CLÁUDIA SOFIA FOLGADO SANTOS

ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Orientador: Professor Elói João Faria Figueiredo

Coorientador: Professor António Manuel Gardete Mendes Cabaço

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2017

CLÁUDIA SOFIA FOLGADO SANTOS

ANÁLISE DE SOLUÇÕES DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Dissertação defendida em provas públicas na Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias no dia 10/05/2018, perante o júri, nomeado pelo Despacho de Nomeação n.º:4/2018, de 09/01/2018 com a seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Francisco Faria Ferreira, por delegação do Diretor do curso, ULHT

Arguente: Prof. Doutor Filipe Amarante dos Santos, FCT/UNL

Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo, ULHT

Vogal: Prof.ª Doutora Maria João Serpa da Lança Falcão da Silva, ULHT

Coorientador: Prof. António Manuel Gardete Mendes Cabaço, ULHT

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2017

Ao meu pai, mãe e irmã

Agradecimentos

Na finalização desta dissertação, desejo manifestar o meu reconhecimento às pessoas que me acompanharam durante esta etapa da minha vida e que contribuíram, das mais variadas formas, para que fossem cumpridos os objetivos estabelecidos e destaco as seguintes pessoas:

- O Professor Elói Figueiredo pela disponibilidade que demonstrou em ser meu orientador, pela motivação de fazer mais e melhor, pela partilha de conhecimentos e por toda a disponibilidade e vontade que demonstrou sempre que necessitei de ajuda;
- O Professor António Cabaço por ter aceitado ser meu coorientador, por toda a partilha de conhecimentos e definição de ideias;
- O Professor Armando Manso pela disponibilidade que demonstrou em ir a uma reunião, numa empresa que trabalha com reforço de estruturas;
- A Eng.ª Joana Pereira da empresa S&P, pela disponibilidade que demonstrou em fornecer orçamentos necessários para o trabalho desta dissertação;
- A minha família: os meus pais que me deram condições para durante todos os anos seguir os meus objetivos e finalizar o meu percurso académico. Os meus pais e a minha irmã por serem os meus principais motivadores na realização desta dissertação, mesmo nas ocasiões mais difíceis, em que parecia que o trabalho não se realizaria.

Análise de soluções de reforço de estruturas de betão armado

RESUMO

Num país desenvolvido como Portugal, com uma área densa de infraestrutura e de edifícios construídos, o reforço de estruturas é cada vez mais comum quer através da reabilitação, da alteração do uso, erros de dimensionamento ou erros de construção. Atualmente, existem várias soluções de reforço de estruturas no mercado, no entanto, algumas delas não têm a documentação técnica e económica necessária. Neste contexto, esta dissertação tem quatro objetivos. O primeiro objetivo centra-se na identificação e descrição das técnicas de reforço existentes. O segundo objetivo consiste na análise técnica das soluções de reforço. O terceiro, depende diretamente do segundo, consiste na análise económica das soluções de reforço através da criação de mapas de quantidades, fichas de rendimento e orçamentos. O quarto objetivo consiste na comparação económica das técnicas de reforço utilizadas, por metro quadrado.

Por questões de análise prática, nesta dissertação analisam-se apenas duas soluções de reforço. A primeira são as chapas de aço por serem uma solução de reforço mais tradicional, e a segunda são os laminados de compósitos reforçados com fibras de carbono por ser recente e menos utilizada.

Na presente dissertação conclui-se que para a mesma solicitação, a área de reforço necessária é maior para a solução de reforço com chapas de aço. Demonstra-se, ainda, que o que mais influencia os custos são a quantidade ou área de vigas a reforçar e os desperdícios que têm de ser contabilizados, referentes aos materiais. Da comparação das duas soluções de reforço constata-se que solução mais económica é a dos laminados de CFRP.

Palavras-chave: Soluções de reforço, Reabilitação, Chapas de aço, Compósitos reforçados com fibras, Análise técnico-económica

Analysis of retrofitting solutions for reinforced concrete structures

ABSTRACT

In a developed country like Portugal, with a dense area of infrastructure and buildings, retrofitting of structures is increasingly common either through rehabilitation or through other reasons such as change of use, design errors or construction errors. Currently, there are several solutions available to strength structures; however, some of them do not have the necessary technical and economic documentation. In this context, this dissertation has four objectives. The first objective focuses on identifying and describing existing retrofitting solutions. The second objective is the technical analysis of those solutions. The third one, depends directly on the second one, and consists of the economic analysis of the retrofitting solutions through the creation of quantity maps, yield sheets and budgets. The fourth objective is the economic comparison of the retrofitting solutions used, per square meter.

Due to practical reasons, in this dissertation only two retrofitting solutions are analyzed. The first one is the traditional sheet steel because and the second one is based on carbon fiber reinforced polymers (CFRP).

In the present dissertation, it is concluded that for the same application, the required reinforcement area is greater for the reinforcing solution with steel sheets. It is also demonstrated that what most influence the costs are the quantity or area of beams to be reinforced and the wastes that have to be accounted for, referring to the materials. The comparison of the two reinforcement solutions shows that CFRP laminates are the most economical solution.

Keywords: Retrofitting solutions, Rehabilitation, Sheet steel, Carbon fiber reinforced polymers, Technical-economic analysis

Siglas

AFRP – Aramid fiber reinforced polymer (Compósitos reforçados com fibras de aramida)

ARU – Áreas de Reabilitação Urbana

CFRP – Carbon fiber reinforced polymer (Compósitos reforçados com fibras de carbono)

CML – Câmara Municipal de Lisboa

EC – Eurocódigo

EC0 – Eurocódigo 0

*EC*1 – Eurocódigo 1

EC2 – Eurocódigo 2

EC8 – Eurocódigo 8

FRP – Fiber reinforced polymer (Compósitos reforçados com fibras)

GFRP – Glass Fiber reinforced polymer (Compósitos reforçados com fibras de vidro)

INE – Instituto Nacional de Estatística

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SRU – Sociedades de Reabilitação Urbana

Simbologia

Notações Escalares Latinas Maiúsculas

A_f – Área de reforço de FRP

A_s – Área de armadura de aço

A_s^{eq} – Área de armadura equivalente para a secção a reforçar

A_s^{i} – Igual a As

A_s^{r} – Área de armadura de reforço de aço

C_{dir} – Custo direto

C_{prod} – Custo de produção

E_{cm} – Valor médio do módulo de elasticidade do betão

E_s – Módulo de elasticidade do aço de armadura de tração

F_c – Força no betão

F_f – Força no laminado de CFRP

F_s^{i} – Força na armadura ordinária de tração

F_s^r – Força na armadura ordinária de tração de reforço

F_{sd} – Força de cálculo na armadura

$F_{T,f}$ – Força de tração no laminado

L – Comprimento do reforço

L – Comprimento da viga

L_0 – Distância da extremidade do reforço ao eixo do apoio

M_{cr} – Momento crítico

M_{gk} – Momento característico das cargas permanentes

M_{qk} – Momento característico das cargas variáveis

M_{rd} – Momento resistente

M_{Rd0} – Momento resistente da secção não reforçada

M_{Rdf} – Momento resistente final

M_{Rk0} – Momento de resistência da secção transversal não reforçada

M_{sdf} – Valor de cálculo do momento fletor atuante na secção reforçada para ELU

$M_{skf,r}$ – Momento fletor característico da secção transversal reforçada

R – parâmetro de reforço

S_{ubEmp} – Custo das subempreitadas

$T_{m,máx}$ – Força de amarração máxima

V_{sd} – Valor de cálculo do esforço transverso atuante (ELU)

V_{rd} – Valor de cálculo do esforço transverso resistente na secção

$V_{rd,\mathrm{c}}$ – Valor de cálculo do esforço transverso resistente do elemento sem armadura transversal

$V_{rd,\mathrm{s}}$ – Valor de cálculo do esforço transverso resistente equilibrado pela armadura de esforço transverso na tensão de cedência

$V_{rd,\mathrm{r}}$ – Valor de cálculo do esforço transverso referente à armadura de reforço

V_{rd0} – Valor de cálculo do esforço transverso resistente inicial na secção

V_{rdf} – Valor de cálculo do esforço transverso resistente final na secção

$V_{rd,máx}$ – Valor máximo de cálculo do esforço transverso resistente na secção

V_{wd} – Parcela do valor de cálculo do esforço transverso resistente que depende da armadura de esforço transverso

$\mathrm{X_k}$ – Valor característico da propriedade do material

Notações Escalares Latinas Minúsculas

a_L – Translação do diagrama de forças $\mathrm{M_{sd/z}}$

aL_0 – Vão de corte fictício

a_i – Metade do valor de b_w

$a_{r,min}$ – Distância de bordo mínima

b – Largura da viga

b_f – Largura do laminado de FRP

b_s – Largura da chapa de aço

b_w – Largura da alma da secção transversal

c_F – Constante interveniente na expressão de Matthys

c_w – Distância de bordo mínima, igual a $a_{r,min}$

c – Recobrimento da armadura de aço de tração

c_1 – Constante interveniente na expressão de $T_{m,máx}$ que pode ser obtida por teste de calibração

c_2 – Constante interveniente na expressão de $l_{b,máx}$ que pode ser obtida por teste de calibração

d – Altura útil

d^{eq} – Altura útil equivalente

d_m – Altura útil média

d^i – Igual a d

d^r – Altura útil do reforço com chapa de aço

d^f – altura útil do laminado de FRP

f – Distância da extremidade do reforço FRP à face do apoio

f_{cd} – Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

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

f_{cm} – $f_{ck}+8$

f_{ctm} – Valor médio de tensão de rotura do betão à tração simples

f_{fd} – Tensão de cálculo da rotura do CFRP

f_{syd} – Resistência de cálculo da armadura equivalente

f^i_{syd} – Igual a f_{syd}

f^r_{syd} – Resistência de cálculo da armadura de reforço

g_k – Valor característico da ação permanente distribuída

g_{k0} – Valor característico da ação permanente distribuída inicial

g_{kf} – Valor característico da ação permanente distribuída no futuro

h – Altura da secção retangular do elemento de betão armado a reforçar

k – Parâmetro menor ou igual a 2,0

k_b – Parâmetro para o cálculo de $T_{máx}$

k_c – Parâmetro para o cálculo de $T_{máx}$ relacionado com a qualidade da superfície de betão

k_T – Parâmetro para o cálculo de $T_{máx}$ relacionado com a temperatura a que está exposta a estrutura

k_μ – Parâmetro para o cálculo de $T_{máx}$

l_b – Comprimento da ligação (mínimo: $l_b = l_{b,max}$ recomendado: $l_b = 1m$)

l_{bd} – Comprimento de amarração de cálculo

$l_{b,max}$ – Comprimento de ligação máximo

qk – Valor característico da ação variável distribuída

q_{k0} – Valor característico da ação variável distribuída inicial

q_{kf} – Valor característico da ação variável distribuída no futuro

$s_{f,max}$ – Espaçamento axial

s_w – Espaçamento entre estribos

t_g – Espessura do adesivo

t_s – Espessura da chapa de aço

x – Profundidade do eixo neutro medida desde a fibra mais comprimida

x_a – Local onde se inicia a amarração do reforço

x_b – Local onde termina a amarração do reforço

x_E – Profundidade do eixo neutro na secção localizada à distância XE do apoio, medida desde a fibra mais comprimida

z – Braço das forças internas na secção, aproximadamente igual a 0,9d

z^{eq} – Braço equivalente das forças internas na secção

z – Braço entre a força de compressão do betão e o reforço à flexão para o reforço com CFRP

z_m – Braço médio das forças internas na secção

z_r – Braço entre a força de compressão do betão e o reforço à flexão para o reforço com chapa de aço

Notações Escalares Gregas

α – Parâmetro relacionado com o grau de reforço ao corte

α_{ct} – Igual a 1,0 (valor recomendado)

α_f – Razão de rigidez FRP / Betão *(Ef/Ecm)*

α_r – Razão de rigidez aço de tração / betão *(Es/Ecm)*

β – Razão entre a profundidade do bloco retangular de tensões e a profundidade do eixo neutro

ΔV_w – Diferença da força de corte

γc – Coeficiente de segurança para o betão

γ_E – Igual a 1,2

γ_f – Coeficiente de segurança para o FRP a ser dimensionado

γ_G – Fator de combinação para as ações permanentes

$\gamma_{n,M}$ – Igual a 0,9 para vigas

γ_M – Fator parcial dependente do modo de rotura

γ_Q – Fator de combinação para as ações variáveis

γ_s – Coeficiente de segurança para o aço de tração

$\gamma_{s,r}$ – Igual a $1{,}5\gamma s,i$.

$\gamma_{\tau sd}$ – Aproximadamente igual a 0,5 MPa

ε_0 – Igual a ε_{b0}

ε_{b0} – Extensão inicial na face a reforçar devida apenas a ações permanentes *(‰)*

ε_{c0} – Extensão na fibra mais comprimida de betão, na secção inicial, no instante de aplicação do reforço *(‰)*

ε_c – Extensão na fibra mais comprimida de betão *(‰)*

ε_{c2} – Extensão no eixo da curva parabólica *(‰)*

ε_{cu} – Extensão última do betão *(‰)*

ε_{cu2} – Extensão máxima do betão *(‰)*

ε_f – Extensão no reforço de FRP *(‰)*

ε_{fd} – Valor de cálculo da extensão no sistema de reforço FRP *(‰)*

$\varepsilon_{f,limit}$ – Extensão limite no reforço de FRP *(‰)*

ε_{s0} – Extensão na armadura ordinária de tração, na secção inicial, aquando da aplicação do reforço *(‰)*

ε_{s1} – Extensão na armadura ordinária de tração*(‰)*

ε_{s2} – Extensão na armadura ordinária de compressão*(‰)*

ε_{yd} – Valor de cálculo da extensão de cedência do aço de armadura de tracção *(‰)*

$\varepsilon_{yd}{}^{r}$ – Valor de cálculo da extensão de cedência do aço de armadura de tracção de reforço *(‰)*

η – Coeficiente do bloco retangular de tensões do betão

η_M – Parâmetro para o cálculo de ΔV_w

η_1 – Parâmetro para o cálculo de fbd

η_2 – Parâmetro para o cálculo de fbd

θ – Parâmetro de segurança

θ – Inclinação da biela de compressão

μ – Momento fletor reduzido

υ – Fator de eficácia

ξ – Parâmetro dado pelo quociente entre *x* e *d*

ρ_s – Percentagem de armadura do aço de tração *(%)*

σ_c – Tensão no betão

σ_f – Tensão no CFRP

σ_s – Tensão no aço

σ_{sd} – Tensão de cálculo do aço

σ_{wd} – Tensão do reforço ao corte externo (em ε_{limit}=0,2%)

τ_1 – Tensão tangencial

τ_2 – Tensão tangencial

τ_{rd} – Valor de cálculo da tensão resistente de corte

τ_{sd} – Valor de cálculo da tensão de aderência

ω – Percentagem mecânica de armadura

Índice de texto

AGRADECIMENTOS ..... **VII**

RESUMO ..... **IX**

ABSTRACT ..... **XI**

SIGLAS ..... **XIII**

SIMBOLOGIA ..... **XIII**

ÍNDICE DE TEXTO ..... **XIX**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XXIII**

ÍNDICE DE TABELAS ..... **XXVII**

INTRODUÇÃO **1**

1. REABILITAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS **5**

1.1. Reabilitação vs. reforço 5

1.2. Reabilitação urbana 6

1.3. Importância do reforço sísmico 14

1.4. Exemplo de edifícios reabilitados 18

1.5. Considerações finais 22

2. TÉCNICAS DE REFORÇO PARA ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO **23**

2.1. Considerações iniciais 23

2.2. Chapas metálicas 24

2.2.1. Chapas metálicas coladas 25

2.2.2. Chapas fixadas mecanicamente 26

2.3. Sistemas compósitos reforçados com fibras (FRP) 27

2.3.1. Constituição e propriedades gerais do FRP 28

2.3.2. Compósitos de fibras de carbono reforçado (CFRP) 29

2.3.3. Compósitos de fibras de aramida reforçado (AFRP) 31

2.3.4. Compósitos de fibras de vidro reforçado (GFRP) 31

2.4. Outras técnicas de reforço.....33

2.4.1. Encamisamento com betão armado (betão moldado "*in situ*") e encamisamento com betão projetado 33

2.4.2. Perfis metálicos 37

2.4.3. Pré-esforço exterior com cabos de cordões ou varões 38

2.4.4. Pré-esforço exterior com CFRP 40

2.5. Considerações finais 43

3. DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÕES PARA REFORÇO ESTRUTURAL.....45

3.1. Considerações iniciais.....45

3.2. Modelos de dimensionamento 45

3.2.1. Solução de reforço de peças de betão armado por elementos metálicos adicionais.....45

3.2.1.1. Verificação de segurança de estruturas existentes 45

3.2.1.2. Cálculo do momento resistente e da área de reforço 46

3.2.1.3. Reforço ao esforço transverso.....50

3.2.2. Solução de reforço de peças de betão armado por sistemas de compósitos de FRP 51

3.2.2.1. Cálculo do momento resistente e da área de reforço 51

3.2.2.2. Reforço ao esforço transverso.....62

3.3. Caracterização do caso de estudo 63

3.4. Avaliação da condição inicial 65

3.4.1. Verificação da necessidade de reforço à flexão 65

3.4.2. Verificação da necessidade de reforço ao esforço transverso 71
3.5. Solução de reforço com chapas de aço 72
3.5.1. Dimensionamento 72
3.6. Solução de reforço com CFRP 79
3.6.1. Dimensionamento 79
3.7. Considerações finais 89

4. ANÁLISE ECONÓMICA DE SOLUÇÕES PARA REFORÇO ESTRUTURAL 91
4.1. Considerações iniciais 91
4.2. Modelo de custos 91
4.2.1. Custos e quantidades 93
4.2.1.1. Orçamentação dos recursos 94
4.2.1.2. Fichas de rendimento 98
4.2.1.3. Mapa de quantidades 103
4.2.1.4. Orçamentação 109
4.2.2. Custos e quantidades 114
4.2.2.1. Orçamentação dos recursos 115
4.2.2.2. Fichas de rendimento 117
4.2.2.3. Mapa de quantidades 120
4.2.2.4. Orçamentação 126
4.3. Considerações finais 131
4.3.1. Análise económica dos resultados 131

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 137
5.1. Considerações finais 137
5.2. Conclusões 139

5.3. Desenvolvimentos futuros 140

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....143

ANEXOS ……... i

ANEXO 1 ……...……..……... iii

ANEXO 2 ……...……..……... vii

ANEXO 3 ……...……..……... ix

ANEXO 4 ……...……..……... xi

ANEXO 5 ……...……..…...….... xii

ANEXO 6 ……...……..……... xv

Índice de figuras

Figura 1.1 – N.º de fogos concluídos em obras de construção nova e reabilitação de 1991 a 2011 [INE & LNEC, 2013] 7
Figura 1.2 – N.º de alvarás da 1.ª categoria, segundo a classe de empreiteiro geral ou construtor geral de 2008 a 2011 [INE & LNEC, 2013] 8
Figura 1.3 – Número de habitantes, famílias, habitações e edifícios de acordo com os censos de 2011 8
Figura 1.4 – Indicador do número de vendas de habitações existentes e novas de 2010 a 2016 [INE, 2017] 9
Figura 1.5 – Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra de 2011 a 2016 [INE, 2017] 10
Figura 1.6 – Obras de reabilitação por tipo de obra de 2011 a 2016 [INE, 2017] 11
Figura 1.7 – Evolução das obras de reabilitação e construção nova no total de obras concluídas de 2011 a 2016 [INE, 2017] 11
Figura 1.8 – Obras de alteração, ampliação e reconstrução no total de obras de reabilitação por NUTS II em 2016 [INE, 2017] 12
Figura 1.9 – Edifício anterior ao terramoto de 1755 (pré-pombalino) [Garcia,2016a] 15
Figura 1.10 – Paredes interiores de um edifício do tipo pombalino em processo de reabilitação [Garcia, 2016b] 16
Figura 1.11 – Edifício do tipo pombalino com número de pisos modificado (a partir do varandim) [Garcia, 2016b] 16
Figura 1.12 – Edifício do tipo gaioleiro [Garcia, 2016c] 17
Figura 1.13 – Edifício na Rua Braamcamp, em Lisboa, reabilitado com acréscimo de 4 pisos envidraçados ligeiramente recuados [Paixão por Lisboa, 2016], [Ipressjournal, 2015] 19
Figura 1.14 – Reabilitação de um edifício na Rua António Almeida, em Coimbra [Fachaimper, 2015] 20
Figura 1.15 – Reabilitação de um edifício na Avenida Lourenço Peixinho em Aveiro [Fachaimper, 2015] 20
Figura 1.16 – Reabilitação de uma moradia no Porto [Fachaimper, 2015] 21
Figura 1.17 – Reabilitação de um edifício comercial no Líbano danificado por um ataque aéreo [BBC, 2006] 21

Figura 1.18 – Reabilitação de edifício de 1948 em Nova Iorque 22
Figura 2.1 – Soluções de reforço com chapas metálicas coladas [Htecnic, 2008a], [NCREP, 2017] 25
Figura 2.2 – Soluções de reforço com chapas metálicas fixadas mecanicamente [Htecnic, 2008b], [Htecnic, 2007].....26
Figura 2.3 – Comparação de características do aço e alumínio com compósitos [Da Costa & Juvandes, 2002].....27
Figura 2.4 – Tipos de FRP 27
Figura 2.5 – Tela de fibras de carbono [E-composites, 2017].....29
Figura 2.6 – Soluções de reforço com CFRP [PerfuraCon, 2017], [WGA, 2016] 30
Figura 2.7 – Tela de fibras de aramida [Fibertex, 2017] 31
Figura 2.8 – Tela de fibras de vidro [C3 Technologies, 2017].....32
Figura 2.9 – Encamisamento de viga com betão armado moldado [Vieira, 2016].....33
Figura 2.10 – Encamisamento com betão projetado [Geoconcret, 2017].....34
Figura 2.11 – Valores mínimos da espessura de material a betonar [Sousa, 2008].....35
Figura 2.12 – Reforço de vigas à flexão [Appleton & Gomes, 1997b] 35
Figura 2.13 – Fibras de aço [Reforma fácil, 2011].....37
Figura 2.14 – Reforço com perfis metálicos standard em I [Stanck, 2017] 38
Figura 2.15 – Pré-esforço com varões para a fendilhação em lajes (Viaduto no Campo Grande).....39
Figura 2.16 – Pré-esforço com varões para a fendilhação em vigas [Costa, 2014].....39
Figura 2.17 – Pré-esforço com cabos para alívio de tensões a meio vão e fechar fissuras [Costa, 2014].....39
Figura 2.18 – Aparelho especial para o desvio dos cabos (desviador) [Costa, 2014] 40
Figura 2.19 – Procedimentos do método indireto [Tostões, 2010].....41
Figura 2.20 – Procedimentos do método direto: pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar [Tostões, 2010].....42
Figura 2.21 – Procedimentos do método direto: pré-esforço do FRP contra a própria estrutura [Tostões, 2010].....42
Figura 3.1 – Modelo do comportamento [Branco, 2011] 46
Figura 3.2 – Cálculo do momento resistente através do método do coeficiente de monolitismo [Branco, 2011].....47
Figura 3.3 – Reforço à flexão com e sem buchas metálicas [Branco, 2011].....48

Figura 3.4 – Distribuição das tensões [Branco, 2011] 49
Figura 3.5 – Reforço ao esforço transverso com e sem buchas metálicas [Branco, 2011] 51
Figura 3.6 – Modo de rotura de um elemento de betão armado reforçado com FRP [Cruz, 2012] 55
Figura 3.7 – Esquema do estudo preliminar 60
Figura 3.8 – Esquema da necessidade e viabilidade do reforço 61
Figura 3.9 – Esquema do pré-dimensionamento do reforço 61
Figura 3.10 – Esquema da interface do betão-FRP 61
Figura 3.11 – Ligação do reforço FRP à flexão à estrutura de treliça interna 62
Figura 3.12 – Resistência ao corte nas vigas 63
Figura 3.13 – Secção transversal da viga e respetivas armaduras 64
Figura 3.14 – Vista lateral da viga sujeita a um carregamento uniforme 65
Figura 3.15 – Esquema de cálculo de M_{rd0} 67
Figura 3.16 – Excentricidade para N [Gomes & Vinagre, 1997] 68
Figura 3.17 – Flexão composta com compressão e tensões em estado fendilhado para secções rectangulares (β=0,25) [Gomes & Vinagre, 1997] 70
Figura 3.18 – Flexão composta com compressão e tensões em estado fendilhado para secções rectangulares (β=0,50) [Gomes & Vinagre, 1997] 71
Figura 3.19 – Reforço à flexão sem buchas metálicas 72
Figura 3.20 – Diagrama para o cálculo da área de reforço 73
Figura 3.21 – Local a partir de onde a chapa de aço pode ser amarrada 78
Figura 3.22 – Solução de reforço com chapa de aço representada longitudinalmente 79
Figura 3.23 – Secção da viga com aplicação da solução de reforço 79
Figura 3.24 – Diagrama para o cálculo da área de reforço 80
Figura 3.25 – Solução de reforço com laminado de CFRP representada longitudinalmente 85
Figura 3.26 – Secção da viga com aplicação da solução de reforço 85
Figura 4.1 – Custos da solução de reforço com chapa de aço 134
Figura 4.2 – Custos da solução de reforço com laminados de CFRP 135

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras de reforço [Juvandes, 2002] 28
Tabela 2.2 – Coeficientes de dilatação térmica das fibras de reforço [ACI, 2002] 28
Tabela 2.3 – Propriedades das matrizes poliméricas termoendurecíveis [Correia, 2012] 29
Tabela 2.4 – Comparação dos valores das propriedades dos laminados e mantas, adaptado de [Correia, J. , 2009] 30
Tabela 3.1 – Recomendações para o elemento de acordo com o tipo de ligação [Matos, 2003] 50
Tabela 3.2 – Coeficientes de segurança das ações e resistências 52
Tabela 3.3 – Fatores parciais para os materiais e produtos [CNR, 2004] 53
Tabela 3.4 – Fatores parciais γrd 53
Tabela 3.5 – Valores do parâmetro de reforço, *R*, adaptado de [Azevedo, 2008] 54
Tabela 3.6 – Expressões para calcular a força de amarração e comprimento de amarração [Azevedo, 2008] 58
Tabela 3.7 – Parâmetros para a força e comprimento de amarração [Azevedo, 2008] 58
Tabela 3.8 – Parâmetro relativo à qualidade do betão [Azevedo, 2008] 59
Tabela 3.9 – Ações aplicadas na estrutura 65
Tabela 3.10 – Recomendações e verificações para a ligação por resina *epoxy* 76
Tabela 3.11 – Características de CFRP disponíveis no mercado [S&P, 2017] 81
Tabela 4.1 – Quantidade e dimensões das chapas e dos cortes 95
Tabela 4.2 – Preços dos materiais utilizados na solução de reforço com chapa de aço 95
Tabela 4.3 – Número de *kits* necessários e preço da resina aplicado por metro quadrado para a solução de reforço 96
Tabela 4.4 – Preços dos equipamentos utilizados na solução de reforço com chapa de aço 96
Tabela 4.5 – Preços da mão-de-obra utilizada na solução de reforço (AECOPS) 97
Tabela 4.6 – Custo horário dos profissionais 97
Tabela 4.7 – Ficha de rendimento n.º1 – Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura 98
Tabela 4.8 – Ficha de rendimento n.º2 – Aluguer diário da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* 99

Tabela 4.9 – Ficha de rendimento n.º3 – Ficha de rendimento da preparação da superfície da viga com recurso a equipamento de jato de partículas de silicato de alumínio por projeção a seco por m^2 99
Tabela 4.10 – Ficha de rendimento n.º4 – Caso de 1 viga – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 100
Tabela 4.11 – Ficha de rendimento n.º5 – Caso de 5 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 100
Tabela 4.12 – Ficha de rendimento n.º6 – Caso de 10 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 101
Tabela 4.13 – Ficha de rendimento n.º7 - Caso de 15 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 102
Tabela 4.14 – Ficha de rendimento n.º8 – Caso de 20 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 102
Tabela 4.15 – Dias de aluguer necessários para cada caso 103
Tabela 4.16 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga) 104
Tabela 4.17 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas) 105
Tabela 4.18 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas) 106
Tabela 4.19 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas) 107
Tabela 4.20 – Mapa de quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas) 108
Tabela 4.21 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga) 109
Tabela 4.22 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas) 110
Tabela 4.23 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas) 111
Tabela 4.24 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas) 112
Tabela 4.25 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas) 113
Tabela 4.26 – Valores máximos permitidos para o desnivelamento no substrato de betão para os laminados (FIP, 2001) 114
Tabela 4.27 – Quantidade e dimensões dos laminados de CFRP 116

Tabela 4.28 – Preços dos materiais utilizados na solução de reforço com laminados de CFRP 116
Tabela 4.29 – Número de *kits* necessários e preço da resina aplicado por metro quadrado para a solução de reforço 116
Tabela 4.30 – Ficha de rendimento n.º 9 – Caso de 1 viga – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 118
Tabela 4.31 – Ficha de rendimento n.º10 – Caso de 5 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 118
Tabela 4.32 – Ficha de rendimento n.º11 – Caso de 10 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 119
Tabela 4.33 – Ficha de rendimento n.º12 – Caso de 15 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 119
Tabela 4.34 – Ficha de rendimento n.º13 – Caso de 20 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 120
Tabela 4.35 – Dias de aluguer necessários para cada caso 120
Tabela 4.36 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga) 121
Tabela 4.37 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas) 122
Tabela 4.38 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas) 123
Tabela 4.39 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas) 124
Tabela 4.40 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas) 125
Tabela 4.41 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga) 126

Tabela 4.42 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas) 127
Tabela 4.43 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas) 128
Tabela 4.44 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas) 129
Tabela 4.45 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas) 130
Tabela 4.46 – Custo direto e incidências correspondentes para as soluções de reforço 132
Tabela 4.47 – Desperdícios existentes para as soluções de reforço do caso de estudo 133

Introdução

Justificação e interesse

As soluções alternativas de reforço são cada vez mais usuais na indústria da construção em todo o mundo. Estes tipos de intervenções resultam de alterações de uso, de deficiente dimensionamento, de causas acidentais e de deterioração estrutural. Em qualquer das situações, cabe ao Engenheiro Civil optar pela eventual substituição (parcial) da estrutura, por uma nova ou pelo reforço da mesma. Atualmente em Portugal, nas principais áreas urbanas da Grande Lisboa e do Grande Porto, é praticamente nula a construção nova. Por esse motivo, nestes locais é privilegiada a reabilitação que, na maioria das vezes, recorre ao reforço das estruturas. Na publicação do Instituto Nacional de Estatística (INE) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (2013), Portugal, em 2011, apresentava valores de produtividade[1] no setor da reabilitação de edifícios (26,1%) inferiores à média da União Europeia (34,9%). Contudo, atualmente verifica-se um recurso crescente ao processo de reabilitação, pelo que a prática de reforço é cada vez mais utilizada.

Nesta dissertação são estudados o dimensionamento e a análise de custos de soluções de reforço de estruturas de betão. Atualmente observa-se que os critérios de dimensionamento do sistema de reforço com chapas de aço se encontram bem definidos e consolidados nos Eurocódigos, embora tal ainda não suceda para o caso do sistema de reforço com FRP. Os sistemas de FRP são uma técnica relativamente recente, com muita diversidade e com múltiplos campos de aplicação, resultando em critérios de dimensionamento e procedimentos de aplicação vagos ou não definidos. Consequentemente, a generalidade dos países sem documentação específica adota os critérios utilizados para o dimensionamento do reforço com chapas de aço. Assim, as propostas normativas existentes são *da Fédération Internationale du béton* (FIB) e do *American Concrete Institute* (ACI) que publicaram diversos documentos até 2010, alguns deles utilizados neste trabalho. No que se refere a informação económica, não existe no entanto documentação específica com informação relevante para a análise de custos dos dois de tipos sistemas.

[1] Valor de todos os gastos que concorrem para a realização de obras.

Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho consistem na identificação e descrição de várias técnicas de reforço existentes, no dimensionamento de soluções de reforço e na comparação de quantidades e de custos das mesmas. As soluções de reforço utilizadas são baseadas em técnicas com recurso a chapas de aço e aos laminados de CFRP. As soluções são propostas para uma viga simplesmente apoiada, em função da quantidade de execução, isto é, de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas. De forma a ter em consideração o efeito de escala inerente às obras de construção civil, os custos são quantificados por metro quadrado e por solução de reforço.

Assim, pretende-se com esta dissertação contribuir cientificamente para a comunidade técnica na área de reforço estrutural, mais precisamente para ajudar os projetistas e donos de obra na tomada de decisão sobre a melhor solução estrutural de reforço em termos de exequibilidade técnica e de custos de construção.

Metodologia

Nesta dissertação é realizada uma revisão bibliográfica de vários sistemas de reforço com especial foco em técnicas de reforço passivas, nomeadamente, chapas de aço e compósitos reforçados com fibras (FRP). A preferência por estes dois tipos de reforço surge na medida em que o reforço através de chapas de aço constitui uma das técnicas mais tradicionais e, em alternativa, pelo facto de a técnica de reforço com FRP ser relativamente recente e de uso não generalizado. Relativamente a esta última, optou-se pela utilização de laminados de compósitos reforçados com fibras de carbono (CFRP), que surgiram nos finais da década de 60, pois é um material com crescente utilização e com assinaláveis propriedades mecânicas. Note-se, contudo, que os restantes FRP são dimensionados de forma idêntica.

As bases teóricas do trabalho estão, essencialmente, assentes sobre a bibliografia disponível. Para a concretização dos objetivos, definiu-se a seguinte metodologia de trabalho:

i) Elaboração de uma pesquisa bibliográfica generalizada e caracterização do estado de arte, nomeadamente sobre a diferenciação de reforço e reabilitação da reabilitação urbana e sobre a importância do reforço sísmico;

ii) Recolha bibliográfica específica de técnicas de reforço, das vantagens e desvantagens da sua utilização, dos critérios de dimensionamento aplicáveis e da análise de custos;
iii) Seleção das soluções que se pretende utilizar;
iv) Descrição do modelo de dimensionamento para o reforço;
v) Aplicação das soluções de reforço com chapas de aço e laminados de CFRP a um caso prático de uma viga simplesmente apoiada;
vi) Análise económica das soluções utilizadas, incluindo a elaboração de mapas de quantidades e fichas de rendimento, maioritariamente recorrendo a dados fornecidos por empresas.

Organização da dissertação

Este trabalho é composto de forma sequencial por cinco capítulos e seis anexos.

No Capítulo 1 são definidos e comparados os conceitos de reabilitação e de reforço. Neste capítulo são, também, abordados temas diretamente ligados com o reforço, tais como a atual dinâmica na reabilitação urbana e a importância do reforço sísmico; adicionalmente, são também exemplificados edifícios reabilitados.

No Capítulo 2 são apresentadas as técnicas de reforço, ativas e passivas, existentes para estruturas de betão, focando-se mais pormenorizadamente nestas últimas, pois foram as utilizadas neste trabalho para o dimensionamento e a análise de custos.

No Capítulo 3 apresentam-se os modelos de dimensionamento para o reforço com elementos metálicos e com FRP e é efetuado o dimensionamento de um caso de estudo de uma viga simplesmente apoiada.

No Capítulo 4 é descrito, genericamente, a análise de custos e são apresentados os modelos dos mapas de quantidade e das fichas de rendimento. Neste capítulo é também efetuado, a análise económica do reforço com chapa de aço colada e laminado de CFRP colado para o caso de estudo, aplicados aos casos de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas.

No Capítulo 5 apresentam-se as considerações finais, as principais conclusões deste trabalho e as propostas de desenvolvimento futuro nas áreas que necessitam de investigação.

A dissertação é ainda composta por seis anexos:

- Ficha técnica da resina *epoxy*;

- Orçamento das chapas de aço;
- Orçamento dos cortes, soldadura e metalização da chapa de aço de 2,00x1,00m;
- Orçamento dos cortes, soldadura e metalização da chapa de aço de 3,00x1,50m;
- Ficha técnica do gerador insonorizado HYW-45KVA-T6B-B10;
- Orçamento de laminados CFRP.

Capítulo 1

Reabilitação e reforço de estruturas de edifícios

1.1. Reabilitação vs. reforço

A reabilitação, quando aplicada à construção civil em edifícios, é uma intervenção que tem como finalidade a beneficiação do desempenho dos mesmos, implementando-lhes as exigências e condições atuais, preservando ao mesmo tempo, os elementos de interesse cultural, histórico e arquitetónico. A reabilitação tem como consequências a melhoria da qualidade de vida dos habitantes, o aumento da vida útil do imóvel e, ainda, o seu valor económico.

O processo de reabilitação pode ser bastante distinto. Em alguns casos podem ser feitas obras de alteração, de ampliação de áreas, de reconstrução, entre outros; ou, nos casos de reabilitação mais invasivos, frequentemente, recorre-se ao reforço. Por isso, a reabilitação pode incluir o reforço mas o contrário não se verifica.

O reforço de uma estrutura existente é o melhoramento ou correção do seu comportamento estrutural. Esta situação surge durante a fase construtiva ou durante o período de vida da estrutura. Durante a primeira utiliza-se o reforço, essencialmente, quando há erros relativos à execução da estrutura, ao projeto de estabilidade, na composição ou produção do betão e, ainda, na capacidade resistente para as ações previstas. No período de vida da estrutura recorre-se ao reforço devido ao aumento das ações pela alteração do uso, à ocorrência de ações de acidentes (incêndios, explosões, choques) e à existência de causas naturais como, por exemplo, os sismos. O reforço estrutural pode, ainda, ser utilizado por alterações na estrutura, como a geometria, ou a necessidade de eliminar elementos estruturais e, ainda, o aumento do

nível de segurança, principalmente, no melhoramento do comportamento estrutural de obras antigas para a ação sísmica.

1.2. Reabilitação urbana

Em Portugal, nas principais áreas urbanas, Grande Lisboa e Grande Porto, é fundamental a reabilitação de edifícios porque são zonas de grande densidade construtiva cuja degradação é facilmente contrastada com edifícios novos adjacentes. Os referidos aglomerados são locais onde há menos terrenos para construção; são centros históricos; e, também, são locais onde há um crescente peso do turismo estrangeiro. Além disso, foram locais de rápida urbanização nas décadas de 70 e 80 através de construções de qualidade duvidosa em certos casos.

Segundo o Decreto-Lei n.º 104/2004, de 7 de Maio, Artigo 1.º, entende-se por reabilitação urbana:

> "O processo de transformação do solo urbanizado, compreendendo a execução de obras de construção, reconstrução, alteração, ampliação, demolição e conservação de edifícios, tal como definidas no regime jurídico da urbanização e da edificação, com o objetivo de melhorar as suas condições de uso, conservando o seu carácter fundamental, bem como o conjunto de operações urbanísticas e de loteamento e obras de urbanização que visem a recuperação de zonas históricas e de áreas críticas de recuperação e reconversão urbanística."

A publicação do INE e LNEC (2013) caracteriza o parque habitacional português e a evolução observada no sector da construção entre 2001 a 2011, baseado principalmente, nos censos. De acordo com essa publicação, um milhão de edifícios existentes foram construídos antes de 1945. Desta forma, a reabilitação de edifícios antigos é cada vez mais uma tendência com vantagens na redução do consumo de energia (associada ao setor da construção na globalidade) comparativamente com a construção nova. Além disso, a reabilitação permite a preservação do parque habitacional bem como a história edificada do país.

A partir dos anos 80, principalmente nos centros urbanos, houve um processo de despovoamento, de tal forma que fora do horário das atividades terciárias originava zonas quase sem ocupação humana. Este processo fez com que estas zonas fossem caracterizadas pela presença de uma população envelhecida e com poucas capacidades financeiras, residentes de longa duração e com rendas baixas, resultando num mecanismo de aceleração da

degradação dos edifícios. Em consequência, este processo levou a população mais jovem a procurar zonas mais recentes.

Na publicação do INE e LNEC (2013) conclui-se que "mais de metade (58,1%) dos edifícios com necessidade de grandes reparações ou muito degradados tinham sido construídos até 1945", que "cerca de 1/3 (32,7%) dos edifícios com necessidade de grandes reparações ou muito degradados estavam concentrados em cinco regiões: Grande Porto, Tâmega, Grande Lisboa, Douro e Algarve". No entanto, "as regiões com maior número de fogos concluídos em obras de reabilitação, na última década, foram o Grande Porto, Algarve e, em especial, a Grande Lisboa". Conclui-se, ainda, que apesar de haver uma melhoria do estado de conservação, em 2011 ainda existia cerca de um milhão de edifícios com necessidade de reabilitação e que Portugal tem uma média de produtividade nesse sector (26,1%) inferior à média europeia (34,9%). Ainda de acordo com a publicação do INE e LNEC de 2013, observa-se na Figura 1.1, que de 2002 a 2011 houve um decréscimo de 75,1% no número de fogos concluídos em construção nova e, em contrapartida, de 2002 a 2008 existiu um acréscimo de 50,9% na reabilitação. Em 2004, no seguimento da aprovação no Decreto-Lei n.º 104/2004 surgiram as Sociedades de Reabilitação Urbana (SRU), podendo os municípios, a partir dessa data, constituir as SRU. Em consequência, de 2004 a 2006 houve um aumento significativo das obras de reabilitação, atingido estas, o seu máximo em 2006. A partir de 2008, a construção nova e a reabilitação decresceram devido, principalmente, à crise económica e financeira que surgiu nas maiores economias mundiais e em Portugal em particular.

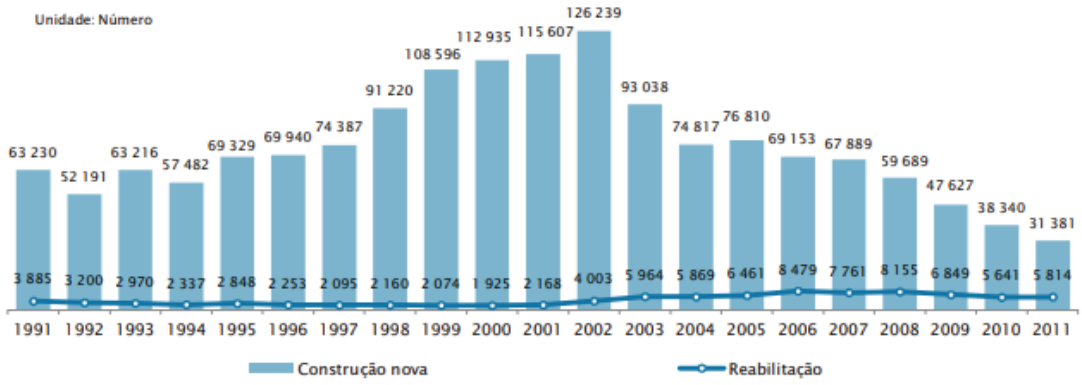


Figura 1.1 – N.º de fogos concluídos em obras de construção nova e reabilitação de 1991 a 2011 [INE & LNEC, 2013]

De acordo com a Figura 1.2, conclui-se que de 2008 a 2011 a tendência foi o crescimento de entidades que realizam reabilitação e conservação de edifícios, apesar da crise económica e

financeira nacional e da diminuição de fogos concluídos para a reabilitação, enquanto que as restantes diminuíram.

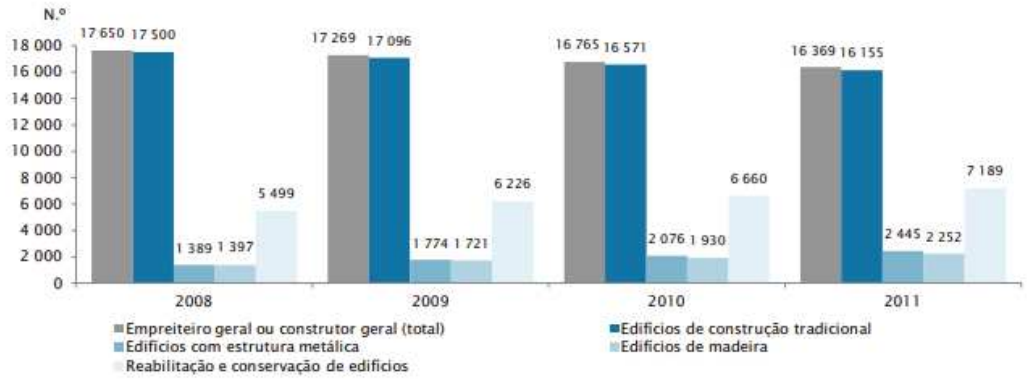


Figura 1.2 – N.º de alvarás da 1.ª categoria, segundo a classe de empreiteiro geral ou construtor geral de 2008 a 2011 [INE & LNEC, 2013]

De acordo com a publicação do INE e LNEC (2013) entre 2001 e 2011 houve uma melhoria no estado de conservação das habitações com decréscimo de 40,4% para os edifícios com necessidades de reabilitação e de 36,0% para os edifícios muito degradados. Ainda assim, em 2011, cerca de 28,9% das habitações necessitavam de obras de reabilitação.

De acordo com os últimos censos de 2011, Portugal tem 10.555.853 habitantes, 4.079.577 famílias, 5.879.845 habitações e 3.550.823 edifícios, representado na Figura 1.3. Por existirem mais habitações que famílias e se cada habitação puder alojar em média apenas duas pessoas, faz sentido que a tendência para a reabilitação, em Portugal, seja cada vez maior ao contrário da construção nova. Em Portugal, a maior parte dos edifícios de habitação necessários para a população existente, já estão construídos.

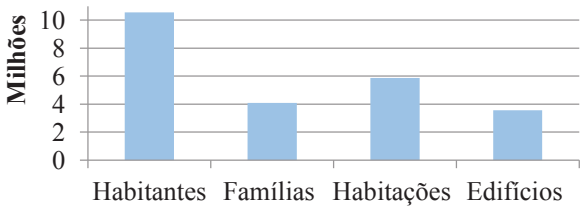


Figura 1.3 – Número de habitantes, famílias, habitações e edifícios de acordo com os censos de 2011

Em conclusão, há indicadores que sugerem que novos instrumentos de regulamentação jurídica e novos incentivos económicos e financeiros se irão acentuar no futuro.

Atualidade: construção nova e obras de reabilitação

Em Portugal, a reabilitação urbana é um processo recente e as primeiras intervenções foram implementadas pontualmente devido a problemas específicos graves. Muito recentemente, os centros urbanos voltaram a ser uma alternativa para as famílias, através da ocupação de habitações existentes reabilitadas ao invés das habitações novas na periferia. Na publicação do INE (2017) constata-se que, das transações realizadas de 127.106 alojamentos familiares, 83,0 % correspondiam a habitações existentes, tendo estas um maior destaque no mercado imobiliário relativamente a habitações novas, conforme a Figura 1.4. Na mesma figura, é possível verificar a tendência crescente da venda de habitações existentes, em contraste com as habitações novas que decrescem para menos de metade (de 36,2% em 2010 para 17% em 2016).

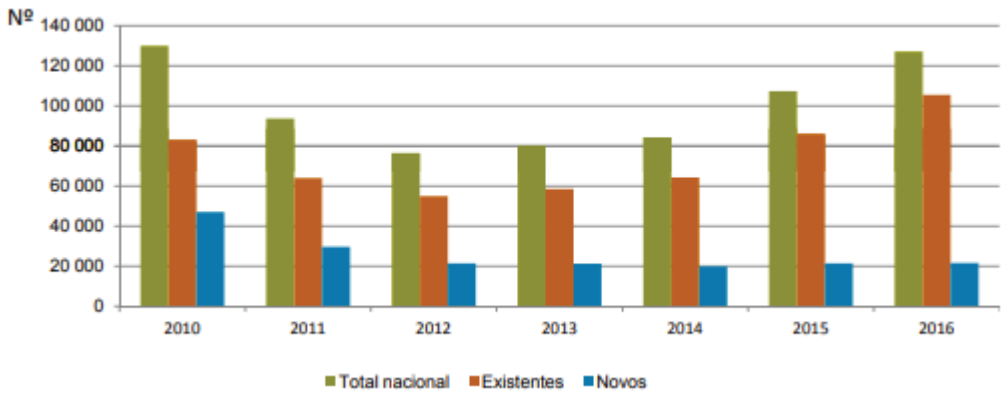


Figura 1.4 – Indicador do número de vendas de habitações existentes e novas de 2010 a 2016 [INE, 2017]

A redução do ritmo de construção de habitações novas e, consequente, subida dos valores de mercado das mesmas, o aumento dos custos de transporte e, em muitos casos, à redução do poder de compra têm como consequência a alteração da natureza da procura habitacional de habitações novas para habitações existentes Esta tendência surgiu por diversas razões, nomeadamente, a inclusão da mulher na vida ativa, a diminuição da média de pessoas dos agregados familiares e a evolução das redes de transportes. Todavia, atualmente observa-se também uma mudança de mentalidade da população, preocupada pela sustentabilidade do ambiente e património, que gera uma atração pelas áreas antigas e pelos seus elementos históricos e culturais, valorizando a diversidade funcional e social.

Ao nível económico, também os agentes imobiliários convergem no sentido de revalorização dos centros urbanos e cativam, não só, os habitantes nacionais à compra de habitações antigas reabilitadas, como turistas, que cada vez mais, pretendem uma segunda habitação em Portugal. Na publicação do INE (2017), constata-se que, de 2014 a 2015, a venda de habitações a estrangeiros aumentaram 21,2%. Segundo a mesma publicação, em 2016, as obras de reabilitação, que incluem as obras de alteração, ampliação e reconstrução, tiveram uma ligeira diminuição no total das obras concluídas, relativamente a 2015, de 33,6% para 31,4%. Na Figura 1.5, observa-se que entre 2011 e 2016 houve uma diminuição relativa da construção nova, reduzindo de 74,4% para 68,6%, com oscilações durante esse período. No entanto, as obras de reabilitação tiveram um aumento relativo, também com oscilações de valores entre 2011 e 2016, em que as obras de reconstrução subiram de 2,8% para 4,3%, as obras de ampliação de 18,3% para 22,2% e de alteração, também, com uma ligeira subida de 4,5% para 4,9%.

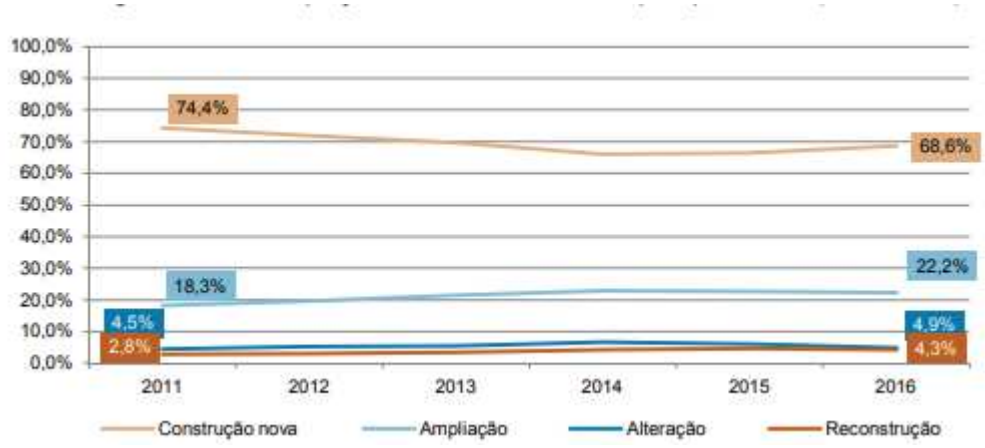


Figura 1.5 – Proporção de edifícios concluídos por tipo de obra de 2011 a 2016 [INE, 2017]

Na Figura 1.6, verifica-se, novamente, que dos tipos de obras de reabilitação, as obras de ampliação, de 2011 a 2016, tiveram um aumento relativo e foram, também, as predominantes. No entanto as obras de alteração tiveram uma redução relativa de 17,7% para 15,7%, ao contrário das obras de reconstrução, que em 2011 tinham um valor percentual de 10,8% e em 2016, 13,6%. Através dos valores anteriores, conclui-se que apesar de o número de obras de ampliação ter aumentado ao longo dos anos, a variação é menor que nas obras de alteração e reconstrução. Observa-se, ainda, que este tipo de obras é feito, no mínimo, em metade dos casos de habitações familiares.

Ano	Alteração				Ampliação				Reconstrução			
	Total	%[1]	Habitação Familiar	%[2]	Total	%[1]	Habitação Familiar	%[2]	Total	%[1]	Habitação Familiar	%[2]
2011	1 173	17,7	729	62,1	4 753	71,5	3 233	68,0	719	10,8	561	78,0
2012	1 191	19,2	746	62,6	4 338	69,9	2 895	66,7	675	10,9	508	75,3
2013	882	18,0	566	64,2	3 455	70,7	2 220	64,3	552	11,3	411	74,5
2014	853	19,7	451	52,9	2 934	67,6	1 665	56,7	552	12,7	375	67,9
2015[3]	680	18,4	344	50,6	2 510	67,9	1 395	55,6	506	13,7	342	67,6
2016[3]	524	15,7	315	60,1	2 367	70,7	1 362	57,5	455	13,6	359	78,9

Figura 1.6 – Obras de reabilitação por tipo de obra de 2011 a 2016 [INE, 2017]

Na Figura 1.7, observa-se que de 2011 a 2016 houve uma redução do número de obras de reabilitação mas que, como consequência da redução das construções novas, aumentou a percentagem relativa de 25,6% para 31,4%.

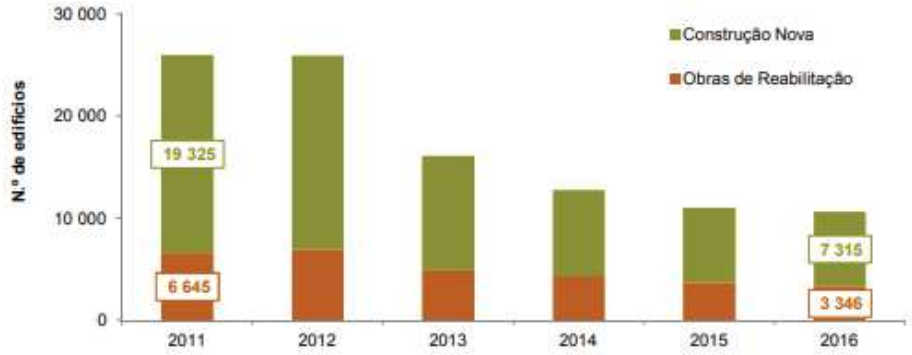


Figura 1.7 – Evolução das obras de reabilitação e construção nova no total de obras concluídas de 2011 a 2016 [INE, 2017]

De acordo com a publicação referida anteriormente, entre as diferentes regiões NUTS II[2], em 2016, as regiões com maior destaque em obras de reabilitação são a Região Autónoma da Madeira com uma percentagem de 97,5% para obras de ampliação, o Norte do país com 18,8% para as obras de reconstrução e a Área Metropolitana de Lisboa para obras de ampliação com 25,0%. Sendo, este último tipo de obra, o mais comum em todo o país, conforme a Figura 1.8.

[2] Acrónimo de "Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos"

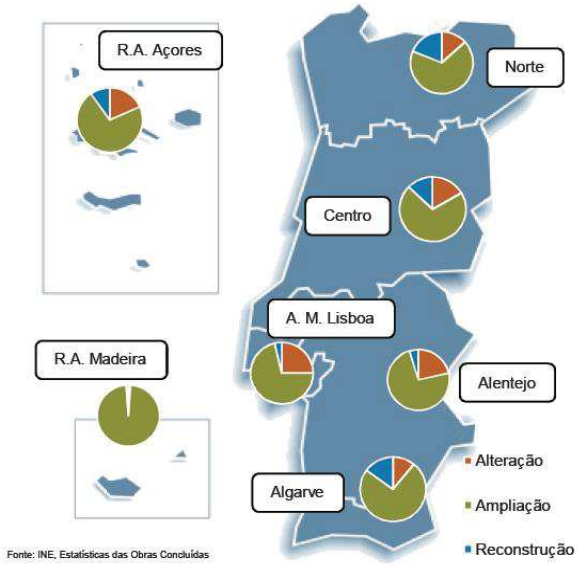


Figura 1.8 – Obras de alteração, ampliação e reconstrução no total de obras de reabilitação por NUTS II em 2016 [INE, 2017]

Segundo o Portal da Habitação, a reabilitação urbana atualmente é uma componente indispensável da política das cidades e da política da habitação em Portugal, na medida em que nela convergem os objetivos de requalificação e revitalização das cidades, em particular das suas áreas mais degradadas e de qualificação do parque habitacional (Portal da Habitação, 2016).

Em muitos casos a prevenção é a melhor solução. Por isso, as intervenções pontuais ao longo da vida da estrutura são importantes para diminuir a dimensão do processo de reabilitação.

Conforme descrito anteriormente a tendência para a reabilitação e conservação de edifícios é cada vez maior. No entanto, as autarquias não têm investido apenas na atração de investidores privados para a reabilitação de edifícios mas, também, na reabilitação de espaços públicos. Nos centros urbanos, principalmente, em Lisboa que perdeu dezenas de milhares de habitantes nos últimos anos, pretende-se atraí-los de volta através de programas que cativam investidores através de benefícios fiscais abrangidos nas Áreas de Reabilitação Urbana (ARU). Segundo a Câmara Municipal de Lisboa (CML), de 2007 a 2012 investiram-se 600 milhões de euros em obras de reabilitação urbana, para edifícios municipais, para uso habitacional ou alojamento turístico. Os aspetos referidos anteriormente potenciaram a atratividade de Portugal como destino turístico e, muitas vezes, como segunda habitação para turistas. Isto deve-se à conjugação de inúmeros fatores históricos, económicos e culturais. No

entanto, isto pode trazer consequências, tais como, a despovoação da população local relativamente aos centros urbanos.

A CML pretende reabilitar a cidade até 2024 (CML, 2011), investindo um total de 4.445 milhões de euros cumprindo os seguintes objetivos:

- Atrair população para os centros urbanos;
- Reabilitação de obras de conservação/reabilitação;
- Reabilitação de espaços verdes;
- Reabilitação de património municipal de uso público;
- Alteração do nível de conservação dos edifícios identificados nos Censos em mau e muito mau estado para um nível não inferior a bom;
- Reabilitar atendendo ao risco sísmico e de incêndio.

Conclui-se assim que a criação das SRU em 2004 proporcionou um crescimento na reabilitação até 2008, ano em que surgiu a crise económica e financeira e que provocou o decréscimo tanto da construção nova, como da reabilitação em construções existentes, até aos dias de hoje. Todavia, o decréscimo sentido na construção nova, foi muito mais acentuado que na reabilitação, por esse motivo, a reabilitação em comparação com a construção nova, aumentou em termos percentuais. Este acontecimento deve-se ao facto do crescimento da procura de habitações existente, de estas, a maioria das vezes necessitarem de reabilitação.

A mudança de mentalidades em termos de procura de habitação, conforme referido anteriormente, deve-se não só ao facto de, cada vez mais, existir a preocupação pela sustentabilidade do ambiente e do património mas, também, pela evolução das redes de transportes, pela inclusão da mulher na vida ativa, entre outros aspetos, levam à fixação das pessoas nos centros urbanos. A falta de necessidade de construção nova, nesses locais, contribuíram para o aumento da reabilitação comparativamente à construção nova. Ao longo dos anos, ambos os tipos de construção têm diminuído, ainda como consequência da crise económica.

Em 2011, a reabilitação tinha uma percentagem de 25,59% comparativamente com a construção nova, atualmente, verifica-se que a tendência é crescente relativamente à construção nova, com um valor 31,39%.

1.3. Importância do reforço sísmico

A construção dos edifícios em todo o território de Portugal tem vindo a alterar-se ao longo dos anos, em especial no reforço sísmico. Por razões históricas associadas ao terramoto de Lisboa em 1755, a história do tipo de construção em Portugal pode ser estruturada da seguinte forma:

- Edifícios anteriores ao terramoto de 1755 (pré-pombalino);
- Edifícios do tipo pombalino (1755 a 1880);
- Edifícios do tipo gaioleiro (1880 a 1930);
- Edifícios mistos de alvenaria e betão (1930 a 1940);
- Edifícios de betão armado com grande percentagem de alvenaria de tijolo (1940 a 1960);
- Edifícios correntes de betão armado (a partir de 1960).

Dos tipos de construção referidos anteriormente, salienta-se os edifícios construídos antes do terramoto de 1755, os construídos logo posteriormente ao terramoto, do tipo pombalino e os edifícios do tipo gaioleiro. Os edifícios do tipo pombalino têm em consideração as ações sísmicas, contemplando um reforço sísmico, enquanto que os edifícios construídos antes do terramoto de 1755 e os edifícios do tipo gaioleiro não têm essa preocupação.

O tipo de construção anterior ao terramoto de 1755, pré-pombalino (Figura 1.9), é caracterizado por paredes de grande densidade com poucas aberturas, pavimentos de madeira, por vezes de secção reduzida e irregular, escadas de tiro[3] (desalinhadas de piso para piso), número médio de dois ou três andares, paredes de natureza variada, paredes de empena meeiras, andares de ressalto e a inexistência de instalações sanitárias (pelo menos de origem). Por terem estas características, ao longo dos anos, estes edifícios começaram a sofrer alterações relativamente à altura, através de ampliações, de novas divisões, entre outras. Pelas habitações terem as características anteriores e, devido à inexistência da preocupação ao reforço sísmico, após o terramoto resistiram poucos edifícios deste tipo e, os que restaram foram demolidos para serem construídos edifícios de raiz de forma organizada e com reforço sísmico mandados pelo Marquês de Pombal.

[3] Escadas antigas de madeira.

Figura 1.9 – Edifício anterior ao terramoto de 1755 (pré-pombalino) [Garcia,2016a]

Ao contrário do tipo de construção anterior, a construção pombalina é uma construção organizada. Após várias propostas foram elaborados planos para a reconstrução de Lisboa. Os planos consistiam na construção de uma cidade nova, segura, respeitando a resistência a ações de natureza sísmica, mas também com um novo urbanismo, mantendo apenas as igrejas na localização anterior, a correção das ruas estreitas, respeitando as linhas gerais da cidade antes do terramoto.

Os edifícios têm como características gerais a estrutura em gaiola de madeira, com pavimentos de madeira, as fundações por estacas, quando necessário e, ainda, paredes interiores em tabique e frontal (Figura 1.10). Os edifícios pombalinos têm uma construção organizada com simetria e regularidade em planta e altura, com limitação da mesma a três pisos elevados, fachadas, paredes interiores de cantaria e abóbodas no piso térreo com a função de suporte da estrutura dos pisos superiores.

Figura 1.10 – Paredes interiores de um edifício do tipo pombalino em processo de reabilitação [Garcia, 2016b]

Entretanto, os edifícios do tipo pombalino, tal como representado na Figura 1.11, começaram a sofrer alterações por parte dos proprietários, tais como a substituição dos pavimentos de madeira por lajes de betão (com peso muito superior), a demolição de elementos estruturais para aumento dos vãos e a abertura de fachadas para montras. Contudo, as alterações podem comprometer a resistência do reforço sísmico original. Também, através dos processos sistemáticos de reabilitação, aumentaram-se o número de pisos existentes.

Figura 1.11 – Edifício do tipo pombalino com número de pisos modificado (a partir do varandim) [Garcia, 2016b]

Posteriormente, surgiram os edifícios do tipo gaioleiro (Figura 1.12). Este tipo de construção é desorganizada e descuidada devido à irregularidade em planta com saguões interiores ou nas empenas, o número de pisos elevados, as fachadas com elementos decorativos pesados em consola, as paredes de diversos tipos e, nalguns casos, a utilização simplificada do frontal e do tabique pombalino, as fundações constituídas, habitualmente, por sapatas contínuas apenas um pouco mais largas que as paredes e a pequena profundidade, as estruturas metálicas nas marquises não têm em consideração o reforço sísmico. Tal, como nos edifícios anteriores, também estes sofreram alterações por parte dos proprietários, ao longo dos anos.

Figura 1.12 – Edifício do tipo gaioleiro [Garcia, 2016c]

A partir de 1880, foram alterados os modos de construção, tendo resultado num abandono da construção antissísmica. Contudo, este aspeto foi recuperado na segunda metade do século XX. A construção de edifícios contíguos, com e sem reforço sísmico, pode ter consequências gravosas porque na ocorrência de um sismo, através das acelerações do solo e das forças horizontais que são transmitidas aos edifícios faz com os edifícios devidamente projetados não colapsem, no entanto, os restantes podem entrar em choque com estes e, colapsarem, mais rapidamente. Neste caso, os edifícios com reforço sísmico podem, também, ficar com danos devido aos impactos dos edifícios rodeantes sem reforço. A prevenção, nestes casos, é sempre

a melhor solução. Segundo, Eduardo Cansado de Carvalho, coordenador da Especialização de Estruturas da Ordem dos Engenheiros (OE), se o reforço sísmico for feito numa construção nova, o custo da estrutura é em média de 20% a 25% do valor total da obra e o reforço sísmico apenas representa um acréscimo de 2% desse valor (Antunes, M., & Freitas, M., 2017). A introdução do reforço sísmico na reabilitação é muito mais invasiva que a solução referida anteriormente e, difere de caso para caso.

Segundo o Eurocódigo 8, a ação sísmica tem um período de retorno de 475 anos e, por esse motivo, a probabilidade de ser excedida de aproximadamente 10% de 50 em 50 anos, podendo variar de região para região, dependendo das características de sismicidade atribuídas [NP EN 1998, 2009].

A intervenção de reabilitação de edifícios para reforço sísmico são muito raras, principalmente, porque quase não existe legislação que obrigue ao reforço sísmico em obras de reabilitação de edifícios antigos.

Em Portugal, prevê-se que possa ocorrer brevemente um grande sismo, idêntico ao de 1755, e de acordo com a generalidade dos especialistas, grande parte dos edifícios não estão preparados para tal. Assim, começam agora a surgir planos de reabilitação urbana relativos à segurança sísmica.

Em Lisboa, está em estudo um Programa de Segurança Sísmica e Aumento da Eficiência Energética (RER) que inclui o reforço da resistência dos edifícios aos sismos na segurança contra fenómenos e catástrofes naturais e, ainda, a acessibilidade de pessoas de mobilidade reduzida e a melhoria das condições de eficiência energética com a aplicação fontes renováveis. Assim, a metodologia de reforço estudada nesta dissertação pode ser uma mais valia para o reforço sísmico que se possa fazer nos próximos anos.

1.4. Exemplo de edifícios reabilitados

Em Portugal, há cada vez mais edifícios reabilitados. Este tipo de solução é importante porque preserva a identidade histórica do povo português, revertendo a deterioração habitacional existente, a salubridade e o despovoamento das zonas urbanas do país. No entanto, muitas vezes, a segurança estrutural é desvalorizada.

Principalmente na área da Grande Lisboa, assiste-se à tendência da preservação da fachada dos edifícios antigos. No entanto, este tipo de construção é desfavorável para a componente sísmica. Segundo Alice Tavares, coordenadora do Grupo Sísmico da Ordem dos Arquitetos (OA), "Não há neste momento uma orientação específica para a reabilitação sísmica. E o que se tem vindo a assistir na Baixa de Lisboa é à demolição integral de edifícios, em que resta apenas a casca. Ou seja, o que deveria permanecer, o seu interior com a estrutura pombalina - que é o elemento mais resistente ao sismo- é demolido e preserva-se antes o elemento mais fraco, a fachada" (Antunes, M., & Freitas, M., 2017). Conforme já foi referido anteriormente, valoriza-se o aspeto estético e cultural, em vez, de ser prioritário a segurança da população.

No entanto, os edifícios reabilitados, principalmente nas zonas urbanas, têm várias vantagens económicas e sociais como por exemplo a fixação dos habitantes existentes e a captação de novos habitantes, a revitalização do comércio, bem como a dinamização do turismo, da cultura e do lazer através da história, das tradições e do património. Da Figura 1.13 à Figura 1.18 apresentam-se alguns edifícios sujeitos a obras de reabilitação e reforço. Na Figura 1.13 observa-se que o edifício foi aumentado em altura, através de vidros, existindo uma correlação entre a construção moderna e a construção antiga, que foi preservada apenas através da conservação das fachadas.

Figura 1.13 – Edifício na Rua Braamcamp, em Lisboa, reabilitado com acréscimo de 4 pisos envidraçados ligeiramente recuados [Paixão por Lisboa, 2016], [Ipressjournal, 2015]

Na Figura 1.14 e Figura 1.15, apresentam-se dois edifícios, em Coimbra e Aveiro, reabilitados principalmente através de pintura, permanecendo a configuração original.

Figura 1.14 – Reabilitação de um edifício na Rua António Almeida, em Coimbra [Fachaimper, 2015]

Figura 1.15 – Reabilitação de um edifício na Avenida Lourenço Peixinho em Aveiro [Fachaimper, 2015]

Na Figura 1.16 apresenta-se a reabilitação de uma moradia no Porto através da substituição de materiais antigos e degradados, por materiais novos e mais modernos, da abertura de um espaço que teria sido fechado e de pintura. No entanto, a moradia manteve a configuração original**.**

Figura 1.16 – Reabilitação de uma moradia no Porto [Fachaimper, 2015]

Ao contrários dos edifícios anteriores, o edifício da Figura 1.17, foi reabilitado não devido à idade mas sim, devido à destruição causada por um ataque áereo. Neste caso, utilizaram-se os mesmo materiais, no entanto, apesar de não ser visível poderá ter sido necessário a utilização de reforços na estrutura.

Figura 1.17 – Reabilitação de um edifício comercial no Líbano danificado por um ataque aéreo [BBC, 2006]

Na Figura 1.18, apresenta-se um edifício devoluto em Londres, que foi reabilitado conservando o aspeto original mas com a utilização de materiais modernos como por exemplo nas janelas, utilizou-se alumínio ao invés da madeira.

Figura 1.18 – Reabilitação de edifício de 1948 em Nova Iorque

1.5. Considerações finais

O reforço de estruturas é cada vez mais usual na indústria da construção e isso acontece, principalmente, através da reabilitação de edifícios. A procura de habitação nas grandes áreas urbanas e a escassez de construção nova nessas áreas são uns dos principais motivos para a reabilitação que, na maioria das vezes, tem como consequência o reforço. O reforço de estruturas é também utilizado pela alteração do uso, pela necessidade de eliminar elementos estruturais, pela ocorrência de ações acidentais (incêndios, explosões, choques) e, ainda, pela existência de causas naturais como, por exemplo, os sismos.

No capítulo seguinte são apresentadas várias as técnicas de reforço como as chapas de aço, os sistemas compósitos reforçados com fibras e, ainda, outras técnicas como o encamisamento com betão armado, os perfis metálicos, o pré-esforço exterior com cabos ou cordões e o pré-esforço exterior com CFRP.

Capítulo 2

Técnicas de reforço para estruturas de betão armado

2.1. Considerações iniciais

O tempo de vida útil requerida pelo projeto, normalmente, faz com que as estruturas tenham um longo período de vida. Por exemplo, o Eurocódigo 0 estipula 50 anos para edifícios e 100 anos para pontes. Durante esse período, os requisitos da estrutura podem alterar-se, comprometendo a vida útil, bem como as condições de segurança e de utilização.

Os reforços nas estruturas de betão são utilizados, não só, para corrigir os processos de deterioração que surgem por causas humanas, naturais ou ambientais e acidentais mas, também, em intervenções de conservação e/ou reabilitação de monumentos e de edifícios, bem como para satisfazer novas exigências funcionais.

As causas humanas que estão associadas à deterioração das estruturas são as deficiências de projeto ou construção e a utilização, das mesmas, que proporciona a degradação dos materiais com o tempo e o envelhecimento acelerado. Através do reforço, é possível recuperar a resistência inicial, cumprir novas exigências normativas e aumentar a ação atuante por eliminação pontual de elementos estruturais.

As causas naturais ou ambientais estão ligadas essencialmente aos ataques físicos, químicos ou biológicos.

As causas acidentais estão ligadas aos efeitos de ações acidentais como explosão, incêndio, sismo, choques, cheias, inundações, entre outras, que, não só, danificam a estrutura, como criam condições de aceleramento do processo de deterioração.

Neste trabalho, descrevem-se técnicas de reforço ativas e passivas, mas o foco será nas últimas, visto que, são as utilizadas mais frequentemente na construção. As técnicas de reforço ativas são de modo geral técnicas caracterizadas pela aplicação de um estado de tensão prévio através de pré-esforço. As técnicas de reforço passivas são geralmente aplicadas por colagem ou aparafusamento de perfis ou chapas, por encamisamento do elemento ou por colocação de elementos pré-fabricados. Dentro das técnicas de reforço passivas, a escolha de chapas metálicas e dos FRP, para este trabalho, deve-se ao facto das chapas serem das técnicas tradicionais mais utilizadas e os FRP serem uma técnica mais recente, com muita diversidade e campos de aplicação.

2.2. Chapas metálicas

A preparação da superfície de betão para chapas metálicas coladas ou fixadas mecanicamente é feita por dois processos. No primeiro, aumenta-se a sua rugosidade através de meios mecânicos e no segundo, aspira-se a superfície. No entanto, atualmente, já existem equipamentos que fazem os dois processos simultaneamente.

O tratamento da superfície da chapa de aço é feito através de galvanização ou metalização da chapa. Para garantir a proteção da mesma, envolve-se com película aderente mantida até à colagem.

As vantagens da técnica de reforço de elementos estruturais de betão por meio de fixação ou colagem exterior de chapas de aço são: simplicidade, rápida execução, eficiência no que se refere ao custo e desempenho mecânico e não altera a geometria da estrutura. Segundo Branco (2011) este tipo de reforço permite uma melhoria significativa da capacidade resistente, uma intervenção sem necessidade de interrupção do uso da estrutura, uma ausência de ruído excessivo ou de pó, um controlo da fendilhação e o aumento da resistência ao corte com um insignificante aumento da secção transversal.

A colocação de chapas tem alguns inconvenientes como a dificuldade de manipulação; o peso elevado; a mão-de-obra especializada; a ancoragem das chapas de aço; os comprimentos limitados devido ao transporte, que resultam na criação de juntas de ligação entre chapas para

reforços longos; e a preocupação em não haver corrosão nas chapas metálicas, pois, sensíveis aos agentes atmosféricos, principalmente, as são chapas coladas pode ter o sistema de colagem comprometido.

2.2.1. Chapas metálicas coladas

As chapas metálicas coladas são uma técnica de reforço passiva em que se une as chapas às superfícies de elementos de betão, por aplicação ou injeção de resina *epoxy*; desta forma, a estrutura tem uma armadura adicional. Ao longo da interface de colagem, o adesivo promove a ligação ao corte entre o betão e armadura exterior tornando-se, assim, numa estrutura composta. Segundo a publicação de Júlio Appleton e Augusto Gomes, recomenda-se que a resina tenha de 1 a 3 mm de espessura porque valores superiores têm uma ligação menos eficiente. A chapa deve ter uma largura inferior a 300 mm e uma espessura de 3 a 5 mm (Appleton & Gomes, 1997a).

Na Figura 2.1 apresentam-se duas soluções de reforço com chapas metálicas coladas.

Figura 2.1 – Soluções de reforço com chapas metálicas coladas [Htecnic, 2008a], [NCREP, 2017]

A técnica de colagem de chapas metálicas é uma técnica de reforço passiva e tem que ter em consideração os seguintes aspetos:

i) É adequada só quando a qualidade e dimensões do betão dos elementos estruturais forem suficientes e quando há deficiência nas armaduras existentes;
ii) Para mobilizar a sua capacidade resistente e de modo a não se utilizar uma deformação elevada, devem colocar-se aços de resistência baixa ou média;
iii) Para garantir uma boa ligação entre as chapas de reforço e o betão existente é necessário uma cuidadosa preparação das superfícies de betão e das chapas;

iv) Optando por adesivo de *epoxy*, com boa resistência ao corte (15 a 25 MPa) e controlando o nível das tensões de corte na interface para não exceder a capacidade do betão que, geralmente, é o material condicionante, pode-se atenuar os problemas da transmissão de forças ao longo da interface de colagem. A ligação pode, também, ser complementada com buchas metálicas;

v) Na execução do reforço, deve-se a aliviar a estrutura de todas as ações variáveis e permanentes removíveis para que as cargas de serviço sejam mobilizadas pelas chapas adicionadas;

vi) Contra a corrosão e ação do fogo, de modo a que neste último caso a estrutura resista ao fogo, pelo menos 30 minutos, as armaduras coladas devem ser protegidas.

A utilização de adesivos *epoxy* tem vantagens como: a aderência a diferentes tipos de suporte, resistência mecânica, e resistência à corrosão e a rapidez de cura.

A sensibilidade do adesivo a aumentos de temperatura é uma desvantagem na utilização de adesivos *epoxy*, pois pode ter como consequência a deterioração da cola e a facilidade de descolamento das extremidades.

2.2.2. Chapas fixadas mecanicamente

As chapas metálicas fixadas mecanicamente, constitui um tipo de técnica passiva de reforço, e são geralmente aplicadas com fixações metálicas (buchas, "conectores") na ligação chapa-betão, especialmente nas extremidades das chapas, ou seja, nas zonas de ancoragem.

Na Figura 2.2 apresentam-se duas soluções de reforço com chapas metálicas fixadas mecanicamente.

Figura 2.2 – Soluções de reforço com chapas metálicas fixadas mecanicamente [Htecnic, 2008b], [Htecnic, 2007]

A utilização de fixações metálicas tem vantagens na redução da sensibilidade ao aumento da temperatura e a compatibilidade com outros métodos.

A desvantagem associada a este tipo de reforço consiste na concentração de tensões no processo de execução.

2.3. Sistemas compósitos reforçados com fibras (FRP)

Os sistemas compósitos FRP são técnicas de reforço passivas, correntemente em forma de três tipos de materiais: carbono, aramida e vidro. Estes podem ter várias formas, quadradas, redondas e triangulares, com dimensões idênticas. A resistência do compósito depende do espaço entre as partículas, do diâmetro das mesmas e da fração de volume do reforço. Na Figura 2.3, apresentam-se algumas das propriedades médias dos FRP comparadas com as do aço e alumínio (Da Costa & Juvandes, 2002).

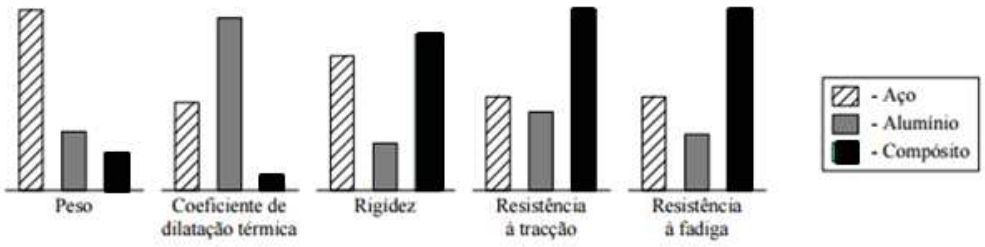


Figura 2.3 – Comparação de características do aço e alumínio com compósitos [Da Costa & Juvandes, 2002]

Na Figura 2.4, apresentam-se os tipos de FRP existentes.

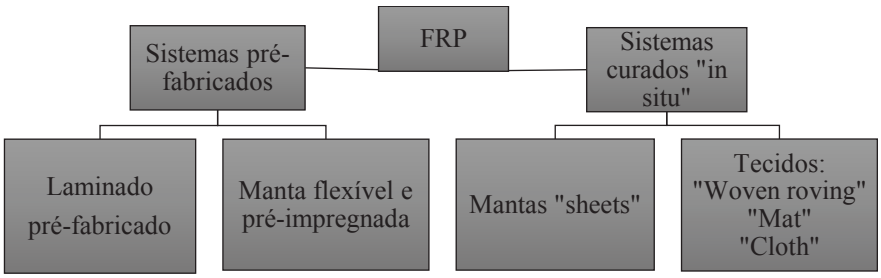


Figura 2.4 – Tipos de FRP

Nos sistemas pré-fabricados, o adesivo é distinto do compósito de FRP, tipo *epoxy*, enquanto que, nos sistemas curados "in situ", o adesivo é a própria resina de impregnação das fibras e de polimerização em compósito de FRP.

Dos três tipos de fibras destacam-se as fibras de carbono por apresentarem uma maior durabilidade em quase todas as condições ambientais em que o betão armado esteja inserido (Silva, 2008). Na Tabela 2.1 apresentam-se as características relativas aos FRP de carbono, aramida e vidro.

Tabela 2.1 – Propriedades das fibras de reforço [Juvandes, 2002]

Propriedade	Carbono		Aramida		Vidro
	Elevada resistência	Elevado módulo elasticidade	Elevada resistência	Elevado módulo elasticidade	
Resistência à tração [MPa]	3430-4900	2940-4600	3500	2900	3500
Módulo elasticidade [GPa]	230-240	165-640	74	111	74
Extensão na rotura [%]	1,5-2,1	0,45-1,2	4,6	2,4	4,7
Peso específico [g/cm^3]	1,8	1,8-2,1	1,39	1,45	2,6

Na Tabela 2.2 apresentam-se os coeficientes de dilatação térmica correspondentes os FRP.

Tabela 2.2 – Coeficientes de dilatação térmica das fibras de reforço [ACI, 2002]

	Coeficiente de dilatação térmica (x 10^{-6}/ºC)		
Direção	Fibras de Carbono	Fibras de Aramida	Fibras de Vidro
Longitudinal	-1,00 a 0,00	-6,0 a -2,0	6,00 a 10,0
Transversal	22,0 a 50,0	60,0 a 80,0	19,0 a 23,0

2.3.1. Constituição e propriedades gerais do FRP

Os FRP são constituídos por dois componentes: fibras de reforço e a matriz polimérica (resina, filler e aditivos). As fibras de reforço são resistentes mas frágeis, enquanto que, a matriz polimérica é pouco resistente mas, protege as fibras das ações ambientais, transfere e distribui as cargas pelas fibras e mantém as fibras na sua posição, evitando a encurvadura quando solicitadas em compressão. As matrizes poliméricas podem ser do tipo termoendurecíveis (poliéster, viniléster, *epoxy*, fenólicas) ou termoplásticas (polietileno, polipropileno). Na Tabela 2.3, apresentam-se as algumas das características das matrizes polimétricas termoendurecíveis do poliéster, viniléster e *epoxy* (Correia, 2012).

Tabela 2.3 – Propriedades das matrizes poliméricas termoendurecíveis [Correia, 2012]

Propriedade	Poliéster	Viniléster	*Epoxy*
Resistência [MPa]	20-70	68-82	60-80
Módulo elasticidade [GPa]	2-3	3,5	2-4
Extensão na rotura [%]	1-5	3-4	1-8
Densidade [g/cm^3]	1,2-1,3	1,12-1,16	1,2-1,3
Temp. transição vítrea [ºC]	70-120	102-150	100-270

2.3.2. Compósitos de fibras de carbono reforçado (CFRP)

Os CFRP, mais recorrentes são os laminados e as mantas (Figura 2.5). Os laminados são fabricados até 1,5 mm de espessura, constituídos por fibras de carbono unidirecionais. Estes são pré-curados estando assim prontos a utilizar. As mantas são constituídas por fibras de carbono contínuas unidirecionais ou multidirecionais; geralmente são coladas com uma matriz *epoxy*, ao contrário dos laminados, endurecidas *in situ.*

Figura 2.5 – Tela de fibras de carbono [E-composites, 2017]

Na Figura 2.6 apresentam-se duas soluções de reforço com CFRP. Existem, ainda, varões, cordões e cabos neste tipo de material.

Figura 2.6 – Soluções de reforço com CFRP [PerfuraCon, 2017], [WGA, 2016]

Na Tabela 2.4, apresentam-se as propriedades dos laminados e mantas.

Tabela 2.4 – Comparação dos valores das propriedades dos laminados e mantas, adaptado de [Correia, J. , 2009]

Propriedades/ Material	Laminados	Mantas
E	165 a 300 GPa	240 a 640 GPa
σ_u	1500 a 3000 MPa	2500 a 3000 MPa
ε_u	0,5 a 1,7 %	0,4 a 1,55 %

Os CFRP têm várias vantagens na sua utilização, tais como serem leves (96 a 288 g/m em laminados), flexíveis, de fácil transporte, fácil manuseamento e aplicação (principalmente quando não exige fixação mecânica). Além disso, este tipo de material ocupa pouco espaço no estaleiro porque é vendido em rolos até 250 m (sem juntas), tem uma espessura reduzida, elevada resistência à tração (>2800 MPa), elevado módulo de elasticidade longitudinal, boas características de amortecimento estrutural e baixo coeficiente de dilatação térmica (-1,00 x 10^{-6}/ºC a 0,00 x 10^{-6}/ºC) comparativamente com o do betão que pode variar de 8 x 10^{-6}/ºC a 16 x 10^{-6}/ºC e do aço que pode variar de 10 x 10^{-6}/ºC a 15 x 10^{-6}/ºC (Sousa, 2008). Ao contrário de vários materiais utilizados no reforço de estruturas, este tem boa resistência química, nomeadamente à corrosão e, ainda, bom comportamento ao choque e à fadiga (Boto, 2015).

As desvantagens na utilização de CFRP são a necessidade de proteção aos raios ultravioleta e ao fogo, a elevada condutibilidade térmica, o comportamento frágil, a ligação comprometida em locais húmidos, o descolamento devido a capacidade resistente ser limitada e os cuidados específicos de aplicação. Além disso, note-se os CFRP têm um custo elevado, cerca de dez vezes mais caro que as fibras de vidro (Boto, 2015). No caso dos laminados, são

condicionantes porque funcionam de forma unidirecional, enquanto que, as mantas/tecidos podem ser bidirecionais ou multidirecionais.

2.3.3. Compósitos de fibras de aramida reforçado (AFRP)

As fibras de aramida (Figura 2.7) são obtidas por trefilagem de poliamidas aromáticas. Neste tipo de reforço, a resistência à tração e o módulo de elasticidade longitudinal são muito superiores às de outras fibras orgânicas.

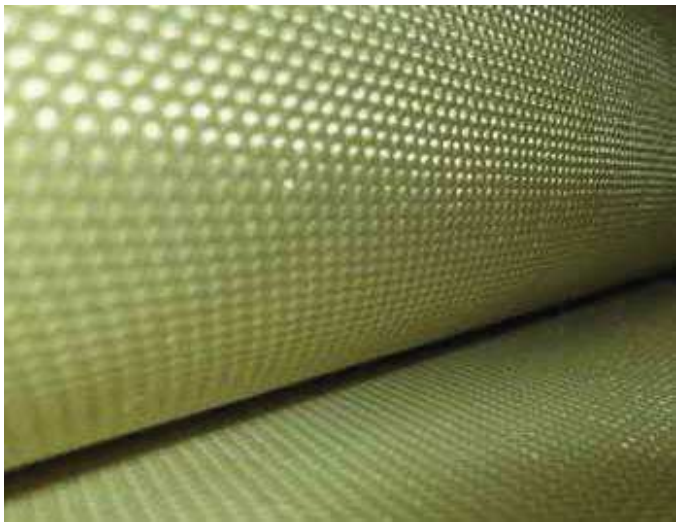


Figura 2.7 – Tela de fibras de aramida [Fibertex, 2017]

As vantagens na utilização de compósitos de fibras de aramida para o reforço são: o excelente comportamento sob temperaturas elevadas de serviço, a boa resistência ao fogo com capacidade de autoextinção, a durabilidade, a elevada resistência à tração, a elevada resistência química (exceto a ácidos e bases concentrados), a baixa condutividade elétrica, baixa massa específica e a elevada resistência ao impacto.

Os AFRP têm vários inconvenientes tais como a baixa resistência à compressão, a má aderência às resinas, a elevada absorção de humidade e o custo elevado.

2.3.4. Compósitos de fibras de vidro reforçado (GFRP)

Os GFRP (Figura 2.8) são compostos por fibras de vidro e uma matriz polimérica. O vidro é fundido e distribuído por canais que o conduzem a fieiras que, por vazamento gravítico,

formam fios com décimas de milímetros. As fieiras são concluídas com um acabamento superficial.

As fibras de vidro são constituídas por fibras longitudinais aglomeradas, mantas de reforço e um véu de superfície com fios desalinhados. A matriz polimérica é constituída por resina, material de enchimento (filler) e aditivos. Ainda, com a utilização de materiais de proteção como tintas intumescentes, materiais inorgânicos projetados, painéis de gesso promovem a resistência ao fogo.

Comparativamente ao aço, a tensão de rotura é semelhante/superior, o coeficiente de condutibilidade térmica é muito inferior, o coeficiente de dilatação térmica é semelhante e a densidade é quatro vezes inferior à do aço.

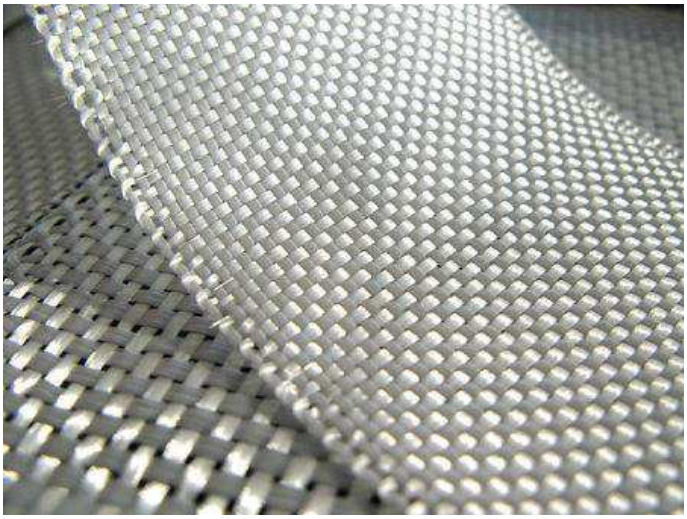


Figura 2.8 – Tela de fibras de vidro [C3 Technologies, 2017]

Os GFRP são vantajosos relativamente às propriedades elétricas e térmicas. Estes também têm bom desempenho, pois têm elevada resistência à tração e compressão, boa durabilidade em locais com ambientes quimicamente agressivos, são de rápida instalação, fácil manutenção e, ainda, têm baixo peso próprio. Este tipo de fibras é o mais económico relativamente às outras fibras (Ventura, 2009).

Os inconvenientes na utilização dos GFRP são o comportamento frágil, a falta de regulamentação, a instabilidade, deformabilidade e módulo de elasticidade reduzido.

2.4. Outras técnicas de reforço

2.4.1. Encamisamento com betão armado (betão moldado "*in situ*") e encamisamento com betão projetado

A técnica de reforço de encamisamento com betão, tal como ilustrado na Figura 2.9, é uma técnica de reforço passiva e aplica-se no reforço de vigas à flexão e ao esforço transverso. Esta técnica consiste no aumento da secção que se pretende reforçar com a colocação de novas armaduras e de uma nova camada de betão na envolvente. O encamisamento pode ser efetuado com argamassa ou betão, aplicado diretamente à colher, com cofragem ou por projeção. Contudo, a projeção é mais favorável em termos de melhor aderência entre o reforço recente e o elemento a reforçar. O betão ou a argamassa deve possuir uma boa aderência, baixa retração, boa trabalhabilidade, elevada resistência à compressão e um coeficiente de dilatação térmica e módulo de elasticidade semelhante com o betão presente. A ligação entre estes dois materiais deve ser melhorada, por causa do efeito de retração, com a aplicação de uma resina *epoxy*, com um período de eficácia de colagem elevado, na superfície de contacto previamente preparada.

Figura 2.9 – Encamisamento de viga com betão armado moldado [Vieira, 2016]

O betão projetado, tal como ilustrado na Figura 2.10, tem características idênticas às do betão comum, diferenciando-se, pela dimensão dos inertes e pelo processo de aplicação. Este processo de aplicação do betão é feito mecanicamente sob pressão, de uma forma contínua. A

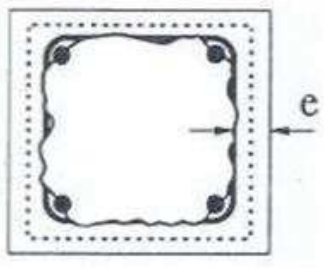
aplicação do betão projetado deve fazer-se por camadas de 4,5 cm, sem contudo ultrapassar a espessura máxima de 20 cm (Azevedo, 2008).

O betão projetado tem uma excelente aderência ao betão base, em superfícies tratadas, e às armaduras, e, além disso, tem boas características de resistência devido à baixa relação água-cimento e ao alto grau de compactação. O betão por ser projetado, a maior parte das vezes, não necessita de cofragens e, quando necessita, utiliza-se uma quantidade mínima. Um dos principais problemas ligados à aplicação do betão desta forma é o ricochete que depende de aspetos como a espessura da camada, o trabalho do operador, a distância de impacto, a velocidade de saída do betão e a composição do betão.

As tecnologias utilizadas para a projeção do betão são por meio de via seca ou via húmida. No primeiro caso (via seca) é lançado por ar comprimido para o canhão de projeção os inertes húmidos e o cimento, adicionando-se água sob pressão. No segundo caso (via húmida) todos os materiais (água, cimento e inertes) são misturados e, posteriormente, transportados por ar comprimido até ao canhão de projeção, adicionando-se mais ar para o lançamento.

Figura 2.10 – Encamisamento com betão projetado [Geoconcret, 2017]

A espessura de betão, a aplicar, depende do tipo de material utilizado, conforme é descrito na Figura 2.11 (Sousa, 2008).



betão projetado → e_{min}= 50 mm

betão cofrado → e_{min}= 75 a 100 mm

argamassa especial → e_{min}= 40 a 60 mm

Figura 2.11 – Valores mínimos da espessura de material a betonar [Sousa, 2008]

As vantagens da técnica de reforço de elementos estruturais de betão por encamisamento com betão armado são: utilização de técnicas e materiais correntes, simplicidade de execução, não é necessária a utilização de mão-de-obra especializada e eficiência. Com esta técnica não é necessário o reforço das fundações porque, em princípio, existe uma distribuição uniforme do aumento de rigidez da estrutura (Júlio, 2012).

Este tipo de reforço tem alguns inconvenientes, tais como o aumento da dimensão dos elementos reforçados que se reflete num grande impacto arquitetónico e a necessidade de espera para presa e endurecimento do betão no sentido de este adquirir a resistência. Além disso, pretendendo-se continuidade do reforço, entre pisos, é necessário furar a laje para atravessamento da armadura longitudinal. No caso de lajes vigadas, o reforço contínuo fica condicionado.

Os principais tipos de disposições de armaduras para o reforço de vigas por encamisamento apresentam-se de seguida (Appleton & Gomes, 1997b). A Figura 2.12 apresenta, em primeiro, o reforço da viga à flexão por encamisamento e, nas duas figuras seguintes, o reforço à flexão e ao esforço transverso por encamisamento.

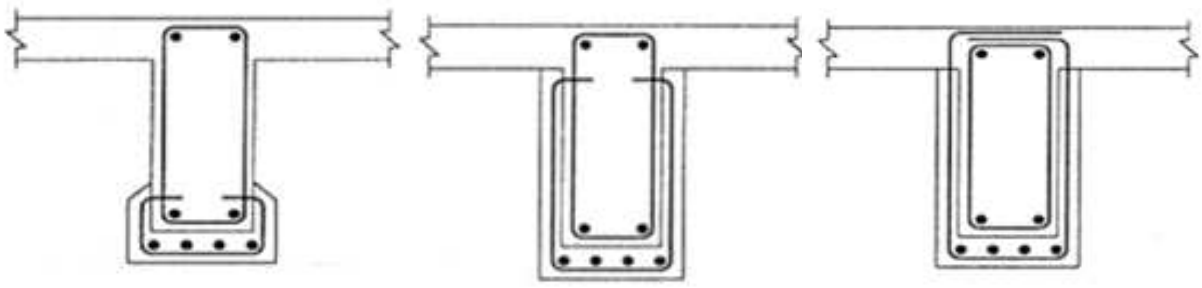


Figura 2.12– Reforço de vigas à flexão [Appleton & Gomes, 1997b]

Os betões de retracção compensada são uma técnica de reforço passiva em que os betões são feitos com cimento expansivo que compensam, aproximadamente, as tensões de tracção induzidas pela retracção por secagem, através da restrição da expansão, tem como consequência a indução de tensões de compressão. Este tipo de betões têm vantagens, tais como: menores custos de execução e manutenção, menos juntas e menos fissuras. Nos betões de retracção expansivos, o cimento comum é substituido, total ou parcialmente. Este tipo de betão pode, também, ser composto por aditivos expansivos como, por exemplo, limalha de ferro ou alumínio em pó.

A técnica de reforço passiva de betões modificados por polímeros, atua como modificadores cimentícios, substituindo parte do cimento ou parte da água de amassadura. Com este tipo de características é possível melhorar a aderência ao betão existente, melhorar a trabalhabilidade e reduzir a retração porque funcionam como redutores de água (plastificantes), aumentar a resistência a alguns ataques químicos e reduzir os procedimentos de cura. Os inconvenientes desta solução são a menor resistência à carbonatação devido a serem menos alcalinos e o facto de serem mais sensíveis à ação do fogo.

No reforço de estruturas utilizam-se argamassas e betões à base de resina, em que o cimento é substituído por resinas *epoxy*. Este tipo de material requer condições de trabalho especiais porque os componentes, resina e endurecedor, são bastante sensíveis, a maior parte das vezes, à humidade e à temperatura, não sendo executado com temperaturas inferiores a 10ºC. Tratando-se de uma reação fortemente exotérmica, em tempo quente, pode originar retrações importantes, além disso, o betão com resinas tem baixa resistência ao calor, perdendo a resistência para temperatura da ordem dos 100ºC.

Na utilização deste tipo de técnica de reforço passiva, para se obter uma aderência perfeita deve-se aplicar, primeiro, no betão existente uma camada de resina pura, em estado liquido.

O betão à base de resinas deve ter um revestimento adequado à superfície como, por exemplo, uma camada de resina pura porque, este, não fornece proteção à penetração do gás carbónico e à carbonatação.

No betão projetado com fibras de aço são incluídas fibras de aço, tais como ilustradas na Figura 2.13, menores que 5 cm de comprimento e com diâmetros entre 3 a 5 mm. Estas fibras têm baixo teor de carbono.

Figura 2.13 – Fibras de aço [Reforma fácil, 2011]

A quantidade de fibras é menor que 5% do peso do betão fresco. Este tipo de técnica de reforço passiva permite reduzir a retração, evitando a colocação de armadura de pele; permite, ainda, um aumento da resistência do betão à compressão e à tração. A última camada, com 2 cm, não deve conter as fibras de aço para ser evitada a corrosão das mesmas.

2.4.2. Perfis metálicos

Os perfis metálicos comerciais são usualmente utilizados como uma técnica de reforço passiva. Tal como na utilização de chapas requerem uma cuidadosa preparação da superfície de betão para garantir uma boa ligação entre a viga e o mesmo. A ligação é efetuada com buchas metálicas e, por vezes, adicionada resina *epoxy*.

A utilização dos perfis metálicos comerciais, tal como ilustrado na Figura 2.14, é vantajosa no que se refere à otimização do tempo de execução e de, em princípio, não haver necessidade, de reforçar as fundações por o aumento de rigidez ser uniformemente distribuído. A ligação mista entre o perfil e o betão através de buchas metálicas e *epoxy* permite que, em caso de incêndio, se a ligação efetuada com resina for afetada, a ligação mecânica continue efetiva através das buchas.

Figura 2.14 – Reforço com perfis metálicos standard em I [Stanck, 2017]

Os inconvenientes no uso deste método de reforço são a possível intrusão na arquitetura, a mão-de-obra especializada e a indispensabilidade da proteção contra o fogo, em especial, devido à perda de resistência das resinas *epoxy*, normalmente, utilizadas nas ligações aos pilares.

2.4.3. Pré-esforço exterior com cabos de cordões ou varões

O pré-esforço exterior é uma técnica de reparação e reforço ativa de estruturas, utilizada para introduzir um estado de tensão adicional, de forma a aliviar as tensões num determinado local da estrutura, podendo aumentá-las noutros. Pode ainda ser utilizado para reduzir deformações excessivas ou para controlar a fendilhação localizada devido a cargas exteriores. Esta aplica-se geralmente para corrigir alterações do sistema estrutural, como por exemplo a eliminação de apoios conferidos por pilares, para corrigir o comportamento em serviço ou para aumentar a capacidade resistente.

Habitualmente, o pré-esforço exterior aplica-se, através de cabos de cordões ou varões. Esta técnica é conceptualmente simples e eficiente, sendo possível utiliza-la em vários elementos de uma estrutura, conforme as figuras seguintes. Na Figura 2.15 é ilustrado um viaduto no Campo Grande que recorre ao pré-esforço com varões para a fendilhação em lajes.

Figura 2.15 – Pré-esforço com varões para a fendilhação em lajes (Viaduto no Campo Grande)

A Figura 2.16 mostra o pré-esforço com varões para a fendilhação em vigas.

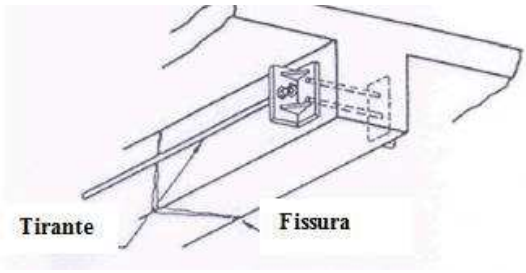


Figura 2.16 – Pré-esforço com varões para a fendilhação em vigas [Costa, 2014]

A Figura 2.17 ilustra o pré-esforço com cabos para alívio de tensões a meio vão.

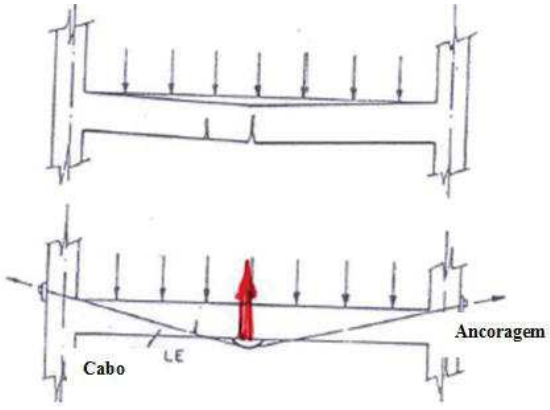


Figura 2.17 – Pré-esforço com cabos para alívio de tensões a meio vão e fechar fissuras [Costa, 2014]

O aparelho especial para o desvio dos cabos é ilustrado na Figura 2.18.

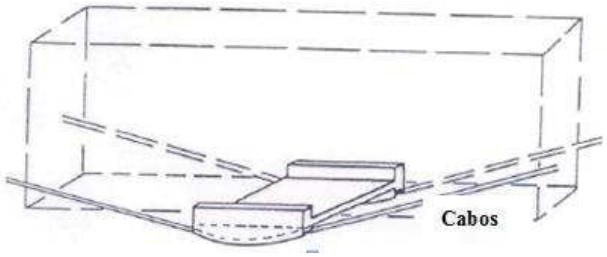


Figura 2.18 – Aparelho especial para o desvio dos cabos (desviador) [Costa, 2014]

A vantagem na utilização do pré-esforço exterior reside na simplicidade e eficiência, na intervenção pouco intrusiva e reversível, na possibilidade de substituição da armadura de pré-esforço, no fato de resultar em qualquer tipo de elemento de uma estrutura e na facilidade de corrigir o nível de pré-esforço aplicado nas armaduras de pré-esforço (Preto, 2014).

As desvantagens referentes as técnicas de pré-esforço exterior não aderente são o estabelecimento dos sistemas de ancoragem e a necessidade de impedir a corrosão dos cabos, devendo apresentar elevada proteção anticorrosiva e, muitas vezes, proteção suplementar por argamassa especial ou por betão projetado e a necessidade de espaço na zona da ancoragem ativa para ser aplicada a tensão na armadura de pré-esforço.

2.4.4. Pré-esforço exterior com CFRP

O reforço por pré-esforço exterior com CFRP utiliza um macaco hidráulico com uma chapa de aço, que com a aplicação do pré-esforço funciona como ancoragem. Esta técnica é uma técnica de reforço ativa. A chapa de aço está ligada por conectores ao betão e funciona como elemento de reação.

A aplicação do pré-esforço exterior pode ser executada por método indireto, por aplicação de contra flecha na estrutura ou por método direto, de duas formas: pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar ou pré-esforço do FRP contra a própria estrutura (Tostões, 2010).

O método indirecto, através da aplicação de contra-flecha à estrutura, tal como ilustrado na Figura 2.19, processa-se da seguinte forma (Tostões, 2010):

i) Aplicação da força vertical para cima com o auxílio de macacos hidráulicos;
ii) Colagem do FRP à estrutura;
iii) Remoção dos macacos hidráulicos.

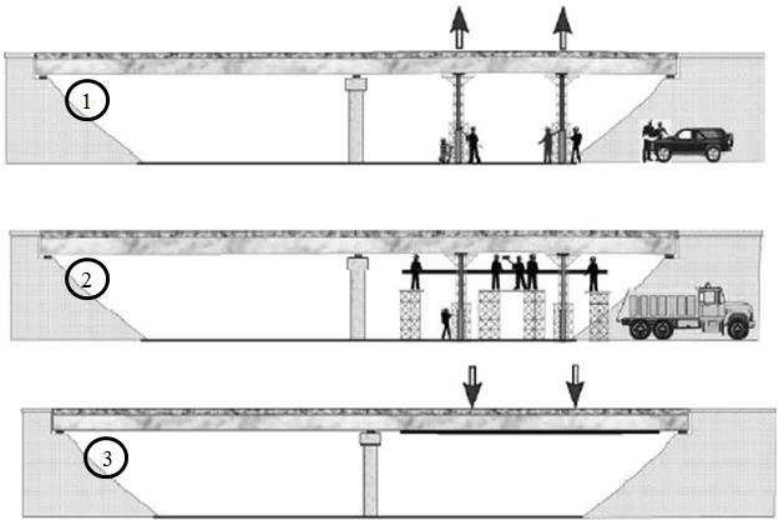


Figura 2.19 – Procedimentos do método indireto [Tostões, 2010]

O método indireto de aplicação de contra flecha à estrutura tem vantagens na intervenção, por ser pouco invasivo, na redução do peso próprio do elemento reforçado, na facilidade de substituição da armadura de reforço e na diminuição da deformação e da fendilhação do elemento reforçado. Além disso, é possível corrigir o nível de pré-esforço aplicado.

Este método tem alguns problemas na sua utilização porque não permite controlar o nível de pré-esforço instalado. Além disso, a relação entre o pré-esforço instalado e o esforço necessário para a aplicação da contra flecha, normalmente, não é compensada.

O método directo, através de pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar, ilustrado na Figura 2.20, processa-se da seguinte forma (Tostões, 2010):

i) Colagem das extremidades do FRP e aplicação do pré-esforço num pórtico auxiliar;
ii) Aplicação do pré-esforço FRP à estrutura; manter o pórtico auxiliar até a resina endurecer;
iii) Remoção das ancoragens através de corte e transferência do pré-esforço para a estrutura.

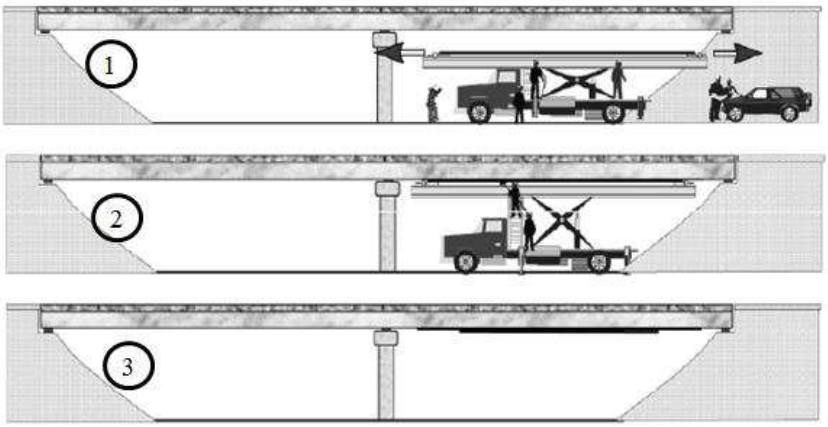


Figura 2.20 – Procedimentos do método direto: pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar [Tostões, 2010]

O método direto de pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar tem as mesmas vantagens que o método anterior. No entanto, o método direto de pré-esforço do FRP contra uma estrutura auxiliar tem como inconveniente a fácil aplicação apenas em estruturas de pequeno porte; por esse motivo, em estruturas de grande porte, é necessário a utilização de um pórtico auxiliar de grandes dimensões.

Finalmente o método directo, pré-esforço do FRP contra a própria estrutura, tal como ilustrado na Figura 2.21, processa-se da seguinte forma:

i) Montagem das ancoragens na estrutura;
ii) Aplicação do pré-esforço no FRP.

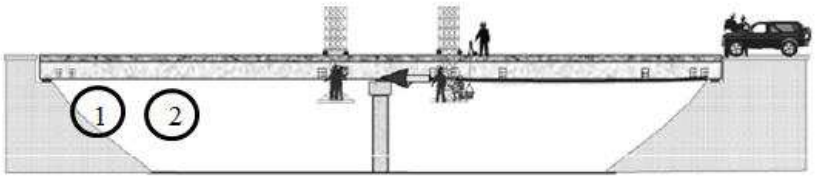


Figura 2.21 – Procedimentos do método direto: pré-esforço do FRP contra a própria estrutura [Tostões, 2010]

Dos métodos anteriores, além das vantagens já referidas, o método direto de pré-esforço do FRP contra a própria estrutura é o mais vantajoso visto que é o mais promissor para as aplicações *in situ*. Adicionalmente, é versátil porque utiliza equipamento leve e com as ancoragens evita o destacamento prematuro por corte do FRP. No entanto, o método direto de pré-esforçado FRP contra a própria estrutura tem como inconvenientes como a

impossibilidade de aplicar forças de puxe elevadas que têm como consequência o esmagamento da armadura.

2.5. Considerações finais

A solução por encamisamento de betão armado é a técnica de reforço mais utilizada e mais antiga (Sousa & Ripper, 1998). No entanto, apresenta desvantagens associadas ao aumento da dimensão da peça, ao aumento do seu peso próprio, a falhas de aderência e à existência de fissuras entre o betão antigo e o betão novo. Por estes motivos, na presente dissertação optou-se por estudar pela utilização do modelo da solução de reforço por elementos metálicos e pela utilização do modelo da solução de reforço por compósitos de FRP. E, ainda, pelo primeiro ser uma das soluções mais tradicionais, sendo comumente utilizada em situações de emergência (Reis, 2001) e pelo segundo ser utilizado tanto em estruturas novas como antigas, ser uma técnica mais recente, de rápida execução, não interrompendo o uso do edifício e podendo melhorar as condições de ductilidade, resistência, flexão e corte.

Capítulo 3

Dimensionamento de soluções para reforço estrutural

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se os modelos de dimensionamento para soluções de reforço de peças de betão armado por elementos metálicos através de chapas de aço coladas e por sistemas de compósitos de FRP através de laminados de CFRP colados. Estes modelos vão ser utilizados no caso de estudo apresentado neste capítulo.

3.2. Modelos de dimensionamento

3.2.1. Solução de reforço de peças de betão armado por elementos metálicos adicionais

A adição de chapas metálicas funcionando como armaduras adicionais exteriores é uma técnica adequada quando a armadura existente se revela insuficiente e as dimensões dos elementos estruturais e qualidade do betão se consideram ser adequadas.

3.2.1.1. Verificação de segurança de estruturas existentes

O dimensionamento do reforço de elementos estruturais de betão armado admite-se os seguintes princípios básicos:

- Compatibilidade de deformações entre os materiais;
- Hipótese de Navier-Bernoulli;
- Equilíbrio de forças na secção.

Assumindo estes princípios e considerando o estado inicial de tensão e de deformação do elemento no ato do reforço, bem como o conhecimento das leis constitutivas dos materiais e dos critérios de cedência, é possível prever o comportamento da estrutura reforçada.

O dimensionamento do reforço deve também ser baseado na filosofia dos estados limites, de acordo com a regulamentação portuguesa e europeia para estruturas novas. Esta metodologia define níveis de segurança aceitáveis em relação à ocorrência, quer dos estados limites de utilização, quer dos estados limites últimos. Na verificação da resistência última do elemento, todos os modos de rotura possíveis devem ser analisados. Por exemplo, a contribuição dos sistemas de chapa de aço ou de compósito no reforço à flexão de uma secção deve manter a ductilidade, assegurando que a capacidade resistente ao esforço transverso não controle a rotura.

3.2.1.2. Cálculo do momento resistente e da área de reforço

O dimensionamento ou verificação da segurança do reforço pode ser feito através de métodos simplificados (método dos coeficientes globais) ou métodos numéricos mais complexos de forma a simular as tensões iniciais dos materiais existentes, bem como os mecanismos de transferência de tensões entre os materiais de reforço e os existentes. A Figura 3.1 mostra o modelo de comportamento real do material existente e o material de reforço.

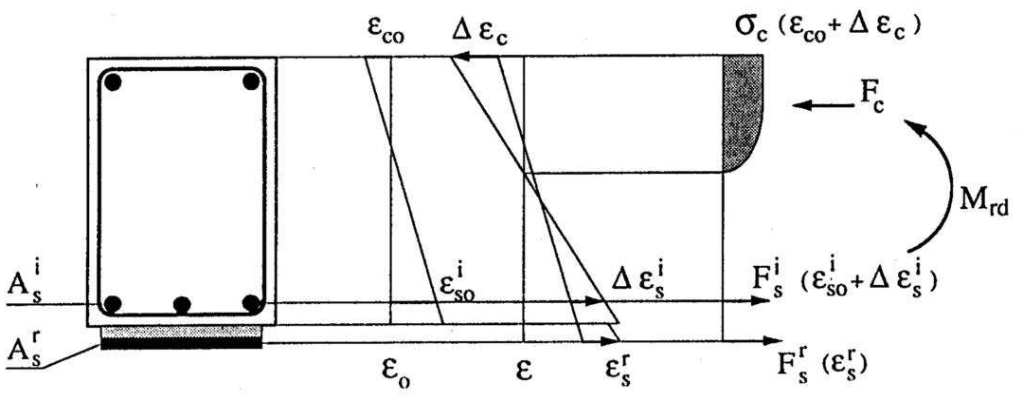


Figura 3.1 – Modelo do comportamento [Branco, 2011]

Por questões de simplificação, nesta dissertação considera-se apenas o método simplificado dos coeficientes globais de monolitismo, sob diversas condições, tais como: assumir elemento reforçado sem defeitos ou danos, aderência perfeita entre matérias, baixas tensões iniciais, chapas metálicas de reforço de aço tipo S235 para não mobilizarem tensões muito elevadas, garantir que as armaduras existentes e chapas metálicas estão em cedência em Estado Limite Último (ELU) de forma a que se verifique rotura dúctil e, finalmente, considerar sempre nas extremidades buchas metálicas (Matos, 2003).

O cálculo do momento resistente para a solução de reforço com chapas de aço é semelhante ao cálculo do betão armado, considerando-se duas armaduras, conforme a Figura 3.2, onde

$$M_{rd} = \gamma_{n,M} \cdot M \tag{3.1}$$

Salienta-se que o EC8, Parte 1-4, admite no caso da flexão um coeficiente de monolitismo de $\gamma_{n,M} = 1{,}0$, com $M_{rd,f} \leq 2M_{rd,0}$ e $\gamma_{s,r} = 1{,}5\gamma_{s,i}$, ou seja, para o aço de reforço deve-se tomar um valor para o coeficiente de segurança parcial 1,5 vezes superior ao utilizado no projeto de estruturas novas (NP EN 1998 1-4, 2009). Desta forma, admite-se que a secção tem um comportamento monolítico, havendo uma aderência perfeita (secções plantas mantêm-se planas após a deformação).

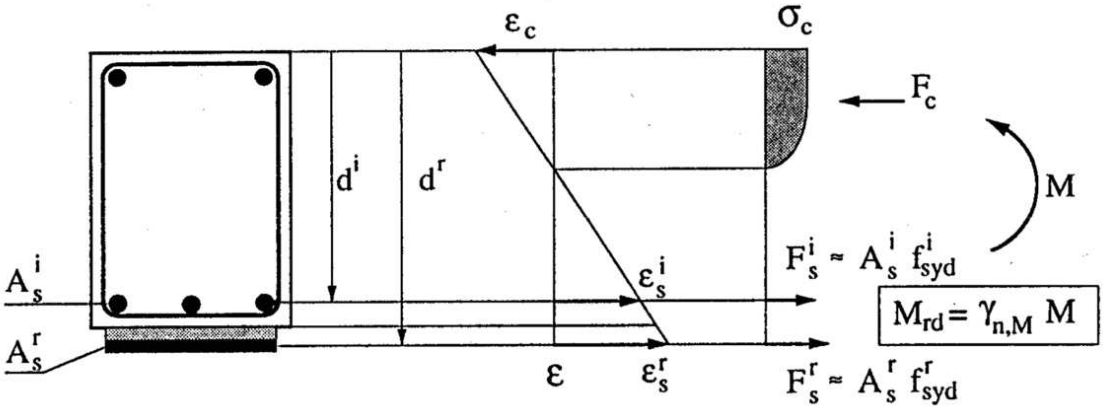


Figura 3.2 – Cálculo do momento resistente através do método do coeficiente de monolitismo [Branco, 2011]

Como as duas camadas de armaduras (varões existentes e chapa de reforço adicional) estão próximas, o cálculo pode simplificadamente ser realizado através de uma armadura equivalente, $A_{s^{eq}}$, posicionada no centro mecânico dessas armaduras.

Assim, para a situação das armaduras entrarem em cedência, o momento resistente em ELU pode ser obtido através da equação 3.2:

$$M_{rd} = A_s^{eq} \cdot z^{eq} \cdot f_{syd}^{i} = A_s^{i} \cdot z^{i} \cdot f_{syd}^{i} + A_s^{r} \cdot z^{r} \cdot f_{syd}^{r} \tag{3.2}$$

onde:

A_s^{eq}- Área de aço equivalente

f_{syd}^{i}- Resistência de cálculo da armadura equivalente

Assumindo $z^{eq} \approx 0{,}9d^{eq}$

$$M_{rd} = A_{s^{eq}} \cdot 0{,}9d^{eq} \cdot f_{syd}^{i} = f_{syd}^{i}(A_s^{i} \cdot 0{,}90d^{i} + A_s^{r} \cdot 0{,}90d^{r} \cdot \frac{f_{syd}^{r}}{f_{syd}^{i}}) \tag{3.3}$$

Sendo área de armadura de reforço determinada por:

$$A_s^{r} = \frac{f_{syd}^{i}}{f_{syd}^{r}} \cdot (A_{s^{eq}} \cdot \frac{d^{eq}}{d^{r}} - A_{s^{i}} \cdot \frac{d^{i}}{d^{r}}) \tag{3.3}$$

Alternativamente, estes cálculos podem ser efetuados com recurso a tabelas.

O reforço à flexão com e sem buchas metálicas têm limites de espessura para as chapas de aço, t_s, para a espessura da resina, t_g, e, ainda, para a largura da chapa, b_s, representado na Figura 3.3 (Branco, 2011).

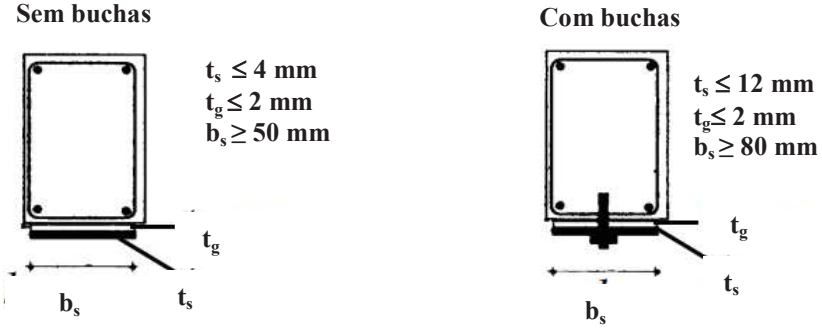


Figura 3.3 – Reforço à flexão com e sem buchas metálicas [Branco, 2011]

No caso da ligação aço/betão pode, em geral, admitir-se uma plastificação da ligação, o que corresponde a admitir uma distribuição plástica uniforme das tensões de corte, de acordo com o indicado na Figura 3.4 (Branco, 2011).

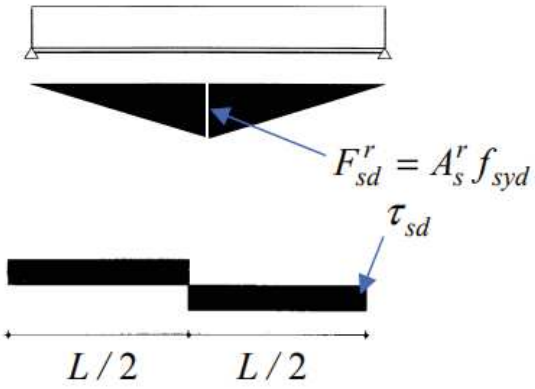


Figura 3.4 – Distribuição das tensões [Branco, 2011]

Para a verificação da segurança em relação à aderência aço/betão não há disposições normativas. Contudo, é proposto o seguinte critério:

- **Ligação sem buchas metálicas:**

$$F_{sd} = A_s^r \cdot f_{syd}^r \leq \tau_{rd} \cdot b_s \cdot \frac{L}{2} \tag{3.4}$$

$$\tau_{rd} \begin{cases} f_{ct,min} \\ 2\ MPa \end{cases} \tag{3.5}$$

onde L e b_s é, respetivamente, o comprimento e a largura da chapa, e τ_{sd} representa a tensão de aderência aço/resina/betão.

- **Ligação com buchas metálicas:**

$$F_{sd} = A_s^r \cdot f_{syd}^r \leq n \cdot F_b + \gamma\tau_{sd} \cdot b_s \cdot \frac{L}{2} \tag{3.6}$$

$$\gamma\tau_{sd} \approx 0{,}5\ MPa \tag{3.7}$$

em que F_b representa o valor de cálculo da força resistente de corte de uma bucha, n é o número de buchas colocadas no comprimento $L/2$, $\gamma\tau_{sd}$ representa a tensão de aderência aço/resina/betão mobilizada em simultâneo com F_b na ordem de 0,5 MPa.

Na Tabela 3.1 apresentam-se recomendações em relação à geometria dos elementos, tendo em atenção o nível de reforço e o tipo de reforço (Matos, 2003).

Tabela 3.1 – Recomendações para o elemento de acordo com o tipo de ligação [Matos, 2003]

Tipo de ligação	Ligação por resina *epoxy*	Ligação por buchas metálicas
Nível de reforço	$\Delta M_{rd} \leq \frac{1}{2} M_{rd0} \rightarrow M_{rdF} \leq 1{,}5 M_{rd0}$	$\Delta M_{rd} \leq M_{rd0} \rightarrow M_{rdF} \leq 2 M_{rd0}$
Secção chapa de reforço (As^r)	$As^r \leq \frac{3}{4} As^i$	$As^r \leq As^i$
Largura chapa de reforço (bs)	$100\ t_s \leq b_s \leq 200\ t_s$ $100\ mm \leq b_s \leq b - 50\ mm$ $b \leq 300\ mm$	$100\ t_s \leq b_s \leq 200\ t_s$ $100\ mm \leq b_s \leq b - 50\ mm$

3.2.1.3. Reforço ao esforço transverso

De acordo como o EC2, a necessidade de reforço ao esforço transverso surge sempre que uma ou mais das três condições descritas de seguida, não se verificam:

$$V_{sd} \leq V_{rd,máx} \tag{3.8}$$

$$V_{sd} \leq V_{rd,c} \tag{3.9}$$

$$V_{sd} \leq V_{rd,s} \tag{3.10}$$

em que V_{sd} é o valor de cálculo do esforço transverso atuante, $V_{rd,máx}$ é o valor de cálculo do esforço transverso resistente máximo, $V_{rd,c}$ é o valor de cálculo do esforço transverso resistente do elemento sem armadura transversal e $V_{rd,s}$ é o valor de cálculo do esforço transverso equilibrado pela armadura de esforço transverso na tensão de cedência.

O reforço ao esforço transverso, com e sem buchas metálicas, pode ser efetuado recorrendo à técnica dos coeficientes globais de monolitismo desde que se verifique as condições geométricas da Figura 3.5, nomeadamente comprimir os limites de espessura para as chapas de aço, t_s, para a espessura da resina, t_g e, ainda, para a altura útil do reforço, d_r.

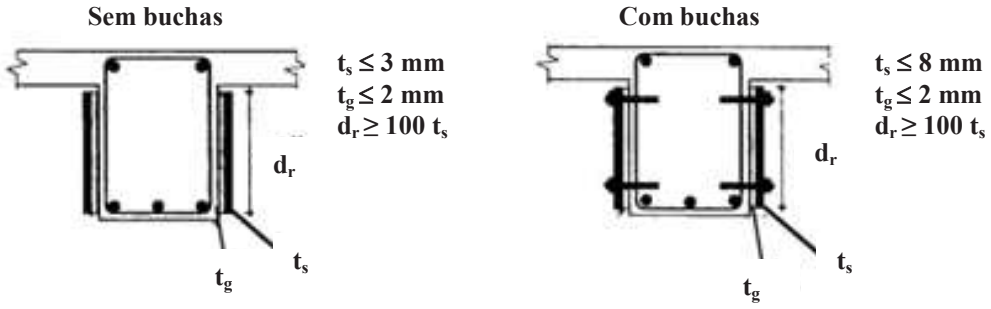


Figura 3.5 – Reforço ao esforço transverso com e sem buchas metálicas [Branco, 2011]

$$V_{sd} \leq V_{rd} = V_{rd,s} + V_{rd,r} \tag{3.11}$$

em que $V_{rd,r}$ é o valor de cálculo do esforço transverso referente à armadura de reforço.

$$V_{wd} = \gamma_{n,V}(0{,}9 \cdot d^i \cdot \frac{A_{sw}^i}{s} \cdot f_{syd}^i + 0{,}9 \cdot d^r \cdot \frac{A_{sw}^r}{s} \cdot f_{syd}^r) \tag{3.12}$$

De acordo com o EC8, Parte 1-4, admite $\gamma_{n,V} = 1{,}0$, com $V_{rdf} \leq 2V_{rd0}$ e $\gamma_{s,r} = 1{,}5\gamma_{s,i}$, ou seja, para o aço de reforço deve-se tomar um valor par ao coeficiente de segurança parcial 1,5 vezes superior ao utilizado no projeto de estruturas novas (NP EN 1998 1-4, 2009)..

3.2.2. Solução de reforço de peças de betão armado por sistemas de compósitos de FRP

3.2.2.1. Cálculo do momento resistente e da área de reforço

Ainda existe pouca regulamentação para o cálculo do reforço em FRP. Contudo, neste trabalho, os documentos utilizados para esse efeito são: Matthys (2000), Brosens (2001), o CEB-FIP (2001) e CNR (2004). É admitido comportamento linear elástico dos materiais para a determinação dos esforços atuantes e o princípio dos estados limites para verificação da segurança. Contudo, por simplificação, neste trabalho, os Estados Limite de Serviço (ELS) não são considerados e a análise ao ELU de flexão baseia-se nas seguintes hipóteses de cálculo:

- As secções mantêm-se planas e perpendiculares ao eixo da viga antes e após a deformação;
- Aderência perfeita betão/aço e FRP/betão;
- Resistência do betão à tração desprezável;
- As leis tensões-extensões do aço e do betão são as preconizadas no EC2;
- O FRP tem comportamento elástico linear até à rotura.

O dimensionamento da estrutura é efetuado com base no método dos coeficientes parciais de segurança. Os coeficientes parciais para as ações são os valores correntes de dimensionamento de estruturas novas, tal como consta nos EC0 (NP EN 1990, 2009) e EC1 (NP EN 1991, 2009). A avaliação das propriedades dos materiais das estruturas existentes como o betão, o aço, a madeira, entre outros é efetuada de acordo com o EC2 (NP EN 1992, 2004) para estruturas novas. A Tabela 3.2 resume os coeficientes parciais de segurança para as ações e resistências do betão e do aço.

Tabela 3.2 – Coeficientes de segurança das ações e resistências

Ações		Resistência	
Permanentes	**Variáveis**	**Betão**	**Aço**
γ_G	γ_Q	γ_C	γ_S
1,35	1,5	1,5	1,15

Relativamente aos sistemas FRP, de uma forma geral todas as propriedades devem ser avaliadas com base no seu valor característico à exceção do módulo de Young, que deve ser usado o valor médio. Assim, os coeficientes parciais para os FRP devem ter em consideração, para uma propriedade genérica (e.g. tensão de rotura à tração uniaxial), o valor de cálculo dado por:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \tag{3.13}$$

em que X_k é o valor característico da propriedade do material, γ_m é o fator parcial dependente do modo de rotura/tipo de aplicação (Tabela 3.3) e η é um fator de conversão para situações especiais.

Tabela 3.3 – Fatores parciais para os materiais e produtos [CNR, 2004]

	Fator parcial	Tipo A de aplicação(1)	Tipo B de aplicação(2)
Rutura do FRP	γ_f	1,10	1,25
Destacamento do FRP	$\gamma_{f,d}$	1,20	1,50

(1) Sistemas de reforço certificados
(2) Sistemas de reforço não certificados

A capacidade resistente (ex. momento fletor e esforço transverso), R_d, deve ser calculada da seguinte forma:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} \tag{3.14}$$

em que $R\{X_{d,i}; a_{d,i}\}$ é função do modelo mecânico em análise (ex. flexão, corte, entre outros), $X_{d,i}$ são valores de cálculo relativos aos materiais existentes e de reforço, $a_{d,i}$ são os parâmetros geométricos envolvidos no modelo, e γ_{rd} é um fator de segurança que cobre as incertezas do modelo assumido (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Fatores parciais γ_{rd}

Modelo resistente	γ_{rd}
Flexão simples ou flexão composta	1,00
Corte ou torção	1,20

De forma a prevenir o colapso da estrutura após a ruína do sistema de FRP devido a atos de vandalismo, impacto, fogo ou outras causas, devem ser definidos limites de reforço máximo. O aumento de resistência à flexão de elementos de betão, por colagem exterior de sistemas compósitos de FRP, não deve exceder o dobro da resistência do elemento não reforçado (Azevedo, 2008). Assim, o parâmetro de reforço, R, é definido conforme a equação (3.15):

$$R = \frac{M_{sdf}}{M_{Rd0}} \leq 2 \tag{3.15}$$

onde M_{sdf} simboliza o valor de cálculo do momento fletor atuante na secção reforçada para o ELU (e respeitando as combinações de ações definidas no EC2) e M_{Rd0} representa o momento

resistente inicial da secção não reforçada. A Tabela 3.5 resume os valores de referência de *R* para a necessidade de reforço e a sua viabilidade.

Tabela 3.5 – Valores do parâmetro de reforço, *R*, adaptado de [Azevedo, 2008]

R ≤ 1	O elemento estrutural tem capacidade resistente para as novas cargas, por isso, não necessita de ser reforçado à flexão.
1 < R ≤ 2	É necessário e exequível o reforço, dado que se respeita o limite de segurança.
R > 2	A intervenção de reforço não é viável porque excede o limite de segurança, ultrapassando, em dobro, a capacidade resistente do elemento estrutural original.

Além disso, pode-se comparar a resistência característica da secção transversal não reforçada com as novas cargas de serviço, através do parâmetro de segurança, θ, assegurando que a estrutura não atinja o colapso, em caso de perda total do mesmo:

$$\theta = \frac{M_{Rk0}}{M_{skf,r}} > 1 \tag{3.16}$$

em que M_{Rk0} designa o momento característico de resistência da secção transversal não reforçada e $M_{skf,r}$ o momento flector característico da secção transversal reforçada.

Assim, verificando as condições anteriores, a determinação da capacidade resistente à flexão do elemento reforçado deverá ser realizada usando a compatibilidade de extensões e equilíbrio de forças de acordo com a Figura 3.6. Em relação à situação mostrada na Figura 3.6, dois tipos de falha podem ser observados, dependendo se a extensão última do FRP é atingida (Região 1 – rotura do sistema FRP) ou se a extensão última à compressão do betão é atingida (Região 2 – rotura do betão).

Através do método simplificado, com as duas camadas próximas (varões existentes e o laminado de FRP), determina-se uma armadura equivalente, $A_{s}{}^{eq}$, posicionada no centro mecânico dessas armaduras e profundidade do eixo neutro medida desde a fibra mais comprimida, x, para delimitar a região do tipo de falha. Utilizam-se as seguintes expressões:

$$\begin{cases} M_{rd} = M_{sd} \\ F_{cd} = F_s{}^{eq} \end{cases} \begin{cases} M_{sd} = A_s^{eq} \cdot z^{eq} \cdot f_{syd}{}^{i} \\ f_{cd} \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot b = A_s^{eq} \cdot f_{syd}{}^{i} \end{cases} \tag{3.17}$$

onde:

A_s^{eq} – Área de aço equivalente

f_{syd}^{i} – Resistência de cálculo da armadura equivalente

F_s^{eq} – Força equivalente

z^{eq} – Braço equivalente das forças internas na secção

Quando o dimensionamento cai na Região 1, a falha é devida à rotura do sistema de FRP. Assim, o diagrama de extensões tem um valor de extensão fixo ao nível do FRP igual a ε_{fd}. Desta forma, a distribuição linear das extensões ao longo da secção transversal é dada por:

- FRP: $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$ (3.18)
- Betão: $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$ (3.19)
- Aço à compressão: $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ (3.20)
- Aço à tração: $\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)}$ (3.21)

onde todos os símbolos estão presentes na Figura 3.6, e $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cu2}$ representa a extensão última do betão à compressão. A verificação das extensões no aço é desnecessária, pois geralmente os sistemas de FRP tem valores inferiores ao aço.

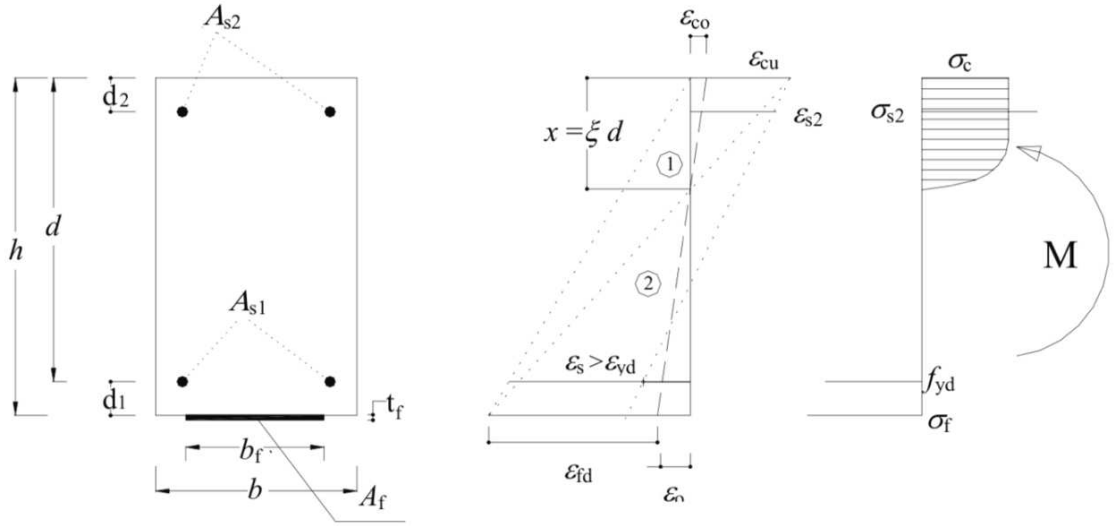


Figura 3.6 – Modo de rotura de um elemento de betão armado reforçado com FRP [Cruz, 2012]

Quando o dimensionamento cai na Região 2, a falha é devido ao esmagamento do betão (extensão igual a ε_{cu}) com plastificação do aço em tração, enquanto que as extensões do FRP não atingiram o valor limite. Desta forma, a distribuição linear das extensões ao longo da secção transversal é dada por:

- FRP: $\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$ (3.22)
- Betão: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ (3.23)
- Aço à compressão: $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$ (3.24)
- Aço à tração: $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$ (3.25)

Note-se que o estado de tensão/deformação existente no elemento antes do reforço terá de ser tido em conta no dimensionamento da solução de reforço com recurso a FRP. Assim, as extensões de compressão (ε_{c0}) e tração (ε_0) iniciais são usadas no cálculo orgânico da secção transversal.

Assim, a posição da linha neutra x é determinada através do equilibro de forças internas ao longo do eixo da viga:

$$b \cdot 0{,}8x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \sigma_f = 0 \quad (3.26)$$

A capacidade resistente em flexão pode ser determinada através da equação (3.27) do equilibrio de momentos:

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{rd}} \left[b \cdot 0{,}8x \cdot f_{cd} \cdot (d - 0{,}4x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1 \right] \quad (3.27)$$

onde o coeficiente parcial deve ser assumo igual a 1,00, de acordo com a Tabela 3.4.

Note-se que neste caso, a área de reforço FRP só é considerada suficiente quando, para além de verificar o critério de segurança dado pela equação $M_{sd} \leq M_{rd}$, também se verificam as condições de:

- cedência da armadura inferior de reforço à flexão: $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$ (3.28)
- limitação da extensão no FRP à extensão limite última. $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd}$ (3.29)

O valor de cálculo da tensão de rotura no FRP, f_{fd}, é dado pela equação (3.30):

$$f_{fd} = \frac{\varepsilon_{fd}}{100} \cdot E_f \tag{3.30}$$

onde E_f representa o módulo de elasticidade e ε_{fd} representa o valor de cálculo da extensão no sistema de reforço FRP.

De acordo com o EC2 o valor de extensão última do betão, ε_{cu}, é limitado a 3,5 ‰ e a extensão no eixo da curva parabólica, ε_{c2} , é igual a 2,0 ‰. O valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão, f_{cd}, é dado por:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \tag{3.31}$$

onde, α_{cc}=1,0 (valor recomendado; f_{ck}- valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade; e γ_c é o coeficiente parcial de segurança relativo ao betão. O valor do módulo de elasticidade secante do betão é dado por:

$$E_{cm} = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \tag{3.32}$$

onde f_{cm} é o valor médio da tensão de rotura do betão à compressão:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8\ [MPa] \tag{3.33}$$

O valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples é dado pela equação (3.34):

$$f_{ctm} = (0{,}3 f_{ck})^{\frac{2}{3}} \tag{3.34}$$

onde f_{ck} é o valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade. O valor de cálculo da tensão de rotura do betão à tração, f_{ctd}, é dado por:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \tag{3.35}$$

onde α_{ct}=1,0 (valor recomendado) e $f_{ctk,0,05}$=1,3f_{ctm}.

A força de amarração, $T_{m,máx}$, e o comprimento de amarração, $l_{b,máx}$ podem ser calculados conforme indicado Tabela 3.6

Tabela 3.6 – Expressões para calcular a força de amarração e comprimento de amarração [Azevedo, 2008]

Modelos	Força de amarração	Comprimento de amarração
Rostasy e Neubauer (CEB-FIP, 2001)	$T_{m,máx} = \alpha \cdot c_1 \cdot k_b \cdot k_c \cdot b_f \cdot k_T \cdot \sqrt{E_f \cdot n \cdot t_f \cdot f_{ctm} \cdot k_\mu}$	$l_{b,máx} = \sqrt{\frac{E_f \cdot n \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}}$
Matthys (2000)	$T_{m,máx} = \alpha \cdot k_b \cdot k_c \cdot b_f \cdot \sqrt{2 \cdot c_F \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$	$l_{b,máx} = 1{,}57 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{c_F \cdot E_f \cdot n \cdot t_f}{f_{ctm}}}$

Os parâmetros necessários para o cálculo da força e o comprimento de amarração são os apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros para a força e comprimento de amarração [Azevedo, 2008]

Parâmetros	CEB-FIP (2001)	Matthys (2000)	Brosens (2001)
k_b	$k_b = 1{,}06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}}$ $1 \le k_b \le 1{,}29;\ \frac{b_f}{b} \ge 0{,}33$	$k_b = 1{,}06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}}$ $\frac{b_f}{b} \ge 0{,}5$	$k_b = \sqrt{\frac{k \cdot \left(2 - \frac{b_f}{b}\right)}{1 + \frac{b_f}{b_0}}}$ $b_0 = \frac{h_{ref}}{k-1}, k = 1{,}47$
k_c	$k_c = 0{,}67 - 1{,}0$	$k_c = 0{,}87 - 1{,}0$	$k_c = 0{,}65 - 1{,}0$
k_μ	$k_\mu = 1{,}0$	-	-
k_T	$k_T = 0{,}9 - 1{,}0$	-	-
c_1	$c_1 = 0{,}64$	-	-
c_2	$c_2 = 2{,}0$	-	-
c_F	-	$c_F = 0{,}202\ mm$	$c_F = 0{,}40\ mm$
α	α=0,9-1,0		

O valor de k_C, referente à qualidade do betão, é estipulado pelas condições do local do reforço, apresentado Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Parâmetro relativo à qualidade do betão [Azevedo, 2008]

k_C	Condições	Exemplo
0,65-0,75	Más	Ambientes poeirentos e húmidos, trabalho pouco cuidado
0,75-0,85	Normais	Ambientes abertos, trabalho cuidado
0,85-0,95	Boas	Ambientes fechados, trabalho cuidado
1	Muito Boas	Condições de laboratório

A força de tração no laminado, $F_{T,f}$, tem que cumprir a condição $F_{T,f} < T_{m,máx}$ verificada essa condição o laminado pode ser amarrado a partir de x_a, valor da dispensa de armadura do lado esquerdo da viga.

$$F_{T,f} = \left(\frac{V}{2} cotg\,\theta + \frac{M}{2}\right) \cdot \frac{A_f \cdot E_f}{A_f \cdot E_f + A_s \cdot E_s} \tag{3.36}$$

Na verificação da tensão de corte na ligação é necessário determinar as secções a partir dos quais $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$. De seguida, determina-se a força de aderência, τ_b.

$$F_s = A_s \cdot f_{yd} \tag{3.37}$$

$$F = \left(\frac{V}{2} \cdot cotg\,\theta + \frac{M}{z}\right) \cdot \frac{A_s \cdot E_s}{A_f \cdot E_f + A_s \cdot E_s} \tag{3.38}$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_{yd} \rightarrow \quad \tau_b = \frac{V_{sd}}{0{,}9 \cdot d \cdot b_f} \tag{3.39}$$

Se $\tau_b < f_{cbd}$ verifica-se a tensão de corte, se $\tau_b > f_{cbd}$ é necessário aumentar a largura do laminado, b_f.

$$f_{cbd} = \frac{1{,}8 \cdot f_{ctk}}{\gamma_c} \tag{3.40}$$

A zona imediatamente antes da ancoragem pode ser verificada com $\tau_b < f_{cbd}$.

$$\varepsilon_s < \varepsilon_{yd} \rightarrow \tau_b = \frac{V_{sd}}{0{,}9 \cdot d \cdot b_f \cdot \left(1+\frac{A_S \cdot E_S}{A_f \cdot E_f}\right)} \tag{3.41}$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \tag{3.42}$$

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_f} \tag{3.43}$$

Nota:

γ_f=1,2 para combinações fundamentais

γ_f=1,0 para combinações acidentais

$$\varepsilon_{f,limit} \leq k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fd} \tag{3.44}$$

Nota: k_ε=0,8

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fp} + \Delta\, \varepsilon_f \leq \varepsilon_{f,limit} \tag{3.45}$$

Na Figura 3.7 apresenta-se o esquema do estudo preliminar do dimensionamento à flexão.

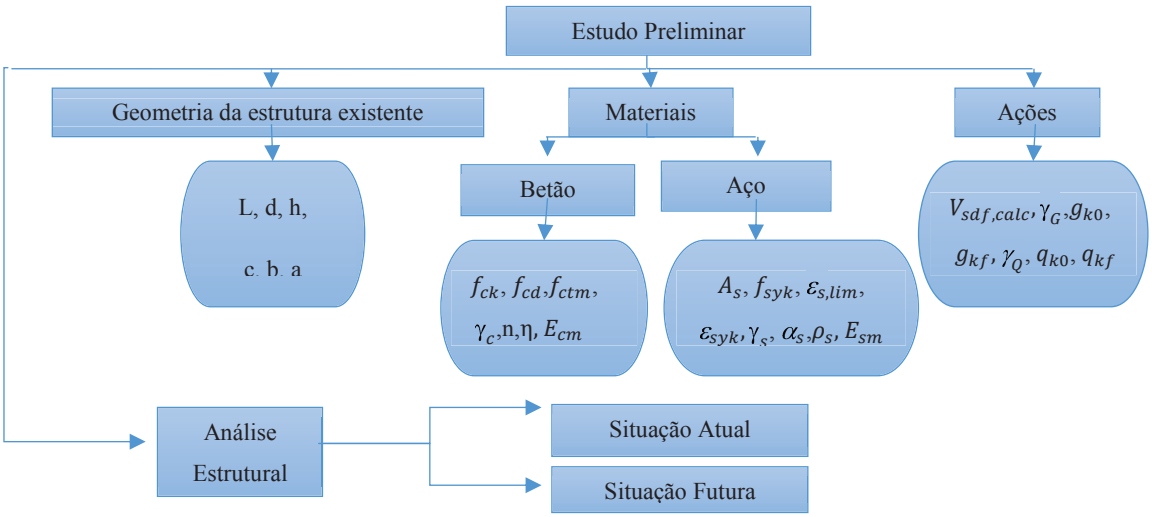


Figura 3.7 – Esquema do estudo preliminar

Na Figura 3.8 ilustra-se o esquema da necessidade e viabilidade do reforço à flexão.

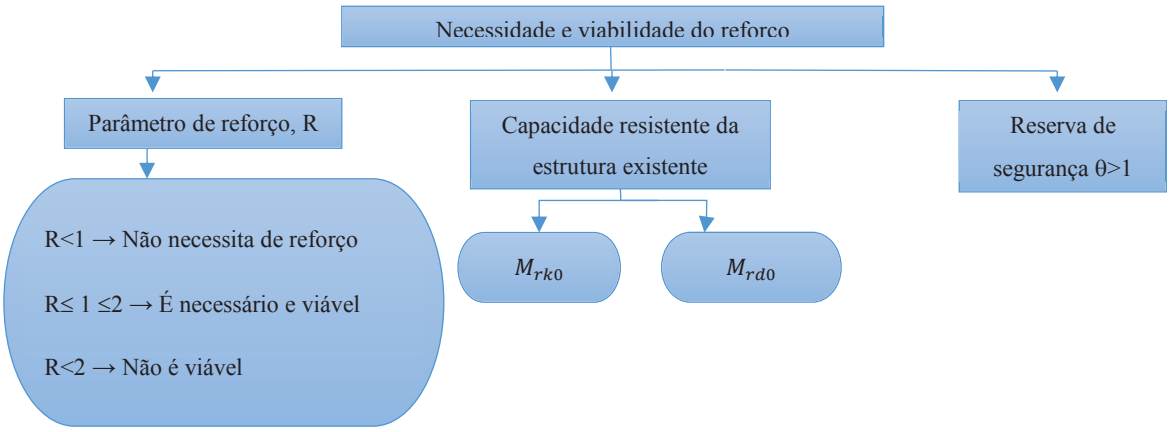


Figura 3.8 – Esquema da necessidade e viabilidade do reforço

Na Figura 3.9 representa-se o esquema do pré-dimensionamento do reforço à flexão.

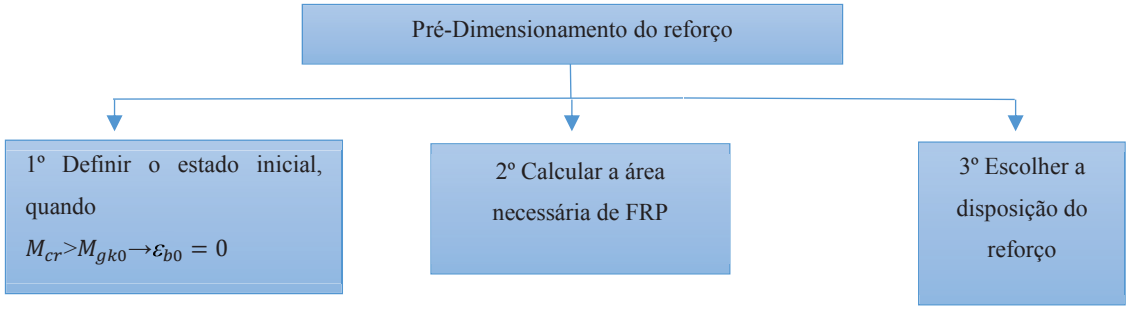


Figura 3.9 – Esquema do pré-dimensionamento do reforço

Na Figura 3.10 apresenta-se o esquema da interface do betão-FRP.

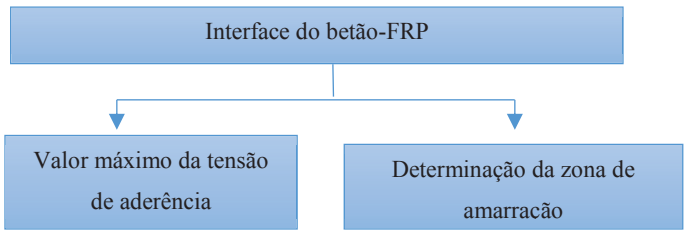


Figura 3.10 – Esquema da interface do betão-FRP

3.2.2.2. Reforço ao esforço transverso

No caso da força de corte, V_{Edf}, existente ser menor que a resistência ao corte, $V_{rd,c}$, não é necessário reforço ao corte.

$$V_{Edf} \leq V_{Rd,c} \tag{3.46}$$

Se a força de corte no estado reforçada for completamente coberta pelos estribos internos existentes, o reforço ao corte mínimo é necessário para completar o modelo de treliça mecânica.

$$V_{Edf} \leq V_{Rd,s} \tag{3.47}$$

O reforço ao corte externo tem que cingir o reforço à flexão e é projetado para a diferença da força de corte ΔV_w que depende da relação de reforço.

$$\Delta V_w = \frac{\eta-1}{\eta} V_{Edf} \tag{3.48}$$

A Figura 3.11, representa a ligação do reforço FRP à flexão à estrutura de treliça interna.

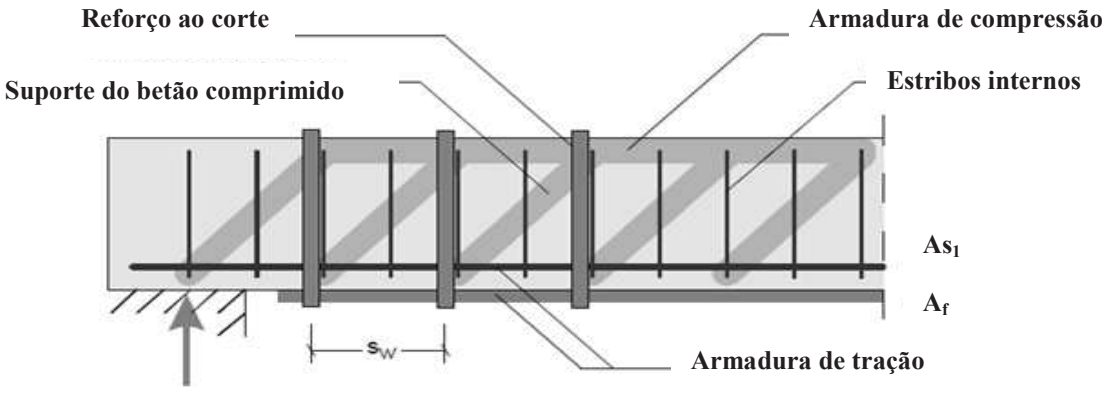


Figura 3.11 – Ligação do reforço FRP à flexão à estrutura de treliça interna

Se a força de corte no estado reforçado excede a capacidade de corte da secção transversal existente, o reforço de corte tem de ser feito para a quantidade restante da força de corte (Figura 3.12).

$$V_{Edf} > V_{Rd,s} \tag{3.49}$$

$$\Delta V_w = V_{Edf} - V_{Rd,s} \quad ou \quad \Delta V_w = \frac{\eta_M - 1}{\eta_M} \cdot V_{Edf} \tag{3.50}$$

A resistência máxima de corte, $V_{Rd,max}$, fornece o limite superior da força de corte também para o estado reforçado.

$$V_{Edf} \leq V_{Rd,max} \tag{3.51}$$

$$V_{Edf} \leq V_{Rdf,limit} \tag{3.52}$$

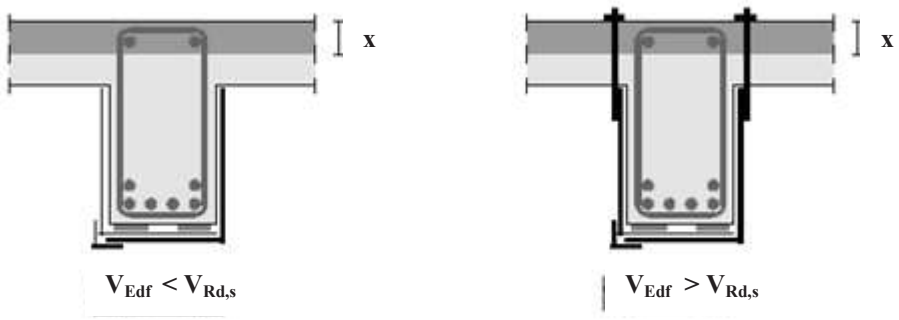


Figura 3.12 – Resistência ao corte nas vigas

3.3. Caracterização do caso de estudo

Neste capítulo considera-se um armazém com vigas simplesmente apoiadas com um comprimento de 5 m. Nas vigas do armazém ocorreu um erro de execução e, desta forma, houve a necessidade da verificação da existência de reforço. As vigas deveriam ter sido

construídas conforme a Figura 3.13, com uma armadura superior de dois varões com 20 mm de diâmetro, uma armadura inferior de sete varões de 20 mm, uma secção transversal de 0,30 x 0,75 m^2 e um recobrimento de 3 cm. No entanto, apenas foram aplicados na armadura inferior, cinco varões de 20 mm de diâmetro. A armadura transversal é constituída por dois ramos de 8 mm, espaçados de 10 cm.

Tal como ilustrado na Figura 3.14, a viga tem 5 m de vão e deverá estar sujeita a ações uniformemente distribuídas permanentes (g) e variáveis (q), apresentadas na Tabela 3.9. Os materiais estruturais utilizados são o betão C20/25 e o aço A235NL.

Devido ao erro de execução verifica-se a necessidade do reforço à flexão e do reforço ao esforço transverso e são estudadas as soluções de reforço com chapas de aço coladas e laminados de CFRP colados.

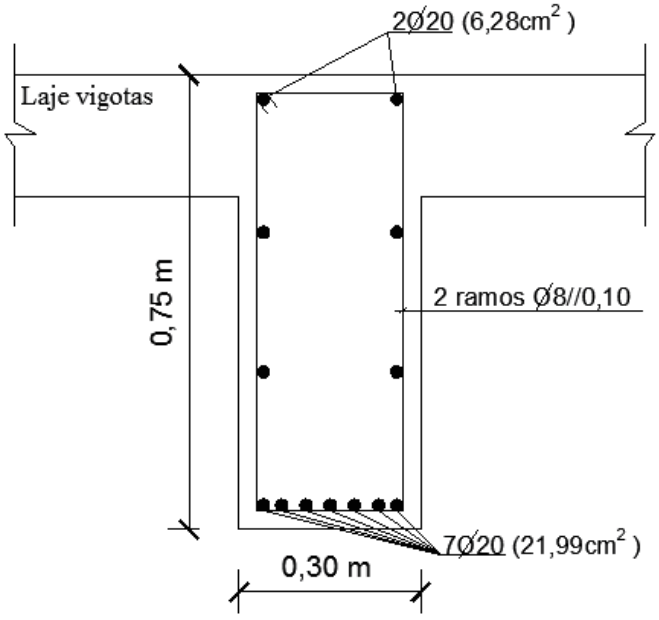


Figura 3.13 – Secção transversal da viga e respetivas armaduras

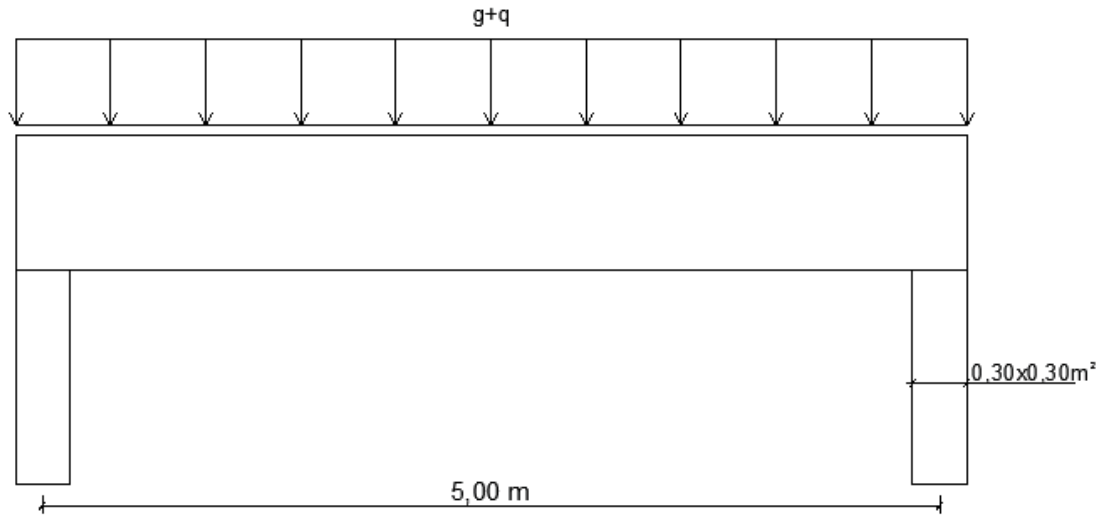


Figura 3.14 – Vista lateral da viga sujeita a um carregamento uniforme

Tabela 3.9 – Ações aplicadas na estrutura

Natureza da ação	Ação		L_{inf}=6 m
Permanente (g)	Peso Próprio	2,9 kN/m^2	17,4 kN/m
	Revestimentos	1,0 kN/m^2	6,0 kN/m
	Camada de betão de compressão de 6 cm	1,5 kN/m^2	9,0 kN/m
Variável (q)	Sobrecarga de utilização	5,0 kN/m^2	30,0 kN/m

3.4. Avaliação da condição inicial

Neste subcapítulo avalia-se a condição inicial da estrutura e a necessidade da existência de reforço à flexão e ao esforço transverso.

3.4.1. Verificação da necessidade de reforço à flexão

De seguida, são apresentados os cálculos referentes: ao momento fletor atuante de cálculo final; ao momento fletor resistente de cálculo inicial; aos momentos fletores característicos inicial e final; ao momento crítico; e as tensões e extensões resultantes da carga permanente. Alguns destes, serão utilizados posteriormente para o cálculo de fatores de segurança.

- **Materiais estruturais**
  - Aço A235 $\Rightarrow f_{yk} = 235\ MPa \Rightarrow {f_{syd}}^{i} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{235}{1{,}15} = 204{,}35\ MPa$

$$\Rightarrow E_s = 200 \cdot 10^3 MPa$$

- Betão C20/25 $\Rightarrow f_{ck} = 20\ MPa \quad \Rightarrow f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1{,}5} = 13{,}33\ MPa$

$$\Rightarrow f_{ctm} = 2{,}2\ MPa$$

$$\Rightarrow E_c = 25{,}5 \cdot 10^3 MPa$$

- **Combinação fundamental**

Sabendo que a combinação fundamental em ELU é dada por:

$$\boldsymbol{p_{sd} = 1{,}35 \cdot g_k + 1{,}5 \cdot q_k} \tag{3.53}$$

$$p_{sd} = 1{,}35 \cdot (17{,}4 + 6{,}0 + 9{,}0) + 1{,}5 \cdot (30{,}0) = 88{,}74\ kN/m$$

- **Momento fletor característico devido às cargas permanentes, $\boldsymbol{M_{gk}}$**

$$\boldsymbol{M_{gk} = \frac{g_k \cdot l^2}{8}} \tag{3.54}$$

$$M_{gk} = \frac{g_k \cdot l^2}{8} \Leftrightarrow M_{gk} = \frac{(17{,}4 + 6{,}0 + 9{,}0) \cdot 5^2}{8} \Leftrightarrow M_{gk} = 101{,}25\ kN \cdot m$$

- **Momento fletor característico devido às cargas variáveis, $\boldsymbol{M_{qk}}$**

$$\boldsymbol{M_{qk} = \frac{q_k \cdot l^2}{8}} \tag{3.55}$$

$$M_{qk} = \frac{30{,}0 \cdot 5^2}{8} = 93{,}75\ kN.m$$

- **Momento fletor atuante de cálculo, $\boldsymbol{M_{sd}}$**

$$\boldsymbol{M_{sd} = \gamma_g \cdot M_{gk} + \gamma_q \cdot M_{qk}} \tag{3.56}$$

$$M_{sd} = 1{,}35 \cdot 101{,}25 + 1{,}5 \cdot 93{,}75 = 277{,}31\ kN.m$$

- **Momento fletor resistente de cálculo inicial, $\boldsymbol{M_{rd0}}$**

O momento flector resistente de cálculo inicial, M_{rd0}, calcula-se de acordo com o esquema representado na Figura 3.15.

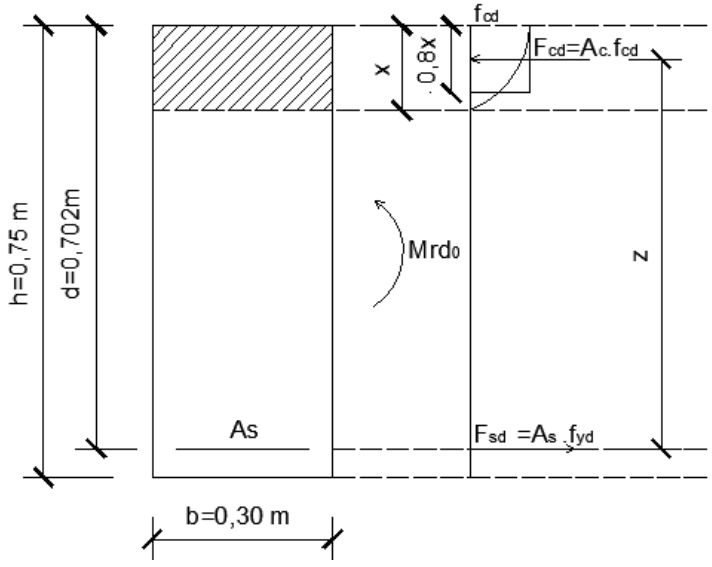


Figura 3.15 – Esquema de cálculo de M_{rd0}

$$\boldsymbol{d^i = h - c - \emptyset est - \frac{\emptyset long}{2}} \tag{3.57}$$

$$d^i = 0{,}75 - 0{,}03 - 0{,}008 - \frac{0{,}020}{2} = 0{,}702\ m$$

Assim, por equilíbrio:

$$\begin{cases} M_{rd0} = F_{cd} \cdot z \\ F_{cd} = F_{sd} \end{cases} \begin{cases} M_{rd0} = f_{cd} \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot b \cdot (d^i - 0{,}4 \cdot x) \\ f_{cd} \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot b = A_s \cdot {f_{yd}}^i \end{cases} \tag{3.58}$$

$$\begin{cases} M_{rd0} = 13{,}33 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot 0{,}30 \cdot (0{,}702 - 0{,}4 \cdot x) \\ 13{,}33 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot 0{,}30 = 15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{rd0} = 212{,}48\ kN.m \\ x = 0{,}10\ m \end{cases}$$

Como $M_{sd} = 277{,}31\ kN.m > M_{rd0} = 212{,}48\ kN.m$ é necessário reforçar a viga à flexão.

- **Momento fletor resistente característico inicial, $\boldsymbol{M_{rk0}}$**

$$\boldsymbol{M_{rk0} = A_s \cdot f_{yk} \cdot z} \tag{3.59}$$

$$M_{rk0} = 15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3 \cdot \left(0{,}702 - \frac{0{,}141}{3}\right) \Leftrightarrow\ M_{rk0} = 241{,}82\ kN.m$$

- **Momento fletor atuante característico final, M_{skf}**

$$\boldsymbol{M_{skf}} = \frac{(g_k+q_k)\cdot l^2}{8} \tag{3.60}$$

$$\boldsymbol{M_{skf}} = \frac{(32{,}4 + 30{,}0)\cdot 5^2}{8} \Leftrightarrow M_{skf} = 195{,}00\ kN.m$$

- **Momento crítico, M_{cr} (sem armadura)**

Para secções retangulares: $w = \frac{b\cdot h^2}{6}$ (3.61)

- $M_{gk} \leq M_{cr} \rightarrow Secção\ Estado\ I\ (Estado\ não\ fendilhado)$ (3.62)
- $M_{gk} > M_{cr} \rightarrow Secção\ Estado\ II\ (Estado\ fendilhado)$ (3.63)

$$\boldsymbol{M_{cr}} = \boldsymbol{f_{ctm}}\cdot \boldsymbol{w} \tag{3.64}$$

$$\boldsymbol{M_{cr}} = \boldsymbol{f_{ctm}}\cdot \frac{\boldsymbol{b\cdot h^2}}{\boldsymbol{6}} \tag{3.65}$$

$$M_{cr} = 2{,}2\cdot 10^3 \cdot \frac{0{,}30\cdot 0{,}75^2}{6}$$

$$M_{cr} = 61{,}88\ kN.m$$

$$\boldsymbol{M_{gk} = 101{,}25 kN.m > M_{cr} = 61{,}88\ kN.m} \rightarrow Secção\ Estado\ II\ (Estado\ fendilhado)$$

- **Tensões e extensões resultantes da carga permanente**

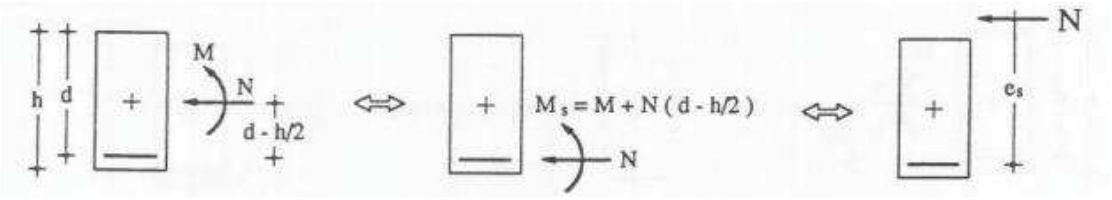


Figura 3.16 – Excentricidade para N [Gomes & Vinagre, 1997]

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{\boldsymbol{E_s}}{\boldsymbol{E_c}};\ \alpha = \frac{200\cdot 10^3}{30\cdot 10^3} = 6{,}667 \tag{3.66}$$

$$\boldsymbol{\rho_s} = \frac{\boldsymbol{A_s}}{\boldsymbol{b\cdot d}};\ \rho_s = \frac{15{,}71\cdot 10^{-4}}{0{,}30\cdot 0{,}702} = 0{,}007 \tag{3.67}$$

$$\boldsymbol{\alpha\cdot\rho_s} = 6{,}667\cdot 0{,}007 = 0{,}047 \approx 0{,}05 \tag{3.68}$$

$$\boldsymbol{e_s = \frac{M_{gk}}{N}}; e_S = \frac{101{,}25}{0} = \infty; \frac{e_S}{d} = \frac{\infty}{0{,}702} = \infty \tag{3.69}$$

$$\boldsymbol{\beta = \frac{A_{s2}}{A_{s1}}}; \beta = \frac{6{,}28 \cdot 10^{-4}}{15{,}71 \cdot 10^{-4}} \approx 0{,}40 \tag{3.70}$$

Através de uma interpolação dos valores de C_s para β_1=0,25 e β_2=0,50 da Figura 3.17 e da Figura 3.18, obtém-se o valor de C_s para β =0,40; o mesmo procedimento é levado a cabo para o valor de C_c.

$$\boldsymbol{C_s = C_{s1} + \left[\left(\frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right)(C_{s2} - C_{s1})\right]} \tag{3.70}$$

$$C_s = 21{,}85 + \left[\left(\frac{0{,}40 - 0{,}25}{0{,}5 - 0{,}25}\right)(21{,}74 - 21{,}85)\right]$$

$$C_s = 21{,}78$$

$$\boldsymbol{C_c = C_{c1} + \left[\left(\frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1}\right)(C_{c2} - C_{c1})\right]} \tag{3.71}$$

$$C_c = 7{,}75 + \left[\left(\frac{0{,}40 - 0{,}25}{0{,}5 - 0{,}25}\right)(7{,}39 - 7{,}75)\right] \Leftrightarrow$$

$$C_c = 7{,}53$$

$$\boldsymbol{\sigma_s = \alpha \cdot C_s \cdot \frac{M_{gk}}{b \cdot d^2}} \tag{3.72}$$

$$\sigma_s = 6{,}67 \cdot 21{,}78 \cdot \frac{101{,}25}{0{,}30 \cdot 0{,}702^2} = 99491\ KPa = 99{,}491\ MPa \quad \textbf{tracção}$$

$$\boldsymbol{\sigma_c = -C_c \cdot \frac{M_{gk}}{b \cdot d^2}} \tag{3.73}$$

$$\sigma_c = -7{,}53 \cdot \frac{101{,}25}{0{,}30 \cdot 0{,}702^2} = -5157\ KPa = -5{,}157\ MPa \quad \textbf{compressão}$$

$$\varepsilon_{s0} = \frac{\sigma_s}{E_s} \tag{3.74}$$

$$\varepsilon_{s0} = \frac{99{,}491}{200 \cdot 10^3} = 0{,}00050 = 0{,}50‰$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{\sigma_c}{E_c} \tag{3.75}$$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{5{,}157}{30 \cdot 10^3} = 0{,}00017 = 0{,}17‰$$

		e_s/d												
	$\alpha\rho$	0.75	0.85	1.00	1.15	1.30	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	5.00	10.00	∞
C_s	.50	0.07	0.29	0.57	0.78	0.95	1.13	1.30	1.42	1.60	1.73	1.97	2.16	2.34
	.40	0.11	0.38	0.71	0.98	1.19	1.41	1.61	1.77	2.00	2.15	2.46	2.69	2.92
	.30	0.17	0.51	0.94	1.28	1.56	1.85	2.13	2.34	2.64	2.84	3.25	3.56	3.87
	.25	0.22	0.60	1.11	1.52	1.85	2.20	2.53	2.78	3.14	3.38	3.88	4.25	4.62
	.20	0.27	0.73	1.35	1.86	2.27	2.70	3.12	3.43	3.88	4.19	4.80	5.27	5.74
	.15	0.35	0.93	1.72	2.39	2.94	3.52	4.07	4.49	5.10	5.50	6.32	6.95	7.58
	.12	0.42	1.10	2.07	2.90	3.58	4.30	5.00	5.53	6.28	6.79	7.82	8.61	9.39
	.10	0.48	1.25	2.39	3.38	4.20	5.07	5.91	6.55	7.45	8.07	9.31	10.25	11.20
	.08	0.54	1.45	2.85	4.08	5.10	6.20	7.24	8.05	9.19	9.96	11.51	12.69	13.88
	.06	0.63	1.73	3.54	5.18	6.55	8.01	9.42	10.50	12.03	13.06	15.15	16.73	18.32
	.05	0.68	1.92	4.06	6.02	7.67	9.43	11.13	12.43	14.27	15.51	18.03	19.93	21.85
	.04	0.75	2.17	4.78	7.23	9.30	11.52	13.65	15.28	17.60	19.16	22.32	24.71	27.11
	.03	0.82	2.51	5.88	9.15	11.93	14.92	17.78	19.97	23.08	25.18	29.41	32.61	35.82
	.02	0.91	3.02	7.84	12.76	16.98	21.52	25.87	29.19	33.89	37.06	43.45	48.28	53.13
	.01	1.03	3.91	12.69	22.65	31.29	40.57	49.43	56.17	65.71	72.13	85.04	94.78	104.56
C_c	.50	2.27	2.35	2.45	2.53	2.58	2.64	2.69	2.73	2.78	2.82	2.88	2.93	2.98
	.40	2.41	2.51	2.64	2.73	2.80	2.87	2.93	2.98	3.05	3.09	3.17	3.23	3.29
	.30	2.57	2.70	2.87	2.99	3.08	3.18	3.26	3.32	3.40	3.46	3.57	3.64	3.72
	.25	2.66	2.82	3.01	3.16	3.27	3.38	3.47	3.55	3.65	3.71	3.83	3.92	4.01
	.20	2.76	2.96	3.19	3.37	3.50	3.63	3.75	3.84	3.96	4.03	4.18	4.29	4.39
	.15	2.88	3.13	3.43	3.65	3.82	3.99	4.14	4.25	4.39	4.49	4.68	4.81	4.94
	.12	2.97	3.25	3.61	3.88	4.08	4.28	4.46	4.59	4.77	4.88	5.10	5.25	5.41
	.10	3.03	3.35	3.77	4.08	4.31	4.54	4.75	4.89	5.09	5.22	5.47	5.65	5.82
	.08	3.10	3.48	3.97	4.34	4.61	4.88	5.12	5.30	5.53	5.68	5.97	6.18	6.38
	.06	3.18	3.63	4.24	4.70	5.04	5.37	5.66	5.87	6.16	6.34	6.69	6.94	7.18
	.05	3.22	3.73	4.42	4.95	5.33	5.71	6.04	6.28	6.60	6.81	7.20	7.48	7.75
	.04	3.27	3.84	4.66	5.27	5.73	6.17	6.55	6.83	7.20	7.43	7.88	8.20	8.51
	.03	3.33	3.99	4.98	5.74	6.29	6.83	7.29	7.62	8.06	8.35	8.88	9.26	9.63
	.02	3.39	4.19	5.50	6.50	7.23	7.92	8.52	8.94	9.51	9.87	10.55	11.03	11.49
	.01	3.46	4.50	6.54	8.16	9.29	10.35	11.26	11.90	12.74	13.28	14.28	14.99	15.67

Figura 3.17 – Flexão composta com compressão e tensões em estado fendilhado para secções rectangulares (β=0,25) [Gomes & Vinagre, 1997]

		e_s/d												
	$\alpha\rho$	0.75	0.85	1.00	1.15	1.30	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	5.00	10.00	∞
C_s	.50	-	0.20	0.46	0.68	0.85	1.03	1.20	1.32	1.51	1.63	1.88	2.07	2.26
	.40	0.01	0.27	0.60	0.86	1.07	1.29	1.50	1.66	1.89	2.04	2.35	2.59	2.82
	.30	0.07	0.39	0.81	1.15	1.43	1.72	2.00	2.22	2.52	2.72	3.13	3.45	3.76
	.25	0.11	0.48	0.97	1.38	1.71	2.06	2.40	2.65	3.01	3.26	3.75	4.13	4.51
	.20	0.16	0.60	1.21	1.71	2.12	2.56	2.98	3.30	3.75	4.06	4.68	5.14	5.62
	.15	0.25	0.79	1.58	2.24	2.79	3.37	3.93	4.35	4.96	5.36	6.19	6.82	7.45
	.12	0.32	0.96	1.92	2.74	3.43	4.15	4.85	5.38	6.14	6.65	7.69	8.48	9.27
	.10	0.37	1.11	2.24	3.23	4.04	4.92	5.76	6.40	7.31	7.93	9.18	10.12	11.07
	.08	0.45	1.31	2.69	3.92	4.95	6.04	7.10	7.90	9.05	9.82	11.38	12.57	13.76
	.06	0.54	1.60	3.39	5.02	6.39	7.86	9.28	10.36	11.89	12.93	15.02	16.61	18.20
	.05	0.60	1.80	3.91	5.86	7.51	9.29	10.99	12.29	14.14	15.39	17.91	19.82	21.74
	.04	0.67	2.05	4.63	7.08	9.15	11.38	13.52	15.15	17.47	19.04	22.20	24.60	27.01
	.03	0.76	2.40	5.74	9.00	11.79	14.78	17.66	19.85	22.97	25.07	29.30	32.51	35.73
	.02	0.86	2.92	7.70	12.63	16.85	21.40	25.75	29.08	33.79	36.97	43.36	48.20	53.06
	.01	1.00	3.84	12.57	22.54	31.18	40.48	49.34	56.10	65.65	72.07	84.99	94.74	104.53
C_c	.50	-	1.85	1.93	1.99	2.04	2.08	2.12	2.15	2.20	2.22	2.27	2.31	2.35
	.40	1.95	2.04	2.14	2.22	2.28	2.34	2.39	2.43	2.48	2.51	2.58	2.63	2.67
	.30	2.16	2.27	2.42	2.52	2.60	2.68	2.75	2.80	2.87	2.92	3.01	3.07	3.13
	.25	2.28	2.42	2.59	2.72	2.81	2.91	2.99	3.05	3.14	3.19	3.30	3.37	3.44
	.20	2.43	2.60	2.81	2.96	3.08	3.20	3.30	3.38	3.48	3.55	3.68	3.77	3.86
	.15	2.60	2.81	3.09	3.29	3.44	3.60	3.73	3.83	3.96	4.05	4.21	4.33	4.44
	.12	2.72	2.98	3.31	3.56	3.74	3.93	4.09	4.21	4.37	4.47	4.66	4.80	4.94
	.10	2.81	3.11	3.49	3.78	4.00	4.21	4.40	4.54	4.72	4.84	5.06	5.22	5.38
	.08	2.91	3.26	3.72	4.07	4.33	4.58	4.81	4.97	5.19	5.32	5.59	5.78	5.96
	.06	3.02	3.45	4.03	4.47	4.79	5.11	5.38	5.58	5.85	6.02	6.35	6.58	6.80
	.05	3.09	3.56	4.23	4.73	5.11	5.47	5.78	6.01	6.31	6.51	6.88	7.14	7.39
	.04	3.16	3.70	4.49	5.09	5.52	5.95	6.32	6.58	6.93	7.16	7.59	7.89	8.18
	.03	3.24	3.87	4.84	5.58	6.12	6.63	7.08	7.40	7.83	8.10	8.61	8.98	9.33
	.02	3.33	4.10	5.38	6.37	7.08	7.76	8.34	8.75	9.30	9.65	10.31	10.78	11.23
	.01	3.43	4.45	6.47	8.06	9.19	10.24	11.13	11.76	12.59	13.12	14.11	14.81	15.48

Figura 3.18 – Flexão composta com compressão e tensões em estado fendilhado para secções rectangulares (β=0,50) [Gomes & Vinagre, 1997]

3.4.2. Verificação da necessidade de reforço ao esforço transverso

De seguida calcula-se o valor do esforço transverso atuante de cálculo, V_{sd}, e a área de armadura transversal, A_{sw}, necessária para o cálculo do esforço transverso resistente inicial, V_{rd0}, de acordo com o EC2. Á partida esta verificação não seria necessária mas, neste caso, foi efetuada por questões académicas.

$$V_{sd} = \frac{p_{sd} \cdot L}{2} \tag{3.76}$$

$$V_{sd} = \frac{88{,}74 \cdot 5}{2}$$

$$V_{sd} = 221{,}85\ kN$$

$$A_{sw} = n.º\ de\ ramos \cdot \frac{\pi \cdot \emptyset est^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}008^2}{4} \approx 1{,}01 * 10^{-4}\ m^2 \quad (3.77)$$

$$V_{rd0} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0{,}9 \cdot d \cdot f_{yd} \cdot \cot\theta \quad (3.78)$$

$$V_{rd0} = \frac{\frac{1{,}01 * 10^{-4}}{0{,}1} \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}702 \cdot 204{,}35 \cdot 10^3}{\mathrm{tg}(30)}$$

$$V_{rd0} = 224{,}81\ kN$$

Como $V_{sd} = 221{,}85\ kN.m < V_{rd0} = 224{,}81\ kN.m$ não é necessário reforçar a viga ao esforço transverso.

3.5. Solução de reforço com chapas de aço

3.5.1. Dimensionamento

Para o reforço com chapa de aço sem buchas metálicas, de acordo com os valores máximos recomendados (Figura 3.19), adotou-se o valor da espessura da resina *epoxy*, t_g = 1 mm e a espessura da chapa de aço t_s = 4 mm. Desta forma, é possível dimensionar o valor da largura da chapa de aço, b_s. A chapa de aço admitida para o dimensionamento é do tipo S235, com $f_{syk}{}^r = 235\ MPa$. O cálculo da área de reforço determina-se através do esquema apresentado na Figura 3.20.

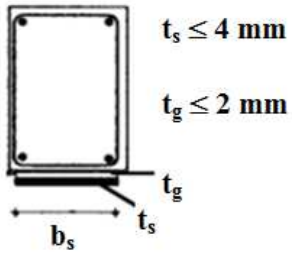


Figura 3.19 – Reforço à flexão sem buchas metálicas

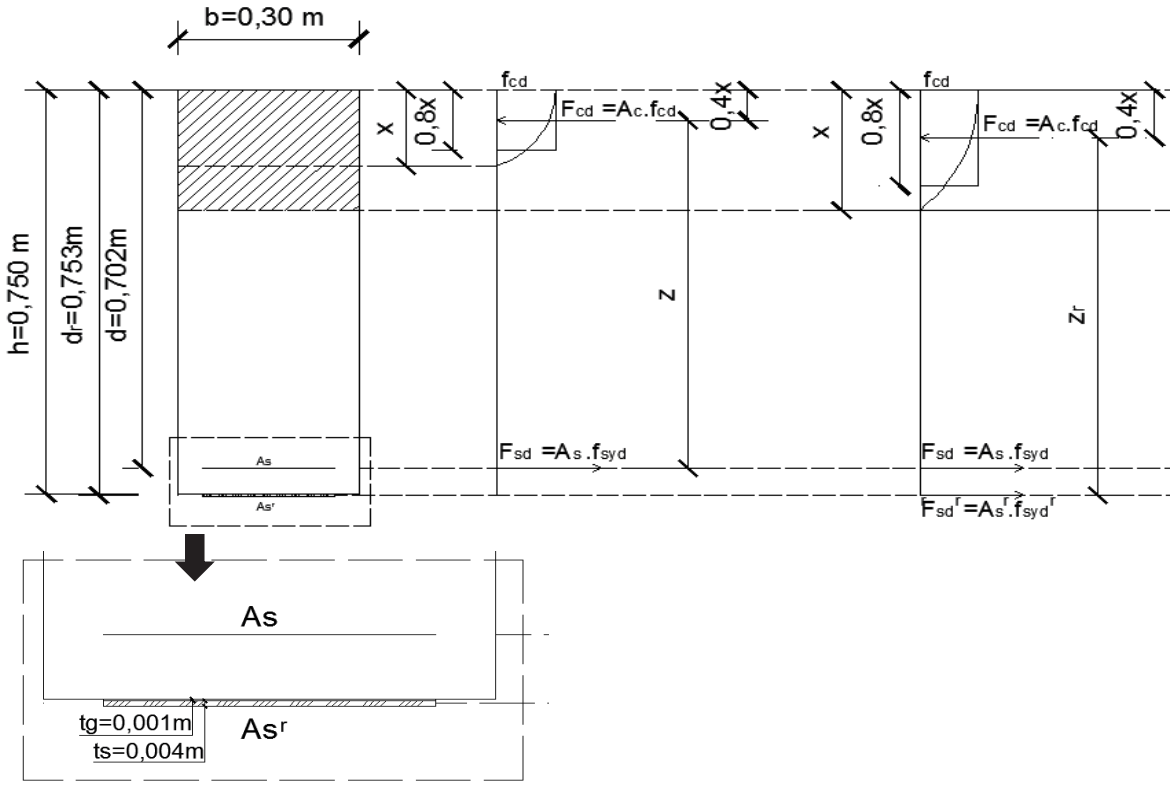


Figura 3.20 – Diagrama para o cálculo da área de reforço

- **Material de reforço, aço do tipo S235**

$$f_{syd}^{r} = \frac{{f_{syk}}^{r}}{\gamma_{s,r}} \tag{3.79}$$

$$f_{syd}^{r} = \frac{{f_{syk}}^{r}}{1{,}5 \cdot \gamma_{s,i}} \tag{3.80}$$

$$f_{syd}^{r} = \frac{235}{1{,}5 \cdot 1{,}0}$$

$$f_{syd}^{r} = 156{,}66\ MPa$$

- **Altura útil do reforço, d^r**

$$\boldsymbol{d^r = h + t_g + \frac{t_s}{2}} \tag{3.81}$$

$$d^r = 0{,}75 + 0{,}001 + \frac{0{,}004}{2} \Leftrightarrow$$

$$d^r = 0{,}753\ m$$

- **Altura útil equivalente, d^{eq}**

$$d^{eq} = \frac{d^i + d^r}{2} \tag{3.82}$$

$$d^{eq} = \frac{0{,}702 + 0{,}753}{2}$$

$$d^{eq} = 0{,}728\, m$$

- **Área equivalente da secção transversal, A_s^{eq}**

De seguida, obtém-se a área equivalente da secção transversal, A_s^{eq}, através do método simplificado e através das tabelas do IST [Gomes & Vinagre, 1997].

- **Método simplificado**

Admitindo $z^{eq} = 0{,}9 \cdot d^{eq}$:

$$\begin{cases} M_{rd} = M_{sd} \\ F_{cd} = {F_s}^{eq} \end{cases} \begin{cases} M_{sd} = A_s^{eq} \cdot z^{eq} \cdot {f_{syd}}^i \\ f_{cd} \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot b = A_s^{eq} \cdot {f_{syd}}^i \end{cases} \tag{3.83}$$

$$\begin{cases} 277{,}31 = A_s^{eq} \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}728 \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \\ 13{,}33 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot 0{,}30 = A_s^{eq} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \end{cases} \begin{cases} A_s^{eq} = 20{,}71 \cdot 10^{-4}\, m^2 \\ x = 0{,}132\, m \end{cases}$$

- **Tabelas**

$$\mu = \frac{M_{sdf}^{+}}{(d^{eq})^2 \cdot b \cdot fcd} \tag{3.84}$$

$$\mu = \frac{277{,}31}{0{,}728^2 \cdot 0{,}30 \cdot 13{,}33 \cdot 10^3} \approx 0{,}13$$

Dados para extrair ω das tabelas IST $\begin{cases} \beta = \frac{A_s'}{A_s} = \frac{2}{5} \approx 0{,}4 \\ \frac{c}{d} = \frac{0{,}03}{0{,}728} \approx 0{,}04 \\ A235 \end{cases}$

Das tabelas do IST, com $\mu \approx 0{,}13$, retira-se o valor de ω:

$$\beta = 0{,}4 \rightarrow \omega = 0{,}137$$

$$\omega = \frac{A_{s,eq}}{b \cdot d^{eq}} \cdot \frac{{f_{syd}}^{i}}{f_{cd}} \tag{3.85}$$

$$0{,}137 = \frac{A_{s,eq}}{0{,}30 \cdot 0{,}728} \cdot \frac{204{,}35 \cdot 10^3}{13{,}33 \cdot 10^3} \Leftrightarrow A_{s,eq} = 19{,}52 \cdot 10^{-4} m^2$$

O valor mais desfavorável de A_s^{eq} é o calculado através do método simplificado e, por isso, é o valor utilizado para a determinação de A_s^r.

- **Área de reforço da secção transversal com a chapa de aço, A_s^r**

Através da equação (3.3) obtém-se a área de reforço da secção transversal com a chapa de aço, A_s^r.

$$A_s^r = \frac{204{,}35 \cdot 10^3}{156{,}66 \cdot 10^3} \cdot (20{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0{,}728}{0{,}753} - 15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0{,}702}{0{,}753})$$

$$A_s^r = 7{,}01 \cdot 10^{-4} m^2$$

- **Definição da largura da chapa de aço, b_s**

Assim, para uma espessura da chapa de aço de t_s=4 mm e uma área total de reforço de $A_s^r = 7{,}01 \cdot 10^{-4}\ m^2$:

$$\boldsymbol{A_s^r = {t_s}^r \cdot b_s \Leftrightarrow b_s = \frac{A_s^r}{t_s}} \tag{3.86}$$

$$b_s = \frac{7{,}01 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-3}} \Leftrightarrow b_s = 0{,}175\ m \approx 175\ mm < b = 300\ mm\ Ok!$$

Admite-se que $b_s = 0{,}180\ m$ por uma questão prática.

Posteriormente, averigua-se se a condição $\frac{b_s}{b} \geq 0{,}33$ é verificada.

$$\frac{b_s}{b} = \frac{180}{300} = 0{,}6 \quad \boldsymbol{Verifica}$$

Na Tabela 3.10 seguinte verifica-se se o dimensionamento cumpre as recomendações para a ligação por resina *epoxy*.

Tabela 3.10 – Recomendações e verificações para a ligação por resina *epoxy*

Tipo de ligação	Recomendações para a ligação por resina *epoxy*	Verificação
Nível de reforço	$\Delta M_{rd} \leq \frac{1}{2} M_{rd0} \rightarrow M_{rdF} \leq 1{,}5 M_{rd0}$	Verifica
Secção chapa de reforço (As^r)	$As^r \leq \frac{3}{4} As^i$	Verifica
Largura chapa de reforço (bs)	$100\ t_s \leq b_s \leq 200\ t_s$	Não Verifica
	$100\ mm \leq b_s \leq b - 50\ mm$	Verifica
	$b \leq 300\ mm$	Verifica

Como se tratam de recomendações desprezou-se a condição $100\ t_s \leq b_s \leq 200\ t_s$ que não foi verificada e é muito limitativa. Para a recomendação anterior ser verificada só seria possível se $t_s < 0{,}3$, o que implicaria uma espessura igual ou inferior a 2mm.

- **Definição do comprimento da chapa de aço**

Para o dimensionamento do comprimento da chapa de aço admite-se uma inclinação da biela de compressão, θ, igual a 30º.

De seguida, apresenta-se a equação (3.87) para o cálculo do braço das forças internas na secção, z em função da altura útil do reforço, d^r.

$$z = 0{,}9 \cdot d^r \tag{3.87}$$

$$z = 0{,}9 \cdot 0{,}753 = 0{,}677\ m$$

$$z cotg\theta = 1{,}173\ m$$

As secções de dispensa do reforço são calculadas para a posição do momento flector resistente de cálculo inicial, $M_{rd0} = 212{,}46\ kN.m$:

$$212{,}46 = 221{,}85 \cdot x - 88{,}74 \cdot \frac{x^2}{2} \tag{3.88}$$

$$\begin{cases} x_1 = 1{,}291\ m \\ x_2 = 3{,}709\ m \end{cases}$$

De seguida, efetua-se o cálculo da translação do diagrama de forças M_{sd}/z, a_L.

$$a_L = \frac{z \cdot cotg\,\theta}{2} = 0{,}587\ m \tag{3.89}$$

A tensão de corte máxima, τ_{sd}, obtém-se da seguinte forma.

$$\tau_{sd} \leq \begin{cases} f_{ct,min} \\ 2\ MPa \end{cases} \tag{3.90}$$

$$\tau_{sd} \leq \begin{cases} 1{,}5\ MPa \\ 2\ MPa \end{cases} \tag{3.91}$$

A chapa deve ter um comprimento de amarração, l^t, suficiente de forma a evitar a rotura por deslizamento/descolamento.

$$F_{sd}^r \leq \tau_{sd} \cdot b_s \cdot l^t \tag{3.92}$$

$$A_s^r \cdot f_{syd}^r \leq \tau_{sd} \cdot b_s \cdot l^t \tag{3.93}$$

$$l^t \geq \frac{A_s^r \cdot f_{syd}^r}{\tau_{sd} \cdot b_s} \tag{3.94}$$

$$l^t \geq \frac{7{,}04 \cdot 10^{-4} \cdot 156{,}66 \cdot 10^3}{1{,}5 \cdot 10^3 \cdot 0{,}18}$$

$$l^t \geq 0{,}408\ m$$

As secções de dispensa das chapas, apresentadas na Figura 3.21, são as seguintes:

$$x_a = x_1 - a_L - l^t \tag{3.95}$$

$$x_b = x_2 + a_L + l^t \tag{3.96}$$

$$x_a = 1{,}291 - 0{,}587 - 0{,}408 = 0{,}296\, m$$

$$x_b = 3{,}709 + 0{,}587 + 0{,}408 = 4{,}704\, m$$

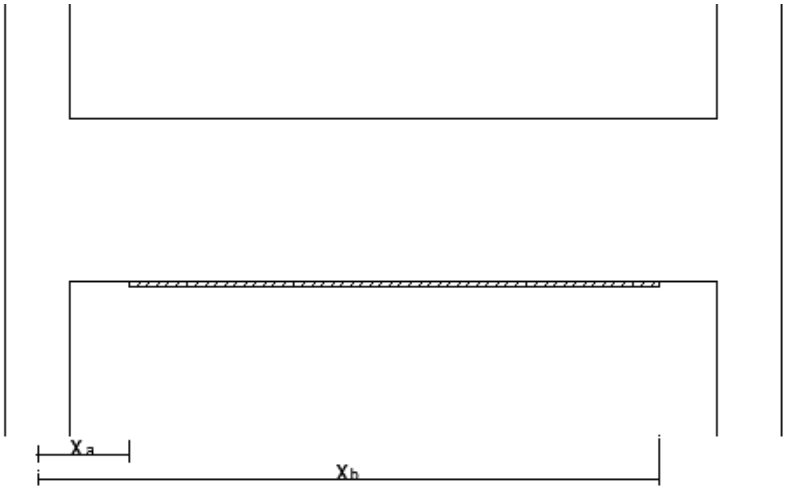


Figura 3.21 - Local a partir de onde a chapa de aço pode ser amarrada

O comprimento da chapa, L, obtém-se da seguinte forma:

$$L = x_b - x_a = 4{,}704 - 0{,}296 = 4{,}408\, m$$

Assim, para a aplicação da chapa de aço, em obra, admitiu-se 4,41 m conforme a Figura 3.22.

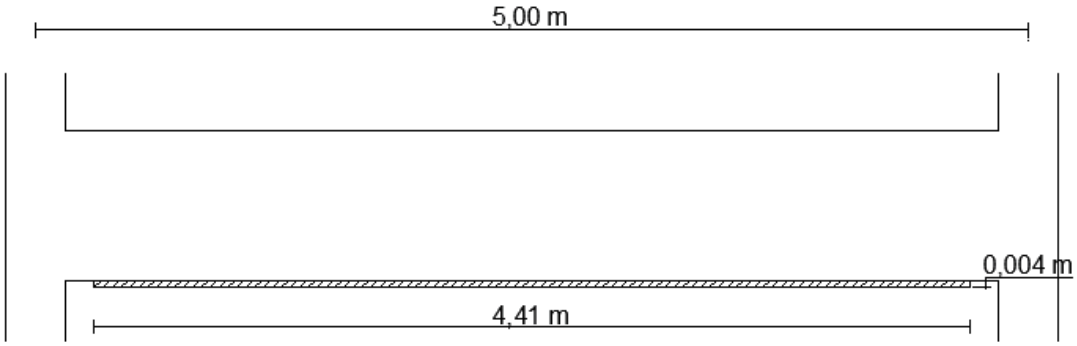


Figura 3.22 – Solução de reforço com chapa de aço representada longitudinalmente

Na Figura 3.23 apresenta-se a secção da viga com a aplicação do reforço.

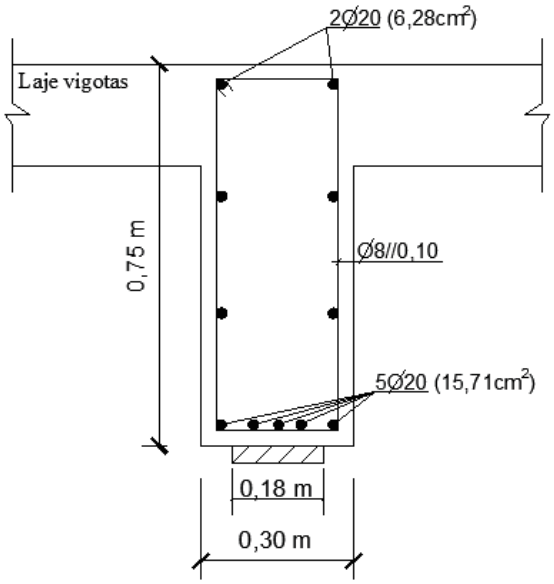


Figura 3.23 – Secção da viga com aplicação da solução de reforço

3.6. Solução de reforço com CFRP

3.6.1. Dimensionamento

O cálculo da área de reforço determina-se através do esquema apresentado na Figura 3.24.

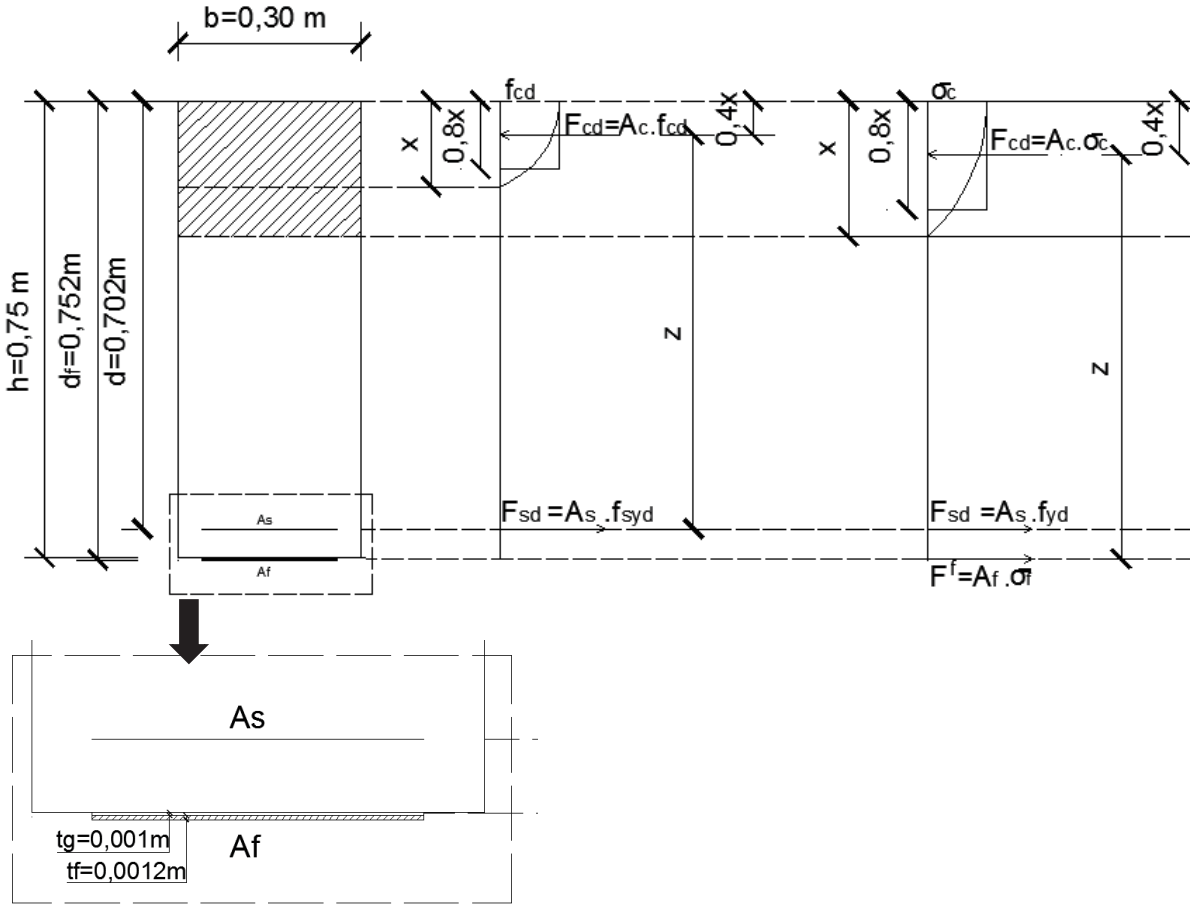


Figura 3.24 – Diagrama para o cálculo da área de reforço

- **Fator global de segurança em caso de perda do reforço FRP, θ**

O fator global de segurança em caso de perda do reforço FRP, θ, determina-se com base na equação (3.16).

$$\theta = \frac{241{,}82}{195{,}00} \Leftrightarrow \theta = 1{,}240 > 1 \quad \boldsymbol{Verifica}$$

- **Parâmetro de reforço, R**

O parâmetro de reforço, R, calcula-se de acordo com a equação (3.15).

$$R = \frac{277{,}31}{212{,}46} = 1{,}305 \quad \boldsymbol{Necessita\ e}\ \text{é}\ \boldsymbol{exequível\ o\ reforço}$$

- **Material de reforço, laminado do tipo SM(150/2000)**

Através do catálogo S&P seleciona-se a solução mais adequada para o dimensionamento do CFRP aplicado à superfície (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Características de CFRP disponíveis no mercado [S&P, 2017]

TIPO DE LAMINADO	SECÇÃO TRANSVERSAL	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO EXTENSÃO DE 6‰	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO EXTENSÃO DE 8‰
SM (150/ 2000) Módulo de elasticidade: ≥ 170 kN/mm² (médio)	[mm²]	Dados teóricos de resistência de cálculo à tracção: 1 050 N/mm²	Dados teóricos de resistência de cálculo à tracção: 1 400 N/mm²
50 / 1.2	60	63,0 kN	84,0 kN
50 / 1.4	70	73,5 kN	98,0 kN
60 / 1.4	84	88,2 kN	117,6 kN
80 / 1.2	96	100,8 kN	134,4kN
80 / 1.4	112	117,6 kN	156,8kN
90 / 1.4	126	132,3 kN	176,4 kN
100 / 1.2	120	126,0kN	168,0 kN
100 / 1.4	140	147,0 kN	196,0 kN
120 / 1.2	144	151,2 kN	201,6 kN
120 / 1.4	168	176,4 kN	235,2 kN
150 / 1.2	180	189,0 kN	252,0 kN
150/ 1.4	210	220,5 kN	294,0 kN

O tipo de laminado selecionado SM (150/2000) tem as seguintes propriedades:

E_f=170 GPa

ε_{fd}≤0,80%

- **Altura útil do reforço, d^r**

Admite-se $t_f = 1{,}2$ mm.

$$d^r = h + \frac{t_f}{2} + t_g \tag{3.97}$$

$$d^r = 0{,}75 + \frac{0{,}0012}{2} + 0{,}001 \approx 0{,}752\ m$$

- **Altura útil equivalente, d^{eq}**

A altura útil equivalente, d^{eq}, obtém-se através da equação (3.82).

$$d^{eq} = \frac{0{,}702 + 0{,}752}{2}$$

$$d^{eq} = 0{,}727\ m$$

- **Método simplificado**

A área equivalente determina-se com base na equação (3.17).

$$\begin{cases} 277{,}31 = A_s^{eq} \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}727 \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \\ 13{,}33 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 \cdot x \cdot 0{,}30 = A_s^{eq} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_s^{eq} = 20{,}74 \cdot 10^{-4}\ m^2 \\ x = 0{,}133\ m \end{cases}$$

Admite-se que a rotura se dá pelo betão (região 2), ou seja, o valor da extensão última à compressão do betão é 3,5‰. O valor da extensão no reforço de FRP é obtido pela equação (3.22).

$$\varepsilon_f = \frac{0{,}0035}{0{,}133} \cdot (0{,}75 - 0{,}133) - 0{,}0050 \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_f = 1{,}12\% \leq \varepsilon_{fd} = 0{,}80\ \%\ \ \boldsymbol{Não\ Verifica}$$

Conclui-se que a rotura ocorre pelo sistema FRP (Região 1), desta forma, admite-se

$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd} = 0{,}80\%$.

- **Área de reforço da secção transversal com o laminado, A_f**

Com base na equação (3.30) obtém-se o valor da área de reforço da secção transversal com o laminado, A_f.

$$f_{fd} = \frac{0{,}80}{100} \cdot 170 \cdot 10^3 = 1360\ MPa$$

De seguida, determina-se a área de reforço da secção transversal com o laminado através da equação (3.27).

$$\begin{cases} b \cdot 0{,}8x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \sigma_f = 0 \\ M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{rd}} \left[b \cdot 0{,}8x \cdot f_{cd} \cdot (d - 0{,}4x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1 \right] \end{cases} \quad (3.98)$$

$$\begin{cases} 0{,}30 \cdot 0{,}8x \cdot 13{,}33 \cdot 10^3 + 6{,}28 \cdot 10^{-4} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 - 15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 - A_f \cdot 1360 \cdot 10^3 = 0 \\ 277{,}31 = 0{,}30 \cdot 0{,}8x \cdot 13{,}33 \cdot 10^3 \cdot (0{,}702 - 0{,}4x) + 6{,}28 \cdot 10^{-4} \cdot 204{,}35 \cdot 10^3 \cdot (0{,}702 - 0{,}03) + A_f \cdot 1360 \cdot 10^3 \cdot 0{,}03 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_f = 0{,}661 \cdot 10^{-4}\ m^2 = 66{,}1\ mm^2 \\ x = 0{,}088\ m \end{cases}$$

A solução selecionada para A_f e que verifica, simultaneamente, $\frac{b_f}{b} \geq 0{,}33$ e $\tau_b > f_{cbd}$ é SM(150/2000) 150/1,2 com $b_f = 150\ mm$, $t_f = 1{,}2\ mm$ e $A_f = 180\ mm^2$. Admitiu-se a espessura da cola, $t_g = 1$ mm.

De seguida, calculam-se os parâmetros necessários para o cálculo da força de amarração, $T_{m,máx}$.

$$k_b = 1{,}06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad com\ 1 \leq k_b \leq 1{,}29 \quad (3.99)$$

$$k_b = 1{,}06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{150}{300}}{1 + \frac{150}{400}}} = 1{,}107\ \boldsymbol{Verifica}$$

$$k_c = 0{,}85\ \ admitindo\ condiçoes\ boas$$

$$T_{m,máx} = \alpha \cdot c_1 \cdot b_f \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_T \cdot \sqrt{E_f \cdot n \cdot t_f \cdot f_{ctm} \cdot k_\mu} \quad (3.100)$$

$$T_{m,máx} = 0{,}9 \cdot 0{,}64 \cdot 150 \cdot 1{,}107 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}0 \cdot \sqrt{170000 \cdot 1 \cdot 1{,}2 \cdot 2{,}21 \cdot 1{,}0} = 54587\ N$$
$$= 54{,}587\ kN$$

- **Definição do comprimento do laminado de CFRP**

Para o dimensionamento do comprimento do laminado de CFRP admite-se uma inclinação da biela de compressão, θ, igual a 30º.

De seguida, apresenta-se o cálculo do braço das forças internas na secção, z em função da altura útil do reforço, d^r, com base na equação (3.87).

$$z = 0{,}9 \cdot 0{,}752 = 0{,}677\ m$$

$$zcotg\theta = 1{,}173\ m$$

As secções de dispensa do reforço são calculadas para a posição do momento flector resistente de cálculo inicial, $M_{rd0} = 212{,}46\ kN.m$, através da equação (3.88):

$$212{,}46 = 221{,}85 \cdot x - 88{,}74 \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$\begin{cases} x_1 = 1{,}291\ m \\ x_2 = 3{,}709\ m \end{cases}$$

De seguida, efetua-se o cálculo da translação do diagrama de forças M_{sd}/z, a_L, através da equação (3.89):

$$a_L = \frac{z \cdot cotg\theta}{2} = 0{,}587\ m$$

Através da expressão seguinte calcula-se o comprimentos de amarração máximo, $l_{b,max}$.

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \tag{3.101}$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{170000 \cdot 1{,}2}{2 \cdot 2{,}21}} = 214{,}83\ mm$$

As secções de dispensa das chapas, apresentadas na Figura 3.21, são as seguintes:

$$x_a = x_1 - a_L - l_{b,max} \tag{3.102}$$

$$x_b = x_2 + a_L + l_{b,max} \tag{3.103}$$

$$x_a = 1{,}291 - 0{,}587 - 0{,}215 = 0{,}489\ m$$

$$x_b = 3{,}709 + 0{,}587 + 0{,}215 = 4{,}511\ m$$

O comprimento da chapa, L, obtém-se da seguinte forma:

$$L = x_b - x_a = 4{,}511 - 0{,}489 = 4{,}02\ m$$

Assim, para a aplicação do laminado, em obra, admitiu-se 4,02 m, conforme a Figura 3.25. Na Figura 3.26 apresenta-se a secção da viga com a aplicação do reforço.

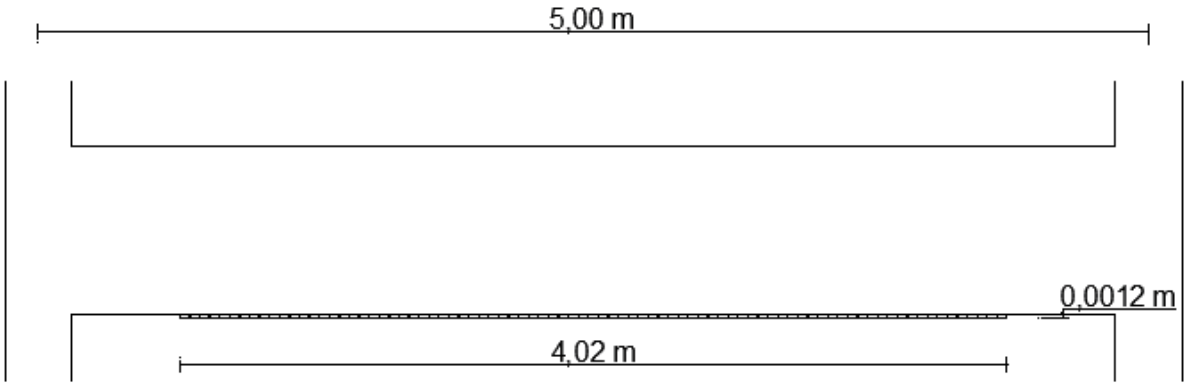


Figura 3.25 – Solução de reforço com laminado de CFRP representada longitudinalmente

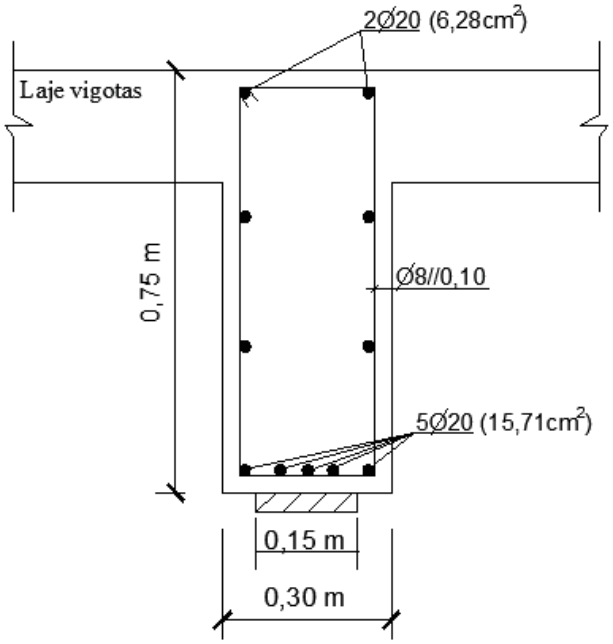


Figura 3.26 – Secção da viga com aplicação da solução de reforço

- **Força de tração no laminado na secção x_a**

Através da derivada da equação dos momentos fletores é possível determinar o ponto $x_a = 0{,}489\ m$, para o esforço transverso.

$$M'(x) = V(x) \tag{3.104}$$

$$V(x) = 221{,}85 - 88{,}74 \cdot x \Leftrightarrow$$

$$V(x_a) = 221{,}85 - 88{,}74 \cdot x_a$$

$$V(0{,}489) = 221{,}85 - 88{,}74 \cdot 0{,}489$$

$$V(0{,}489) = 178{,}456\ kN$$

$$M(0{,}489) = 221{,}85 \cdot 0{,}489 - 88{,}74 \cdot \frac{0{,}489^2}{2} = 97{,}875\ kNm$$

O cálculo da força de tração no laminado, $F_{T,f}$, é efetuado com base na equação (3.36), apresentado de seguida:

$$F_{T,f} = \left(\frac{178{,}456}{2} cotg30 + \frac{97{,}875}{0{,}677}\right) \cdot \frac{180 \cdot 10^{-6} \cdot 170 \cdot 10^{6}}{180 \cdot 10^{-6} \cdot 170 \cdot 10^{6} + 1571 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^{6}}$$

$$F_{T,f} = 26{,}546\ kN < Tmáx = 54{,}587\ \ kN\ \boldsymbol{Verifica}$$

- **Verificação da tensão de corte na ligação (determinação das secções a partir dos quais $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$)**

Os parâmetros Fs e F são estabelecidos através da equação (3.37) e da equação (3.38), respetivamente.

$$F_s = 15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot 204{,}35 \cdot 10^{3} = 321{,}034\ kN$$

$$F = \left(\frac{221{,}85 - 88{,}74 \cdot x}{2} \cdot cotg30 + \frac{221{,}85 \cdot x - 88{,}74 \cdot \frac{x^2}{2}}{0{,}677} \right) \cdot \frac{15{,}71 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^6}{1{,}80 \cdot 10^{-6} \cdot 170 \cdot 10^6 + 15{,}71 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^6}$$

$$F = -59{,}723x^2 + 228{,}583 \cdot x + 175{,}077$$

$$F = F_s \tag{3.105}$$

$$-59{,}723x^2 + 228{,}583 \cdot x + 175{,}077 - 321{,}034 = 0$$

$$-59{,}723x^2 + 228{,}583 \cdot x - 145{,}957 = 0$$

$$\rightarrow \begin{cases} x_1 = 0{,}810\ m \\ x_2 = 3{,}017\ m \end{cases}$$

$$V_{sd}(x_1) = 221{,}85 - 88{,}74 \cdot x_1 \tag{3.106}$$

$$V_{sd}(0{,}810) = 221{,}85 - 88{,}74 \cdot 0{,}810$$

$$V_{sd}(0{,}810) = 149{,}971\ kN$$

A determinação de f_{cbd} obtém-se através da equação (3.40).

$$f_{cbd} = \frac{1{,}8 \cdot 1{,}5}{1{,}5} = 1{,}8\ MPa$$

O valor de τ_b é definido pela equação (3.39).

$$\tau_b = \frac{149{,}971}{0{,}9 \cdot 0{,}752 \cdot 0{,}15} = 1477\ kPa = 1{,}477\ MPa$$

De seguida, averigua-se se a condição $\tau_b < f_{cbd}$ é verificada.

$$\tau_b = 1{,}477 < f_{cbd} = 1{,}8\ MPa \quad \boldsymbol{Verifica}$$

Como $\tau_b < f_{cbd}$ não é necessário aumentar a largura do laminado.

- **Verificação da zona imediatamente antes da ancoragem**

A zona imediatamente antes da ancoragem é verificada mediante a equação (3.41).

$$\varepsilon_s < \varepsilon_{yd} \rightarrow \tau_b = \frac{V(x_a)}{0{,}9 \cdot d^r \cdot b_f \cdot \left(1 + \frac{A_s.E_s}{A_f.E_f}\right)}$$

$$\tau_b = \frac{178{,}456 \cdot 10^3}{0{,}9 \cdot 0{,}752 \cdot 0{,}150 \cdot \left(1 + \frac{15{,}71 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot 10^6}{1{,}80 \cdot 10^{-4} \cdot 170 \cdot 10^6}\right)}$$

$$\tau_b = 156003\ Pa = 0{,}156\ MPa \ll f_{cbd}\ \boldsymbol{Verifica}$$

- **Extensões e verificação da cedência**

A extensão do betão, ε_c, obtém-se pela equação (3.19).

$$\varepsilon_c = (0{,}008 + 0{,}00050) \cdot \frac{0{,}088}{(0{,}75 - 0{,}088)}$$

$$\varepsilon_c = 1{,}13\ ‰ < \varepsilon_{cu}\ \boldsymbol{Verifica}$$

A extensão do aço à compressão, ε_{s2}, é determinada pela equação (3.20).

$$\textbf{Aço à compressão:}\ \varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x - d_2}{(h - x)}$$

$$\varepsilon_{s2} = (0{,}008 + 0{,}00050) \cdot \frac{0{,}088 - 0{,}03}{(0{,}75 - 0{,}088)}$$

$$\varepsilon_{s2} = 0{,}74\ ‰$$

A extensão do aço à tração, ε_{s1}, é estipulada através da equação (3.21).

$$\textbf{Aço à tração:}\ \varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d - x}{(h - x)}$$

$$\varepsilon_{s1} = (0{,}008 + 0{,}00050) \cdot \frac{0{,}702 - 0{,}088}{(0{,}75 - 0{,}088)}$$

$$\varepsilon_{s1} = 7{,}88\ ‰$$

3.7. Considerações finais

Neste capítulo apresentam-se os modelos de dimensionamento teórico para a solução de reforço com chapas de aço e para a solução de reforço com laminados de CFRP. Estes modelos foram baseados na filosofia dos estados limites, de acordo com a regulamentação portuguesa e europeia para estruturas novas e em publicações internacionais, nomeadamente, Matthys (2000), Brosens (2001), o CEB-FIP (2001) e CNR (2004).

Para o caso de estudo, recorreu-se a duas soluções de reforço. Em ambas as soluções utilizou-se a resina *epoxy* S&P *Resin* 220 com um milímetro de espessura. Uma das soluções é uma chapa de aço S235 de quatro milímetros de espessura com as dimensões de 0,18 metros de largura e 4,41 metros de comprimento. A segunda solução utilizada é a de laminados de CFRP designados de SM (150/2000) S&P de 1,2 milímetros de espessura com 0,15 metros de largura e 4,02 metros de comprimento.

Capítulo 4

Análise económica de soluções para reforço estrutural

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se o modelo de custos e, ainda, a análise económica para soluções de reforço de peças de betão armado por elementos metálicos através de chapas de aço coladas e por sistemas de compósitos de FRP através de laminados de CFRP colados. A análise económica efetua-se para ambas as soluções de reforço aplicadas aos casos de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas.

4.2. Modelo de custos

A análise de custos é composta pelo mapa de quantidades e fichas de rendimento que, posteriormente, através de consulta de fornecedores, permitem compor um orçamento.

Na análise de custo é necessário obter o custo direto, o custo da operação e o custo total da operação.

O custo direto diz respeito aos custos diretamente relacionados com a execução dos trabalhos, sendo determinado através da seguinte expressão:

$$Cdir = Cprod + SubEmp \tag{4.1}$$

em que:

C_{dir} – Custo direto

C_{prod} – Custo de produção

S_{ubEmp} – Custo das subempreitadas

O custo da operação adiciona ao custo direto os custos indiretos, os quais pretendem contabilizar os encargos indiretos com a estrutura da empresa, não incluindo o lucro. Os custos indiretos são estimados em 10% do valor do custo direto, de acordo com o indicado na publicação do LNEC (Manso, Fonseca & Espada, 2008).

O custo total da operação representa a soma do custo da operação e dos lucros os quais, de acordo com a mesma publicação do LNEC, poderão ser estimados em 8% do custo da operação.

O mapa de quantidades tem o objetivo de identificar e quantificar os trabalhos necessários para as soluções de reforço, através de uma breve descrição, das dimensões e das quantidades.

As fichas de rendimento de uma operação de construção contêm as quantidades necessárias de recursos (materiais, equipamentos e mão-de-obra) para realizar uma unidade (m, m^2, m^3, kg, unidades) daquela operação de construção. O cálculo dos rendimentos e as regras de medição foram baseadas em Branco (1993) e Fonseca (1997). No caso deste trabalho, a unidade de medição das fichas de rendimentos utilizadas é o metro quadrado. Optou-se por esta unidade, para existir uma comparação mais precisa e uniforme entre as diferentes soluções de reforço.

Os orçamentos, para cada trabalho de construção, obtêm-se através da multiplicação das quantidades constantes no mapa de quantidades pelo custo total da operação que figura nas correspondentes fichas de rendimento.

As fichas de rendimento, os mapas de quantidades e os orçamentos, relativos às soluções de reforço estudadas, e que foram elaboradas especificamente para o efeito, encontram-se apresentadas ao longo deste capítulo.

4.2.1. Custos e quantidades

Este subcapítulo destina-se a determinar as quantidades e os custos da solução de reforço com chapa de aço de 4,41 x 0,18m aplicado a uma, a cinco, a dez, a quinze e a vinte vigas.

Para a elaboração das Fichas de Rendimentos das operações de construção, começa-se por descrever os trabalhos envolvidos na solução de reforço em estudo. Esses trabalhos são divididos nas seguintes fases:

i) Trabalhos preparatórios
   - Preparação da superfície onde é aplicado o reforço;
   - Preparação das chapas de aço;

ii) Aplicação do reforço
   - Aplicação das chapas de aço.

- **Preparação da superfície onde é aplicado o reforço**

A preparação da superfície para a aplicação do reforço de chapa de aço deve ser garantida para ficar livre de qualquer contaminação que comprometa a ligação. Utilizou-se um equipamento de projeção a seco de jato de partículas de silicato de alumínio para superfícies de betão. Existem outros métodos como a picagem mas que podem danificar o betão mais facilmente.

No momento de aplicação de reforço, a superfície deve estar seca e limpa de qualquer poeira.

- **Preparação das chapas de aço**

A preparação das chapas de aço inclui o corte, a soldadura e a metalização, previamente executadas, pela serralharia.

- **Aplicação das chapas de aço para o reforço**

As chapas devem ser lixadas para ser assegurada a adesão da resina. As chapas devem estar seladas em todas as aberturas por onde a resina possa sair, de forma a evitar vazios entre a chapa e o betão aquando da injeção.

4.2.1.1. Orçamentação dos recursos

Os valores necessários para os materiais, equipamentos e mão-de-obra foram disponibilizados por uma empresa fornecedora de chapas e por uma serralharia. A orçamentação destina-se à solução de reforço com chapas de aço coladas. Através da orçamentação disponibilizada, selecionou-se os materiais e as soluções mais adequadas, económicas e com menos desperdício possível.

i) Materiais

A preparação das superfícies superfície de betão estrutural com meios mecânicos (CYPE, 2017a) efetua-se com o auxílio de um jato de partículas e de um gerador. Os materiais necessários são as partículas abrasivas de silicato de alumínio para limpeza e o gasóleo. O preço do gasóleo é a média do valor do combustível atual.

Para a aplicação do reforço, utiliza-se a resina S&P *Resin* 220, fornecida em *kits* de 5 kg ou de 15 kg, apresentando um rendimento de 1,75 kg/m^2 por mm de espessura (no Anexo 1, apresenta-se a Ficha técnica da resina *epoxy*). Considera-se a aplicação de 1 mm de espessura de *Resin* 220. Apesar de o valor do rendimento aproximado da resina *epoxy* S&P *Resin* ser designado no orçamento fornecido, opta-se pela utilização do valor exato de 1,75 kg/m^2 por mm de espessura.

Para esta solução de reforço, utiliza-se uma chapa de aço do tipo S235 com 4 mm de espessura. No Anexo 2 apresentam-se o orçamento das chapas de aço do tipo S235 com as dimensões de 2,00 x1,00 m e 3,00 x1,50 m com 4 mm de espessura O preço das chapas é contabilizado por peso e a segunda tem sensivelmente o dobro do peso da primeira. A escolha das dimensões das chapas dependem do custo, do número de vigas a reforçar e do menor desperdício que originam. Na Tabela 4.1 apresenta-se as dimensões das chapas utilizadas para cada caso de reforço e os respetivos cortes. No Anexo 3 e no Anexo 4 encontra-se o orçamento para os cortes, soldadura e metalização do reforço com chapa de aço com 4,41 x 0,18 m e o orçamento para reforço de 5 vigas com chapa de aço com 4,41 x 0,18 m fornecidos por uma serralharia. Nestes orçamentos apresentam-se os custos do corte, da soldadura e da metalização da chapa.

Tabela 4.1 – Quantidade e dimensões das chapas e dos cortes

Caso	Chapa		Cortes das chapas	
	Quant.	Dimensões	Quant.	Dimensões
1 viga	1	2,00 x 1,00 m^2	2	2,00 x 0,18 m^2
			1	0,41 x 0,18 m^2
5 vigas	1	3,00 x 1,50 m^2	5	3,00 x 0,18 m^2
			5	1,41 x 0,18 m^2
10 vigas	2	3,00 x 1,50 m^2	10	3,00 x 0,18 m^2
			10	1,41 x 0,18 m^2
15 vigas	3	3,00 x 1,50 m^2	15	3,00 x 0,18 m^2
			15	1,41 x 0,18 m^2
20 vigas	4	3,00 x 1,50 m^2	20	3,00 x 0,18 m^2
			20	1,41 x 0,18 m^2

Na Tabela 4.2, designam-se os valores dos materiais utilizados na solução de reforço com chapa de aço colada.

Tabela 4.2 – Preços dos materiais utilizados na solução de reforço com chapa de aço

Materiais	Unidade	Custo dos materiais
S235 (2,00m x 1,00m)	Un.	€ 42,05
S235 (3,00m x 1,50m)	Un.	€ 94,61
S&P *Resin* 220	kg	€ 7,65
Gasóleo	l	€ 1,30
Partículas abrasivas de silicato de alumínio para limpeza	kg	€ 0,25

Conforme mencionado anteriormente, como os *kits* de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 apenas são comercializados em embalagens de 5kg e de 15kg, considerando que a resina depois de aberta fica inutilizada, obteve-se o preço por metro quadrado apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Número de *kits* necessários e preço da resina aplicado por metro quadrado para a solução de reforço

Caso	Dimensões e quantidades da chapa S235 (m)	Área de reforço (m^2)	Quant. de resina *epoxy* (kg)	*Kits* de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 necessários	Preço do *kit* por metro quadrado (€ / m^2)
1 viga	2,00 x 1,00 (1 chapa)	0,79	1,38	*1 kit* de 5kg (€ 38,25)	38,25/0,79 = 48,42
5 vigas	3,00 x 1,50 (1 chapa)	3,97	6,95	2 *kits* de 5 kg (€ 76,50)	76,50/3,97 = 19,27
10 vigas	3,00 x 1,50 (2 chapas)	7,94	13,89	1 *kit* de 15 kg (€ 114,75)	114,75/7,94 =14,45
15 vigas	3,00 x 1,50 (3 chapas)	11,91	20,84	1 *kit* de 15 kg +2 *kit* de 5kg (€ 191,25)	191,25/11,91 =16,06
20 vigas	3,00 x 1,50 (4 chapas)	15,88	27,79	2 *kits* de 15kg (€ 229,50)	229,50/15,88 = 14,45

ii) Equipamentos

Os equipamentos necessários para a solução de reforço são a plataforma elevatória de tesoura e o jato de partículas de material abrasivo (silicato de alumínio) de projeção a seco para a preparação de superfície de betão estrutural, em trabalhos de reparação de estruturas, com um rendimento de 0,135 h/m^2. A utilização deste equipamento implica o recurso a um gerador de 45 kVA de potência. No Anexo 5, encontra-se a Ficha técnica do gerador HYW-45 kVa T6B Diesel- Himoinsa necessária para determinar o consumo de gasóleo por hora, que é 9,23 l/h.

Na Tabela 4.4, apresentam-se os custos do aluguer dos equipamentos utilizados para a solução de reforço com chapa de aço colada.

Os equipamentos utilizados para a preparação da superfície de betão são utilizados, também, em 4.2.2.1.

Tabela 4.4 – Preços dos equipamentos utilizados na solução de reforço com chapa de aço

Equipamento	Custo do aluguer dos equipamentos	Unidade
Plataforma elevatória de tesoura	86,44	€/dia
Jato de partículas de silicato de alumínio	2,86	€/h
Gerador HYW-45 kVa T6B Diesel- Himoinsa	4,81	€/h

iii) Mão-de-obra

O rendimento do operário especializado da construção e do servente são iguais por trabalharem em equipa. Na Tabela 4.5 apresentam-se os preços da mão-de-obra necessária, com recurso à tabela salarial [AECOPS, 2017].

Tabela 4.5 – Preços da mão-de-obra utilizada na solução de reforço (AECOPS)

Profissão	Grupo Profissional	Remuneração mínima
Operário da construção qualificado	VIII	€ 564,00
Servente	XII	€ 557,00

Como a mão-de-obra para a aplicação das chapas de aço é igual à da aplicação dos laminados, admitiu-se o mesmo valor para as duas soluções.

Os custos horários de mão-de-obra, para cada profissão, foram calculados com a seguinte expressão:

$$C_{hor} = \frac{V_{mensal}*12}{H_{semana}*52} * (1 + E_{nc}) \quad (4.2)$$

em que:

C_{hor} – Custo horário de mão-de-obra;

V_{mensal} – Vencimento mensal;

H_{semana} – Número de horas de trabalho por semana (considerou-se 8 horas diárias por 5 dias= 40 horas semanais);

E_{nc} – Percentagem de encargos na forma decimal (feriados, férias, seguros, subsídios, entre outros), considerou-se 1,495.

Na Tabela 4.6 apresentam-se os custos horários para cada profissional que serão utilizados também em 4.2.2.1.

Tabela 4.6 – Custo horário dos profissionais

Profissão	Custo horário (€/h)
Operário da construção qualificado	8,12
Servente	8,02

4.2.1.2. Fichas de rendimento

As fichas de rendimento servem para determinar os preços unitários dos artigos dos mapas de quantidades. A unidade de medição das fichas de rendimento é o metro quadrado (m^2).

Na publicação *Informação sobre Custos,* do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Manso, Fonseca & Espada, 2008), não existe nenhuma ficha de rendimento que contemple sistemas de reforços com chapas de aço, pelo que as Fichas de Rendimento que se apresentam nesta dissertação foram especificamente elaboradas para o efeito. Conforme descrito anteriormente, os preços unitários foram obtidos por consulta de fornecedores de materiais e a uma serralharia. No entanto, é necessário contabilizar os preços dos materiais com desperdício. Para as chapas de aço utiliza-se o valor total das mesmas, que se encontram no Anexo 2, contabilizando os desperdícios.

As fichas estão divididas da seguinte forma:

i) Materiais (MT)
ii) Equipamentos (EQ)
iii) Mão-de-obra (MO)

Na Tabela 4.7 apresenta-se a ficha de rendimento para a mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura (CYPE, 2017b), utilizada também em 4.2.2.2.

Tabela 4.7 – Ficha de rendimento n.º1 – Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura

Descrição da Operação (Unidade=Un)							**Ficha n.º1**
Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.							
Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
EQ.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória	Un	1,165	100,00	116,50	116,50	100,00
Custo direto (CD)					Total (€)	116,50	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	128,15	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	138,40	

Na Tabela 4.8 expõe-se a ficha de rendimento do aluguer diário da plataforma elevatória de tesoura (CYPE, 2017c). Esta ficha também é utilizada em 4.2.2.2.

Tabela 4.8 – Ficha de rendimento n.º2 – Aluguer diário da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel*

Descrição da Operação (Unidade=dia)	**Ficha n.º2**

Aluguer diário da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel*, de 10 m de altura máxima de trabalho.

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total(€)	Incidências no custo direto (%)
EQ.	Plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel*	dia	1,000	86,44	86,44	86,44	100,00
Custo direto (CD)					Total (€)	86,44	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	95,08	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	102,69	

Na Tabela 4.9 é exibida a ficha de rendimento da preparação da superfície da viga com recurso a equipamento de jato de partículas por m^2, aplicada também em 4.2.2.2.

Tabela 4.9 – Ficha de rendimento n.º3 – Ficha de rendimento da preparação da superfície da viga com recurso a equipamento de jato de partículas de silicato de alumínio por projeção a seco por m^2

Descrição da Operação (Unidade=m^2)	**Ficha n.º3**

Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total(€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Partículas abrasivas de silicato de alumínio	Kg	1,725	0,25	0,43	2,05	38,14
	Gasóleo	l	1,246	1,30	1,62		
EQ.	Jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco	h	0,135	2,86	0,39	1,04	19,25
	Gerador HYW-45 kVa T6B *Diesel-Himoinsa*	h	0,135	4,81	0,65		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,142	8,12	1,15	2,29	42,61
	Servente	h	0,142	8,02	1,14		
Custo direto (CD)					Total (€)	5,38	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	5,92	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	6,39	

Na Tabela 4.10 apresenta-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de chapa S235 com resina epoxy S&P Resin 220 e aos preços da chapa, do corte, da soldadura e da metalização para o caso de uma viga, por m^2.

Tabela 4.10a – Ficha de rendimento n.º4 – Caso de 1 viga – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha n.º4**

Caso de 1 viga-Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,41 m de comprimento e 0,18 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Chapa S235 com corte, soldadura e metalização	m²	1,000	237,35	237,35	285,77	95,68
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	48,42	48,42		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,800	8,12	6,49	12,91	4,32
	Servente	h	0,800	8,02	6,41		
Custo direto (CD)					Total (€)	298,68	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	328,55	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	354,83	

Tabela 4.10b – Ficha de rendimento n.º4 – Caso de 1 viga – Preço da chapa, do corte, da soldadura e da metalização

Designação	**Preço**	**Preço/m²**
S235 (1 chapa de 2,00x1,00m)	42,05 €	52,97 €
Corte, Soldadura e Metalização	146,36 €	184,38 €
	Total	237,35 €

Na Tabela 4.11 expõe-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de chapa S235 com resina epoxy S&P Resin 220 e aos preços da chapa, do corte, da soldadura e da metalização para o caso de cinco vigas, por m².

Tabela 4.11a – Ficha de rendimento n.º5 – Caso de 5 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha n.º5**

Caso de 5 vigas-Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,41 m de comprimento e 0,18 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total(€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Chapa S235 com corte, soldadura e metalização	m²	1,000	135,68	135,68	154,95	92,31
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	19,27	19,27		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,800	8,12	6,49	12,91	7,69
	Servente	h	0,800	8,02	6,41		
Custo direto (CD)					Total (€)	167,86	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	184,65	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	199,42	

Tabela 4.11b – Ficha de rendimento n.º5 – Caso de 5 vigas – Preço da chapa, do corte, da soldadura e da metalização

Designação	Preço	Preço/m^2
S235 (1 chapa de 3,00x1,50m)	94,61 €	23,84 €
Corte, Soldadura e Metalização	443,91 €	111,84 €
	Total	135,68 €

Na Tabela 4.12 exibe-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de chapa S235 com resina epoxy S&P Resin 220 e aos preços da chapa, do corte, da soldadura e da metalização para o caso de dez vigas, por m^2.

Tabela 4.12a – Ficha de rendimento n.º6 – Caso de 10 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m^2)							**Ficha n.º6**
Caso de 10 vigas-Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,41 m de comprimento e 0,18 m de largura							
Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total(€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Chapa S235 com corte, soldadura e metalização	m^2	1,000	135,68	135,68	150,13	92,08
	S&P *Resin* 220	m^2	1,000	14,45	14,45		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,800	8,12	6,49	12,91	7,92
	Servente	h	0,800	8,02	6,41		
Custo direto (CD)					Total (€)	163,04	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	179,34	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	193,69	

Tabela 4.12b – Ficha de rendimento n.º6 – Caso de 10 vigas – Preço da chapa, do corte, da soldadura e da metalização

Designação	Preço	Preço/m2
S235 (2 chapas de 3,00x1,50m)	189,22 €	23,84 €
Corte, Soldadura e Metalização	887,82 €	111,84 €
	Total	135,68 €

Na Tabela 4.13 apresenta-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de chapa S235 com resina epoxy S&P Resin 220 e aos preços da chapa, do corte, da soldadura e da metalização para o caso de quinze vigas, por m^2.

Tabela 4.13a – Ficha de rendimento n.º7 - Caso de 15 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha n.º7**

Caso de 15 vigas-Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,41 m de comprimento e 0,18 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Chapa S235 com corte, soldadura e metalização	m²	1,000	135,68	135,68	151,74	92,16
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	16,06	16,06		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,800	8,12	6,49	12,91	7,84
	Servente	h	0,800	8,02	6,41		
Custo direto (CD)					Total (€)	164,65	
Custo da Operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	181,12	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	195,60	

Tabela 4.13b – Ficha de rendimento n.º7 - Caso de 15 vigas – Preço da chapa, do corte, da soldadura e da metalização

Designação	**Preço**	**Preço/m²**
S235 (3 chapas de 3,00x1,50m)	283,83 €	23,84 €
Corte, Soldadura e Metalização	1.331,73 €	111,84 €
	Total	135,68 €

Na Tabela 4.14 expõe-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de chapa S235 com resina epoxy S&P Resin 220 e aos preços da chapa, do corte, da soldadura e da metalização para o caso de vinte vigas, por m².

Tabela 4.14a – Ficha de rendimento n.º8 – Caso de 20 vigas – Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha n.º8**

Caso de 20 vigas-Aplicação do reforço de chapa S235 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,41 m de comprimento e 0,18 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	Chapa S235 com corte, soldadura e metalização	m²	1,000	135,68	135,68	150,13	92,08
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	14,45	14,45		
MO.	Operário da construção qualificado	h	0,800	8,12	6,49	12,91	7,92
	Servente	h	0,800	8,02	6,41		
Custo direto (CD)					Total (€)	163,04	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	179,34	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	193,69	

Tabela 4.14b – Ficha de rendimento n.º8 – Caso de 20 vigas – Preço da chapa, do corte, da soldadura e da metalização

Designação	**Preço**	**Preço/m²**
S235 (4 chapas de 3,00x1,50m)	378,44 €	23,84 €
Corte, Soldadura e Metalização	1.775,64 €	111,84 €
	Total	135,68 €

4.2.1.3. Mapa de quantidades

O mapa de quantidades tem como função a descrição das atividades a realizar, por meio de artigos nos quais são indicadas as medições na unidade correspondente. Posteriormente, através das fichas de rendimento, é feita a orçamentação.

A solução de reforço com chapa de aço foi dividida em três capítulos. Os capítulos utilizados nos mapas de quantidade foram os seguintes:

i) Trabalhos prévios
ii) Preparação da superfície
iii) Aplicação do reforço

Para os trabalhos prévios calculam-se os dias necessários de aluguer da plataforma elevatória de tesoura para os vários casos de reforço das vigas com chapas de aço, conforme apresentado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Dias de aluguer necessários para cada caso

Caso	Área de reforço (m^2)	Rendimento necessário por m^2		Dias necessários de aluguer
		Preparação da superfície	Aplicação do reforço	
1 viga	0,79	0,142 h	0,800 h	1 dia
5 vigas	3,97			1 dia
10 vigas	7,94			1 dia
15 vigas	11,91			2 dias
20 vigas	15,88			2 dias

A Tabela 4.16 corresponde ao mapa de quantidades da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de uma viga.

Tabela 4.16 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga)

Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor diesel.	dia	1,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41m x 0,18m com 4mm de espessura.	m^2	1,00	4,41	0,18			0,79
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	1,00	4,41	0,18			0,79
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m .	m^2	1,00	4,41	0,18			0,79

Na Tabela 4.17 apresentam-se o mapa de quantidades da solução de reforço com chapas de aço para o caso de cinco vigas.

Tabela 4.17 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas)

Mapa de Quantidades - Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor diesel.	dia	1,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00 m com reforço de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura.	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento e aplicação de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00 m .	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97

A Tabela 4.18 refere-se ao mapa de quantidades da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de dez vigas.

Tabela 4.18 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas)

Mapa de Quantidades - Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	1,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00 m com reforço de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura.	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento e aplicação de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94

A Tabela 4.19 expõe o mapa de quantidades da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de quinze vigas.

Tabela 4.19 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas)

Mapa de Quantidades - Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00 m com reforço de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura.	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento e aplicação de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91

Na Tabela 4.20 apresenta-se o mapa de quantidades da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de vinte vigas.

Tabela 4.20 – Mapa de quantidades – Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas)

Mapa de Quantidades - Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00 m com reforço de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura.	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento e aplicação de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88

4.2.1.4. Orçamentação

As obras de reforço ainda têm pouca relevância no mercado nacional comparativamente às restantes. Assim, a orçamentação para este tipo de trabalhos apresenta um grau de incerteza e de dificuldade acrescido. Existe, ainda, outro ponto desfavorável que é a inexistência de normas e documentação de apoio para o dimensionamento e orçamentação destes tipos de trabalhos. A Tabela 4.21 corresponde ao orçamento da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de uma viga.

Tabela 4.21 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga)

Orçamento - Solução de reforço com chapas de aço coladas (1 viga)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	1,00						102,69	102,69
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41mx0,18m com 4 mm de espessura.	m^2	1,00	4,41	0,18			0,79	5,07	5,07
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (kit 5kg)	m^2	1,00	4,41	0,18		0,79	0,79	45,44	45,44
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	1,00	4,41	0,18		0,79	0,79	234,87	234,87
			Custo total operação					Total (€)	526,48	526,48

A Tabela 4.22 expõe o orçamento da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de cinco vigas.

Tabela 4.22 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas)

Orçamento - Solução de reforço com chapas de aço coladas (5 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel*.	dia	1,00						102,69	102,69
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41mx0,18m com 4 mm de espessura.	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97	5,07	25,36
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (2 *kits* de 5 kg)	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97	18,17	90,86
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	5,00	4,41	0,18		0,79	3,97	140,13	700,63
			Custo total operação					Total (€)	404,46	1057,94

Na Tabela 4.23 apresenta-se o orçamento da solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de dez vigas.

Tabela 4.23 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com chapas de aço coladas (10 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	1,00						102,69	102,69
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41mx0,18m com 4 mm de espessura.	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94	5,07	50,72
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* de 15 kg)	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94	13,63	136,27
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	10,00	4,41	0,18		0,79	7,94	140,13	1401,26
			Custo total operação					Total (€)	399,92	1829,33

Na Tabela 4.24 é exibido o orçamento para a solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de quinze vigas.

Tabela 4.24 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com chapas de aço coladas (15 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00						102,69	205,38
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41mx0,18m com 4 mm de espessura.	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91	5,07	76,07
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* de 15 kg e 2 *kits* de 5kg)	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91	15,15	227,18
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	15,00	4,41	0,18		0,79	11,91	140,13	2101,89
			Custo total operação					Total (€)	401,44	2748,92

Na Tabela 4.25 apresenta-se o orçamento para a solução de reforço com chapas de aço coladas para o caso de vinte vigas.

Tabela 4.25 – Orçamento – Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com chapas de aço coladas (20 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00						102,69	205,38
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação da chapa metalizada S235 numa viga de 5,00m com reforço de 4,41mx0,18m com 4 mm de espessura.	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88	5,07	101,43
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (2 *kits* de 15 kg)	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88	13,63	272,54
3.2.	Fornecimento e aplicação da chapa de aço metalizada S235 de 4,41mx0,18m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	20,00	4,41	0,18		0,79	15,88	140,13	2802,51
			Custo total operação					Total (€)	399,92	3520,27

4.2.2. Custos e quantidades

Este subcapítulo destina-se a determinar as quantidades e os custos da solução de reforço com laminados de CFRP de 4,02 x 0,15 m aplicado a uma, a cinco, a dez, a quinze e a vinte vigas.

Para a elaboração das Fichas de Rendimentos das operações de construção, começa-se por descrever os trabalhos envolvidos na solução de reforço em estudo. Esses trabalhos são divididos nas seguintes fases:

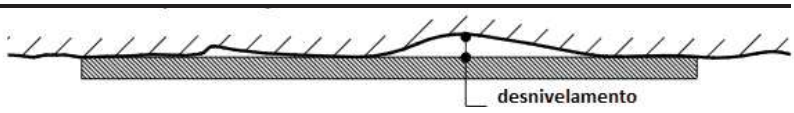
i) Trabalhos preparatórios
   - Preparação da superfície a aplicar o reforço;
   - Preparação dos laminados de CFRP;

ii) Aplicação do reforço
   - Aplicação dos laminados de CFRP.

- **Preparação da superfície a aplicar o reforço**

A preparação da superfície na qual é aplicado o reforço é igual à descrita na preparação da superfície da chapa de aço colada, aplicando-se as recomendações descritas em 4.2.1. Os valores máximos de desnivelamento permitidos no substrato de betão, segundo FIP 2001, são os apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Valores máximos permitidos para o desnivelamento no substrato de betão para os laminados (FIP, 2001)

Tipo de sistema FRP		
	Desnivelamento admissível numa base de 2,0m [mm]	**Desnivelamento admissível numa base de 0,3m [mm]**
Pré-fabricado com espessura >1mm	10	4
Pré-fabricado com espessura <1mm	6	2

- **Preparação dos laminados de CFRP**

Os laminados são fornecidos no local com as dimensões especificadas. No entanto, pode-se proceder ao corte do comprimento dos laminados com o recurso a um disco. O sistema pré-fabricado é fornecido com uma película protetora que só deve ser removida imediatamente antes da aplicação, não devendo haver nenhum contato com a superfície de aderência. Se não existir película protetora, o laminado deve ser limpo com um solvente.

- **Aplicação dos laminados de CFRP para o reforço**

A ligação entre o laminado e o betão é garantida pela resina *epoxy*. A aplicação é feita de uma forma arredondada, com uma altura superior, no centro, relativamente aos extremos laterais dos laminados. A espessura final do adesivo deve ter um valor mínimo uniforme de 1,0mm e um valor máximo de 4,0 mm ao longo do comprimento de colagem. Os laminados de CFRP são aplicados por pressão através de um rolo de borracha contra a superfície do betão. De acordo com FIP (2001), para não existir uma diminuição substancial de adesão entre o reforço e o betão, é desaconselhável uma humidade relativa superior a 80%.

4.2.2.1. Orçamentação dos recursos

Os valores necessários para os materiais, equipamentos e mão-de-obra foram disponibilizados por uma empresa fornecedora de laminados de CFRP. A orçamentação destina-se à solução de reforço com laminados de CFRP. Através da orçamentação disponibilizada, selecionou-se os materiais e as soluções mais adequadas, económicas e com menos desperdício possível.

i) Materiais

Os materiais utilizados para a preparação da superfície para aplicação da solução de reforço com laminados de CFRP e da resina *epoxy* são os mesmos que os apresentados em 4.2.1.1.

Os materiais necessários para a solução de reforço com laminados de CFRP colados da viga com um reforço de 4,02 x 0,15 m são a resina *epoxy* S&P *Resin* 220 fornecida num kit de 5 kg ou de 15kg e o laminado S&P C-Laminate 150/1,2, com 4,02 m.

A orçamentação destes materiais foram fornecidos pela empresa S&P, através de uma mensagem de correio eletrónico, no Anexo 6. Este orçamento inclui o corte dos laminados.

Na Tabela 4.27 apresenta-se a quantidade e as dimensões dos laminados utilizados para cada caso de reforço.

Tabela 4.27 – Quantidade e dimensões dos laminados de CFRP

Caso	Laminado	
	Quantidade	Dimensões
1 viga	1	4,02 x 0,15m
5 vigas	5	
10 vigas	10	
15 vigas	15	
20 vigas	20	

Na Tabela 4.28, designam-se os valores dos materiais utilizados na solução de reforço com laminados CFRP colados.

Tabela 4.28 – Preços dos materiais utilizados na solução de reforço com laminados de CFRP

Materiais	Unidade	Custo dos materiais
S&P C-Laminate 150/1,2	m^2	€ 108,53
S&P *Resin* 220	kg	€ 7,65
Gasóleo	l	€ 1,30
Partículas abrasivas de silicato de alumínio para limpeza	kg	€ 0,25

Considerando que a resina depois de aberta fica inutilizada, determinou-se o número de *kits* necessários, para cada caso e, obteve-se o preço por metro quadrado, apresentado na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Número de *kits* necessários e preço da resina aplicado por metro quadrado para a solução de reforço

Caso	Dimensões e quantidades do laminado de CFRP (m)	Área de reforço (m^2)	Quant. de resina *epoxy* (kg)	*Kits* de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 necessários	Preço do *kit* por metro quadrado (€ / m^2)
1 viga	4,02 x 0,15 (1 laminado)	0,60	1,05	*1 kit* de 5kg (€ 38,25)	38,25/0,60 = 63,75
5 vigas	4,02 x 0,15 (5 laminados)	3,02	5,29	2 *kits* de 5 kg (€ 76,50)	76,50/3,02 = 25,33
10 vigas	4,02 x 0,15 (10 laminados)	6,03	10,55	1 *kit* de 15 kg (€ 114,75)	114,75/6,03 =19,03
15 vigas	4,02 x 0,15 (15 laminados)	9,05	15,84	1 *kit* de 15 kg +1 *kit* de 5kg (€ 153,00)	153,00/9,05 =16,91
20 vigas	4,02 x 0,15 (20 laminados)	12,06	21,11	1 *kit* de 15 kg +2 *kits* de 5kg (€ 191,25)	191,25/12,06 = 15,86

ii) Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a solução de reforço com laminados de CFRP são apresentados em 4.2.1.1.

iii) Mão-de-obra

A mão-de-obra utilizada para a solução de reforço com laminados de CFRP é apresentada em 4.2.1.1.

4.2.2.2. Fichas de rendimento

Tal como descrito anteriormente, na publicação *Informação sobre Custos* do Laboratório Nacional de Engenharia Civil não existe nenhuma ficha de rendimento que contemple sistemas de reforços com laminados de CFRP, pelo que foram elaboradas no âmbito deste trabalho fichas específicas para cada artigo. Os preços unitários foram obtidos por consulta de fornecedores de laminados de CFRP. Os laminados de CFRP não têm desperdício mas a resina *epoxy* tem, pelo que tem de ser contabilizado. Anteriormente, calculou-se o valor por m^2 da resina *epoxy*.

As fichas estão divididas da seguinte forma:

i) Materiais (MT)
ii) Equipamentos (EQ)
iii) Mão-de-obra (MO)

Neste caso, as fichas de rendimento da mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura (Ficha n.º1) (CYPE, 2017b), do aluguer diário de plataforma elevatória de tesoura (Ficha n.º2) (CYPE, 2017b), e da preparação da superfície da viga com recurso a equipamento de jato de partículas de partículas (Ficha n.º3) são as utilizadas em 4.2.1.2.

Na Tabela 4.30 apresenta-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de laminados de S&P C-Laminate 150/2000 para o caso de uma viga, por m^2.

Tabela 4.30 – Ficha de rendimento n.º 9 – Caso de 1 viga – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha nº9**

Caso de 1 viga-Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,02 m de comprimento e 0,15 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2	m²	1,000	108,53	108,53	172,28	91,44
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	63,75	63,75		
MO.	Operário da construção qualificado	h	2,683	8,12	21,78	16,14	8,56
	Servente	h	2,683	8,02	21,51		
Custo direto (CD)					Total (€)	188,42	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	207,26	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	223,84	

Na Tabela 4.31 apresenta-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de laminados de S&P C-Laminate 150/2000 para o caso de cinco vigas, por m².

Tabela 4.31 – Ficha de rendimento n.º10 – Caso de 5 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha nº10**

Caso de 5 vigas-Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,02 m de comprimento e 0,15 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	S&P C-Laminate 150/2000 150/ 1,2	m²	1,000	108,53	108,53	133,86	89,24
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	25,33	25,33		
MO.	Operário da construção qualificado	h	2,683	8,12	21,78	16,14	10,76
	Servente	h	2,683	8,02	21,51		
Custo direto (CD)					Total (€)	150,00	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	165,00	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	178,20	

A Tabela 4.32 refere-se à ficha de rendimento da aplicação do reforço de laminados de S&P C-Laminate 150/2000 para o caso de dez vigas, por m².

Tabela 4.32 – Ficha de rendimento n.º11 – Caso de 10 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha nº11**

Caso de 10 vigas-Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/1000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,02 m de comprimento e 0,15 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2	m²	1,000	108,53	108,53	127,56	88,77
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	19,03	19,03		
MO.	Operário da construção qualificado	h	2,683	8,12	21,78	16,14	11,23
	Servente	h	2,683	8,02	21,51		
Custo direto (CD)					Total (€)	143,70	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	158,07	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	170,71	

A Tabela 4.33 expõe a ficha de rendimento da aplicação do reforço de laminados de S&P C-Laminate 150/2000 para o caso de quinze vigas, por m².

Tabela 4.33 – Ficha de rendimento n.º12 – Caso de 15 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha nº12**

Caso de 15 vigas-Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,02 m de comprimento e 0,15 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2	m²	1,000	108,53	108,53	125,44	88,60
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	16,91	16,91		
MO.	Operário da construção qualificado	h	2,683	8,12	21,78	16,14	11,40
	Servente	h	2,683	8,02	21,51		
Custo direto (CD)					Total (€)	141,58	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	155,73	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	168,19	

Na Tabela 4.34 apresenta-se a ficha de rendimento da aplicação do reforço de laminados de S&P C-Laminate 150/2000 para o caso de vinte vigas, por m².

Tabela 4.34 – Ficha de rendimento n.º13 – Caso de 20 vigas – Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220

Descrição da Operação (Unidade=m²)	**Ficha nº13**

Caso de 20 vigas-Aplicação do reforço de laminados S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2 com resina *epoxy* S&P *Resin* 220 em 4,02 m de comprimento e 0,15 m de largura

Descrição de recursos		Unidade	Quant.	Preço Unitário (€)	Custo (€)	Sub-total (€)	Incidências no custo direto (%)
MT.	S&P C-Laminate 150/2000 150/1,2	m²	1,000	108,53	108,53	124,39	88,52
	S&P *Resin* 220	m²	1,000	15,86	15,86		
MO.	Operário da construção qualificado	h	2,683	8,12	21,78	16,14	11,48
	Servente	h	2,683	8,02	21,51		
Custo direto (CD)					Total (€)	140,53	
Custo da operação S/lucro, 10% Custos indiretos					Total (€)	154,58	
Custo total operação 8% de Lucros					Total (€)	166,94	

4.2.2.3. Mapa de quantidades

A solução de reforço com laminados de CFRP foi dividida em três capítulos. Os capítulos utilizados nos mapas de quantidade foram os seguintes:

i) Trabalhos prévios
ii) Preparação da superfície
iii) Aplicação do reforço

Para os trabalhos prévios calcula-se os dias necessários de aluguer da plataforma elevatória de tesoura para os vários casos de reforço das vigas com laminados de CFRP, conforme apresentado na Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Dias de aluguer necessários para cada caso

Caso	**Área de reforço (m²)**	**Rendimento necessário por m²**		**Dias necessários de aluguer**
		Preparação da superfície	**Aplicação do reforço**	
1 viga	0,60	0,142 h	2,683 h	1 dia
5 vigas	3,02			2 dias
10 vigas	6,03			3 dias
15 vigas	9,05			4 dias
20 vigas	12,06			5 dias

A Tabela 4.36 corresponde ao mapa de quantidades da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de uma viga.

Tabela 4.36 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga)

Mapa de Quantidades- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	1,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	1,00	4,02	0,15			0,60
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	1,00	4,02	0,15			0,60
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	1,00	4,02	0,15			0,60

Na Tabela 4.37 apresentam-se o mapa de quantidades da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de cinco vigas.

Tabela 4.37 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas)

Mapa de Quantidades- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	5,00	4,02	0,15			3,02
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	5,00	4,02	0,15			3,02
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 4 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	5,00	4,02	0,15			3,02

A Tabela 4.38 refere-se ao mapa de quantidades da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de dez vigas.

Tabela 4.38 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas)

Mapa de Quantidades- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	3,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	10,00	4,02	0,15			6,03
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	10,00	4,02	0,15			6,03
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	10,00	4,02	0,15			6,03

A Tabela 4.39 expõe o mapa de quantidades da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de quinze vigas.

Tabela 4.39 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas)

Mapa de Quantidades- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	4,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	15,00	4,02	0,15			9,05
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada.	m^2	15,00	4,02	0,15			9,05
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	15,00	4,02	0,15			9,05

Na Tabela 4.40 apresenta-se o mapa de quantidades da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de vinte vigas.

Tabela 4.40 – Mapa de Quantidades – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas)

Mapa de Quantidades- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas)		**Un**	**PARTES IGUAIS**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**	
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**COMP.**	**LARG.**	**ALT.**	**PARCIAIS**	**TOTAIS**
1.	Trabalhos prévios							
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00					
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	5,00					
2.	Preparação da superfície							
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	20,00	4,02	0,15			12,06
3.	Aplicação do reforço							
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin 220* na superfície previamente preparada.	m^2	20,00	4,02	0,15			12,06
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P C-*Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 4mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	20,00	4,02	0,15			12,06

4.2.2.4. Orçamentação

A Tabela 4.41 corresponde ao orçamento da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de uma viga.

Tabela 4.41 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga)

Orçamento- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (1 viga)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,4
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	1,00						102,69	102,69
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	1,00	4,02	0,15		0,60	0,60	3,85	3,85
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* de 5 kg)	m^2	1,00	4,02	0,15		0,60	0,60	45,67	45,67
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	1,00	4,02	0,15		0,60	0,60	108,76	108,76
		Custo total operação						Total (€)	399,37	399,37

A Tabela 4.42 expõe o orçamento da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de cinco vigas.

Tabela 4.42 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (5 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,4
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	2,00						102,69	205,38
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	5,00	4,02	0,15		0,60	3,02	3,85	19,26
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (2 *kits* de 5 kg)	m^2	5,00	4,02	0,15		0,60	3,02	18,15	90,73
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	5,00	4,02	0,15		0,60	3,02	108,76	543,80
			Custo total operação					Total (€)	371,85	997,58

Na Tabela 4.43 apresenta-se o orçamento da solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de dez vigas.

Tabela 4.43 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (10 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,4
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	3,00						102,69	308,07
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	10,00	4,02	0,15		0,60	6,03	3,85	38,53
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* de 15 kg)	m^2	10,00	4,02	0,15		0,60	6,03	13,63	136,32
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	10,00	4,02	0,15		0,60	6,03	108,76	1087,60
			Custo total operação					Total (€)	367,34	1708,93

Na Tabela 4.44 é exibido o orçamento para a solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de quinze vigas.

Tabela 4.44 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (15 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,4
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	4,00						102,69	410,76
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	15,00	4,02	0,15		0,60	9,05	3,85	57,79
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* 15 kg e 1 *kit* de 5 kg)	m^2	15,00	4,02	0,15		0,60	9,05	12,11	181,71
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	15,00	4,02	0,15		0,60	9,05	108,76	1631,40
			Custo total operação					Total (€)	365,82	2420,06

Na Tabela 4.45 apresenta-se o orçamento para a solução de reforço com laminados de CFRP colados para o caso de vinte vigas.

Tabela 4.45 – Orçamento – Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas)

Orçamento- Solução de reforço com laminados de CFRP colados (20 vigas)		**Un**	**PART. IG.**	**DIMENSÕES [m]**			**QUANTIDADES**		**PREÇO UNIT. (€)**	**PREÇO (€)**
Art.º	**Designação dos trabalhos**			**C.**	**L.**	**A.**	**PARC.**	**TOT.**		
1.	Trabalhos prévios									
1.1.	Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel* até 10 m de altura máxima de trabalho.	Un.	1,00						138,40	138,40
1.2.	Aluguer de plataforma elevatória de tesoura com motor *diesel.*	dia	5,00						102,69	513,45
2.	Preparação da superfície									
2.1.	Preparação da superfície da viga com recurso equipamento jato de partículas de silicato de alumínio de projeção a seco para superfícies de betão, criando uma superfície rugosa, plana e regular, limpa e sem leitanças, gelo, água estagnada, gordura, óleos e partículas soltas para a aplicação do laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 numa viga de 5,00m com reforço de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura.	m^2	20,00	4,02	0,15		0,60	12,06	3,85	77,05
3.	Aplicação do reforço									
3.1.	Fornecimento de resina *epoxy* S&P *Resin* 220 na superfície previamente preparada (1 *kit* 15 kg e 2 *kits* de 5 kg)	m^2	20,00	4,02	0,15		0,60	12,06	11,36	227,23
3.2.	Fornecimento e aplicação de laminado S&P *C-Laminate* 150/2000 150/1,2 de 4,02mx0,15m com 1,2 mm de espessura numa viga de 5,00m.	m^2	20,00	4,02	0,15		0,60	12,06	108,76	2175,21
				Custo total operação				Total (€)	365,07	3131,34

4.3. Considerações finais

No presente capítulo analisou-se economicamente duas soluções de reforço. Conforme referido anteriormente, uma das soluções é uma chapa de aço S235 de quatro milímetros de espessura com as dimensões de 0,18 metros de largura e 4,41 metros de comprimento. A segunda solução utilizada é a de laminados de CFRP designados de SM (150/2000) S&P de 1,2 milímetros de espessura com 0,15 metros de largura e 4,02 metros de comprimento. Em ambas as soluções utilizou-se a resina *epoxy* S&P *Resin* 220 com um milímetro de espessura. De seguida, apresenta-se a análise económica dos resultados das soluções de reforço referidas anteriormente, aplicados aos casos de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas.

4.3.1. Análise económica dos resultados

Neste subcapítulo, efetua-se uma análise económica comparativa dos dois tipos de soluções de reforço aplicados no caso de estudo, chapas de aço e laminados de CFRP.

O custo direto e as incidências correspondentes por m^2 para as soluções de reforço estão descritas na Tabela 4.46.

Tabela 4.46 – Custo direto e incidências correspondentes para as soluções de reforço

Ficha de rendimento	Unidade	Custo Direto (€)			Incidências no custo direto (%)		
		MT	EQ	MO	MT	EQ	MO
N.º1 - Mobilização e desmobilização da plataforma elevatória	Un.	-	116,50	-	-	100,00	-
N.º2 - Aluguer diário da plataforma elevatória	dia	-	86,44	-	-	100,00	-
N.º3 - Preparação da superfície	m^2	2,05	1,04	2,29	38,14	19,25	42,61
N.º4 - Aplicação do reforço de chapa de aço (1 viga)		285,77	-	12,91	95,68	-	4,32
N.º5 - Aplicação do reforço de chapa de aço (5 vigas)		154,95	-	12,91	92,31	-	7,69
N.º6 - Aplicação do reforço de chapa de aço (10 vigas)		150,13	-	12,91	92,08	-	7,92
N.º7 - Aplicação do reforço de chapa de aço (15 vigas)		151,74	-	12,91	92,16	-	7,84
N.º8 - Aplicação do reforço de chapa de aço (20 vigas)		150,13	-	12,91	92,08	-	7,92
N.º9 - Aplicação do reforço de laminados de CFRP (1 viga)		172,28	-	16,14	91,44	-	8,56
N.º10 - Aplicação do reforço de laminados de CFRP (5 vigas)		133,86	-	16,14	89,24	-	10,76
N.º11 - Aplicação do reforço de laminados de CFRP (10 vigas)		127,56	-	16,14	88,77	-	11,23
N.º12 - Aplicação do reforço de laminados de CFRP (15 vigas)		125,44	-	16,14	88,60	-	11,40
N.º13 - Aplicação do reforço de laminados de CFRP (20 vigas)		124,39	-	16,14	88,52	-	11,48

Por consulta da Tabela 4.46 é possível comparar os valores entre as duas soluções de reforço, de chapas de aço e dos laminados de CFRP, extraindo-se as seguintes conclusões principais:

i) A atividade de preparação da superfície é igual nas duas soluções de reforço. Na preparação da superfície, o custo da mão-de-obra tem uma maior incidência no custo direto (42,61%), estando esse valor próximo do valor dos custos dos materiais utilizados (38,14%). Os equipamentos são os que têm menor incidência no custo direto (19,25%);

ii) Em ambas as soluções de reforço, o valor da mão-de-obra por metro quadrado não difere, quando varia a quantidade de vigas a reforçar. Desta forma, conclui-se que o que vai fazer variar o custo direto por metro quadrado são os materiais utilizados, tendo estes a maior incidência no custo direto, com valores superiores a 88 %;

iii) A solução de reforço mais económica por metro quadrado é a dos laminados de CFRP colados;

iv) Para ambas as soluções de reforço, quando maior é o número de vigas a reforçar, menor é o valor por metro quadrado.

Os desperdícios são um dos fatores que influenciam os custos por m^2. Na Tabela 4.47, apresentam-se os desperdícios existentes para as soluções de reforço com chapas de aço e laminados CFRP.

Tabela 4.47 – Desperdícios existentes para as soluções de reforço do caso de estudo

			Chapa de aço/ Laminado de CFRP		Resina *epoxy*	
N.º de vigas a reforçar		**Área (m^2)**	**Área de desperdício (m^2)**	**Valor por m^2 com o desperdício (€)**	**Área de desperdício (m^2)**	**Valor por m^2 com o desperdício (€)**
Solução de reforço com chapa de aço	1	0,79	2,00x1,00=2,00 2,00-0,79= 1,21	237,35	5,00/1,75=2,86 2,86-0,79=2,07	48,42
Solução de reforço com laminado CFRP		0,60	0,00	108,53	5,00/1,75=2,86 2,86-0,60= 2,26	63,75
Solução de reforço com chapa de aço	5	3,79	3,00x1,50=4,50 4,50-3,79= 0,71	135,68	10,00/1,75=5,71 5,71-3,79=1,92	19,27
Solução de reforço com laminado CFRP		3,02	0,00	108,53	10,00/1,75=5,71 5,71-3,02=2,69	25,33
Solução de reforço com chapa de aço	10	7,94	2x3,00x1,50=9,00 9,00-7,94=1,06	135,68	15,00/1,75=8,57 8,57-7,94=0,63	14,45
Solução de reforço com laminado CFRP		6,03	0,00	108,53	15,00/1,75=8,57 8,57-6,03=2,54	19,03
Solução de reforço com chapa de aço	15	11,91	3x3,00x1,50=13,50 13,50-11,91=1,59	135,68	25,00/1,75=14,29 14,29-11,91=2,38	16,06
Solução de reforço com laminado CFRP		9,05	0,00	108,53	20,00/1,75=11,43 11,43-9,05=2,38	16,91
Solução de reforço com chapa de aço	20	15,88	4x3,00x1,50=18,00 18,00-15,88=2,12	135,68	30,00/1,75=17,14 17,14-15,88=1,26	14,45
Solução de reforço com laminado CFRP		12,06	0,00	108,53	25,00/1,75=14,29 14,29-12,06=2,23	15,86

Extraem-se, da Tabela 4.47, as seguintes conclusões principais:

i) Os laminados de CFRP não apresentam desperdício, o que se justifica por o material CFRP ter uma largura específica e ser cortado pelo comprimento necessário;
ii) Na solução de reforço com chapas de aço contabiliza-se as chapas inteiras, ou seja, admitindo os desperdícios, o preço das chapas de aço é mais elevado que o preço dos laminados de CFRP;
iii) A resina *epoxy* utilizada tem um valor maior por metro quadrado na solução de reforço com laminados de CFRP comparativamente à solução de reforço com chapas de aço. Tal acontece devido ao facto de a resina *epoxy* ser vendida em *kits* e, ao ser efetuado um balanço entre quantidades necessárias para cada solução e quantidades de cada *kit*, a solução com laminados de CFRP conduzir a maior quantidade de resina não utilizada.

Na Figura 4.1 apresentam-se os custos da solução de reforço com chapa de aço para a solução total de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas e o preço por viga correspondente a cada solução.

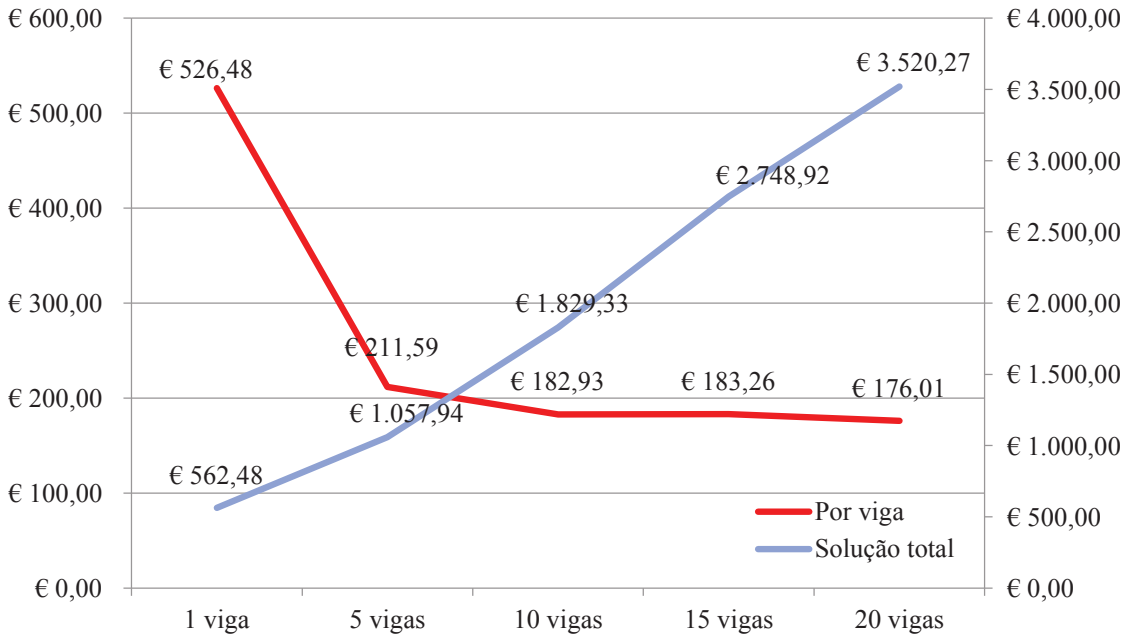


Figura 4.1 – Custos da solução de reforço com chapa de aço

Da análise da Figura 4.1, extraem-se as seguintes conclusões principais:

i) Quanto maior o número de vigas por solução total, menor o custo por viga;
ii) O custo por viga para a solução total de uma viga é muito maior que para restantes soluções e tem, no mínimo, uma diferença de € 314,89;
iii) O custo por viga é maior para as soluções totais com menos vigas devido ao maior desperdício de materiais e, porque, o valor da mobilização e desmobilização da plataforma elevatória não varia de solução para solução.
iv) Na solução total de quinze vigas não se verifica a diminuição do custo relativamente a solução total de dez vigas e a diferença é mínima, devido aos desperdícios serem maiores.

Na Figura 4.2 apresentam-se os custos da solução de reforço com laminados de CFRP para a solução total de uma, cinco, dez, quinze e vinte vigas e o preço por viga correspondente a cada solução.

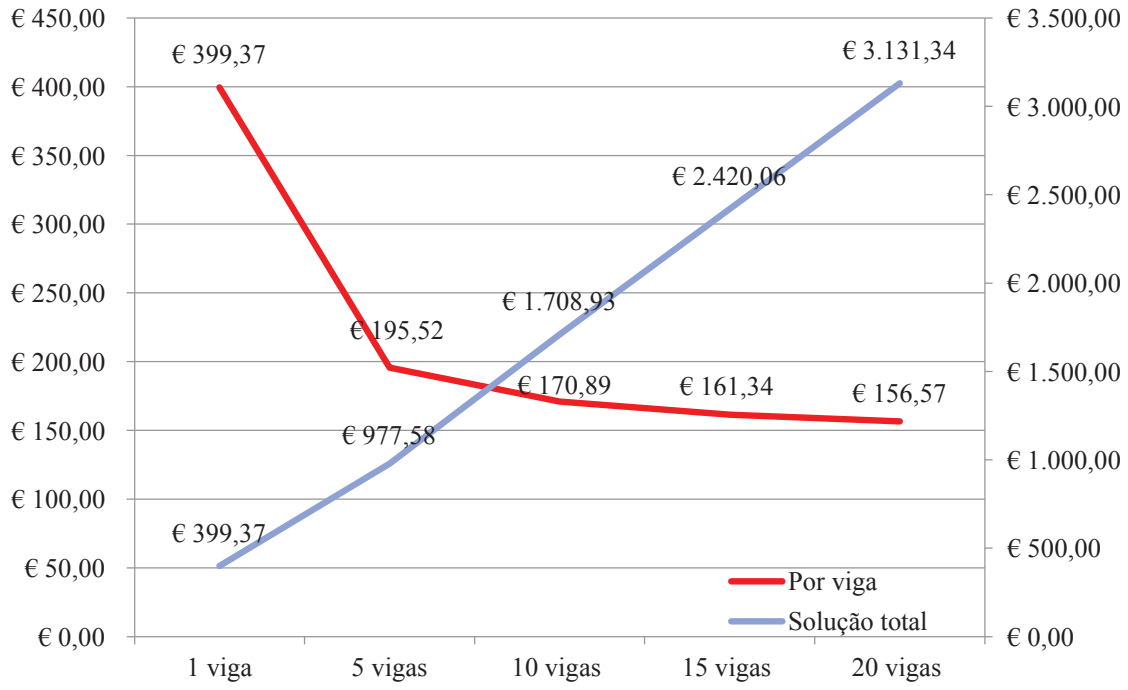


Figura 4.2 – Custos da solução de reforço com laminados de CFRP

Por consulta da Figura 4.2, extraem-se as seguintes conclusões principais:

i) Quanto maior o número de vigas por solução total, menor o custo por viga;
ii) O custo por viga para a solução total de uma viga é muito maior que para restantes soluções e tem, no mínimo, uma diferença de € 203,85;
iii) O custo por viga é maior para as soluções totais com menos vigas devido ao valor da mobilização e desmobilização da plataforma elevatória não variar de acordo com o número de vigas e porque existe maior desperdício de materiais;

Em conclusão:

i) O custo é mais reduzido para a solução de reforço com laminados de CFRP do que para a solução de reforço com chapas de aço. Tal sucede porque para a mesma solicitação é necessário uma menor área de laminados que, consequentemente, resulta em menos materiais, equipamentos e mão-de-obra;
ii) O preço dos materiais associados à solução de reforço com laminados de CFRP é mais económico e, estes, geram menos desperdícios que os utilizados para a solução de reforço com chapas de aço;
iii) O custo por viga, para a solução de uma viga, é muito maior que para restantes soluções;
iv) Quanto maior for a quantidade de vigas a reforçar numa solução, menor são os custos por viga.

Capítulo 5

Considerações finais, conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Considerações finais

Esta dissertação de mestrado estabeleceu uma contribuição no âmbito dos sistemas de reforço de estruturas, nomeadamente, chapas de aço coladas e laminados de CFRP colados. O destaque desta dissertação foram os quatro principais objetivos estabelecidos.

O **primeiro objetivo** foi a identificação e descrição das técnicas de reforço existentes. Através desse objetivo, foi possível conhecer as várias técnicas de reforço existentes. O **segundo objetivo** foi a análise técnica das duas soluções de reforço. O interesse por estes dois tipos de reforço surgiu por as chapas serem uma solução de reforço corrente, ao contrário dos laminados de CFRP que são uma solução mais recente e menos utilizada. Através desse objetivo, foi possível conhecer as normas e/ou documentos necessários para o dimensionamento das duas soluções de reforço e, ainda, tomar conhecimento da inexistência de normas para a solução de reforço com CFRP. O **terceiro objetivo** foi a análise económica das duas soluções de reforço anteriores. Deste objetivo, constatou-se a dificuldade de construção das fichas de rendimento, por ainda não existir um modelo definido para estes dois tipos de reforço, como existe para os mais variados trabalhos na publicação *Informação sobre custos - Fichas de Rendimento do LNEC*. O **quarto objetivo** desta dissertação foi a comparação económica das soluções utilizadas em função da área utilizada.

Realçam-se, em seguida, a matéria abordada na dissertação por capítulo, destacando os aspetos mais importantes para a concretização dos objetivos.

No **Capítulo 1** definiu-se e comparou-se os conceitos de reabilitação e reforço e, apesar de serem conceitos diferentes, esclarece-se que, por vezes, o reforço pode estar incluído na reabilitação. Atualmente, existe um decréscimo da construção nova e um aumento da reabilitação, por esse motivo e o anterior, neste capítulo são, também, abordados os temas da reabilitação urbana na atualidade e a importância do reforço sísmico.

No **Capítulo 2** realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre as técnicas de reforço existentes para as estruturas de betão com as vantagens e desvantagens de utilização de cada uma analisando, mais detalhadamente, as soluções de reforço de chapas de aço coladas e de laminados de CFRP colados por serem as soluções utilizadas na dissertação. Os laminados de CFRP têm vantagens pelo facto de serem leves, ocuparem pouco espaço no estaleiro, e por serem fornecidos em rolo. No entanto, este tipo de reforço tem elevada condutibilidade térmica e comportamento frágil. As chapas de aço, por sua vez, têm vantagens por serem de rápida execução e eficientes no desempenho mecânico. No entanto, ao contrário dos laminados de CFRP, têm um peso elevado, ocupam muito espaço e os comprimentos têm que ser limitados devido ao transporte. Em ambas as soluções de reforço, existe a vantagem de não alterarem a geometria da estrutura. Como se tratam de reforços colados, utiliza-se a resina *epoxy* para os dois casos porque adere a diferentes tipos de suporte. No entanto, esta tem desvantagens, pois este adesivo com a humidade e os aumentos de temperatura, por exemplo o fogo, pode originar a deterioração do mesmo e o descolamento das extremidades dos reforços.

No **Capítulo 3** apresentou-se os modelos de dimensionamento para o reforço com elementos metálicos e com FRP e desenvolveu-se o dimensionamento do caso de estudo descrito. O dimensionamento das duas soluções de reforço resultou numa solução de uma chapa de aço S235 de quatro milímetros de espessura com as dimensões de 0,18 metros de largura e 4,41 metros de comprimento. Os laminados de CFRP designados de SM (150/2000) S&P resultaram numa solução de 1,2 milímetros de espessura com 0,15 metros de largura e 4,02 metros de comprimento. Em ambas as soluções utilizou-se a resina *epoxy* S&P *Resin* 220 com um milímetro de espessura. Uma das soluções é uma chapa de aço S235 de quatro milímetros de espessura com as dimensões de 0,18 metros de largura e 4,41 metros de comprimento. A

segunda solução utilizada é a de laminados de CFRP designados de SM (150/2000) S&P de 1,2 milímetros de espessura com 0,15 metros de largura e 4,02 metros de comprimento.

No **Capítulo 4** é descrito, genericamente, a análise de custos e a descrição dos custos que a compõem, os custos diretos, os custos operacionais e os custos operacionais totais. Neste capítulo desenvolveu-se a análise económica do reforço com chapa de aço colada e laminados de CFRP colados para o caso de estudo. Essa análise realizou-se através da criação de mapas de quantidades e fichas de rendimento para os trabalhos. Para este capítulo, contactou-se empresas que forneceram orçamentos para os materiais e mão-de-obra. Depois de criados os mapas de quantidades, criaram-se as fichas de rendimento para cada trabalho por metro quadrado para a comparação.

5.2. Conclusões

A presente dissertação, para além enaltecer a temática em estudo, permitiu a obtenção de resultados com relevância dos quais se extraem as seguintes conclusões principais:

i) Existem normas e documentação para o dimensionamento do reforço com chapas de aço, no entanto, para as soluções com laminados de CFRP não existem normas, existem apenas alguns documentos;
ii) A área de reforço necessária, para a mesma solicitação, é maior para a solução de reforço com chapas de aço;
iii) Em ambas as soluções, os critérios de verificação são muito limitativos resultando em maiores dimensões de reforço;
iv) Não existe documentação para a análise de custos das duas soluções de reforço estudadas, nomeadamente, as chapas de aço e os laminados de CFRP;
v) Na aplicação dos reforços os materiais são os que têm maior incidência nos custos com valores superiores a 88%;
vi) O que mais influencia os custos são os desperdícios que têm de ser contabilizados, referentes aos materiais e a quantidade ou área de vigas a reforçar;
vii) Os laminados de CFRP não apresentam desperdício, o que se justifica por o material CFRP ter uma largura específica e ser cortado pelo comprimento necessário;

viii) Na solução de reforço com chapas de aço contabiliza-se as chapas inteiras, ou seja, admitindo os desperdícios, o preço das chapas de aço é mais elevado que o preço dos laminados de CFRP, por metro quadrado.

ix) A resina *epoxy* utilizada tem um valor maior por metro quadrado na solução de reforço com laminados de CFRP comparativamente à solução de reforço com chapas de aço. Tal acontece devido ao facto de a resina *epoxy* ser vendida em *kits* e, ao ser efetuado um balanço entre quantidades necessárias para cada solução e quantidades de cada *kit*, a solução com laminados de CFRP conduzir a maior quantidade de resina não utilizada.

x) A solução de reforço com chapas de aço gera mais desperdícios que a solução de reforço com laminados de CFRP;

xi) A solução de reforço com laminados de CFRP é mais económica que a solução de reforço com chapas de aço;

xii) Para ambas as soluções de reforço, quanto maior for a quantidade de vigas a reforçar menor é o custo por viga.

5.3. Desenvolvimentos futuros

O reforço de estruturas é cada vez mais comum em Portugal, seja através da reabilitação, da alteração ao uso, e dos erros de dimensionamento ou de construção. Na continuidade deste trabalho, apresentam-se alguns aspetos que podem ser desenvolvidos, futuramente, no que respeita à análise técnica e económica de estruturas com necessidade de reforço:

i) As normas na construção são importantes e necessárias, no sentido de unificar os critérios de cálculo e de dimensionamento de estruturas e, consequentemente, promover qualidade, eficiência e segurança às mesmas. Pelo facto de serem inexistentes regulamentos para o dimensionamento de soluções de reforços com laminados de CFRP, torna-se fundamental a criação dos mesmos. No entanto, é também, essencial a criação de regulamentos e documentação técnica para todas as outras soluções de reforço existentes, por todos os motivos descritos anteriormente;

ii) As fichas de rendimento são cruciais para a análise de custos. Existem fichas de rendimento para os mais variados trabalhos realizados na construção civil, principalmente na publicação *Informação sobre custos - Fichas de Rendimento do*

LNEC, porém, conforme se verificou nesta dissertação, são inexistentes para as soluções de reforço com chapas de aço e para os laminados de CFRP. Para desenvolvimento futuro, propõe-se que sejam criadas fichas de rendimento, não só para as chapas de aço e para os laminados de CFRP mas, também, para as várias soluções de reforço existentes. Seria importante a realização de trabalhos para recolha de dados e o respetivo tratamento estatístico permitindo quantificar com maior rigor a quantidade de recursos, principalmente de equipamentos e mão-de-obra. A criação destas fichas seria útil para uniformizar, fiabilizar e facilitar a análise económica dos trabalhos de reforço de estruturas;

iii) Para completar a análise técnico-económica realizada nesta dissertação, seria interessante que a mesma fosse estendida para as mais variadas técnicas de reforço de estruturas, para sistemas estruturais e situações de obras diferentes e, ainda, para o reforço ao esforço transverso.

Referências bibliográficas

Artigos e normas

AECOPS (2017). *Tabela Salarial de 2017*.

CEB-FIP fib (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Technical Report Bulletin 14, Geneva, Switzerland.

Câmara Municipal de Lisboa [CML] (2011). *Estratégias de Reabilitação Urbana de Lisboa 2011/2024*. Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa.

CNR (2004). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*. National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, CNR-DT 200/2004.

Correia, J. (2009). *A utilização de materiais plásticos reforçados com fibras (FRP) na reabilitação de construções*. Instituto Superior Técnico, Lisboa

Correia, J. (2012). *Utilização de materiais FRP na reabilitação e reforço de estruturas*. Instituto Superior Técnico, Lisboa

Costa, A. (2014). *Reforço com pré-esforço exterior.* Instituto Superior Técnico, Lisboa

Cruz, J. (2012). *Reabilitação e reforço de estruturas - Projecto de reforço com FRP.* Instituto Superior Técnico, Lisboa

Garcia, J. L. (2016a). *Conservação e Reabilitação da Construção - Edifícios anteriores ao terramoto.* Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa

Garcia, J. L. (2016b). *Conservação e Reabilitação da Construção - Edifícios Pombalinos.* Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa

Garcia, J. L. (2016c). *Conservação e Reabilitação da Construção - Edifícios do tipo gaioleiro.* Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa

Gomes, A., & Vinagre, J. (1997). *Estruturas de Betão I- Volume III- Tabelas de cálculo.* Instituto Superior Técnico, Lisboa

Htecnic (2007). *Obra 276 - Hotel Clarion – Rua Rodrigo da Fonseca n.º 44 a 50 – Projecto de Reforço das Fundações e Estruturas de Reforço da Piscinas*. Htecnic, Lisboa.

Htecnic (2008a). *Obra 317 - Reforço de laje na Escola EB1 / J1 em Famões, Odivelas.* Htecnic, Lisboa.

Htecnic (2008b). *Obra 347 - Reforço estrutural no Hotel Tivoli – Palácio dos Seteais.* Htecnic, Lisboa.

Júlio, E. (2012). *Reabilitação e Reforço de Estruturas- Técnicas de reforço de estruturas de betão armado.* Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Matos, D. S. (2003). *Conservação e Reabilitação de Estruturas:* Apontamentos das Aulas Teóricas.

Norma Portuguesa [NP EN 1990] (2009). *Eurocódigo 0: Bases para o projecto de estruturas.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC], Lisboa.

Norma Portuguesa [NP EN 1991] (2009). *Eurocódigo 1: Acções em estruturas.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC], Lisboa.

Norma Portuguesa [NP EN 1992] (2004). *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC], Lisboa.

Norma Portuguesa [NP EN 1998] (2009). *Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC], Lisboa.

Norma Portuguesa [NP EN 1998 1-4] (2009). *Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1-4.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC], Lisboa.

Tostões, A. (2010). *Reabilitação e reforço de estruturas- Reforço de estruturas com FRP*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ventura, A.M.F.M. (2009). *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas.* Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Dissertações e Teses

Azevedo, D. M. M. (2008). *Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas de compósitos de CFRP- Recomendações para dimensionamento*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Boto, T. (2015). *Estratégias para intervenções de reparação e reforço em estruturas de Betão Armado.* Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Branco, F. G. (2011). *Reabilitação e Reforço de Estruturas-Reforço por colagem de chapas de aço.* Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Brosens, K. (2001). *Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements*. Tese de doutoramento. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica.

Juvandes, L.F.P. (2002). *Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Matthys, S. (2000). *Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement*. Tese de doutoramento. Ghent University, Ghent.

Preto, P. D. Barrocas. (2014). *Aplicação de Pré-Esforço Exterior como Técnica de Reforço de Estruturas de Betão*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Reis, L. (2001). *Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Silva, P. A. M. (2008). *Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP*. Tese de doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Sousa, A.F.V. (2008). *Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado.* Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

S&P (2017). *Ficha técnica de Laminados de fibra de carbono para reforço estrutural- S&P C-Laminate SM(150/2000).* Clever Reinforcement Ibérica, Lda., Amora.

Vieira, N. H. P. (2016). *Estudo de reabilitação de um viaduto.* Dissertação de mestrado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Livros

American Concrete Institute, ACI 440.2R. (2002). *Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI COMMITTEE 400, Farmington Hills, Michigan, USA.

Branco, A. P. (1993). *Rendimentos de mão-de-obra, materiais e equipamentos em edificação e obras públicas.* Escola Gustave Eiffel. Lisboa.

Fonseca, M. (1997). *Regras de medição na Construção.* Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Manso, A. C., Fonseca, M. S., & Espada, J. C. (2008). *Informação Sobre Custos- Fichas de Rendimento*, 2 volumes. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

Souza, V., & Ripper, T. (1998). *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.* São Paulo.

Páginas internet

Antunes, M., & Freitas, M. (2017). *Alerta vermelho para a reabilitação em Lisboa*. Acedido a 11 de Outubro de 2017 em http://expresso.sapo.pt/sociedade/2017-06-10-Alerta-vermelho-para-a-reabilitacao-em-Lisboa-1#gs.jxjiwBM

BBC (2006). *A reconstrução do Líbano*. Acedido a 16 de Abril de 2017 em http://www.bbc.com/portuguese/especial/2323_libano/page4.shtml

C3 Technologies (2017). Acedido a 7 de Maio de 2017 em http://www.c3technologies.fr/composite-material/

CYPE Ingenieros, S.A. (2017a). *Preparação de superfície de betão estrutural, com meios mecânicos.* Acedido a 14 de Junho de 2017 em http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Estruturas/Betao_armado/Preparacao_da_superficie/EHK020_Preparacao_de_superficie_de_betao_e_3_0.html

CYPE Ingenieros, S.A. (2017b). *Aluguer de plataforma elevatória.* Acedido a 16 de Junho de 2017 em http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Trabalhos_previos/Andaimes_e_equipamento_de_elevacao/Plataformas_elevatorias/Aluguer_de_plataforma_elevatoria_0_2_1_0_0.html

CYPE Ingenieros, S.A. (2017c). *Transporte para a obra e remoção de plataforma elevatória de tesoura, motor diesel, de 10 m de altura máxima de trabalho*. Acedido a 16 de Junho de 2017 em http://www.geradordeprecos.info/reabilitacao/Trabalhos_previos/Andaimes_e_equipamento_de_elevacao/Plataformas_elevatorias/Transporte_de_plataforma_elevatoria_0_2_1_0_0.html

E-composites (2017). *Tecido de fibra de carbono*. Acedido a 6 de Junho de 2017 em https://www.e-composites.com.br/TECIDO_DE_FIBRA_DE_CARBONO_RC200P/prod-4572156/

Fachaimper (2015). *Reabilitação - Antes e Depois.* Acedido a 16 de Abril de 2017 em http://www.fachaimper.com/fachaimper/content/antes-e-depois.

Fibertex (2017). *Tecido de Fibra de Aramida – Tecidos para Compósitos*. Acedido a 6 de Junho de 2017 em http://www.fibertex.com.br/produto/tecidos-para-compositos-de-aramida/

Geoconcret (2017). *Concreto projetado por via húmida.* Acedido a 7 de Junho de 2017 em http://geoconcret.com.br/servicos/#prettyPhoto

Ipressjournal (2015). *O edifício Heron Castilho passou a ser gerido pela JLL*. Acedido a 16 de Abril de 2017 em http://www.ipressjournal.pt/o-edificio-heron-castilho-passou-a-ser-gerido-pela-jll/

NCREP (2017*). Monotorização de estrutura de reforço, V. N. Gaia.* Acedido a 20 de Maio de 2017 em http://www.ncrep.pt/view.php?id=14325

Paixão por Lisboa (2016). *Rua Castilho.* Acedido a 16 de Abril de 2017 em https://paixaoporlisboa.blogs.sapo.pt/rua-castilho-77582

PerfuraCon (2017). *Empresa de reforço estrutural fibra de carbono*. Acedido a 6 de Junho de 2017. http://www.perfuraconcreto.com.br/servicos/empresa-de-reforco-estrutural-fibra-de-carbono

Portal da Habitação (2016). *Sociedades de reabilitação urbana*. Acedido a 20 de Maio de 2017 em https://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/reabilitacao/sociedadesreabilitacaourbana/menusru.html

Reforma fácil (2011). *Fibra de aço reciclado é novidade na construção civil*. Acedido a 21 de Maio de 2017 em http://reformafacil.com.br/produtos/pisos_revestimentos/fibra-de-aco-reciclado-e-novidade-na-construcao-civil/

Stanck (2017). *Reforço Vigas Perfis Metálicos.* Acedido a 21 de Maio de 2017 em http://www.stanck.com.br/coberturas-metalicas/reforco-vigas-perfis-metalicos

WGA (2016). *Reforço estrutural – Materiais compósitos.* Acedido a 25 de Maio de 2017 em http://wgaengenharia.blogspot.pt/2016/04/reforco-estrutural-materiais-compositos.html

Relatórios

Da Costa, A. G., & Juvandes, L. F. P. (2002). *Reforço e Reabilitação de Estruturas- Módulo 2*: Formação Professional- Ordem dos Engenheiros. Lisboa

Instituto Nacional de Estatística [INE] (2017). *Estatística da Construção e Habitação 2016*. Lisboa

Instituto Nacional de Estatística [INE] & Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC]. (2013). *O Parque Habitacional e a sua Reabilitação- Análise da Evolução entre 2001 e 2011*. Lisboa

Revista

Appleton, J., & Gomes, A. (1997a). *Reforço de Estruturas de Betão Armado por Adição de Armaduras Exteriores,* Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas Nº41.

Appleton, J., & Gomes, A. (1997b). *Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das secções,* Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas Nº42.

ANEXOS

ANEXO 1

Ficha técnica da resina *epoxy*

ANEXO 2

Orçamento das chapas de aço

ANEXO 3

Orçamento dos cortes, soldadura e metalização da chapa de aço de 2,00x1,00m

ANEXO 4

Orçamento dos cortes, soldadura e metalização da chapa de aço de 3,00x1,50m

ANEXO 5

Ficha técnica do gerador insonorizado HYW-45KVA-T6B-B10

ANEXO 6

Orçamento dos laminados CFRP e da resina *epoxy*

ANEXO 1

S&P Resin 220

Adesivo Epoxy

SP-PT.08.01.23.00

CARACTERÍSTICAS GERAIS

DESCRIÇÃO

A S&P Resin 220 é uma resina epoxy bi-componente, sem adição de solventes, tixotrópica, de cor cinzenta, especialmente desenvolvida para colagem estrutural de laminados de fibra de carbono (S&P C-Laminate).

As propriedades do adesivo, tanto em estado fresco como endurecido foram testadas no sistema de reforço, e incorporadas no Software de Cálculo S&P, FRP Lamella.

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- Colagem por pressão de: S&P C-Laminate em superfícies de betão, aço e de madeira
  - chapas de aço
  - colagens diversas em betão

VANTAGENS DO PRODUTO

- De aplicação imediata (não é necessário filler)
- Tempo de trabalhabilidade adequado
- Elevada tensão de aderência
- Permanece consistente em superfícies verticais e horizontais, como tectos
- Elevada resistência mecânica
- Endurece sem retracção
- Sem adição de solventes
- Impermeável à água e ao vapor de água

DADOS DO PRODUTO

Descrição Genérica
S&P Resin 220

Aparência / Cor
Comp. A – solução de resina epoxy, cor cinzenta clara
Comp. B – endurecedor de resina epoxy, cor preta

Fornecimento
Unidades de: 5 ou 15 kg (Comp. A + Comp. B)
Paletes de: 42 x 5 kg (embalagem)/ 28 x 15 kg (embalagem)

Armazenamento
Comp. A & B: Período de validade de 1 ano, quando armazenados em locais com temperatura entre +10 °C e +25 °C.
Homogeneizar antes de usar; aquecer gradualmente e homogeneizar material congelado ou muito frio.

12.2016

www.sp-reinforcement.pt

S&P Resin 220

Adesivo Epoxy

PREPARAÇÃO

Preparação do suporte

O reforço só se efectiva quando o substrato possui uma capacidade resistente mínima de 1,5 N/mm².

O substrato deve estar isento de substâncias que possam prejudicar a aderência (óleo, gordura, cera, etc.), e isento de pó. A superfície deve estar limpa, coesa e seca (pelo menos numa extensão elevada).

Humidade máxima do suporte: 4%

Mistura

Mexer os componentes individuais separadamente.

Adicionar o componente A ao componente B e mexer continuamente até que a cor seja cinzento uniforme e a mistura isenta de vestígios.

Colocar a mistura num recipiente diferente, para confirmar a homogeneidade da mistura, ou pôr em evidência as inadequações que possam existir.

Misturar com pá misturadora a baixa rotação (<400 rot/min) para minimizar bolhas de ar na mistura.

APLICAÇÃO

Antes de a resina ser aplicada, a superfície do laminado deve ser limpa com um pano embebido em S&P Cleaner.

Onde necessário, aplicar uma camada de resina com uma espessura de aproximadamente 1 mm sobre o substrato utilizando uma espátula. Aplicar uma camada uniforme com 2-3 mm de espessura sobre o laminado. Durante o período em que a resina é trabalhável, pressionar o laminado sobre a camada de resina previamente aplicada, de forma uniforme, com um rolo de pressão, até que uma porção da resina surja nos bordos em ambos os lados do laminado. Deverá ficar uma espessura residual mínima de 1 mm; 4 mm é o limite máximo de espessura de resina de colagem. A melhor forma de aplicar a resina é através de um doseador/dispensador S&P.

Após a resina ter endurecido, verificar que a aderência se efectivou ao longo de toda a área batendo sobre a superfície (tap test). A superfície dos laminados pode ser revestida ou pintada, de forma a cumprir critérios estéticos.

Temperatura de Aplicação

- O adesivo é trabalhável de +8 °C a +35 °C.

A temperatura do substrato deve estar pelo menos 3° C acima da temperatura do ponto de orvalho.

Consumo

- Aproximadamente 1,75 kg/m² por mm de espessura

DADOS TÉCNICOS

S&P RESIN 220 Adesivo Epoxy	
Densidade	1.7 – 1.8 g/cm³ (23 °C)
Relação de mistura A:B	4 : 1 (em peso) 4 : 1 (em volume)
Temperatura de aplicação	+ 8 °C — + 35 °C
Tempo de trabalhabilidade EN ISO 9514:2005	Aprox. 25 minutos (+ 23 °C)
Resistência à compressão EN 1504-4 (EN 12190)	> 70 N/mm²
Módulo de elasticidade DIN EN ISO 178	> 7 100 N/mm²
Resistência ao corte DIN EN 12615	> 26 N/mm²
Dureza Shore-D DIN EN 53505-D/EN ISO 868	87 - 93
Tensão de aderência DIN EN 13892-8	> 3 N/mm² (em betão; 3 dias; a 20 °C) > 2 N/mm² (com S&P Resin 230) > 3 N/mm² (S&P C-Laminate) > 14 N/mm² (aço/ aço – sem primário)

www.sp-reinforcement.pt

S&P Resin 220

Adesivo Epoxy

MARCA-CE

CE

S&P Resin 220 é um produto conforme a EN 1504-4.

ENSAIOS

Todos os dados técnicos desta ficha baseiam-se em testes laboratoriais. Podem verificar-se desvios aos valores apresentados por circunstâncias fora do nosso controlo.

Contacte-nos para informação detalhada sobre ensaios efectuados.
Estão disponíveis relatórios de ensaio.

LIMPEZA

A mistura não endurecida pode ser removida com S&P Cleaner.

A mistura endurecida apenas pode ser removida através de meios mecânicos.

HIGIENE E SEGURANÇA

Precauções

É recomendado o uso de vestuário apropriado e luvas de protecção em borracha.
Caso a mistura entre em contacto com a pele, lavar de imediato com sabão e água abundantes. Em caso de contacto com os olhos, lavar com água abundante. Adicionalmente, usar kit de limpeza (disponível em farmácias).
Procure assistência médica imediatamente.
As embalagens vazias devem ser depositadas em local de acordo com a legislação ambiental aplicável.

As fichas de segurança podem ser obtidas através dos nossos serviços de apoio ao cliente pelo nº de telefone +351 212 253 371 ou email info@reinforcement.pt.

Os produtos da gama S&P são para uso industrial. Devem ser instalados por pessoal especializado e por profissionais competentes com formação adequada. Devem ser seguidas as instruções de instalação adequadas que constam nos manuais de aplicação S&P e nos diversos "Guidelines", documentos / notas técnicas existentes.

É da responsabilidade do dono de obra, seu representante ou empreiteiro determinar a adequação e utilização dos produtos S&P.
Antes de usar qualquer produto S&P deve consultar um profissional qualificado para o aconselhamento técnico sobre os nossos produtos, sendo as informações fornecidas baseadas nos nossos melhores conhecimentos científicos e práticos.

São reservados os direitos à alteração do produto.
São aplicáveis as condições gerais da venda e do transporte.
É considerada válida a versão mais recente da Ficha Técnica disponibilizada pelos nossos serviços técnicos.

Clever Reinforcement Ibérica, Lda

Escritório:
Rua José Fontana, Nº 76
Zona Industrial Stª Marta de Corroios
2845-408 Amora

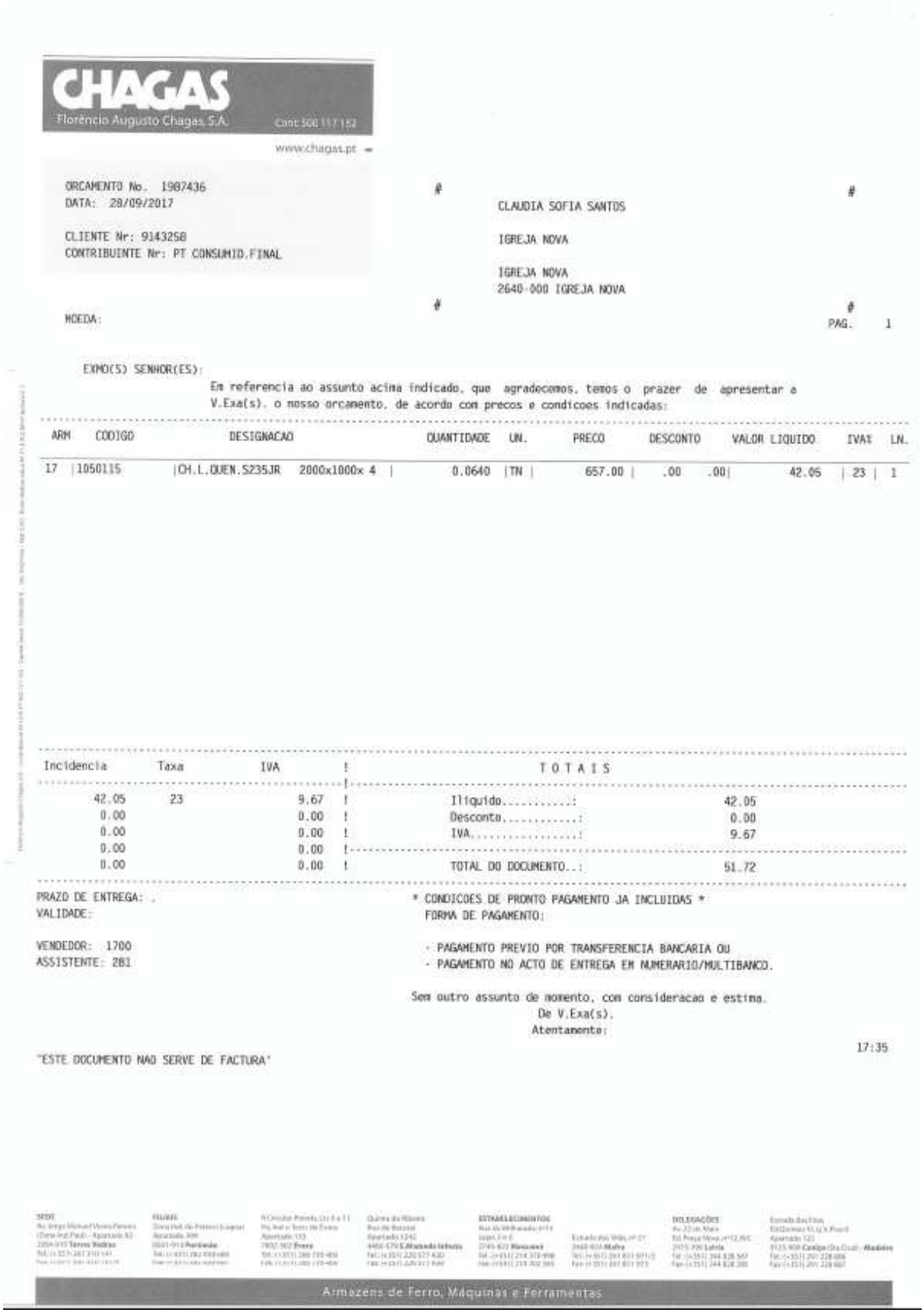
Fábrica:
Rua de Portugal, Nº 10
Zona Industrial das Fontainhas
7350-297 Elvas

Tel.+ 351 212 253 371
Fax.+ 351 212 252 436

www.sp-reinforcement.pt
info@sp-reinforcement.pt

Clever Reinforcement Ibérica, Lda - NIF: 507 128 249 - M.C.R.C. de Elvas - C. Social: 50.000 €

ANEXO 2



CHAGAS
Florêncio Augusto Chagas, S.A. Cont.500 117 152
www.chagas.pt

ORCAMENTO No. 1987436
DATA: 28/09/2017

CLIENTE Nr: 9143258
CONTRIBUINTE Nr: PT CONSUMID.FINAL

CLAUDIA SOFIA SANTOS

IGREJA NOVA

IGREJA NOVA
2640-000 IGREJA NOVA

MOEDA: PAG. 1

EXMO(S) SENHOR(ES):

Em referencia ao assunto acima indicado, que agradecemos, temos o prazer de apresentar a V.Exa(s). o nosso orcamento, de acordo com precos e condicoes indicadas:

ARM	CODIGO	DESIGNACAO	QUANTIDADE	UN.	PRECO	DESCONTO	VALOR LIQUIDO	IVA%	LN.
17	1050115	CH.L.QUEN.S235JR 2000x1000x 4	0.0640	TN	657.00	.00 .00	42.05	23	1

Incidencia	Taxa	IVA		TOTAIS	
42.05	23	9.67		Iliquido.....:	42.05
0.00		0.00		Desconto.....:	0.00
0.00		0.00		IVA.....:	9.67
0.00		0.00			
0.00		0.00		TOTAL DO DOCUMENTO..:	51.72

PRAZO DE ENTREGA: .
VALIDADE:

VENDEDOR: 1700
ASSISTENTE: 281

* CONDICOES DE PRONTO PAGAMENTO JA INCLUIDAS *
FORMA DE PAGAMENTO:

- PAGAMENTO PREVIO POR TRANSFERENCIA BANCARIA OU
- PAGAMENTO NO ACTO DE ENTREGA EM NUMERARIO/MULTIBANCO.

Sem outro assunto de momento, com consideracao e estima.
De V.Exa(s).
Atentamente:

17:35

"ESTE DOCUMENTO NAO SERVE DE FACTURA"

SEDE
FILIAIS
ESTABELECIMENTOS
DELEGAÇÕES
Armazens de Ferro, Maquinas e Ferramentas

CHAGAS
Florêncio Augusto Chagas, S.A.
Cont.500 117 152
www.chagas.pt

ORCAMENTO No. 1987448
DATA: 28/09/2017

CLIENTE Nr: 9143258
CONTRIBUINTE Nr: PT CONSUMID.FINAL

CLAUDIA SOFIA SANTOS

IGREJA NOVA

IGREJA NOVA
2640-000 IGREJA NOVA

MOEDA:

PAG. 1

EXMO(S) SENHOR(ES):

En referencia ao assunto acima indicado, que agradecemos, temos o prazer de apresentar a V.Exa(s). o nosso orcamento, de acordo com precos e condicoes indicadas:

ARM	CODIGO	DESIGNACAO	QUANTIDADE	UN.	PRECO	DESCONTO	VALOR LIQUIDO	IVA%	LN.
17	1050715	CH.L.QUEN.S235JR 3000x1500x 4	0.1440	TN	657.00	.00 .00	94.61	23	1

Incidencia	Taxa	IVA		TOTAIS	
94.61	23	21.76		Ilíquido.....:	94.61
0.00		0.00		Desconto.....:	0.00
0.00		0.00		IVA.....:	21.76
0.00		0.00			
0.00		0.00		TOTAL DO DOCUMENTO..:	116.37

PRAZO DE ENTREGA: .
VALIDADE:

VENDEDOR: 1700
ASSISTENTE: 281

* CONDICOES DE PRONTO PAGAMENTO JA INCLUIDAS *
FORMA DE PAGAMENTO:

- PAGAMENTO PREVIO POR TRANSFERENCIA BANCARIA OU
- PAGAMENTO NO ACTO DE ENTREGA EM NUMERARIO/MULTIBANCO.

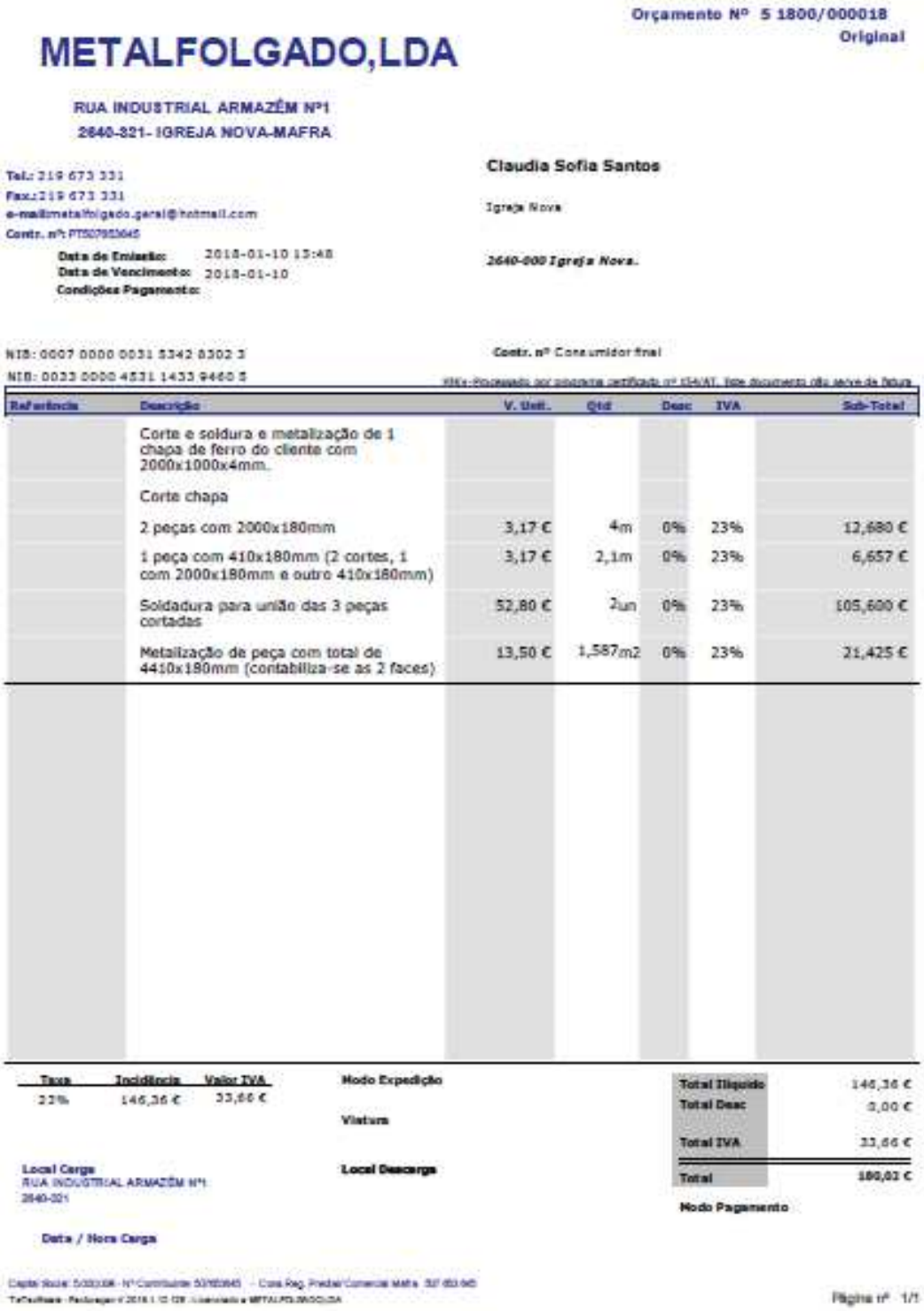
Sem outro assunto de momento, com consideracao e estima.
De V.Exa(s).
Atentamente:

17:44

"ESTE DOCUMENTO NAO SERVE DE FACTURA"

Armazéns de Ferro, Máquinas e Ferramentas

ANEXO 3



Orçamento Nº 5 1800/000018
Original

METALFOLGADO,LDA

RUA INDUSTRIAL ARMAZÉM Nº1
2640-321- IGREJA NOVA-MAFRA

Tel.: 219 673 331
Fax.:219 673 331
e-mail:metalfolgado.geral@hotmail.com
Contr. nº: PT507853645

Data de Emissão: 2018-01-10 13:48
Data de Vencimento: 2018-01-10
Condições Pagamento:

Claudia Sofia Santos

Igreja Nova

2640-000 Igreja Nova.

NIB: 0007 0000 0031 5342 8302 3
NIB: 0033 0000 4531 1433 9460 5

Contr. nº Consumidor final

Hits-Processado por programa certificado nº 154/AT. Este documento não serve de fatura

Referência	Descrição	V. Unit.	Qtd	Desc	IVA	Sub-Total
	Corte e soldura e metalização de 1 chapa de ferro do cliente com 2000x1000x4mm.					
	Corte chapa					
	2 peças com 2000x180mm	3,17 €	4m	0%	23%	12,680 €
	1 peça com 410x180mm (2 cortes, 1 com 2000x180mm e outro 410x180mm)	3,17 €	2,1m	0%	23%	6,657 €
	Soldadura para união das 3 peças cortadas	52,80 €	2un	0%	23%	105,600 €
	Metalização de peça com total de 4410x180mm (contabiliza-se as 2 faces)	13,50 €	1,587m2	0%	23%	21,425 €

Taxa	Incidência	Valor IVA
23%	146,36 €	33,66 €

Modo Expedição

Viatura

Local Descarga

Total Ilíquido	146,36 €
Total Desc	0,00 €
Total IVA	33,66 €
Total	180,02 €

Modo Pagamento

Local Carga
RUA INDUSTRIAL ARMAZÉM Nº1
2640-321

Data / Hora Carga

Capital Social: 5.000,00€ - Nº Contribuinte 507853645 - Conservatória Reg. Predial/Comercial Mafra 507 853 645
TeCnoware - Packaged v 2018.1.10.128 - Licenciado a METALFOLGADO,LDA

Página nº 1/1

ANEXO 4

Orçamento Nº S 1800/000019
Original

METALFOLGADO,LDA

RUA INDUSTRIAL ARMAZÉM Nº1
2640-321- IGREJA NOVA-MAFRA

Tel.: 219 673 331
Fax.:219 673 331
e-mail:metalfolgado.geral@hotmail.com
Contr. nº: PT507853645

Data de Emissão: 2018-01-10 13:53
Data de Vencimento: 2018-01-10
Condições Pagamento:

Claudia Sofia Santos

Igreja Nova

2640-000 Igreja Nova.

NIB: 0007 0000 0031 5342 8302 3
NIB: 0033 0000 4531 1433 9460 5

Contr. nº Consumidor final

cód-Processado por programa certificado nº 1541/AT. Este documento não serve de fatura

Referência	Descrição	V. Unit.	Qtd	Desc	IVA	Sub-Total
	Corte e soldura e metalização de 1chapa de ferro do cliente com, 3000x1500x4mm.					
	Corte chapa					
	5 peças com 3000x180mm (5x3000mm=15000mm)	3,17 €	15m	0%	23%	47,550 €
	5 com peças 1410x180mm, (5x1410mm=7050mm e outro com 5 com 180mm=900mm)	3,17 €	7,95m	0%	23%	25,202 €
	Soldadura para união das peças cortadas(3000+1410mm)	52,80 €	5un	0%	23%	264,000 €
	Metalização de 5 peças com total um 4410x180mm (contabiliza-se 2 faces da peça).	13,50 €	7,938m2	0%	23%	107,163 €

Taxa	Incidência	Valor IVA
23%	443,91 €	102,10 €

Modo Expedição

Viatura

Local Descarga

Total Ilíquido	443,91 €
Total Desc	0,00 €
Total IVA	102,10 €
Total	546,01 €

Modo Pagamento

Local Carga
RUA INDUSTRIAL ARMAZÉM Nº1
2640-321

Data / Hora Carga

Capital Social: 5.000,00€ - Nº Contribuinte 507853645 - Cons.Reg. Predial Comercial Mafra 507 853 645
TeTraSoft - Facturação © 2018.1.12.126 - Licenciado a METALFOLGADO,LDA

Página nº 1/1

ANEXO 5

HIMOINSA®
THE ENERGY

Modelo: HYW-45 T6B
Insonorizado
Motorisado por YANMAR

- B10
- AGUA
- TRIFÁSICO
- 60 Hz
- 0,8 FATOR DE POTÊNCIA
- DIESEL

Dados do Grupo Gerador

Volts	Standby KVA	Standby KW	Prime KVA	Prime KW	Amp
220/127	45,1	36,08	40,7	32,56	106,8
380/220	41	32,8	37	29,6	56,2
440/254	45,1	36,08	40,7	32,56	53,4
480/277	45,1	36,08	40,7	32,56	49

Os grupos electrogéneos Himoinsa cumprem com a marcação CE que inclui as seguintes directivas:

- 2006/42/CE Segurança de Máquinas
- 2006/95/CE de baixa tensão
- 2004/108/CE de compatibilidade Eletromagnética
- 2000/14/CE Emissões sonoras de máquinas de uso ao ar livre (modificada por 2005/88/CE)

- EN 12100, EN 13857, EN 60204

Condições ambientais de referência segundo norma ISO 8528-1:2005: Pressão: 1000 mbar., Temperatura: 25ºC, Umidade relativa : 30%.

Regime de potência Prime Power (PRP):
De acordo com a norma ISO 8528-1:2005, é a potência máxima disponível para uso em cargas variáveis por um número ilimitado de horas por ano entre os intervalos de manutenção recomendados pelo fabricante, e nas condições ambientais estabelecidas por ele. A potência média consumível durante um período de 24 horas, não deve exceder 70% do PRP.

Regime de potência Standby ou Emergência (ESP):
De acordo com a norma ISO 8528-1:2005, é a potência máxima disponível sob cargas variáveis para uso em caso de falta de energia de uma fonte principal ou rede em condições de teste para um número limitado de horas por ano, entre os intervalos de manutenção recomendados pelo fabricante e nas condições ambientais estabelecidas por ele. O consumo médio dentro de um período de 24 horas não deve exceder 70% do ESP.

SEDE HIMOINSA:
Fábrica: Ctra. Murcia - San Javier, Km. 23,6 | 30730 SAN JAVIER (Murcia) Spain
Tel.+34 968 19 11 28 Fax +34 968 19 12 17 Fax +34 968 19 04 20 info@himoinsa.com www.himoinsa.com

Centros Productivos:
ESPANHA • FRANÇA • INDIA • CHINA • EUA • BRASIL

Filiales:
ITÁLIA | PORTUGAL | POLÓNIA | ALEMANHA | SINGAPURA | EMIRADOS ÁRABES | MÉXICO | PANAMÁ | ARGENTINA | ANGOLA | UK

Himoinsa do Brasil - Rua Olavo Machado, 120 - Bairro: CINCO - Contagem – MG - Brasil | CEP: 32341-562
Tel.: +55 (31) 3198-8600 | E-mail: brasil@himoinsa.com | www.himoinsa.com.br

HIMOINSA THE ENERGY

HIMOINSA®
THE ENERGY

Modelo: HYW-45 T6B
Insonorizado
Motorisado por YANMAR

Especificações do Motor 1.800 r.p.m.

Motor		PRP	STANDBY
Potência Nominal	kW	36,4	40,8
Fabricante		YANMAR	
Modelo		4TNV98 GGEH	
Tipo de Motor		Diesel 4 tempos	
Tipo de Injecção		Direta	
Tipo aspiração		Natural	
Cilindros, numero e disposições		4 - L	
Diâmetro x Curso	mm	98 x 110	
Cilindrada total	L	3,319	
Sistema de refrigeração		Liquido refrigeração	
Especificações do óleo motor		SAE 3 class 10W30 / API grade CD,CF	
Relação de compressão		18,5	
Consumo combustivel Standby	l/h	10,58	
Consumo combustivel 100 % PRP	l/h	9,23	
Consumo combustivel 75 % PRP	l/h	6,83	
Consumo combustivel 50 % PRP	l/h	4,89	
Consumo de óleo a plena carga	g/kwh	0,27	
Capacidade total de óleo	L	10,5	
Capacidade total de líquido refrigerante	L	9	
Regulador	Tipo	Mecânico	
Filtro de Ar	Tipo	Seco	
Diâmetro interior de saida de escape	mm	45	

Himoinsa do Brasil - Rua Olavo Machado, 120 - Bairro: CINCO - Contagem – MG - Brasil | CEP: 32341-562
Tel.: +55 (31) 3196-8800 | E-mail: brasil@himoinsa.com | www.himoinsa.com.br

HIMOINSA THE ENERGY

ANEXO 6

RE: Orçamento de aplicação de laminados para incluir na dissertação

JP Joana Pereira <joana.pereira@sp-reinforcement.pt>
sex 22-09-2017 18:43
Para: 'Claudia Folgado Santos' (claudiafolgadosantos@hotmail.com)
Cc: Filipe Dourado (Filipe.dourado@sp-reinforcement.pt)

Respondeu em 22-09-2017 18:51.

Olá Cláudia,

Relendo o email que lhe enviei, poderá não ter ficado clara a informação. Passo a detalhar:

Custo dos materiais:

- S&P C-Laminate 150/1000 150/1.2 – 16,28 €/m
- S&P C-Laminate 150/2000 150/1.4 – 18,47 €/ m

Note que estes valores estão indicados por metro linear de laminado.
Para o cálculo do valor total dos materiais, terá de considerar os comprimentos respectivos.

Consumo aproximado de adesivo para laminado com 150 mm de largura – 1050 g/m

- S&P Resin 220 – 7,65 €/ kg; custo do kit de 15 kg – 114,75 €

Custo de materiais e mão-de-obra:
(entre 40 – 100 €/ m)
Com a informação que me dá, sugiro que considere um valor total na ordem dos 60-70 €/m.

Para obter o custo da mão-de-obra, subtraia ao custo de materais e mão-de-obra o custo dos materiais.

Para o cálculo da parcela do custo do adesivo, deve considerar os 114,75/ 7,80. Mesmo não utilizando o kit completo, o material sobrante fica inutilizado.

Fui de encontro às s/ necessidades?
Espero que sim.

Desejo um bom fim-de-semana, e bom trabalho.

Melhores Cumprimentos,
Joana Pereira | Sales Engineer | Structural Reinforcement | S&P Clever Reinforcement Ibérica - Rua José Fontana nº76, Zona Industrial Stª Marta de Corroios, !