2/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
A1/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
A2/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
B1/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
B2/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
A1/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
A2/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
B1/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
B2/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
A1/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
A2/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
B1/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3
B2/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3

Notações:  $t_p$  – período de propagação de cálculo;  $k$  – Valor da redução de secção das armaduras devida à corrosão;  $\phi_0$  – diâmetro inicial das armaduras passivas;  $\alpha$  – fator que tem em conta ao tipo de corrosão (uniforme ou pecada);  $I_{corr}$  – fator que tem em conta a taxa de corrosão;  $R$  – recobrimento do elemento estrutural;  $f_{cd}$  – resistência à compressão diametral do betão.

Tabela A0.7 – Cálculo do  $t_p$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_p$ [anos]	Classe de exposição ambiental	$k$	$\phi_0$ [mm]	$\alpha$	$I_{corr}$ [ $\mu A/cm^2$ ]	$R$ [mm]	$f_{cd}$ [MPa]
C1/XS1	1,57	XS1	1,128	8	10	0,5	25	3
C2/XS1	1,57	XS1	1,128			0,5	25	3
D1/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
D2/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
C1/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
C2/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
D1/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
D2/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
C1/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
C2/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
D1/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
D2/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
C1/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
C2/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
D1/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3
D2/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3

Notações:  $t_p$  – período de propagação de cálculo;  $k$  – Valor da redução de secção das armaduras devida à corrosão;  $\phi_0$  – diâmetro inicial das armaduras passivas;  $\alpha$  – fator que tem em conta ao tipo de corrosão (uniforme ou pecada);  $I_{corr}$  – fator que tem em conta a taxa de corrosão;  $R$  – recobrimento do elemento estrutural;  $f_{cd}$  – resistência à compressão diametral do betão.

Tabela A0.8 – Cálculo do  $t_p$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.

Designação / Classe de exposição ambiental	$t_p$ [anos]	Classe de exposição ambiental	k	$\phi_0$ [mm]	$\alpha$	$I_{corr}$ [ $\mu A/cm^2$ ]	R [mm]	$f_{cd}$ [MPa]
E1/XS1	1,57	XS1	1,128	8	10	0,5	25	3
E2/XS1	1,57	XS1	1,128			0,5	25	3
F1/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
F2/XS3	0,78	XS3	1,128			1	25	3
E1/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
E2/XS1	1,89	XS1	1,356			0,5	35	3
F1/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
F2/XS3	0,94	XS3	1,356			1	35	3
E1/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
E2/XS1	2,20	XS1	1,584			0,5	45	3
F1/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
F2/XS3	1,10	XS3	1,584			1	45	3
E1/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
E2/XS1	2,52	XS1	1,812			0,5	55	3
F1/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3
F2/XS3	1,26	XS3	1,812			1	55	3

Notações:  $t_p$  – período de propagação de cálculo; k – Valor da redução de secção das armaduras devida à corrosão;  $\phi_0$  – diâmetro inicial das armaduras passivas;  $\alpha$  – fator que tem em conta ao tipo de corrosão (uniforme ou pecada);  $I_{corr}$  – fator que tem em conta a taxa de corrosão; R – recobrimento do elemento estrutural;  $f_{cd}$  – resistência à compressão diametral do betão.

Tabela A0.9 – Cálculo do  $t_L$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V.

Designação / Classe de exposição ambiental	R [mm]	$t_{ic}$ [anos]	$t_i$ [anos]	$t_p$ [anos]	$t_L$ [anos]	$t_g$ [anos]	$\gamma$
A1/XS1	25	1	0	2,0	2	50	2,8
A2/XS1		60	21	2,0	23		
B1/XS3		0	0	1,0	1		
B2/XS3		3	1	1,0	2		
A1/XS1	35	6	2	2,0	4		
A2/XS1		409	146	2,0	148		
B1/XS3		1	0	1,0	1		
B2/XS3		20	7	1,0	8		
A1/XS1	45	18	7	2,0	9		
A2/XS1		1719	614	2,0	616		
B1/XS3		2	1	1,0	2		
B2/XS3		85	30	1,0	31		
A1/XS1	55	45	16	3,0	19		
A2/XS1		5410	1932	3,0	1935		
B1/XS3		4	2	1,0	3		
B2/XS3		268	96	1,0	97		
C1/XS1	25	2	1	2,0	3	50	2,8
C2/XS1		99	35	2,0	37		
D1/XS3		0	0	1,0	1		
D2/XS3		5	2	1,0	3		
C1/XS1	35	9	3	2,0	5		
C2/XS1		679	243	2,0	245		
D1/XS3		1	0	1,0	1		
D2/XS3		31	11	1,0	12		
C1/XS1	45	28	10	2,0	12		
C2/XS1		2855	1020	2,0	1022		
D1/XS3		3	1	1,0	2		
D2/XS3		130	46	1,0	47		
C1/XS1	55	69	25	3,0	28		
C2/XS1		8986	3209	3,0	3212		
D1/XS3		6	2	1,0	3		
D2/XS3		408	146	1,0	147		

Notações:  $R$  – recobrimento do elemento estrutural;  $t_{ic}$  – período de iniciação de cálculo;  $t_i$  – período de iniciação do projeto;  $t_p$  – período de propagação de cálculo;  $t_L$  – período de vida útil de cálculo;  $t_g$  – período de vida útil pretendido;  $\gamma$  – fator de segurança da vida útil.

**Tabela A0.10 - Cálculo do  $t_L$  para condições ambientais XS1 e XS3, e para os tipos de cimentos CEM I até V, continuação.**

Designação / Classe de expo- sição ambiental	R [mm]	$t_{ic}$ [anos]	$t_i$ [anos]	$t_p$ [anos]	$t_L$ [anos]	$t_g$ [anos]	$\gamma$
E1/XS1	25	0,7	0,3	2,0	2	50	2,8
E2/XS1		32,0	11,4	2,0	13		
F1/XS3		0,1	0,0	1,0	1		
F2/XS3		1,6	0,6	1,0	2		
E1/XS1	35	3,2	1,2	2,0	3		
E2/XS1		218,7	78,1	2,0	80		
F1/XS3		3,2	1,1	1,0	2		
F2/XS3		11,2	4,0	1,0	5		
E1/XS1	45	9,9	3,5	2,0	6		
E2/XS1		919,4	328,3	2,0	330		
F1/XS3		1,0	0,4	1,0	1		
F2/XS3		46,9	16,8	1,0	18		
E1/XS1	55	24,2	8,7	3,0	12		
E2/XS1		2893,9	1033,5	3,0	1037		
F1/XS3		2,4	0,9	1,0	2		
F2/XS3		147,6	52,7	1,0	54		