

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Estudo de viabilidade técnica e económica do reforço de elementos estruturais.

CARLOS ALBERTO CARDOSO MONTEIRO

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil.

Orientadores:

Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva
Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista

Júri:

Presidente: Mestre Cristina Xavier de Brito Machado
Vogal: Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto
Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Julho de 2017

Agradecimentos

Pelo desenvolvimento deste trabalho exprimo o meu reconhecimento à instituição do qual fiz parte estes anos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, presando o meu mais profundo agradecimento a todos os professores e colegas que contribuíram e me acompanharam nesta minha jornada académica e que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização do trabalho proposto.

No entanto o meu maior agradecimento irá para o Professor Doutor Pedro Raposeiro da Silva sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho expressando assim o meu mais sentido agradecimento pela disponibilidade demonstrada desde início.

Ao professor Doutor Luís Manuel da Rocha Evangelista, co-orientador deste trabalho, pela disponibilidade e ajuda sempre demonstrada, tendo já tido hipótese de lhe agradecer a sua contribuição nesta minha jornada académica.

Ao meu grande amigo e colega Miguel Bastos que me acompanhou sempre nas noitadas a quando da realização deste trabalho.

E por ultimo e mais importante, aos meus pais, sem os quais esta etapa não seria possível de ser realizada, expressando o meu maior agradecimento a ambos, e à minha mulher pela compreensão e apoio ao longo destes anos todo de formação.

Resumo

O âmbito do presente trabalho visa a realização de um levantamento de três tipos de reforço estrutural comuns nos dias de hoje, o mesmo será feito através de um estudo síntese de obras já realizadas com três tipos de reforço e mencionando algumas obras realizadas em Portugal.

O estudo síntese terá como base uma primeira análise a obras que foram alvo de um reforço estrutural com recurso a mantas de carbono, seguido de uma análise a obras com utilização de chapas metálicas e por fim, obras onde o método de reforço estrutural realizado foi o aumento de secção, por encamisamento.

Será realizado também uma análise aos materiais a utilizar bem como métodos construtivos, fazendo uma comparação em termos de rendimentos dos três tipos de reforço para assim avaliar o melhor método a adotar para diferentes problemas estruturais.

Por fim, a realização de uma análise económica através da mão de obra necessária para a boa realização dos trabalhos de reforço, bem como um levantamento referente ao custo dos materiais a aplicar ou ferramentas a utilizar, estudando os rendimentos necessários e matérias primas para uma boa realização dos trabalhos.

Palavras chave

Reforço estrutural;

Mantas de carbono;

Chapas metálicas;

Encamisamento;

Análise de custos.

Abstract

The goal of the present work is the realization of a survey of three types of structural reinforcement which are common nowadays. It will be done through a study of the synthesis work's of construction work already performed with these three types of reinforcement and mentioning some done in Portugal.

The synthesis study will be based on a first analysis of works that have undergone a structural reinforcement using carbon blankets, followed by an analysis of works using sheet metal and, finally, works where the method of structural reinforcement carried out was the Increased sectioning, by reinforced concrete jacketing.

An analysis of the materials used as well as the constructive methods will be made, comparing the performance of the three types of reinforcement, in order to evaluate the best method to adopt for different structural problems.

Finally, an economic analysis will be carried out considering the manpower required for the proper execution of the reinforcement work, as well as a survey of the cost of the materials to be applied or the tools to be used, studying the necessary yields and raw materials necessary for the work.

Keywords

Structural reinforcement;

Carbon blankets;

Sheet metal;

Reinforced concrete jacketing;

Cost analysis.

Abreviaturas

AFRP	Fibra de aramida reforçada, (<i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i>);
FRP	Polímeros reforçados com fibras (<i>Fibre Reinforced Polymer</i>);
CFRP	Fibra de carbono reforçada, (<i>Carbon fiber reinforced polymer</i>);
GFRP	Fibra de vidro reforçada, (<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>);
EBR	<i>Epoxy Bonded Reinforcement</i>
NSMR	<i>Near Surface Mounted Reinforcement</i>

Índice Geral

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
PALAVRAS CHAVE	III
ABSTRACT	IV
KEYWORDS	IV
ABREVIATURAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS	4
2.1 MANTAS DE CARBONO	4
2.1.1 Aplicação pratica do reforço por mantas de carbono.....	9
2.2 CHAPAS METÁLICAS.....	17
2.2.1 Aplicação pratica do reforço por chapas metálicas	23
2.3 AUMENTO DA ÁREA DA SECÇÃO, POR ENCAMISAMENTO	27
2.3.1 Aplicação pratica do reforço por aumento da área da secção, por encamisamento.....	31
3. ANÁLISE DE CUSTOS	38
3.1 INTRODUÇÃO.....	38
3.2 ANÁLISE DE CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	38
3.2.1 Estimativa de custos e tempo.....	40
3.2.2 Analise da mão de obra vs tempo de realização.....	43
3.2.3 Comparação de valores vs qualidade e eficiência.....	49
4. CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

Índice de Figuras

Figura 1- Pormenor de aplicação de CFRP. (Carvalho, 2010).....	5
Figura 2- Camadas de reforço, (Corsini R. 2012)	6
Figura 3- Passos gerais para aplicação do reforço, (Corsini R. 2012)	7
Figura 4 – Preparação da superfície com lixadeira elétrica com disco diamantado aplicado. (tecknicas.com.br)	9
Figura 5 – Aplicação da manta de carbono. (tecknicas.com.br)	10
Figura 6 – Superfícies regularizadas com argamassa epoxídica.(tecknicas.com.br)	10
Figura 7 – Mantas de carbono utilizadas, já cortadas.(tecknicas.com.br).....	11
Figura 8 – Preparação da superfície para aplicação do reforço. (tecknicas.com.br).....	12
Figura 9 – Reforço das vigas e controlo de qualidade, (Costa A, et al 2004).	12
Figura 10 – Ponte sobre o Rio Caldo, Geres. (Betar.pt).....	13
Figura 11 – Aplicação laminados de carbono. (stb.pt).....	14
Figura 12 – Ancoragem nas extremidades por mantas de carbono. (stb.pt)	14
Figura 13 – Alívio da sobrecarga por auxílio de macaco hidráulico. (stb.pt)	14
Figura 14 – Tratamento da superfície e boleamento das arestas. (stb.pt)	15
Figura 15- aplicação da resina epóxi nas extremidades dos laminados a ancorar. (stb.pt).....	16
Figura 16 – Aplicação da resina epóxi nos sobre os laminados. (stb.pt)	16
Figura 17 – Regularização da superfície com argamassa hidráulica. (stb.pt)	16

Figura 18 – Fissuração típica causada por deficiência de resistência à flexão. (Fernando G., et al 2002).....	17
Figura 19 – Aplicação da chapa metálica. (Fernando G., et al 2002)	17
Figura 20 – Pormenor da fixação da chapa metálica à viga. (Fernando G., et al 2002)	18
Figura 21 – Viga com estribos metálicos. . (Fernando G., et al 2002).....	18
Figura 22 – Corte da viga, estribo envolvendo viga. (Fernando G., et al 2002)	18
Figura 23 – Pormenor da fixação da chapa metálica à viga. (Fernando G., et al 2002)	19
Figura 24 – Momento torsor. (Fernando G., et al 2002)	19
Figura 25 – Estribos envolventes da estrutura. (Fernando G., et al 2002).....	20
Figura 26 – Corte do pormenor do estribo e pormenor da fixação da chapa. (Fernando G., et al 2002).....	20
Figura 27 – Utilização ou não de bucha para o reforço à flexão (Branco F. 2011).	21
Figura 28 – Utilização ou não de bucha para o reforço ao esforço transversal (Branco F. 2011).	21
Figura 29 – Representação de parte das 24 moradias. (trimetrica.com.pt)	23
Figura 30 – Reforço de um pilar das moradias. (trimetrica.com.pt)	23
Figura 31 – Aplicação e selagem das chapas metálicas. (stap.pt).....	24
Figura 32 – Aplicação dos grampos e perfis HEB300. (stb.pt).....	25
Figura 33 – Reforço exterior das vigas. (stb.pt).....	25
Figura 34 – Resultado final da laje apos regularização e pintura e ligação entre perfil metálico HEB300 e viga reforçada. (stb.pt).....	26

Figura 35 – Central dos CTT de Cabo Ruivo, Lisboa. (a2p.pt)	26
Figura 36 – Reforço das vigas com chapas metálicas. (a2p.pt)	27
Figura 37 – Ilustração dos tipos de encamisamento.....	28
Figura 38 – Ilustração da disposição das armaduras em vigas.....	29
Figura 39 - Ilustração da disposição das armaduras em pilares.	30
Figura 40 – Tipos de tratamento de superfície.....	31
Figura 41 – Edifício dos CTT Av. Da Republica. (a2p.pt)	32
Figura 42 – Pilares reforçados por encamisamento. (a2p.pt).....	33
Figura 43 – Vista geral da Central de Cerveja. (stap.pt)	34
Figura 44 – Zona degradada. (stap.pt).....	34
Figura 45 – Reforço dos pilares. (htecnic.pt)	35
Figura 46 – Execução de novos pilares. (htecnic.pt).....	35
Figura 47 – Pintura nas zonas reparadas. (htecnic.pt).....	36
Figura 48 – Reforço dos pilares por encamisamento. (htecnic.pt).....	36
Figura 49 – Execução do reforço por encamisamento dos pilares nas zonas enterradas. (htecnic.pt).....	37
Figura 50 – Regularização das superfícies reparadas e pintura final. (htecnic.pt).....	37

Índice de Tabelas

Tabela 1- Reforço estrutural por mantas de Carbono.	40
Tabela 2 – Reforço estrutural por chapas de aço.	41
Tabela 3 – Reforço estrutural por aumento de secção, por encamisamento.	42
Tabela 4 – Mão de obra do reforço com mantas de carbono.	43
Tabela 5 – Trabalhos para realização do reforço por mantas de carbono.	44
Tabela 6 – Mão de obra do reforço com chapas de aço.	45
Tabela 7 - Trabalhos para realização do reforço por chapas de aço.	45
Tabela 8 – Mão de obra do reforço com aumento de secção, por encamisamento.	46
Tabela 9 - Trabalhos para realização do reforço por aumento de secção, por encamisamento.	48

1. Introdução

O reforço diferencia-se da reparação quando se entende que uma ação afeta o comportamento da estrutura, melhorando assim a sua resistência e/ou ductilidade aferindo um melhor desempenho relativamente ao seu desempenho inicial, já a reparação são todas as ações que têm como intuito repor à estrutura todo o seu desempenho inicial, corrigindo e prevenindo efeitos que possam degradar a mesma, (Santos T. 2008).

Foi em meados do século XX que se começou a falar no tema de reforço estrutural, altura em que as primeiras estruturas de betão armado não experimentais atingiam o fim do seu período de vida útil, com as limitações dos materiais existentes na época e tecnologia, as primeiras abordagens passaram pelo aumento das secções dos elementos ou a alteração do sistema estrutural, no entanto era uma abordagem que requeria um grande consumo de recursos. Com a chegada dos primeiros anos da década de 60, começou-se a fazer a aplicação de chapas metálicas, solução bastante mais rápida, simples e muito menos intrusiva (Carvalho T. 2010).

Contudo, foi com a introdução dos Fiber Reinforced Polymers (FRP), que se originou uma alteração radical para a abordagem do tema do reforço estrutural, tudo devido às suas propriedades físicas e mecânicas, originando um grande número de estudos e investigações a este tipo de material (Carvalho T. 2010).

A necessidade de reforço estrutural pode ter diversas causas, pode ser manifestada em diferentes fases da vida de uma estrutura. Essas causas podem ser originadas na conceção da estrutura, como por exemplo, a ocorrência de um erro de dimensionamento na sua execução, devido à má qualidade dos materiais ou mesmo durante a sua utilização. Esta última devido a uma utilização despreocupada da estrutura, provocada por uma manutenção inadequada ou mesmo inexistente.

Para cada problema poderá haver mais do que uma solução, no entanto há sempre a solução mais indicada podendo esta ser ao nível económico ou devido às limitações da estrutura.

Uma intervenção numa estrutura, após a sua avaliação e estudo do projeto executado e/ou propriedades mecânicas do aço e betão, a mesma pode ser sujeita à sua demolição parcial ou total, pode ser limitado o seu uso, pode haver ou ser solicitado a substituição ou introdução de

novos elementos, pode apenas ser necessário a reparação de elementos danificado e por fim a execução de reforço dos elementos existentes.

Com o reforço estrutural pode surgir o problema do aumento de peso da secção e assim começou-se a recorrer a materiais sintéticos, materiais esses que tem como principais vantagens a não corrosão, elevada resistência e leveza, proporcionando à estrutura a resistência pretendida e uma sobrecarga não acentuada, sendo que o material sintético mais utilizado é o carbono.

Outro problema que pode surgir nas estruturas é o movimento de torção, podendo ser originado por um mau dimensionamento, sendo que o recurso a chapas metálicas irá de certa forma corrigir esse movimento, proporcionando uma maior estabilidade à estrutura.

Contudo há sempre os aumentos de carga na própria estrutura, carga esta para a qual a estrutura não foi concebida, e assim há a necessidade de recorrer a um reforço estrutural para ser evitada a demolição da própria estrutura, podendo recorrer assim a um aumento das secções de suporte para assim dissipar mais carga a que esta fica sujeita.

Este trabalho final de Mestrado, tem como objetivo a realização de um estudo da viabilidade económica do reforço de elementos estruturais, fazendo uma análise ao custo vs benefício do reforço da estrutura, analisando também uma estimativa de rendimentos para atribuição de um tempo de concepção dos diferentes tipos de reforço.

Os três tipos de reforço estrutural a analisar serão:

- Reforço por aplicação de mantas de Carbono;
- Reforço por aplicação de chapas metálicas;
- Reforço por aumento da área da secção.

Cada tipo de reforço será alvo de uma análise em separado, avaliando o seu método de concepção, sendo depois inseridos num estudo económico de modo a analisar a viabilidade económica do tipo de reforço para um determinado problema estrutural, de acordo com as exigências do projeto ou características da obra.

Será também analisado o método construtivo de cada tipo de reforço, com base em dados existentes referentes a custos de mão de obra, matéria prima e equipamentos necessários, para se criar uma estimativa de custos de modo a ir-se criando valores para se poder fazer uma comparação económica entre os três tipos de reforço estrutural.

2. Síntese de conhecimentos

2.1 Mantas de carbono

Nos tempos de hoje, com o evoluir da tecnologia moderna temos o desenvolvimento de novos materiais construtivos e melhor conhecimento das suas características. Um desses materiais ditos “novos” são as chamadas mantas de carbono ou fibras de carbono utilizadas como reforço de estruturas, cada vez mais presente na construção, apesar de relativamente recente nos processos de reforço de estruturas com este material, o mesmo tem vindo a demonstrar uma boa aposta para o reforço de estruturas. Tudo devido à sua resistência, ao seu pouco peso e sendo um material sintético não entra em corrosão proporcionando uma maior vida útil ao reforço da estrutura.

Este tipo de material entra na categoria dos FRP, que consiste na aplicação ou deposição sucessiva de camadas de fibras de reforço e na sua posterior impregnação com uma dada matriz polimérica que ao curar forma um elemento FRP sólido. O elemento ao adquirir a cura ficará mais resistente, sendo que no método de moldagem implica a utilização de diferentes técnicas, conferirá ao material uma melhor qualidade (em termos de volume e posicionamento das fibras e volume de vazios), pode também ser utilizado temperaturas elevadas, pressão e eventualmente vácuo, para melhorar a cura das várias camadas. (Correia, 2011).

No entanto o que é utilizado para o reforço é as chamadas mantas ou tecidos, as mantas são compostas por feixes de fibras alinhadas e esticadas que são inseridos numa prensa em conjunto com uma tela impregnada em quantidades mínimas de resina, os tecidos são formados pelo entrelaçamento de fibras posteriormente alinhadas. No entanto o material só se designa por FRP após impregnado em resina, *in situ* e após a aplicação no elemento a reforçar e impregnado em resina e após a polimerização da resina é que o material ganha as suas propriedades mecânicas (Carvalho, 2010).

As designações das famílias de FRP, resultam da conjugação das resinas termoendurecíveis (matriz) e cargas de enchimento denominadas por “fillers”, logo a junção com as fibras mais conhecidas como o carbono, fibra vidro e aramida fará com que se formem os referidos compósitos reforçados, denominados respetivamente por *Carbon fiber reinforced polymer* - **CFRP**, *Glass Fiber Reinforced Polymer* - **GFRP** e *Aramid Fiber Reinforced Polymer* -

AFRP. No entanto é a disposição das fibras, o teor, o processo de fabrico e as propriedades mecânicas da resina que determinam a resistência do material. (Juvandes, 1999)

A aplicação do material de FRP *in situ*, consiste na colocação das mantas no exterior da peça a reforçar onde o processo de impregnação e cura do compósito são efetuados no momento da aplicação. As mantas de carbono apresentam em modo geral uma espessura de 0,1 a 0,5 mm e uma largura de 25 a 130 cm, muitas vezes aplicadas em varias camadas de modo a conferir um maior reforço, as fibras podem ser aplicadas unidirecional ou em diferentes direções

Figura 1, (Carvalho, 2010), Carvalho mencionando Carolin, 2001 e Blaschko, M., Zilch K., 1999 refere que a superfície da peça a reforçar deverá ser previamente tratada, podendo a mesma ser com jato de areia ou de agua ou mesmo picagem mecânica de modo a conferir uma superfície com alguma rugosidade, nunca apresentando irregularidades superiores a 5 mm a cada 2 m e uma humidade inferior a 4 % aumentando assim a interface do agente ligante à superfície a reforçar conferindo uma maior adaptabilidade do reforço a conferir à peça.

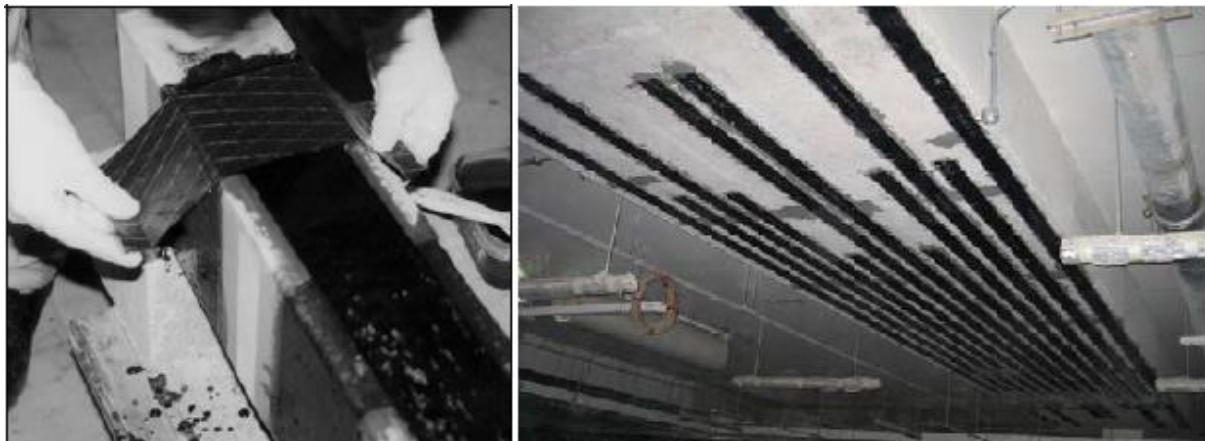


Figura 1- Pormenor de aplicação de CFRP. (Carvalho, 2010)

A aplicação da técnica *in situ* é um ótimo método para uso em pilares redondos ou ligações de geometria irregular, como é o caso dos nós de ligação viga pilar, devido à sua fácil adaptabilidade a superfícies irregulares conferido um aumento de ductilidade e resistência ao corte (Carvalho, 2010).

Assim a aplicação do reforço consiste numa boa preparação da superfície de modo a conferir uma boa adesão do material para assim conferir uma boa resistência à peça, este processo de preparação passa por vários pontos de tratamento da superfície e aplicação de material, Figura 2.

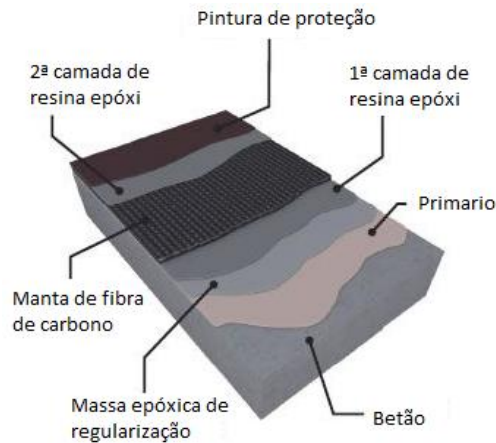


Figura 2- Camadas de reforço, (Corsini R. 2012)

Numa primeira fase é necessário selar todas as fendas existentes acima de 0,3 mm, assim estas são sopradas, com auxílio de um compressor, por exemplo, para extrair todos os contaminantes e cheia ao posterior com injeção de poliuretano (PU), sendo por fim selada com argamassa.

Numa segunda fase a superfície tem de ser preparada para assim receber a camada aderente, sendo esta lixada ou limpa com jato de areia.

Numa terceira fase é aplicado um primário epóxico de baixa viscosidade para assim penetrar melhor no betão.

Numa quarta fase é aplicada uma argamassa de regularização para assim eliminar qualquer imperfeição da superfície.

Numa quinta fase é aplicada a 1ª camada de resina epóxica de alta viscosidade, o que irá ajudar a manter a manta de carbono na direção e posição adequada, ajudado também na resistência da fibra.

Numa sexta fase é aplicada a manta de carbono, podendo esta ser aplicada com auxílio de um rolo ou espátula própria de modo a retirar qualquer ar que fique entre a manta e a resina, para ficar uma superfície totalmente embebida na resina e selada.

Por fim é aplicada uma nova camada de resina epoxídica seguido de uma ultima camada de acabamento e proteção, podendo esta ser uma tinta, como é demonstrado na Figura 3, onde demonstra os passos gerais para aplicação do reforço estrutural. (infraestruturaurbana.pini.com.br).

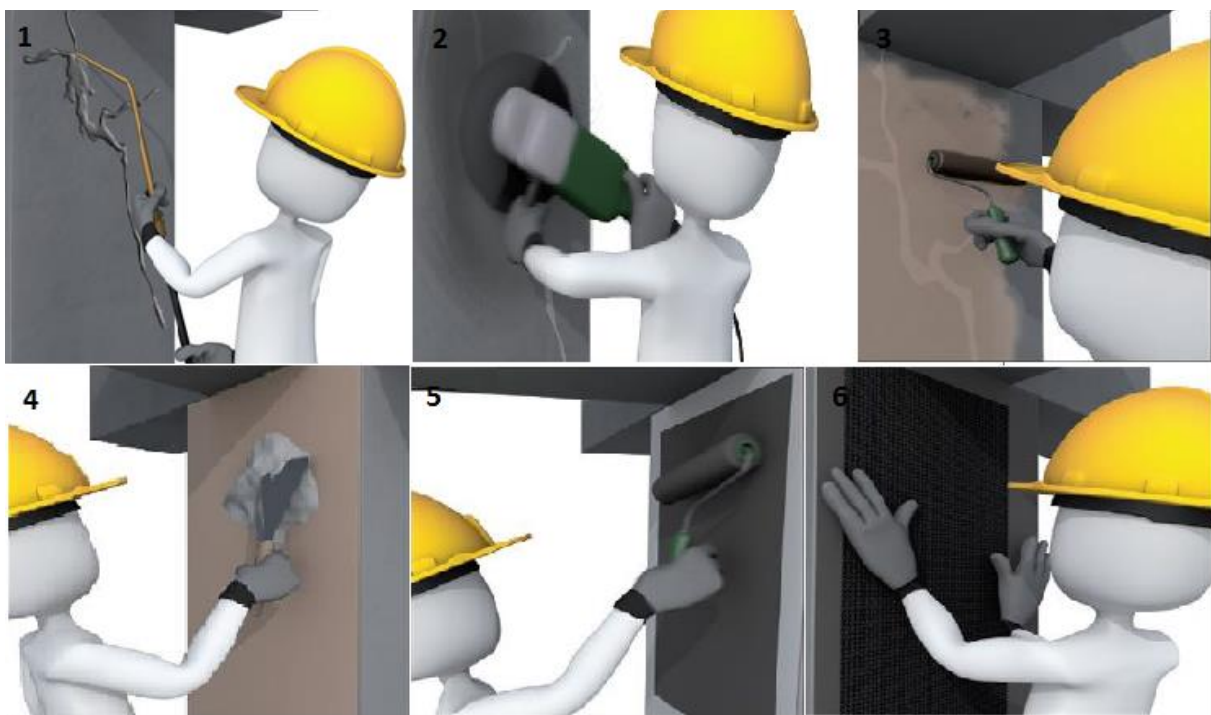


Figura 3- Passos gerais para aplicação do reforço, (Corsini R. 2012)

No entanto na utilização de FRP, esta deve ser avaliada não apenas em aspetos mecânicos mas também em aplicabilidade e longa durabilidade, uma vez que a resistência deste material é apenas na direção das fibras, assim a utilização de FRP para reforço não pode ser considerado um substituto abusivo do aço, sendo que o aço pode ser solicitado em todas as direções. Em todo o caso, a utilização de mantas de CFRP já permitem a mobilização de ações resistentes nas direções longitudinais e transversais. (Carvalho P. 2012)

Este tipo de técnica já foi estudado por diversas vezes, sendo o mesmo aplicado quer em vigas quer em pilares de modo a verificar a sua fiabilidade na construção, como método de reforço.

Por exemplo, Carvalho 2010, estudou o reforço à flexão em vigas de betão armado com CFRP, testando cinco vigas de betão armado e analisando o comportamento de dois sistemas de reforço de vigas com CFRP, sendo eles o *Epoxy Bonded Reinforcement* - **EBR** e *Near Surface Mounted Reinforcement* – **NSMR**.

Chegando à conclusão que a aplicação destes sistemas é muito mais rápida que a aplicação de chapas metálicas ou encamisamento. No ponto de vista estrutural houve um incremento de resistência de 30% ate ao momento de cedência das armaduras ordinárias de flexão, tendo no sistema NSMR obtido uma ductilidade maior. No pós-cedência os sistemas tiveram respostas dispares, e concluindo assim que o sistema mais eficaz é o sistema por NSMT, tendo o sistema EBR obtido um valor de 55,2% de extensão ultima do laminado antes da rotura e o sistema NSMT obtido 93,2% de extensão ultima do laminado antes da rotura.

Henriques, Branco e Júlio, 2014, estudaram o desempenho de pilares de betão armado reforçado com FRP e submetidos a uma compressão uniaxial. Utilizaram provetes de com 170 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento e foram reforçados com 4 tipo de fibras, fibras de carbono (CFRP), fibras de carbono de alto módulo de elasticidade (HM CFRP), fibras de vidro (GFRP) e fibras de aramida (AFRP) e aplicaram 3 camadas de fibras em cada provete fazendo ainda alguns provetes com mistura de fibras. O betão à data do ensaio apresentava uma resistência media de 34,4 MPa e as fibras de carbono, segundo o fornecedor apresentava um módulo de elasticidade de 240 GPa, uma tensão de rotura de 3800 MPa, uma extensão de rotura de 1,55 %, uma espessura de 0,176 mm e uma área de 176 mm²/m.

Nos ensaios realizados apenas com as fibras de carbono (CFRP) obtiveram um aumento de 58 % e nos provetes com fibras de carbono com alto módulo de elasticidade (HM CFRP) um aumento de 36 %, resultados inferiores aos obtidos nos outros ensaios com os materiais diferentes, assim concluíram que fibras mesmo com um alto módulo de elasticidade, materiais menos deformáveis, se revelam mais eficiente para a realização de um reforço por confinamento.

2.1.1 Aplicação prática do reforço por mantas de carbono.

Sendo este um método de reforço já com alguma aplicação em obra nos dias de hoje e cada vez mais, com novos conhecimentos práticos, adquiridos por diversos estudos ao material em si e à sua aplicação, permite mencionar algumas obras já realizadas com este método.

O Engenheiro Decio Rey da Técnicas Especiais de Engenharia Ltda, realizou uma intervenção num duplex situado em São Paulo-SP, onde o mesmo iria passar a receber eventos, necessitando assim de reforço num dos pisos, pois iria ser alvo de um aumento de subcarga de utilização maior que aquela para o qual foi dimensionado. Através de cálculos analíticos, o Engenheiro Decio Rey concluiu que a laje de cobertura iria necessitar de reforço nas nervuras principais e secundárias, sendo a mesma uma laje estruturada nervurada “do tipo caixão perdido”.

Tendo o reforço utilizado manta de carbono cortada em faixas com uma largura de 5 a 15 cm, a manta de carbono utilizada apresenta um peso de 300 g/m^2 , uma espessura de 0,166 mm, uma resistência à tração de 4900 MPa e um módulo de elasticidade à tração de 230 GPa, Figura 4 a Figura 7.

Excluiu o reforço aos pilares uma vez que estavam bem dimensionados para a sobrecarga de utilização desejada.



Figura 4 – Preparação da superfície com lixadeira elétrica com disco diamantado aplicado. (tecknicas.com.br)



Figura 5 – Aplicação da manta de carbono. (tecknicas.com.br)



Figura 6 – Superfícies regularizadas com argamassa epoxídica.(tecknicas.com.br)



Figura 7 – Mantas de carbono utilizadas, já cortadas.(tecknicas.com.br)

Um outro trabalho do engenheiro Decio Rey, consistiu no reforço de pilares de um armazém industrial, Figura 8, que através de uma auditoria ao projeto estrutural constatou-se que os mesmos não foram projetados originalmente para o efeito do vento bem como algumas vigas apresentavam armadura insuficiente para os esforços de flexão e de corte.

Assim a solução de reforço optada foi mantas de carbono, nas vigas foi aplicada fibra de carbono de 300 g/m^2 nas faces inferiores e nas laterais junto aos apoios para reforçar à flexão e ao corte respetivamente, nos pilares mantas de carbono de 600 g/m^2 nas faces tracionadas sob o esforço do vento.

As mantas de carbono utilizadas para o reforço da estrutura foram dimensionadas de modo a suportarem os efeitos a que a estrutura ira estar sujeita sendo que a resistência à tração da manta de carbono, 4900 MPa , é de aproximadamente 10 vezes mais que a do aço, 500 MPa , com uma espessura de apenas 2 mm .



Figura 8 – Preparação da superfície para aplicação do reforço. (tecknicas.com.br)

Em Portugal também existem varias obras onde o reforço estrutural foi feito através de fibras de carbono, por exemplo o Viaduto Duarte Pacheco quando foi alvo de reabilitação as vigas externas foram reforçadas por colagem de laminados de fibra de carbono, Figura 9, uma vez que estas estavam localizadas sob o passeio e assim sujeitas a um menor esforço, apresentavam metade da armadura das vigas interiores, (Costa A, *et al* 2004).



Figura 9 – Reforço das vigas e controlo de qualidade, (Costa A, et al 2004).

A ponte sobre o rio Caldo, no Geres, Figura 10, obra realizada pela empresa Betar Consultores Lda, entre 2005 e 2009, onde houve a necessidade de reforçar a obra de arte, com Pré-esforço no tabuleiro, as vigas e montantes diagonais do tabuleiro foram reforçados com fibra de carbono e as nascenças dos arcos com recurso a chapas metálicas. (Betar.pt)



Figura 10 – Ponte sobre o Rio Caldo, Geres. (Betar.pt)

A fabrica CIRES em Estarreja, por projeto do Eng. Rui Taborda da empresa STB Reabilitação do Património Edificado, Lda foi alvo de reforço da armadura longitudinal de uma viga que devido ao excesso de carga se encontrava fissurada. O reforço foi efetuado com laminados de carbono, Figura 11, ancorados nas extremidades com mantas de carbono, Figura 12, e por fim uma pintura para proteção aos raios ultravioleta, a sobrecarga foi previamente aliviada com auxílio de um macaco hidráulico, Figura 13, e após cura dos materiais reposta novamente. (stb.pt)

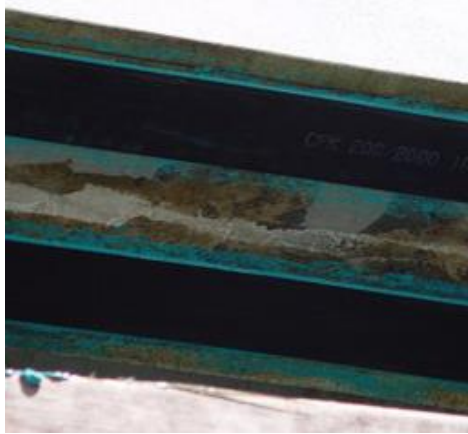


Figura 11 – Aplicação laminados de carbono. (stb.pt)

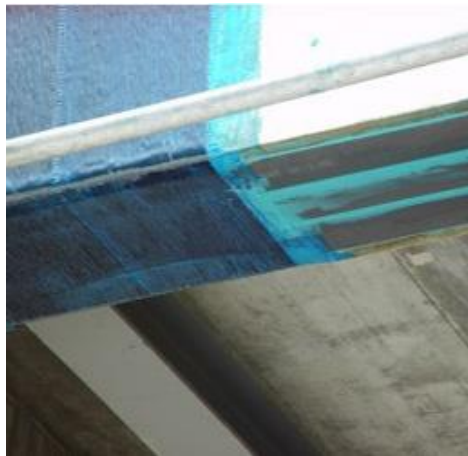


Figura 12 – Ancoragem nas extremidades por mantas de carbono. (stb.pt)



Figura 13 – Alívio da sobrecarga por auxílio de macaco hidráulico. (stb.pt)

A empresa STB Reabilitação do Património Edificado, Lda tem também um trabalho de reforço, entre muitos outros, de uma moradia unipessoal por direção técnica do Eng. João Graça, onde foi detetado que o espaçamento existente entre estribos era muito superior aquele que havia sido previsto em projeto em duas vigas, assim optou-se pela utilização de laminados de carbono especificamente concebidos para a utilização em situações de reforço a esforços por corte, conferindo um acréscimo de resistência de 75 kN na totalidade do desenvolvimento das vigas.

As arestas das vigas foram boleadas, a superfície regularizada por meios mecânicos, Figura 14, e aplicada resina epóxi para uma melhor uniformidade da superfície. Para garantir um melhor comportamento da ancoragem, foi aplicada uma camada de argamassa epóxi nas extremidades dos laminados, Figura 15, e por fim após colagem, foi aplicada uma camada de resina epóxi, Figura 16, e polvilhada com areia para uma melhor aderência da argamassa hidráulica de regularização, Figura 17, (stb.pt).



Figura 14 – Tratamento da superfície e boleamento das arestas. (stb.pt)

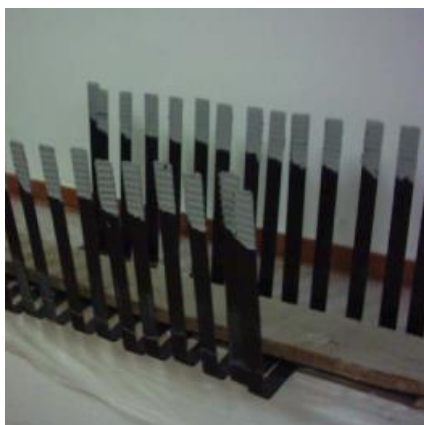


Figura 15- aplicação da resina epóxi nas extremidades dos laminados a ancorar. (stb.pt)



Figura 16 – Aplicação da resina epóxi nos sobre os laminados. (stb.pt)



Figura 17 – Regularização da superfície com argamassa hidráulica. (stb.pt)

2.2 Chapas Metálicas

Este método consiste na aplicação de chapas metálicas de modo a reforçar os elementos ao momento fletor, Figura 18, esforço transverso e, em menor escala, momento torsor em elementos quer horizontais, quer verticais, sendo mais utilizado em elementos horizontais, (Fernando G., et al 2002). As chapas metálicas no reforço das estruturas são ligadas através de aderência, ou seja, adesão, natureza química, atrito, ou natureza física, Figura 20. O reforço da estrutura por este método consiste na aplicação de chapas metálicas nas zonas mais frágeis da estrutura.

O reforço por chapas metálicas consiste na sua colagem, Figura 19, nas zonas onde há deficiência nas armaduras e os elementos estruturais assim permitem a sua aplicação, sendo aplicadas do seguinte modo:



Figura 18 – Fissuração típica causada por deficiência de resistência à flexão. (Fernando G., et al 2002)

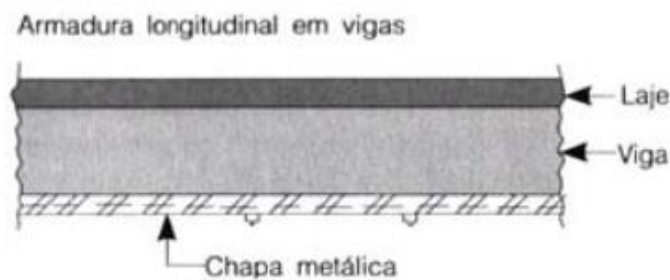


Figura 19 – Aplicação da chapa metálica. (Fernando G., et al 2002)

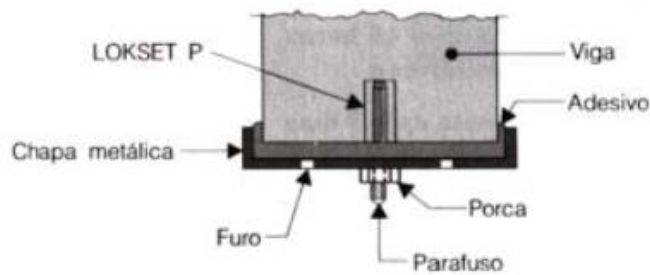


Figura 20 – Pormenor da fixação da chapa metálica à viga. (Fernando G., et al 2002)

NOTA: Lokset P, mencionado na Figura 20, é um material de ancoragem, tixotrópico de elevada resistência mecânica e química de rápido endurecimento, (Fernando G., et al 2002).

Por vezes há a necessidade de recorrer a estribos, Figura 21, principalmente na presença de esforço transversal, para um melhor reforço em todo o elemento, Figura 22, e assim não ser apenas a chapa colada/aparafusada.



Figura 21 – Viga com estribos metálicos. . (Fernando G., et al 2002)

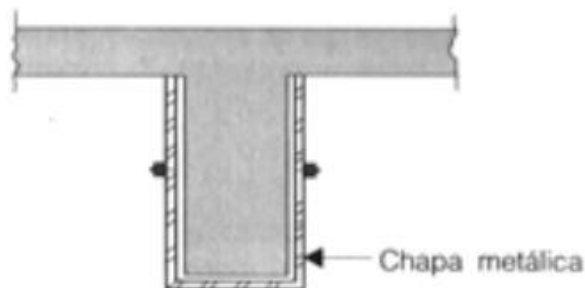


Figura 22 – Corte da viga, estribo envolvendo viga. (Fernando G., et al 2002)

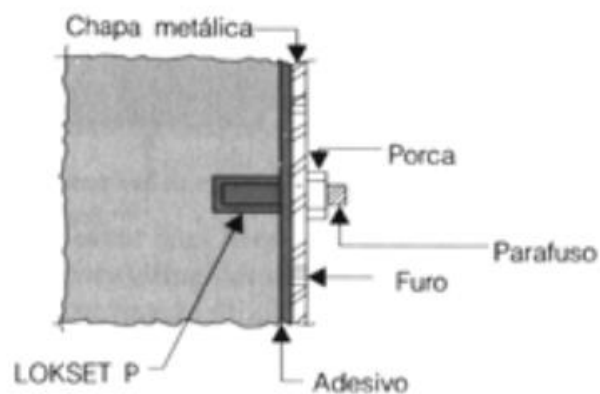


Figura 23 – Pormenor da fixação da chapa metálica à viga. (Fernando G., et al 2002)

Quando há a presença de momento torsor, Figura 24, o reforço é com auxílio dos estribos, Figura 25, de modo a envolver a estrutura por completo, Figura 26, podendo ser necessário recorrer à escarificação e regularização da superfície da estrutura.

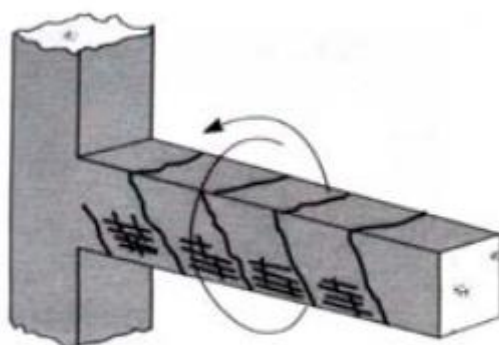


Figura 24 – Momento torsor. (Fernando G., et al 2002)

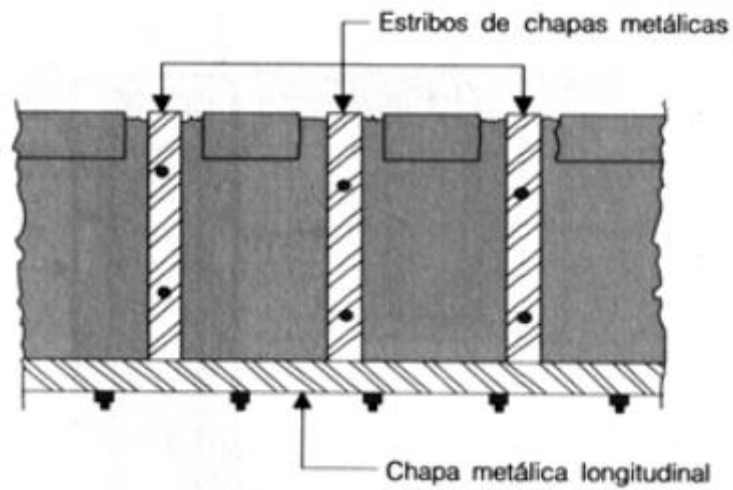


Figura 25 – Estribos envolventes da estrutura. (Fernando G., et al 2002)

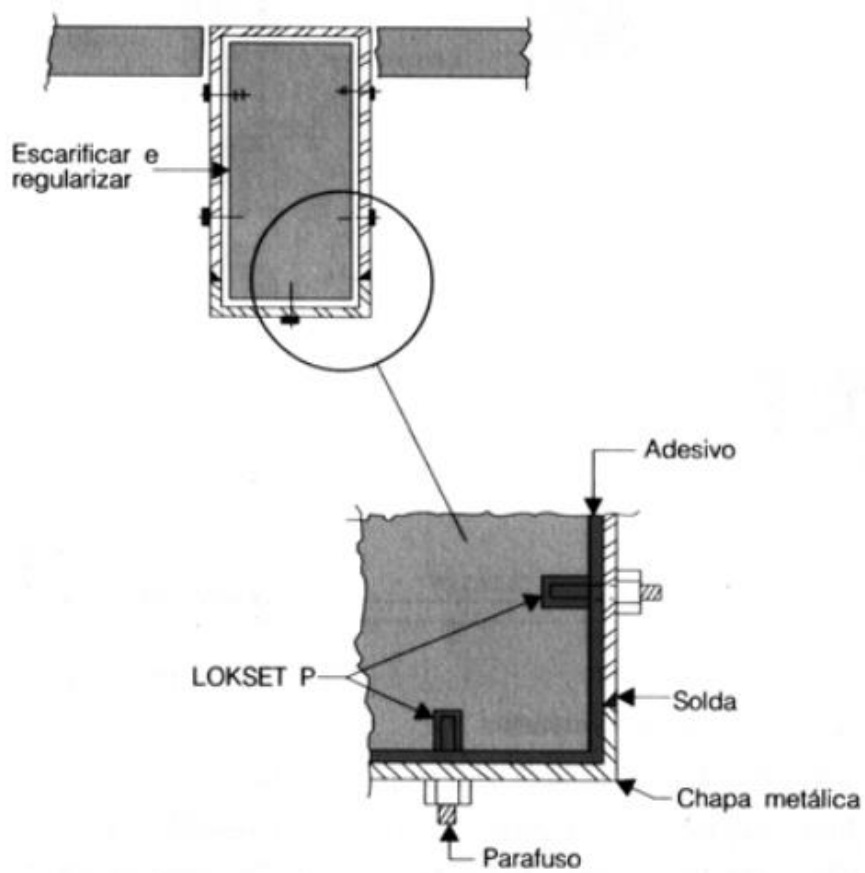


Figura 26 – Corte do pormenor do estribo e pormenor da fixação da chapa. (Fernando G., et al 2002)

Quando não há a aplicação de buchas metálicas a chapa deve apresentar uma espessura de 3 a 5 mm e uma largura inferior a 300 mm e fixa à estrutura com uma espessura na ordem do 1 a 3 mm de resina epóxi. A quando do reforço da estrutura a mesma deve ser aliviada de todas as cargas possíveis de remover para assim as chapas de reforço absorverem as cargas de serviço (Appleton J. e Gomes A).

A utilização de buchas, depende da análise efetuada à estrutura e determinação das cargas, estudando os requisitos geométricos a adotar, como a necessidade de uma camada mais espessa de resina entre a chapa e o betão ou de uma chapa mais espessa para os diferentes esforços, Figura 27 e Figura 28 . As buchas podem ser mecânicas ou químicas, (Branco F. 2011), como é o exemplo das buchas metálicas e químicas.

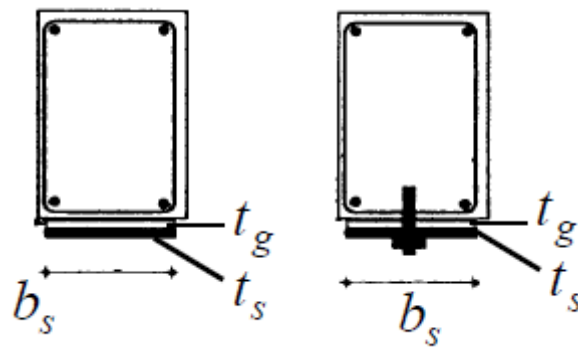


Figura 27 – Utilização ou não de bucha para o reforço à flexão (Branco F. 2011).

No reforço à flexão para a não utilização de bucha $t_g \leq 2$ mm, $t_s \leq 4$ mm e $b_s \geq 50$ mm, utilização de bucha $t_g \leq 2$ mm, $t_s \leq 12$ mm e $b_s \geq 80$ mm, , (Branco F. 2011).

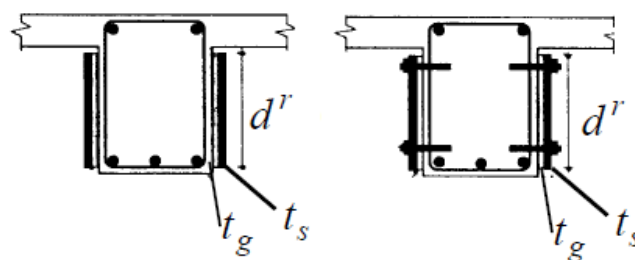


Figura 28 – Utilização ou não de bucha para o reforço ao esforço transversal (Branco F. 2011).

No reforço ao esforço transversal para a não utilização de bucha $t_g \leq 2 \text{ mm}$, $t_s \leq 3 \text{ mm}$ e $d^r \geq 100 t_s$, utilização de bucha $t_g \leq 2 \text{ mm}$, $t_s \leq 8 \text{ mm}$ e $d^r \geq 100 t_s$, (Branco F. 2011).

Onde t_g é a espessura da chapa, t_s espessura de resina e b_s e d^r a secção a adotar.

Segundo Reis 1998, esta técnica apresenta varias vantagens, como por exemplo rapidez na execução, ausência de vibrações, baixo nível de ruido e o acréscimo de secção é pequeno. No entanto também apresenta desvantagens como a aplicação das chapas impede a visualização de possíveis danos que a peça apresente como a fendilhação, motivada por uma deterioração da peça, a resina epóxi utilizada na colagem das chapas à estrutura apresenta uma fraca resistência a temperaturas e nas extremidades das placas há o risco de as mesmas se descolarem da peça devido às elevadas tensões nessa zona.

Segundo Carvalho 2010, citando Appleton J e Gomes A 1997, este método apenas deve ser adotado quando há deficiência de resistência ao nível das armaduras, ou seja, tensões de tração, atendendo primeiro a uma prévia avaliação da qualidade do betão para o esforço a que será imposto pelo reforço, e avaliação da rigidez de modo a que os limites regulamentares sejam limitados. Assim o aço não deve apresentar uma resistência muito elevada de modo a não ser necessário uma grande deformação para mobilizar tensões.

Para realização deste tipo de dimensionamento é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas das chapas metálicas, como a sua resistência à tração e módulo de elasticidades, de modo a que a peça e chapa, atinjam simultaneamente a ruína por plastificação e assim não ocorra rotura na zona de contacto chapa/ resina ou resina/betão (Reis, 1998). Em alguns casos é utilizado parafusos metálicos de modo a evitar a rotura por deslizamento da chapa.

É método comum no reforço de estrutura devido às suas vantagens, como por exemplo a sua rapidez e acréscimo mínimo de secção, (Reis, 1998), no entanto é um método de reforço pouco documentado cientificamente em relação a estudos laboratoriais, pelo menos publicados.

2.2.1 Aplicação prática do reforço por chapas metálicas

Sendo este um método de reforço com alguma rapidez na sua realização e eficácia como método de reforço, a sua utilização em Portugal esta relatada por varias obras.

Por exemplo, a empresa Trimétrica Engenharia, Lda, efetuou o reforço e recuperação estrutural a 24 moradias de 3 pisos, Figura 29, por projeto do Eng. Fernando Domingues, situadas em Murches-Cascais no ano de 1997, com recurso a chapas metálicas e injeção de resinas, Figura 30.



Figura 29 – Representação de parte das 24 moradias. (trimetrica.com.pt)



Figura 30 – Reforço de um pilar das moradias. (trimetrica.com.pt)

O Hotel Madeira Palace no Funchal após diversos trabalhos de levantamento e diagnóstico, devido às novas exigências funcionais ao nível dos elementos estruturais, para assim avaliar a sua estrutura, foram identificadas deficiências ao nível das vigas em betão armado, assim o método de reforço utilizado foi chapas metálicas, Figura 31, e laminados de fibra de carbono.

Foi também alvo de reparação de pilares e lajes, mas apenas devido à degradação e desagregação em algumas partes, com argamassa de reparação não-retrátil e microbetão de alta resistência, trabalhos realizados pela empresa STAP Reparação Consolidação e Modificação de Estruturas, SA.



Figura 31 – Aplicação e selagem das chapas metálicas. (stap.pt)

Em Valongo o edifício da COLQUIMICA - Indústria Nacional de Colas também foi alvo de um reforço na laje do piso 0 com uma malha de armadura, Figura 32, e respetivas vigas com recurso a chapas metálicas, Figura 33.

A laje foi assim alvo de reforço com recurso a grampos metálicos na face inferior e montagem de uma malha de armadura, Figura 32, que ficou embebida em betão projetado, os grampos

foram selados com recurso a uma argamassa de epóxi, e perfis metálicos HEB300. As vigas foram reforçadas com chapas metálicas, Figura 33, e seladas as juntas de contorno dos elementos metálicos com mástique de poliuretano para assim permitir a injeção de resinas epóxi de colagem estrutural, por ultimo foi aplicado um reboco hidráulico para regularização do teto e dos locais intervencionados finalizando com uma pintura com tinta acrílica, Figura 34. (stb.pt)



Figura 32 – Aplicação dos grampos e perfis HEB300. (stb.pt)



Figura 33 – Reforço exterior das vigas. (stb.pt)



Figura 34 – Resultado final da laje após regularização e pintura e ligação entre perfil metálico HEB300 e viga reforçada. (stb.pt)

A empresa A2P Estudos e Projetos Lda documenta o reforço estrutural à central dos Correios de Lisboa em Cabo Ruivo, Figura 35, edifício de 2 pisos elevados e uma área de implantação de 6000 m², pois apresentava falta de capacidade resistente na estrutura para novos equipamentos, apresentava fendilhação em vigas e os pilares não apresentavam resistência sísmica, trabalho concluído em 1995.

Foi assim alvo de reforço em todos os pilares por encamisamento com adição de armadura e microbetão e reforço à flexão das vigas através da colagem de chapas metálicas coladas com resina epóxi e aplicação de buchas mecânicas, Figura 36. Foi utilizado 125 000 kg de aço em chapas e cantoneiras, cerca de 9 m³ de resina epóxi e 25 000 buchas mecânicas.



Figura 35 – Central dos CTT de Cabo Ruivo, Lisboa. (a2p.pt)



Figura 36 – Reforço das vigas com chapas metálicas. (a2p.pt)

2.3 Aumento da área da secção, por encamisamento

Este método de reforço é preferencialmente utilizado quando há necessidade de se aumentar a resistência à compressão nas zonas mais vulneráveis a esse efeito. Esse reforço deve-se ao aumento da secção através de uma nova armadura e nova aplicação de betão, conferindo assim um aumento da resistência aos esforços.

Pode ser aplicado em vigas ou pilares, sendo que nas vigas o reforço poderá ser apenas para a flexão Figura 37 a), ou flexão e esforço transversal Figura 37 b), nos pilares normalmente é envolvida toda a secção do mesmo, designado por encamisamento fechado Figura 37 c), ou podendo ser efetuado apenas em algumas faces, designado por encamisamento aberto Figura 37 d), isto devido a possíveis condicionantes arquitetónicas, sendo que o reforço é efetuado em todo o comprimento do pilar Figura 37 e) (APPLETON J. e GOMES A, 1992).

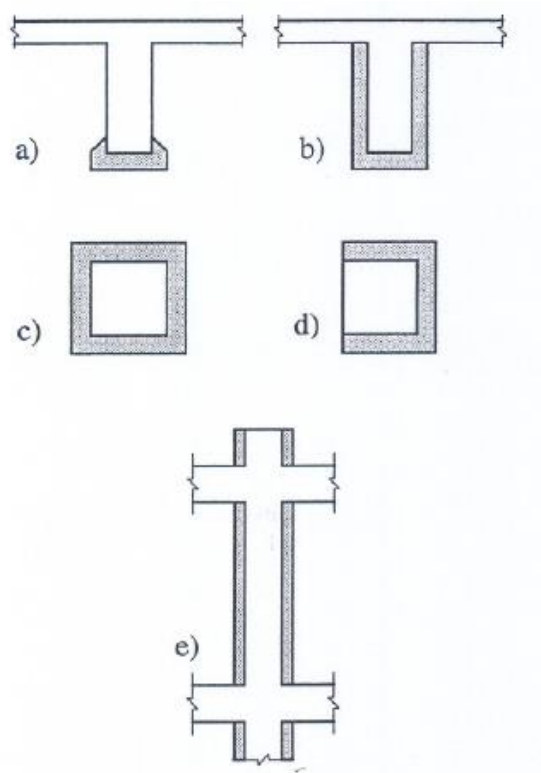


Figura 37 – Ilustração dos tipos de encamisamento.

Appleton J. e Gomes A, mencionam que os diversos tipos de betão influenciam na espessura mínima a betonar, sendo de 50 mm no betão projetado, 75 a 100 mm no betão normal cofrado e 40 a 60 mm na argamassa especial, e para uma melhor adesão do betão de reforço à estrutura, esta deve ser previamente pintada com uma tinta com resina epoxídica.

Em alguns casos há a necessidade de aplicação de armadura, assim a sua disposição em vigas segundo Appleton J. e Gomes A é ilustrada na Figura 38, sendo que na Figura 38 a) o reforço é apenas à flexão, na Figura 38 b) e Figura 38 c) o reforço é à flexão e ao esforço transversal, tendo como diferença a disposição dos estribos, onde na Figura 38 c) em relação aos da Figura 38 b) permite uma maior altura de mecanismo resistente ao esforço transversal.

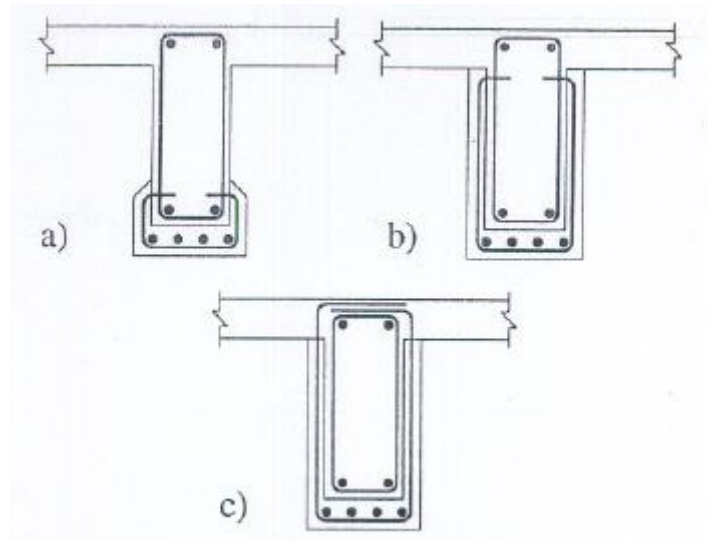


Figura 38 – Ilustração da disposição das armaduras em vigas.

Nos pilares, Appleton J. e Gomes A apresentam a Figura 39, onde a Figura 39 a) representa um encamisamento completo, Figura 39 b) e Figura 39 c) encamisamento aberto, onde a Figura 39 b) é uma ligação por solda do estribo a uma barra adicionada exteriormente ao pilar, a Figura 39 c) estribo embebido numa cavidade aberta no pilar inicial, Figura 39 d) estribo introduzido num furo, Figura 39 e) estribo ligado por soldadura a cantoneiras unidas através de uma barra de aço e por fim Figura 39 f) estribo ligado por soldadura a cantoneira fixada na secção inicial com bucha metálica.

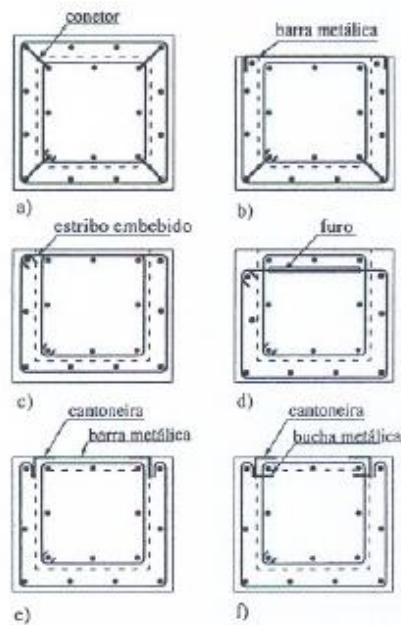


Figura 39 - Ilustração da disposição das armaduras em pilares.

Júlio E., Branco F., e Silva V., estudaram a influência da interface no comportamento de pilares reforçados por encamisamento de betão armado, utilizando 6 tipos de preparação de superfície, Figura 40, caracterizadas como, superfície betonada contra cofragem como modelo, superfície preparada com escova de aço, superfície picada parcialmente, superfície picada parcialmente submergida em água 24 h., antes aplicação do reforço, superfície tratada com jato de areia e repetição deste ultimo tratamento de superfície, realizaram os ensaios apenas com a superfície tratada e superfície tratada com aplicação de resina epóxi.

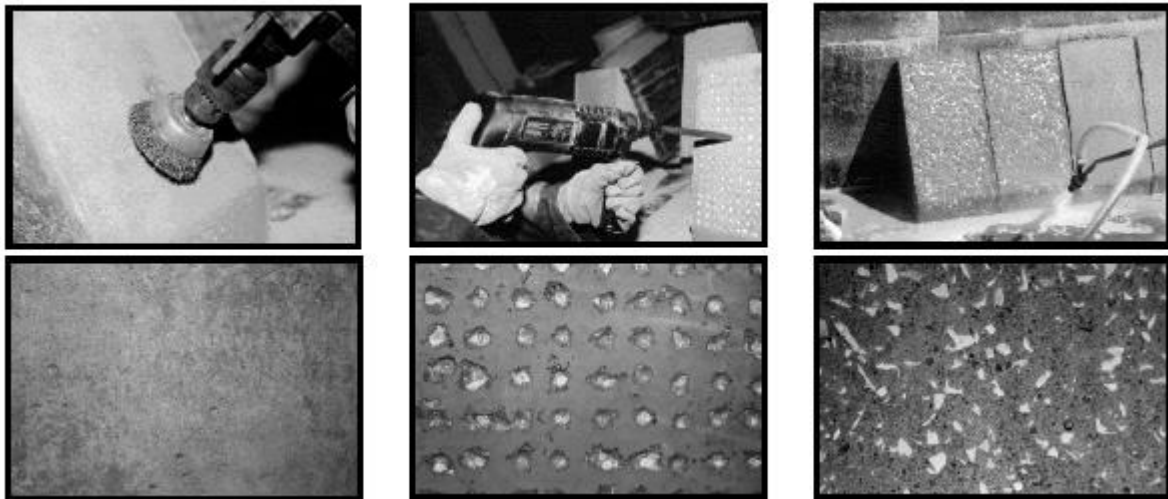


Figura 40 – Tipos de tratamento de superfície.

Utilizaram um betão original para provetes com uma resistência de 30 MPa aos 28 dias, e para o betão de reforço uma resistência à compressão de 30 MPa, 50 MPa e 100 MPa. Realizando três tipos de ensaio, *slant shear test*, *pull-off teste* e *push-off test*. No ensaio *slant shear test* obtiveram por exemplo um valor de tensão tangencial na superfície preparada com escova de aço de 10,57 MPa e a superfície tratada com jato de areia, tendo um valor máximo do ensaio, de 14,13 MPa, já nos mesmos tipos de preparação de superfície mas com aplicação de resina epóxi, concluíram que não melhora a resistência desde que se adote um tratamento de superfície de modo a aumentar a sua rugosidade, onde por exemplo a superfície tratada com jato de areia obteve os 14,13 MPa de tensão tangencial em comparação com os 11,57 MPa obtidos com a aplicação da resina epóxi. Em geral concluíram que a superfície preparada com jato de areia, globalmente, foi a que obteve melhores resultados entre as técnicas, na influência da superfície pré-humedecida, os resultados não foram conclusivos e com o aumento da resistência do betão de reforço houve um aumento de resistência da ligação e uma alteração da rotura pela interface para rótula monolítica, concluindo que os betões de alto desempenho são os mais indicados para o reforço.

2.3.1 Aplicação pratica do reforço por aumento da área da secção, por encamisamento.

A aplicação do método de reforço por encamisamento em obras realizadas em Portugal, temos por exemplo obras documentadas pela empresa A2P Estudos e Projetos, a Central dos CTT em Cabo Ruivo, já mencionada, a ampliação do edifício dos CTT na Av. Da Republica n18,

Lisboa, Figura 41, com construção por parte da Soconstroi Engenharia Lda concluída a 1993. O edifício é constituído por uma torre de 17 pisos e numa área não ocupada pela torre um corpo de apenas 2 pisos que foi alvo de uma ampliação para mais 3 pisos, necessitando assim de reforço estrutural. Este reforço consistiu no encamisamento dos pilares existentes, Figura 42, para assim suportar a introdução dos 3 novos pisos.



Figura 41 – Edifício dos CTT Av. Da Republica. (a2p.pt)



Figura 42 – Pilares reforçados por encamisamento. (a2p.pt)

A empresa Stap Reparação Consolidação e Modificação de Estruturas SA, realizou uma intervenção geral na Central de Cerveja de Vialonga, Figura 43, onde efetuou uma reabilitação múltipla, que consistiu no saneamento e recolocação do betão em zonas delaminadas ou onde a armadura se apresentava corroída, Figura 44, e realizou um reforço estrutural por encamisamento com betão projetado armado e por fim uma pintura.



Figura 43 – Vista geral da Central de Cerveja. (stap.pt)



Figura 44 – Zona degradada. (stap.pt)

Em Novembro de 2004 a ponte de Odeceixe, por parte da empresa H Tecnic – Construções Lda, foi alvo de reforço nos pilares, Figura 45, saneamento do betão degradado, execução de novos pilares, Figura 46, para alargamento da ponte e reforço e alargamento das travessas dos alinhamentos dos pilares com micro betão, finalizando com uma pintura em todas as zonas reparadas, Figura 47.



Figura 45 – Reforço dos pilares. (htecnic.pt)



Figura 46 – Execução de novos pilares. (htecnic.pt)



Figura 47 – Pintura nas zonas reparadas. (htecnic.pt)

A empresa H Tecnic- Construções Lda, realizou também um reforço estrutural num edifício na Rua Joaquim António de Aguiar, nº66, onde realizaram remoção dos revestimentos de reboco, escavação de poços nos contornos dos pilares a reparar e reforçar, Figura 48, incluindo remoção dos pavimentos existentes, execução do reforço da zona enterrada de pilares, Figura 49, incluindo remate de reforço na face superior das sapatas, regularização das superfícies reparadas e finalização com pintura, Figura 50.



Figura 48 – Reforço dos pilares por encamisamento. (htecnic.pt)



Figura 49 – Execução do reforço por encamisamento dos pilares nas zonas enterradas. (htecnic.pt)



Figura 50 – Regularização das superfícies reparadas e pintura final. (htecnic.pt)

3. Análise de custos.

3.1 Introdução

A escolha do tipo de reforço de uma estrutura requer sempre uma análise de diversos aspetos, o fator económico é um dos principais fatores determinantes. Apesar de este ainda ser um dos principais fatores no tipo de escolha do reforço é também necessário avaliar outros aspetos importantes como por exemplo o prazo previsto de execução, sendo este um fator muito importante nos dias de hoje na indústria da construção ou reabilitação e cada vez mais relevante para o fecho de obras, mas também as condicionantes na conceção do reforço ou geometria da estrutura.

3.2 Análise de considerações gerais.

Numa análise geral, fez-se um levantamento aos três tipos de métodos de reforço, estudando o tipo de mão de obra necessária para a realização do trabalho e característica técnica da mesma, avaliou-se também o material necessário, tanto ao nível de maquinaria como ao nível de matéria prima, para o bom desempenho dos trabalhos, e tempo estimado necessário para uma boa realização do reforço.

Foi considerado um pilar com superfície já reparada, superfície sã, pronta a aplicar qualquer método de reforço, necessitando apenas da preparação previa da superfície necessária para a aplicação de cada tipo de reforço.

Pilar esse com uma secção retangular com 0.40 x 0.50 m e 2.40 m de altura, tendo assim um pilar com 4.32 m².

Em relação aos preços da mão de obra, equipamentos e matéria prima, foi utilizado como referencia, meramente indicativa, o site geradordepreços.info, CYPE Ingenieros S.A, sendo que não foi possível o acesso a valores de referencia através dos contactos efetuados a entidades da especialidade, possivelmente por uma questão de confidencialidade das mesmas.

No entanto em relação aos valores monetários é tudo uma questão de negocio, sendo que de entidade para entidade o valor a imputar, quer na mão de obra quer na matéria prima varia.

Assim a utilização dos valores monetários do geradordepreços.info foi capaz de exprimir o pretendido, ainda que meramente indicativos.

Em relação aos tempos de trabalhos, o mesmo também foi considerado através de valores do site referido, com base em rendimentos.

Podendo fazer uma comparação entre os três métodos de reforço de estrutura em estudo, pela realização de umas tabelas.

3.2.1 Estimativa de custos e tempo.

No custo total foi considerado, valores de mão de obra bem como custo de materiais a aplicar e maquinaria necessária para a boa realização dos trabalhos, em relação ao tempo total foi considerado um rendimento estipulado pelo site geradordepreços.info, CYPE Ingenieros S.A.

De acordo com os valores obtidos pelo site CYPE Ingenieros S.A temos a Tabela 1, onde se estima um custo de 659,84 € por pilar com reforço por mantas de carbono e um tempo de 4 horas de realização dos trabalhos de reforço estrutural por mantas de carbono.

Tabela 1- Reforço estrutural por mantas de Carbono.

MO				
Encarregado	7,00	€/h	28,00	€
Oficial/Técnico	5,50	€/h	22,00	€
Servente	4,50	€/h	18,00	€

Material						
Lixadora com disco de diamante para superfícies de betão.	9,00	€/m2	38,88	€	1	
Aplicação de massa de regularização, secagem rápida	13,00	€/m2	56,16	€	1	
Aplicação de primário à base de resina epóxi para aplicar com rolo sobre o elemento a reforçar	27,00	€/m2	116,64	€	0,5	
Colocação de Fibra carbono 300g/m2 e 0,17 espessura	63,00	€/m2	272,16	€	1	
Resina epóxi para aplicar c/ rolo sobre o carbono.	25,00	€/m2	108,00	€	0,5	
					4	h
Custo Pilar completo =			659,84	€		

Pela Tabela 2, temos um custo de 456,56 € por pilar e um tempo estimado de 5 horas, para a realização do reforço estrutural por chapas de aço.

Tabela 2 – Reforço estrutural por chapas de aço.

MO						
Encarregado	7,00	€/h	35,00	€		
Oficial/Técnico	5,50	€/h	27,50	€		
Servente	4,50	€/h	22,50	€		
Servente	4,50	€/h	22,50	€		
Material						
Execução das aberturas para as buchas químicas e limpeza das mesmas	9,00	€/m2	45,00	€	1,5	
Injeção de Resina epóxi para melhor para ligação aço/betão	20,00	€/m2	86,40	€	0,5	
Aplicação Placa aço laminado s355JR para aplicações estruturais	19,00	€/m2	46,74	€	0,5	
Selagem dos espaçamentos entre betão e placa	6,00	€/m2	25,92	€	0,5	
Execução da Bucha química 8 mm diâmetro com ancoragem c/ varão roscado de aço 8mm c/ porca e anilha	3,00	€/und.	120,00	€	1,5	
Aperto das porcas	5,00	€/m2	25,00	€	0,5	
					5	h
Custo Pilar completo =			456,56	€		

E por fim pela Tabela 3, temo que para a realização do pilar considerado estimasse um custo de 363,06 € e um tempo de 6 horas para a realização do reforço estrutural por aumento de secção.

Tabela 3 – Reforço estrutural por aumento de secção, por encamisamento.

MO				
Enc	7,00	€/h	42,00	€
Oficial/Técnico	5,50	€/h	33,00	€
Servente	4,50	€/h	27,00	€
Servente	4,50	€/h	27,00	€
Servente	4,50	€/h	27,00	€

Material						
Realização da misturadora de argamassa	9,00	€/m2	54,00	€	1	
Aplicação e corte de armadura, varões nervurados (D6//0,10) nas 2 direções	4,00	€/Kg	76,72	€	2,5	
Aplicação de cofragem metálica 50x50 p pilares rect ou quadrados ate 3 m	21,00	€/m2	90,72	€	1	
Betão c25/30 s3 d12; s3	73,00	€/m3	12,61	€	1,5	
					6	h
Custo Pilar completo =			390,06	€		

3.2.2 Análise da mão de obra vs tempo de realização.

Analisando o tipo de mão de obra considerado para a realização dos trabalhos de reforço nos diferentes tipos, podemos concluir que nos três casos é necessário sempre mão de obra especializada e apoio à mesma sendo que no caso do reforço com chapas de aço e no aumento de seção é necessário, para além da mão de obra especializada, mais apoio à mão de obra especializada.

Na elaboração da Tabela 4, temos um encarregado, um técnico e um servente, sendo este o tipo de reforço mais rápido e simples de elaboração, em relação aos considerados neste trabalho, é, no entanto, o que necessita de mão de obra mais especializada uma vez que se recorre a materiais mais técnicos e com características mais especiais como as ligas de carbono e as resinas epoxídicas.

O preparar da superfície e aplicação das resinas pode ser efetuado por mão de obra menos especializada, não dispensado nunca a supervisão do técnico especializado, já para a aplicação do carbono tem de ser efetuado por mão de obra especializada sendo que na aplicação das fibras é necessário tomar atenção à disposição das mesmas em relação ao que foi projetado para o efeito.

Sendo que as fibras mal aplicadas podem originar o efeito contrário ao pretendido, provocado pelo não reforço nos locais de maior carga levando ao colapso da estrutura.

Tabela 4 – Mão de obra do reforço com mantas de carbono.

MO				
Encarregado	7	€/h	28	€
Oficial/Técnico	5,5	€/h	22	€
Servente	4,5	€/h	18	€

Na análise aos trabalhos necessários para a boa realização do reforço por mantas de carbono, Tabela 5, o tempo estimado para cada procedimento pode variar, sendo o apresentado neste trabalho meramente indicativo, sendo o mesmo variável pois está dependente da prática do trabalhador tanto na aplicação do carbono como na preparação da superfície e por vezes das

boas características dos equipamentos, como por exemplo a potencia da lixadoras ou qualquer outro equipamento para a preparação da superfície, neste tipo de reforço tendo em conta todos os trabalhos necessários para a realização do reforço, o reforço por mantas de carbono foi considerado que envolvia toda a área do pilar sendo estimado um tempo de quadro horas para o reforço do pilar em estudo.

Tabela 5 – Trabalhos para realização do reforço por mantas de carbono.

Material					
Lixadora com disco de diamante para superfícies de betão.	9,00	€/m2	38,88	€	1
Aplicação de massa de regularização, secagem rápida	13,00	€/m2	56,16	€	1
Aplicação de primário à base de resina epóxi para aplicar com rolo sobre o elemento a reforçar	27,00	€/m2	116,64	€	0,5
Colocação de Fibra carbono 300g/m2 e 0,17 espessura	63,00	€/m2	272,16	€	1
Resina epóxi para aplicar c/ rolo sobre o carbono.	25,00	€/m2	108,00	€	0,5
					4
					h

Na análise à carga de mão de obra da Tabela 6, temos um encarregado, um técnico e dois serventes, neste método de reforço a utilização de mais mão de obra não especializada, por exemplo em comparação ao reforço por mantas de carbono, deve-se ao facto da utilização de materiais mais pesados, como é o exemplo do aço, diminuindo assim o rendimento da sua realização, no entanto foi considerado chapas de aço já prontas a aplicar ou seja, vindas já com as medidas certas de fabrica para o reforço do pilar em estudo.

A possibilidade de utilização de chapas quinadas e cortadas em obra pode levar a uma maior quantidade de mão de obra, quer especializada como não especializada, sendo que as medidas das chapas a cortar têm de corresponder ao especificado em projeto.

Neste tipo de reforço o tratamento da superfície da estrutura, antes e após aplicação das chapas, poderá ser efetuado por mão de obra não especializada, bem como a colocação das chapas, desde que sempre acompanhada da supervisão de um técnico especializado, podendo este tipo de reforço não necessitar de uma técnica de aplicação do reforço tão exigente como o reforço por mantas de carbono, não descuidando claro a sua aplicação, uma vez que se trata de um reforço de estrutura definitivo.

Tabela 6 – Mão de obra do reforço com chapas de aço.

MO				
Encarregado	7,00	€/h	35,00	€
Oficial/Técnico	5,50	€/h	27,50	€
Servente	4,50	€/h	22,50	€
Servente	4,50	€/h	22,50	€

Na Tabela 7 temos os materiais necessários à boa realização dos trabalhos de reforço por chapas de aço. Neste método o tratamento da superfície passa pela sua regularização. No caso em estudo, sendo considerado um pilar já de superfície sã, não se considerou este processo para a quantificação do tempo de realização, mas foi considerada a execução de buchas químicas para fixação das chapas.

A utilização de buchas químicas no reforço por chapas de aço, pode ser considerado ou não como já referido anteriormente, dependendo da quantidade de carga a que a estrutura a reforçar esta sujeita e tipo de esforço, para assim se optar pela utilização ou não de bucha.

No caso em estudo considerou-se bucha química bem como as chapas de aço para reforço já prontas a aplicar na estrutura, chapas já quinadas e cortadas à medida, foi também considerada a selagem da junta entre a chapa e o betão para aquando da injeção da resina a mesma não sair pela abertura levando assim a desperdício de material, e por fim o aperto das porcas no varão, o tempo de execução deste trabalho também depende muito da perícia do trabalhador do tempo de presa do químico da bucha química e da quantidade de parafusos afetos à estrutura, estimando um tempo de cinco horas para a realização do reforço do pilar em estudo com chapas de aço.

Tabela 7 - Trabalhos para realização do reforço por chapas de aço.

Material					
Execução das aberturas para as buchas químicas e limpeza das mesmas	9,00	€/m2	45,00	€	1,5
Injeção de Resina epóxi para melhor para ligação aço/betão	20,00	€/m2	86,40	€	0,5
Aplicação Placa aço laminado s355JR para aplicações estruturais	19,00	€/m2	46,74	€	0,5
Selagem dos espaçamentos entre betão e placa	6,00	€/m2	25,92	€	0,5
Execução da Bucha química 8 mm diâmetro com ancoragem c/ varão roscado de aço 8mm c/ porca e anilha	3,00	€/und.	120	€	1,5
Aperto das porcas	5,00	€/m2	25	€	0,5
					5 h

Por fim, pela análise à Tabela 8, temos um encarregado um técnico especializado e três serventes, este tipo de reforço apresenta menos técnicas que os anteriormente analisados, no entanto necessita à mesma de mão de obra especializada sendo que há parâmetros a seguir estipulados em projeto, a utilização de mais quantidade de mão de obra é justificada pela necessidade de realização de trabalhos mais demorados e mais pesados, como a necessidade de aplicação de cofragem.

Tabela 8 – Mão de obra do reforço com aumento de secção, por encamisamento.

MO				
Enc	7	€/h	42	€
Oficial/Técnico	5,5	€/h	33	€
Servente	4,5	€/h	27	€
Servente	4,5	€/h	27	€
Servente	4,5	€/h	27	€

Pela Tabela 9, temos os materiais para a realização do reforço por encamisamento, este tipo de reforço é mais demorado que os anteriormente analisados uma vez que carece de processos mais demorosos como a aplicação da armadura de aço e cofragem.

No caso em estudo, foi considerado betão preparado em obra, em vez de já pronto o que pode reduzir tempo final à realização do reforço, estipulando uma hora para a realização da argamassa, sendo que enquanto um servente procede à realização da argamassa ou outros tratam da armadura de aço.

A armadura considerada, é também corta e dobrada em obra estipulando duas horas e trinta minutos para a realização da mesma, foi considerado um espaçamento de 10 mm e varões de 6 mm perfazendo um total de 19,18 kg de aço, não estipulando qualquer tipo de carga a que o pilar está sujeito, podendo assim o tempo ser mais elevado pela utilização de varões de diâmetro maior o que leva a uma diminuição de rendimento na dobragem e aplicação da armadura de aço.

Referente à cofragem foi considerado cofragem metálica, logo já pronto a aplicar considerando uma hora para a sua aplicação.

Por fim considerou-se uma hora e trinta minutos para betonagem, perfazendo um tempo total de seis horas para a realização do reforço por aumento de secção, por encamisamento.

Tabela 9 - Trabalhos para realização do reforço por aumento de seção, por encamisamento.

Material					
Realização da misturadora de argamassa	9,00	€/m2	54,00	€	1
Aplicação e corte de armadura, varões nervurados (D6//0,10) nas 2 direções	4,00	€/Kg	76,72	€	2,5
Aplicação de cofragem metálica 50x50 p pilares rect. ou quadrados ate 3 m	21,00	€/m2	90,72	€	1
Betão c25/30 s3 d12; s3	73,00	€/m3	12,61	€	1,5
					6
					h

Nos três métodos de reforço foi apenas considerado o tempo de realização dos trabalhos para a realização do reforço do pilar, não contado com os tempos de presa das resinas após aplicação final e tempo de presa do betão e descofragem, no caso do reforço por encamisamento, tempos esses necessários para a colocação definitiva do pilar aos esforços a que possa estar sujeito.

3.2.3 Comparação de valores vs qualidade e eficiência.

Numa comparação dos três tipos de reforço, temos o reforço por mantas de carbono como um processo de reforço que requer mão de obra muito técnica e especializada, quer na aplicação do material que na preparação da superfície, esta técnica apresenta uma interferência mínima na utilização da estrutura e é suscetível à exposição solar e apresenta um mau comportamento ao fogo e à fadiga, (Appleton J. et al, 2011).

No entanto é uma técnica que apresenta elevada resistência à tração, resistência essa muito mais elevada que a do aço, e não é suscetível a sofrer corrosão, esta técnica é assim de fácil execução e de grande rapidez, (Appleton J. et al, 2011), sendo esta uma técnica bastante valida para um reforço estrutural onde o prazo de execução é bastante reduzido, no entanto tem um custo elevado devido aos materiais utilizados, uma boa solução para aplicação em elementos horizontais e verticais.

Num reforço por chapas metálicas, esta técnica necessita que as chapas sejam protegidas contra a corrosão e contra a ação do fogo, é uma ótima solução para um reforço de elementos horizontais ao momento fletor e esforço transversal, e não tão bom para aplicação a elementos verticais, requer de um elevado controlo de qualidade na preparação da superfície, necessitando assim de mão de obra técnica e especializada, (Appleton J. et al, 2011)., numa aplicação com chapas metálicas não cortadas à medida de fabrico pode ser um processo de reforço um pouco demorado, podendo ser aplicado mais mão de obra o que pode levar a um aumento do custo de fabrico final.

No reforço por aumento de secção, temos uma ótima solução de reforço à compressão, é uma solução bastante valida para um reforço à ação sísmica e proteção das armaduras à corrosão e ao fogo, requer preparação da superfície e implica um aumento das dimensões das seções transversais, (Appleton J. et al, 2011). No entanto é uma solução de reforço, que apesar do seu baixo custo em relação aos outros tipos de reforço, é uma solução muito demorada e que necessita de muita mão de obra.

O seu baixo custo de confeção deve-se aos materiais utilizados sendo eles muito comuns na construção, os mesmos apresentam um baixo custo, carece também de mão de obra especializada, mas já não de tantos técnicos especializados uma ótima solução para pilares.

4. Conclusão.

Neste trabalho foi realizado o estudo de três tipos de reforço utilizados nos dias de hoje, tendo feito uma comparação entre eles em termos de método construtivo, equipamentos utilizados e materiais para a realização dos mesmos, avaliando a utilização mais conveniente para cada um e estimando o tempo de realização de cada reforço.

Assim numa análise global, com este estudo permite-se verificar que em termos de mão de obra necessária para realização do reforço a mais exigente é o reforço por encamisamento bem como é o reforço que mais preparação de estaleiro exige, podendo ser por vezes um condicionante. Mas é o reforço estrutural, que apesar de necessitar de mão de obra qualificada, como qualquer outro reforço, é o mais simples de realizar, mas também o mais demorado.

O reforço por chapas metálicas, pode ter a desvantagem da preparação das chapas, caso seja estudado a sua aplicação já pronta evitando o seu corte em obra, no entanto pode ser sempre realizado o fabrico em obra, mas este processo pode levar a um tempo mais alargado na sua realização e pode levar à necessidade de mais mão de obra.

Por fim temos as fibras de carbono, que sendo o reforço mais dispendioso, em termo de custo de material, é um tipo de reforço que para uma obra bastante grande pode ter uma grande percentagem de valor de custo final de obra, para além de que necessita de mão de obra mais qualificada. No entanto é um reforço bastante rápido de se fazer, de modo geral, e tem como sua grande vantagem o acréscimo não significativo de subcarga à estrutura a reforçar bem como em termos de geometria final do elemento a reforçar esta não é significativamente alterada, este tipo de reforço permite também a sua moldagem à estrutura.

Assim para uma boa otimização do reforço é imprescindível um bom estudo da estrutura, e em casos de reforço por deterioração ou falha da própria estrutura, o estudo da causa é muito importante, de modo a evitar custos adicionais ou novas intervenções mais tarde.

Referências bibliográficas

APPLETON J. e GOMES A. (1992) , “*Reforço de estruturas de betão armado por adição de armadura exterior.*” Revista portuguesa de Engenharia de Estruturas nº42.

APPLETON J. e GOMES A. (1992) , “*Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções.*” Revista portuguesa de Engenharia de Estruturas nº42.

APPLETON J.; COSTA A.. (2011).; “*Reabilitação e reforço de estruturas*”, IST.

BRANCO F. (2011).; “*Reabilitação e reforço de estruturas*”, Aula 15: Reforço por colagem de chapas de aço, IST.

CARVALHO P. (2012) , “*Reabilitação e reforço estrutural da ponte sobre a ribeira do amor, na estrada nacional n.º 6, ao km 1 + 550, com recurso a compósitos de CFRP*” FEUP-Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

CARVALHO, TIAGO (2010); “*Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósito de CFRP*”, Universidade Nova de Lisboa.

CORREIA, J. R. (2011).; “*Pontes em plásticos reforçados com fibras e em betão-FRP*” ,1^{as} Jornadas de MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO.

COSTA A., APPLETON J, DELGADO J, SANTOS J, PEDRINHO V, “*Reabilitação do Viaduto Duarte Pacheco*” , Encontro Nacional Betão Estrutural 2004.

CORSINI R. (2012), “*Reforço de estruturas com fibra de carbono*” , Associação brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (Abece), Edição 20.

FERNANDO G., SANTOS H., TOMÉ L., ALMEIDA R., “*Reforços estruturais com perfis e chapas metálicas*”, Construlink press nº10, 2002.

GOMES, AUGUSTO .; “*Reforço de Estruturas de Betão Armado por Encamisamento das Secções*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE) No' 42

HENRIQUES, SERGIO; BRANCO, FERNANDO; JÚLIO, EDUARDO (2014);5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas “*Reforço de Pilares de Betão por Confinamento Híbrido de FRP*”.

JUVANDES, LUÍS (1999); “*Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"*”, FEUP.

JULIO E., BRANCO F., SILVA V., (2002), “*A influência da interface no comportamento de pilares reforçados por encamisamento de betão armado*” revista internacional Onstrulink vol. 0 N°0.

REIS, A. P. A. (1998); “*Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho.*” Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

SANTOS T. (2008),” *Estratégias para reparação e reforço de Estruturas de betão armado*”, Universidade do Minho, 2008