



Soluções de Reabilitação e Reforço com GFRP
Aplicações na Região Autónoma da Madeira

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Bruno Miguel Silva Santos
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2013

UMa

Sol

Soluções de Reabilitação e Reforço com GFRP **Aplicações na Região Autónoma da Madeira**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Bruno Miguel Silva Santos

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

Paulo Miguel de Macedo França

CO-ORIENTADOR

Patrícia Carlota Costa Escórcio

RESUMO

Este trabalho consiste na apresentação de técnicas de reabilitação e reforço e a sua adaptação ao GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). O foco incidiu sobre as estruturas degradadas pela corrosão das armaduras, e apresenta-se uma vasta gama de técnicas de intervenção. Encamisamento, proteção eletroquímica, adição de armaduras são as técnicas mais desenvolvidas ao longo do trabalho. São ainda abordados os tipos de produtos de recobrimento, as técnicas de aplicação do recobrimento, bem como as ferramentas com maior utilidade para a reabilitação e reforço. De seguida faz-se um breve resumo das características e potencialidades do material GFRP, aborda-se alguns dos principais fornecedores, fazendo uma descrição dos produtos comercializados por estes, e ainda uma análise de preços por metro linear de varão GFRP. Por fim apresenta-se um levantamento fotográfico realizado na Região Autónoma da Madeira, de estruturas que apresentem sinais claros de corrosão das armaduras, com o objetivo de perceber a aplicabilidade dos varões de GFRP na reabilitação das mesmas. Apresenta-se ainda, uma possível técnica de reabilitação/reforço para todos os casos apresentados, utilizando os varões de GFRP. O levantamento fotográfico tem ainda o objetivo de perceber as principais causas de deterioração de estruturas na região, e de criar uma base de estruturas a necessitar de intervenção urgente.

Palavras-chave: GFRP, Reabilitação, Reforço, Corrosão

ABSTRACT

This work consists in the presentation of rehabilitation and strengthening techniques and their adaptation to GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). The focus was on the structures damaged by steel reinforcing bars corrosion, and presents a wide range of intervention techniques. Jacketing, electrochemical protection, addition of steel bars are the techniques developed throughout the work. Are also addressed the types of products covering the coating application techniques, as well as the tools most useful for rehabilitation and strengthening. Below is a brief summary of the characteristics and capabilities of the material GFRP, it approaches some major suppliers, making a description of the products sold by them, and also an analysis of prices per linear meter of GFRP rod. Finally it presents a photographic survey accomplished in the Região Autónoma da Madeira, of structures showing clear signs of reinforcement bars corrosion, in order to realize the applicability of GFRP bars in rehabilitating them. Its also presented a possible technique for rehabilitation / reinforcement for all cases presented, using GFRP rods. The photographic survey also aims to understand the main causes of deterioration of structures in the region, and to create a base of structures in need of urgent intervention.

Keywords: GFRP; Rehabilitation, Reinforcement; Corrosion

ÍNDICE

Resumo.....	i
Abstract	iii
Índice.....	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Quadros	xiv
Agradecimentos.....	xv
1- Considerações Iniciais.....	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização da dissertação	2
2- Estado de Arte	5
2.1. Causas da corrosão.....	6
2.2. Intervenção.....	8
2.3. Materiais a utilizar.....	8
2.3.1. Produtos de recobrimento:	9
2.3.2. Armaduras	13
2.3.3. Equipamentos/processos de remoção do recobrimento.....	13
2.3.4. Equipamentos/processos de limpeza da superfície e/ou remoção da corrosão	14
2.4. Tipos de intervenção	14
2.4.1. Substituição do betão contaminado.....	14
2.4.2. Métodos de proteção/reparação eletroquímica.....	15
2.4.3. Substituição das armaduras	21
2.5. Soluções de reabilitação	25

2.6.	Soluções de reforço	25
2.6.1.	Aumento da secção.....	26
2.6.2.	Adição de armaduras	26
2.6.3.	Encamisamento	29
3-	Caraterísticas do Material GFRP	43
3.1.	Descrição do material.....	43
3.2.	Propriedades das fibras.....	44
3.3.	Propriedades da matriz polimérica	45
3.4.	Processo de fabrico.....	46
3.4.1.	Formas de aplicação:.....	46
3.5.	Propriedades mecânicas dos varões de GFRP.....	46
3.6.	Fabricantes de varões de GFRP	47
3.6.1.	Pultrall Inc.	47
3.6.2.	Hughes brothers.....	48
3.6.3.	Schöck.....	51
4-	Reforço e Reabilitação com Varões de GFRP	53
4.1.	Exemplos de aplicação	56
4.1.1.	Reabilitação de varandas.....	56
4.1.2.	Muros	56
4.1.3.	Reforço de alvenarias.....	58
4.1.4.	Reforço de edifícios históricos.....	60
4.1.5	Reforço de estruturas de madeira.....	61
5-	Casos de Estudo e Soluções	63
5.1.	Estruturas marítimas.....	63
5.1.1.	Marina do lugar de baixo	63
5.1.2.	Porto de abrigo do Porto Santo	65
5.1.3.	Cais do Porto Novo.....	66

5.2. Estruturas em zonas costeiras.....	69
5.2.1. Porto de recreio de Santa Cruz.....	69
5.2.2. Muro da promenade dos Reis Magos.....	74
5.2.4. Contrafortes Funchal.....	76
5.2.5. Espaço comercial na Pontinha	80
5.2.6. Ponte do Ribeiro Seco ou Ponte Monumental	82
5.2.7. Viga de bordadura da zona balnear da Quinta Magnólia	84
5.2.8. Rampa de acesso às piscinas naturais do Porto moniz.....	85
5.2.9. Estação de correios do porto Moniz.....	87
5.2.10. Instalações da Câmara Municipal de São Vicente (CMSV)	87
5.2.11. Ponte da Estrada Comandante Camacho Freitas - Ribeira Brava	89
5.2.12. Promenade da Madalena do Mar	91
5.3. Outros casos	92
5.3.1. Túnel da Nazaré	92
6- Considerações finais.....	99
6.1. Conclusão	99
6.2. Trabalhos Futuros.....	100
Referências Bibliográficas	101
Anexos	107
Anexo 1 – Marina do Lugar de Baixo.....	107
Anexo 2 – Cais do Porto Novo.....	108
Anexo 3 – Porto de recreio de Santa Cruz	111
Anexo 4 – Estrutura de suporte com contrafortes, Funchal	121
Anexo 5 – Ponte do Ribeiro Seco	125
Anexo 6 – Rampa de acesso à piscina do Porto Moniz.....	127
Anexo 7 – Estação de correios do Porto Moniz	128
Anexo 8 – Ponte da Estrada Comandante Camacho Freitas, Ribeira Brava	130

Anexo 9 – Promenade da Madalena do Mar	133
Anexo 10 - Túnel da Nazaré	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Deslocamento das cofragens, extraído de [29].	7
Figura 2: Progressão da corrosão, extraído de [28].	7
Figura 3: Aplicação de betão projetado em parede, extraído de [29].	10
Figura 4: Esquema da ponteira de um sistema projetor de betão com fibras de aço, extraído de [29].	10
Figura 5: Aplicação de enchimento com a técnica de agregados pré-colocados, extraído de [10].	12
Figura 6: Aplicação de argamassa seca, extraído de [10].	12
Figura 7: evolução da corrosão em aço galvanizado, extraído de [36].	13
Figura 8: Exemplo de aplicação num pilar: a) colocação da malha (ânodo) sobre uma 1ª camada de fibra de celulose embebida em solução Na_2CO_3 e b) colocação de nova camada de fibra de celulose sobre a malha e selagem com plástico, retirado de [32].	16
Figura 9: Esquema do sistema.	17
Figura 10: Aplicação do eletrólito sobre a malha metálica, extraído de [36].	18
Figura 11: a) aplicação da malha de titânio ativado com fixadores de plástico, b) esquema de funcionamento de PC corrente impressa por ânodos tipo revestimento.	19
Figura 12: Esquema de funcionamento de PC corrente impressa por ânodos localizados.	20
Figura 13: Colocação dos ânodos sacrificiais	20
Figura 14: Construção da Ópera de Sydney	21
Figura 15: Emenda dos varões, extraído de [19].	23
Figura 16: Acopladores de rosca	24
Figura 17: Acopladores de aperto lateral, extraído de Halfen.de	24
Figura 18: Emenda por soldadura, extraído de [19].	24

Figura 19: Reforço, à flexão, por adição de armaduras.....	26
Figura 20: Reforço de vigas ao corte, adaptado de [19].....	27
Figura 21: Reforço de vigas ao corte.	27
Figura 22: Reforço e reabilitação de lajes, adaptado de [19].	28
Figura 23: Colocação do varão de reforço.	28
Figura 24: Encamisamento de um pilar, extraído de [23].	30
Figura 25: a) Viga reforçada à flexão por encamisamento; b) Viga reforçada à flexão e ao corte por encamisamento, extraído de [16].	31
Figura 26: a) Encamisamento de pilar; b) Encamisamento aberto, extraído de [16].	31
Figura 27: Preparação da superfície do elemento, extraído de [16].	32
Figura 28: Reforço à flexão de vigas, adaptado de [19].....	33
Figura 29: Reforço à flexão por encamisamento, adaptado de [16].....	33
Figura 30: Reforço à flexão de viga e laje, adaptado de [29].....	34
Figura 31: Reforço à flexão por encamisamento com betão projetado, extraído de [19].....	35
Figura 32: Reforço de vigas ao corte e à flexão, adaptado de [12].	35
Figura 33: Reforço de uma viga, à torção, com betão projetado, extraído de [19].	36
Figura 34: Ancoragem dos varões de reforço, a) por adesão; b) por aparafusamento; c) e d) por soldagem a elemento metálico; adaptado de [16].....	37
Figura 35: Reforço da face inferior de uma laje, com betão projetado, adaptado de [19].	38
Figura 36: Reforço de pilar por encamisamento.	38
Figura 37: Configurações especiais. a) Pilar de fachada; b) Pilar de canto.	39
Figura 38: Reforço de pilar de fachada.	39
Figura 39: Encamisamento de pilar com betão projetado, extraído de [19].....	40

Figura 40: Reforço de pilar, por encamisamento, adaptado de [19].	41
Figura 41: Reforço de pilar, por encamisamento.	41
Figura 42: Reforço de um pilar ao punçoamento.	42
Figura 43: Campos de aplicação dos FRP, extraído de [15].	43
Figura 44: Instalação dos varões no tabuleiro da ponte da Highway 410, extraído de www.vrod.ca	48
Figura 45: Custo relativo para vida útil de 100 anos, extraído de [30].	48
Figura 46: Ancoragem passiva para varões de GFRP, extraído de [20].	49
Figura 47: Construção de linha ferroviária em Miami, extraído de www.aslanfrp.com	50
Figura 48: Aplicação dos "GFRP Dowel Bars", extraído de [21].	50
Figura 49: Elemento pré-fabricados usados em obras marítimas, em Inglaterra, extraído de [38].	51
Figura 50: Laje de pavimento de linha ferroviária, extraído de [38].	51
Figura 51: Reforço de vigas à flexão com GFRP.....	55
Figura 52: Reforço ao corte com GFRP.....	55
Figura 53: Reabilitação de varanda (retirado de aslanfrp.com)	56
Figura 54: Substituição das armaduras de aço por armaduras de GFRP.....	57
Figura 55: a) Abertura de rasgo em parede de alvenaria de tijolo cerâmico; b) Colocação de silicone no rasgo (extraído de HB).	58
Figura 56: Colocação dos varões de GFRP no rasgo.	59
Figura 57: Selagem do rasgo: a) com silicone; b) com argamassa.....	59
Figura 58: Reforço de alvenarias estruturais com varões GFRP.....	60
Figura 59: Reforço de paredes em pedra com varões GFRP.....	60
Figura 60: Reforço de ligação entre elementos estruturais de madeira, retirado de aslanfrp.com	61

Figura 61: Marina do Lugar de Baixo	64
Figura 62: Corrosão de armaduras por falta de recobrimento.	65
Figura 63: Corrosão em muro do porto de acostagem do Porto Santo.....	65
Figura 64:Corrosão em muro do porto de acostagem do Porto Santo.....	66
Figura 65: Cais de acostagem do Porto Novo.	67
Figura 66: Muro de proteção do cais do Porto Novo	67
Figura 67: Muro de proteção do cais do Porto Novo	68
Figura 68: Elemento estrutural analisado.....	70
Figura 69: Lado oeste da estrutura.	70
Figura 70: Medição do recobrimento.	71
Figura 71: Perda de secção dos varões.....	71
Figura 72: Estado degradado da estrutura.	72
Figura 73: Destacamento do betão de recobrimento.	72
Figura 74: Destacamento do betão.....	73
Figura 75: Agregados grossos.....	73
Figura 76: Muro da promenade dos Reis Magos	75
Figura 77: Corrosão total de alguns estribos	75
Figura 78: Estado de degradação	76
Figura 79: Contrafortes no Funchal.	77
Figura 80: Danos provocados pelo impacto de equipamentos.	77
Figura 81: Parede com falta de recobrimento.	78
Figura 82: Excesso de varões encostados.	78

Figura 83: Espaço comercial na Pontinha.	80
Figura 84: Pormenor do vão.	81
Figura 85: Pormenor 2.	81
Figura 86: Estrutura de suporte das instalações técnicas.	82
Figura 87: Degradação na parte inferior do pilar: a) pilar oeste; b) pilar este.	82
Figura 88: Perda de secção dos estribos.	83
Figura 89: Viga de bordadura.	84
Figura 90: Pormenor do destacamento do betão.	84
Figura 91: Deterioração do elemento pré-fabricado.	85
Figura 92: Elemento com menor espessura de recobrimento.	86
Figura 93: Diminuição da secção dos varões.	86
Figura 94: Canteiro na estação de correios do Porto Moniz.	87
Figura 95: Estaleiro da CMSV.	88
Figura 96: Defeito de construção na estrutura.	88
Figura 97: Estado geral da estrutura.	89
Figura 98: Estado do muro de suporte.	90
Figura 99: Pormenor do estado dos varões.	90
Figura 100: Escada de acesso à praia na Madalena do Mar.	91
Figura 101: Grande volume de agregados grossos.	92
Figura 102: Emboquilhamento do túnel da Nazaré.	93
Figura 103: Espessura de recobrimento do emboquilhamento do túnel da Nazaré.	93
Figura 104: Anomalia no emboquilhamento do túnel da Nazaré.	94

Figura 105: Estado de degradação da viga de emboquilhamento.	94
Figura 106: Intervenção no interior do túnel da Nazaré.....	95
Figura 107: Degradação do interior do túnel.....	96

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Características da corrente elétrica, adaptado de [10].	16
Quadro 2: Caraterísticas da corrente elétrica, adaptado de [36].	17
Quadro 3: Solução eletrolítica, adaptado de [10].	18
Quadro 4: Suporte eletrolítico, adaptado de [10].	18
Quadro 5: Principais características dos vários aços inoxidáveis, adaptado de [33].	22
Quadro 6: Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis [6].	45
Quadro 7: Propriedades físicas e mecânicas típicas de varões de GFRP, adaptado de [6].	47
Quadro 8: Preços de varões GFRP por metro linear dos vários fabricantes abordados no trabalho.	52

AGRADECIMENTOS

Após encerrar mais um capítulo da minha carreira académica, com a realização deste trabalho, queria deixar algumas palavras de agradecimento a quem contribuiu para a concretização deste objetivo pessoal.

Aos familiares mais chegados por todo o apoio, principalmente aos meus pais por me proporcionarem todas as condições para a conclusão do curso.

À minha namorada Sofia por todo o apoio e incentivo que me deu ao longo destes 5 anos de vida académica.

Ao Prof. Eng.º Paulo França pela orientação na realização da Dissertação de Mestrado.

À Eng.ª Patrícia Escórcio pela coorientação do trabalho.

Aos colegas e amigos que contribuíram, com os seus conhecimentos e conselhos, para a realização deste trabalho.

Agradecer ainda à Universidade da Madeira pela qualidade dos professores e do curso.

1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

A degradação dos edifícios/estruturas de betão armado é um dos principais problemas na indústria da construção civil. A durabilidade do betão foi durante muito tempo ignorada e as estruturas que chegam agora ao fim do período de vida útil previsto, já apresentam um grau de degradação bastante elevado. Atualmente, mesmo com a publicação e exigência de cumprimento dos códigos normalizados a nível Europeu, são construídas muitas estruturas, em que o fator durabilidade é muitas vezes ignorado, assumindo o betão como um material sem fim de vida. A competitividade do mercado e a crise financeira são dois fatores que muito têm contribuído para este facto, pois o dono de obra pretende sempre o valor mais baixo do mercado e os empreiteiros, para atingirem esses valores acabam por descurar na qualidade dos trabalhos/materiais.

Devido ao aumento de investigação na área da durabilidade das estruturas começou-se a descobrir novos materiais que embora mais caros garantem à estrutura uma maior durabilidade. A introdução de aditivos no betão e a utilização de armaduras não-metálicas são o grande foco neste aspeto. Os aditivos no betão garantem, entre outros, a diminuição da permeabilidade e da retração do betão e o aumento da aderência, melhorando assim a proteção das armaduras aos agentes corrosivos exteriores. As armaduras não metálicas são a grande evolução na construção civil mas o mercado tem estado reticente em implementar este material devido ao seu custo elevado. Este material tem, em média, um custo inicial 4x superior ao do aço, mas a longo prazo apresenta um custo semelhante, se os ataques dos cloretos forem um fator de dimensionamento. Os varões de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) são a armadura não metálica com maior interesse atualmente, isto porque apresenta uma excelente relação preço/resistência. Este

material apresenta uma elevada resistência à tração e à fadiga, elevada resistência química, transparência eletromagnética, corrosibilidade nula e baixo peso próprio.

A Região Autónoma da Madeira (RAM) apresenta um grande número de estruturas em zona costeira, o que torna a resistência aos ataques de cloretos, um fator de dimensionamento preponderante para a durabilidade da estrutura. Mesmo seguindo os regulamentos/código de dimensionamento, a ação dos cloretos é muito variável o que torna insuficientes algumas medidas tomadas em projeto. Sendo assim torna-se normal que a degradação por corrosão das armaduras esteja presente em algumas estruturas da RAM. A implementação do GFRP na construção ou na reabilitação de estruturas seria uma excelente forma de eliminar os problemas com a corrosão, e aumentar a durabilidade das estruturas. O levantamento fotográfico destas estruturas tornou-se interessante para o trabalho, de modo a perceber a magnitude deste problema na RAM.

No seguimento do trabalho de investigação desenvolvido pelo Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), investigação essa que tem incidido no dimensionamento de estruturas com recurso a GFRP, tornou-se interessante abordar a reabilitação e o reforço de estruturas com este material. Sendo assim desenvolveu-se este trabalho com o intuito de agregar num mesmo documento, técnicas de reabilitação e de reforço tradicionais com técnicas utilizando o GFRP e o levantamento fotográfico de possíveis estruturas a intervir.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho consiste numa pesquisa de técnicas de reabilitação e reforço com recurso a varões de aço e proceder à sua adaptação para os varões de fibra de vidro reforçados com polímeros (GFRP). Pretende-se também apresentar o levantamento fotográfico de casos de estruturas, na Região Autónoma da Madeira (RAM), a necessitar de uma intervenção devido à degradação provocada pela corrosão do aço. Para além do levantamento também pretende-se apresentar uma possível técnica de reabilitação/reforço com recurso aos varões de GFRP.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

De modo a cumprir os objetivos propostos, a dissertação foi organizada em seis capítulos. Assim, no presente capítulo são descritas as considerações iniciais onde é feito o enquadramento e a motivação que levaram à escolha do tema, os objetivos pretendidos para o trabalho e uma descrição de como está organizada a dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se o estado da arte no que concerne à reabilitação e reforço de estruturas de betão armado com aço, abordando os equipamentos e materiais, bem como as técnicas tradicionais e não tradicionais sugeridas pelas referências bibliográficas.

No terceiro capítulo faz-se um resumo das principais características do material GFRP, focando-se especificamente nos varões de GFRP. Neste capítulo é ainda apresentado os principais fabricantes de GFRP a nível mundial, fazendo-se ainda uma breve comparação de preços.

No quarto capítulo apresenta-se algumas técnicas de reabilitação e reforço com GFRP sugeridas pelo autor, bem como soluções já utilizadas por diversas empresas de construção.

No quinto capítulo expõe-se o levantamento fotográfico de estruturas degradadas pela ação da corrosão na Região Autónoma da Madeira (RAM) e apresentam-se soluções com recurso ao varão GFRP.

2

ESTADO DE ARTE

Numa época onde a indústria da construção tem sido obrigada a inovar, o desenvolvimento de novos materiais e investigação de novas técnicas é fundamental para a sobrevivência desta indústria. A reabilitação é uma das áreas que mais tem crescido, fruto do maior investimento das empresas ao nível da investigação, bem como da maior procura por parte do mercado.

O aumento das exigências de habitabilidade quer por parte da legislação, quer por parte dos donos dos edifícios, fez com que o mercado da reabilitação e do reforço não se focasse apenas em edifícios antigos (com mais de 50 anos), mas também abrangesse edifícios, que ainda durante o período de vida útil, apresentem anomalias que tenham impacto a nível estético ou estrutural.

De entre as anomalias que contribuem para a degradação das estruturas o foco será a corrosão das armaduras, pois este é o que tem mais consequências ao nível estrutural.

Segundo várias referências consultadas, conclui-se que a origem de problemas de corrosão deve-se a deficiências no projeto e falhas de execução. O facto de o projetista usar um recobrimento igual para todos os betões e para todos os elementos estruturais é um dos principais indutores de mecanismos de corrosão [28]. O recobrimento adequado é suficiente, a maior parte das vezes, para prevenir a corrosão, mas é necessário ter em atenção que a espessura de recobrimento depende das características do betão, e do elemento estrutural a ter em conta. É por isso importante o projetista distinguir as espessuras de recobrimento para diferentes tipos de betão (betão mais poroso deverá ter uma espessura maior), e também distinguir o recobrimento por elemento estrutural (em ambientes húmidos, as lajes sofrem mais o efeito da condensação que os pilares) [28]. O facto de ser um elemento exterior ou interior também tem importância na escolha do recobrimento (um pilar interior não está sujeito às mesmas condições meteorológicas de um pilar exterior).

2.1. CAUSAS DA CORROSÃO

Martins [28] e [29] apresenta as seguintes causas de corrosão para estruturas de betão armado:

- Carbonatação do betão: a alta alcalinidade inicial do betão vai reduzindo com o passar do tempo, devido à exposição a gases ácidos de atmosferas urbanas e industriais. Esta perda de alcalinidade provoca a destruição da película protetora de carácter passivo das armaduras.
- Agentes agressivos na atmosfera: o principal agente a considerar são os cloretos, presentes em atmosferas marítimas, até aproximadamente 5km da costa.
- Características do meio envolvente: a conjugação de uma atmosfera urbana e/ou industrial com uma humidade relativa elevada aumenta o risco de corrosão acentuada. Deve-se ao elevado teor de óxidos e fuligem ácida.
- Agentes agressivos adicionados ao betão: o elemento que é mais vezes adicionado ao betão durante a amassadura são os cloretos. Os cloretos podem estar presentes nos agregados, na água, nos aceleradores de presa e nos endurecedores. Estes agentes agressivos levarão à perda da passividade das armaduras. A utilização de agregados com altas concentrações ferruginosas, embora pouco comum, também tem efeitos nefastos para as armaduras, pois acelera a carbonatação superficial do betão.
- Características do betão de recobrimento: a porosidade do betão favorece a penetração dos agentes agressivos.
- Deslocamento das cofragens [29]: se ocorrer um movimento da cofragem entre a fase em que o betão perde a fluidez e a presa, provoca o aparecimento de fissuras, que poderão ser internas (Figura 1). Nesta fissura poderá se formar bolsas de água, que aceleram o mecanismo de corrosão.

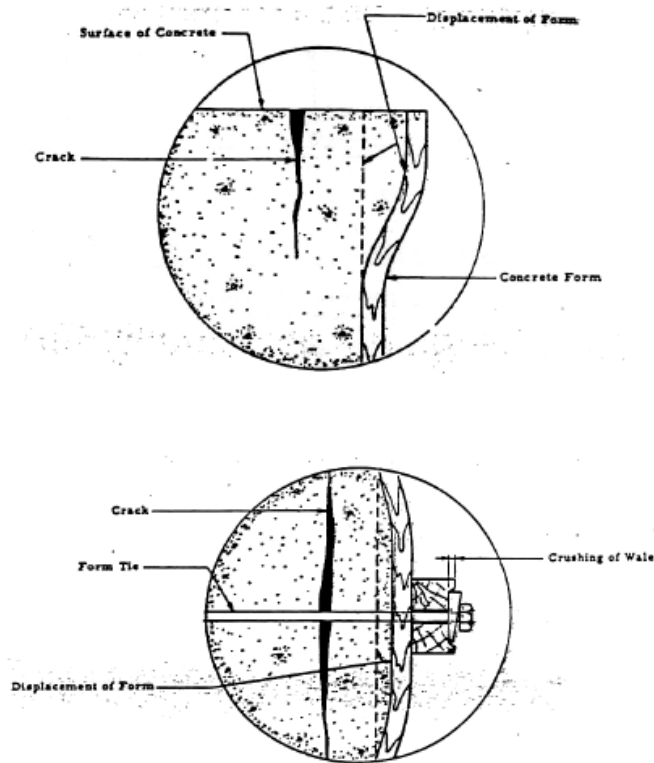


Figura 1: Deslocamento das cofragens, extraído de [29].

De todas as causas enumeradas anteriormente, existem duas que se destacam, por serem a origem da maior parte da corrosão nas armaduras (Figura 2): ação dos cloretos e ação da carbonatação. Sendo importante analisar a causa da corrosão antes de proceder à sua reparação, é fundamental o técnico perceber as diferenças da corrosão provocada pela ação dos cloretos e pela ação da carbonatação. Os cloretos originam corrosão localizada e a carbonatação origina corrosão generalizada nos varões.

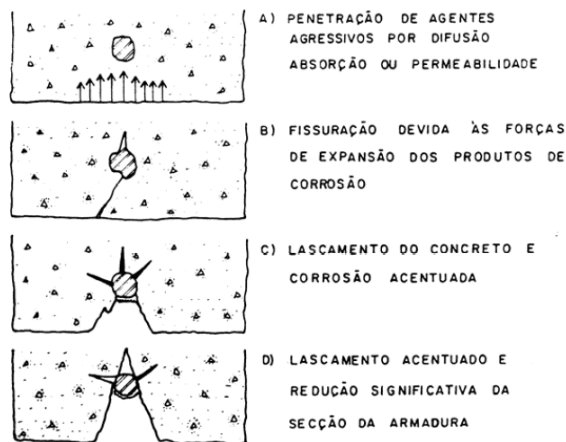


Figura 2: Progressão da corrosão, extraído de [28].

2.2 INTERVENÇÃO

A intervenção só deverá ser realizada após a realização de análises à estrutura e de serem detetadas as patologias inerentes à corrosão das armaduras.

Ainda antes de começar a trabalhar na estrutura deve-se ter especial atenção às condições de segurança da estrutura e dos trabalhadores, cumprindo sempre um plano delineado na fase de projeto.

Farinha [12] salienta os seguintes aspetos a ter em conta na escolha da solução de reabilitação:

- As propriedades dos materiais e tecnologias a adotar devem preencher os requisitos para a proteção e reparação das estruturas;
- As condições químicas e físicas do substrato;
- A resistência mecânica e estabilidade da estrutura durante todas as fases do processo construtivo, bem como em condições de serviço;
- A compatibilidade dos materiais de reabilitação com o substrato em betão a manter e com as armaduras, bem como a compatibilidade com os diferentes produtos e sistemas a utilizar no esquema de reparação;
- Evitar criar condições galvânicas que podem causar a corrosão das armaduras;
- Assegurar que as propriedades elétricas da estrutura são apropriadas, no caso de se optar pela utilização de processos eletroquímicos;
- Medidas para assegurar que a preparação do substrato de betão existente e a utilização dos produtos de proteção e de reparação estão de acordo com as recomendações do fabricante;
- Avaliar os riscos para a saúde e segurança durante a execução dos trabalhos.

Após o diagnóstico das patologias e da escolha da técnica de reabilitação, deverá se proceder à intervenção, e à resolução das causas que originaram a degradação. Deverá também utilizar-se um sistema de proteção do betão, garantindo assim a não-ocorrência de nova situação de deterioração do elemento.

2.3. MATERIAIS A UTILIZAR

Devido ao aumento de mercado na área de reabilitação, as empresas vendedoras de materiais investem muito na procura do melhor produto possível. Assim tem-se observado nos últimos anos o aparecimento de muitos materiais com comportamentos cada vez melhores ao nível da proteção à corrosão. Neste trabalho, apenas vou identificar os materiais mais usados não os diferenciando por marcas.

Cabe ao projetista da solução de reabilitação escolher o produto mais adequado após uma análise das opções de mercado.

A norma europeia EN 1504 define os critérios de conformidade, métodos de ensaio a que estes materiais deverão ser submetidos de forma a atestar a sua adequabilidade à estrutura a intervir.

2.3.1. PRODUTOS DE RECOBRIMENTO:

Num produto de recobrimento pretende-se uma material com baixas relações água-cimento, retração diminuta, elevada aderência ao aço e ao betão, baixa permeabilidade, baixa capilaridade, boa resistência mecânicas (35 MPa aos 7 dias em termos de tensão característica de rotura à compressão) [26].

Desta forma passo a descrever os materiais e técnicas de aplicação da argamassa de reparação mais comuns:

2.3.1.1. BETÃO PROJETADO

- 1- Betão projetado (Figura 3): tem como vantagens a boa aderência ao betão velho, baixa razão água-cimento e não requerer cofragem, mas tem a desvantagem de grande perda de material; deve ser aplicado com uma espessura mínima de 5 cm. De formar a melhorar o comportamento deste material pode-se adicionar fibras de aço, látex e microssílica.
- 2- Betão projetado com fibras de aço (Figura 4): aumenta a resistência à compressão e à tração do betão, as fibras controlam a retração e aumenta a resistência ao choque. A grande desvantagem é a corrosão destas fibras e como forma de a evitar deverá ser aplicado uma camada de betão projetado sem fibras de aço com cerca de 2 cm;
- 3- Betão projetado aditivado com látex: aumenta a resistência à flexão e à tração, maior resistência à penetração e difusão de cloretos. Se a emulsão for mal preparada forma um filme polimérico denso e impermeável, na interface betão velho-novo, diminuindo a aderência;
- 4- Betão projetado aditivado com microssílica: aumenta a capacidade resistente e de aderência, reduz a permeabilidade, porosidade e a penetração de cloretos.

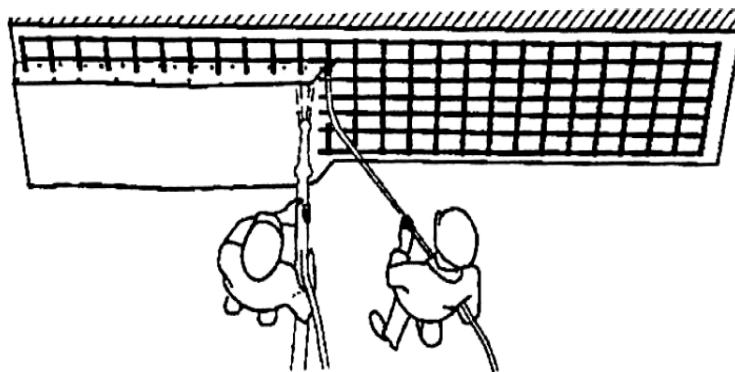


Figura 3: Aplicação de betão projetado em parede, extraído de [29].

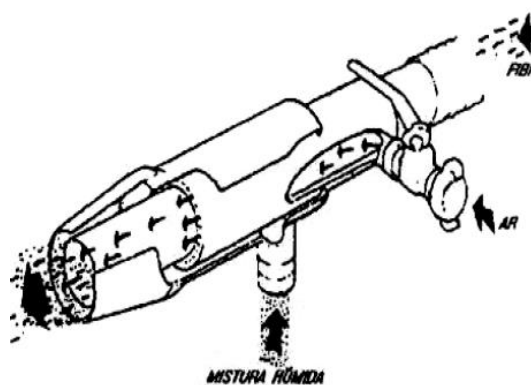


Figura 4: Esquema da ponteira de um sistema projetor de betão com fibras de aço, extraído de [29].

2.3.1.2. ADESIVOS À BASE DE EPÓXI

Este material é usado como forma de garantir uma melhor união entre o betão velho e o novo. Garante uma excelente impermeabilização das armaduras. As desvantagens são: necessitar de formas para a sua aplicação e dificultar a compactação e adensamento do betão novo. A aplicação deste produto acarreta um aumento de secção final.

2.3.1.3. BETÕES E ARGAMASSAS POLIMÉRICAS OBTIDAS DE RESINAS À BASE DE EPÓXI OU METIL-METACRILATOS

Este material tem alta durabilidade, impermeabilidade e aderência ao betão velho e à armadura, e não acarretam o aumento de secção pois a espessura de recobrimento varia entre 0,5cm e 5cm. Como desvantagens está o facto de ser necessário mão-de-obra especializada, testes prévios de desempenho, pois segundo Martins [28] existe muita flutuação de características neste tipo de produtos e têm ainda uma resistência ao fogo inferior ao betão comum.

2.3.1.4. BETÕES E ARGAMASSAS COMUNS

Como vantagem tem o preço e a facilidade de colocação em obra mas exige um grande aumento de secção, pois tem como espessura mínima os 7,5 cm [16]. A utilização de aditivos superplastificantes pode reduzir esta espessura para 6 cm.

2.3.1.5. BETÕES E ARGAMASSAS ESPECIAIS PARA “GRAUTEAMENTO”

Permite enchimento e descofragem rápido, auto nivela-se, não apresenta retração, não requer aumento de secção, tem boa aderência. A desvantagem é ser necessário cofragem.

2.3.1.6. AGREGADOS PRÉ-COLOCADOS

Esta técnica consiste na colocação dos agregados grossos e posterior introdução de um microbetão (Figura 5). Tem a desvantagem de necessitar de uma cofragem específica, e esta tem de ser selada pois o microbetão será injetado sobre pressão.

2.3.1.7. ARGAMASSA SECA

Trata-se de uma argamassa, facilmente moldável com uma consistência parecida ao barro que permite o preenchimento de pequenos orifícios. A sua aplicação requer a compactação com o auxílio de um escopro de madeira (Figura 6). Deve ser aplicado em camadas finas (1cm), e Helene [19] recomenda a colocação de agregados grossos pré-lavados a cada duas camadas. Estes agregados devem ser colocados um a um, cravando o máximo possível na argamassa, com o auxílio do escopro. Sugere-se também a utilização de um adesivo na interface com o betão, de modo a melhorar a aderência entre ambos.

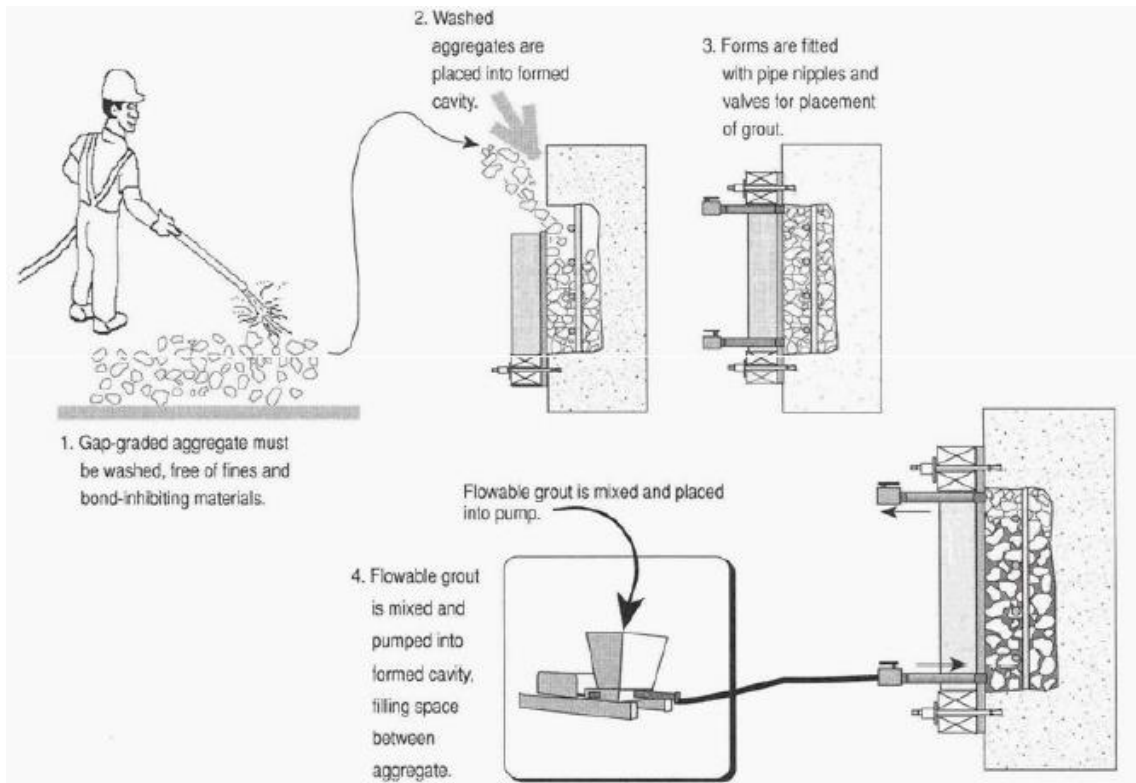


Figura 5: Aplicação de enchimento com a técnica de agregados pré-colocados, extraído de [10].

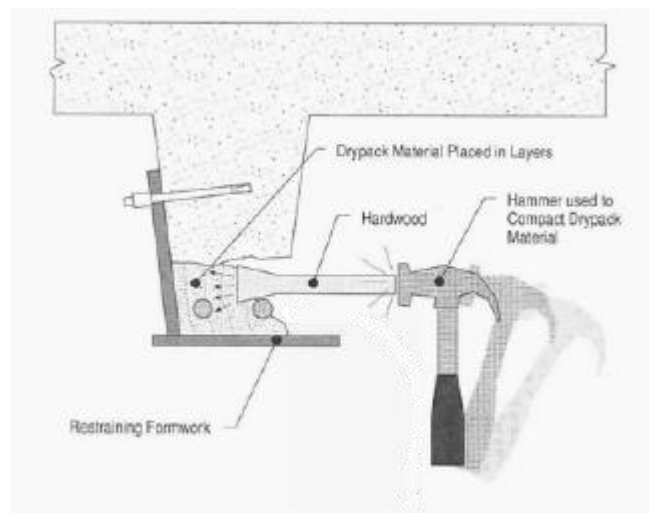


Figura 6: Aplicação de argamassa seca, extraído de [10].

2.3.2. ARMADURAS

A armadura normalmente utilizada no betão armado é em aço não ligado mas em casos específicos pode-se adotar armaduras com melhor comportamento mecânico ou químico. Passo a enumerar algumas alternativas ao aço não ligado:

- 1- Aço inoxidável: vantajoso em condições de exposição agressivas, ambientes marítimos, e em situações onde se queira evitar intervenções futuras, elementos de difícil acesso e edifícios de alto valor patrimonial [35];
- 2- Perfis metálicos: a grande desvantagem é a dificuldade em proteger este elemento, em ambientes agressivos e ao fogo [24];
- 3- Aço galvanizado: produtos de corrosão menos expansivos e menos sensíveis no manuseamento [36]. Os defeitos de galvanização não são tão prejudiciais à estrutura pois os produtos de corrosão acabam por eliminar o defeito (Figura 7);
- 4- Aço revestido com pinturas à base de epóxi: Salta [36] aconselha a sua utilização em elementos pré-fabricados pois o seu manuseamento em obra pode causar danos na pintura o que originará pontos de corrosão. Se bem aplicado garante a impermeabilidade aos cloretos.

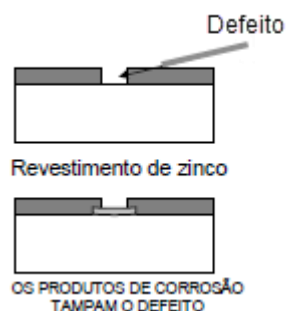


Figura 7: evolução da corrosão em aço galvanizado, extraído de [36].

2.3.3. EQUIPAMENTOS/PROCESSOS DE REMOÇÃO DO RECOBRIMENTO

Para esta tarefa existem vários equipamentos mecânicos e também alguns meios manuais que permitem mais pormenor:

- 1- Escarificação manual;
- 2- Escarificação mecânica;
- 3- Disco de desgaste;
- 4- Disco de corte;
- 5- Escovagem manual.

2.3.4. EQUIPAMENTOS/PROCESSOS DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE E/OU REMOÇÃO DA CORROSÃO

A limpeza do betão e das armaduras é uma tarefa de extrema importância, pois determinará a adesão entre os materiais. Desta forma passo a enumerar os principais equipamentos e processos sugeridos por Helene [19]:

- 1- Jato de água;
- 2- Jato de ar comprimido;
- 3- Jato de areia seco ou húmido;
- 4- Pistola de agulhas;
- 5- Lixamento manual;
- 6- Lixamento elétrico;
- 7- Vapor (usado em superfícies contaminadas com sais);
- 8- Lavagens com soluções alcalinas (resíduos ácidos impregnados);
- 9- Solventes voláteis (antes da aplicação das resinas);
- 10- Aspiração.

2.4. TIPOS DE INTERVENÇÃO

Segundo Farinha [12] pode-se recorrer às seguintes técnicas de modo a reparar uma estrutura deteriorada pela corrosão:

- 1- Substituição do betão contaminado;
- 2- Métodos de proteção/reparação eletroquímica (Realcalinização, Dessalinização e Proteção catódica); (solução a longo prazo para reabilitar estruturas contaminadas por cloretos);
- 3- Substituição das armaduras (2.3.2);
- 4- Adicionar armaduras (reforço).

2.4.1. SUBSTITUIÇÃO DO BETÃO CONTAMINADO

Quando a profundidade de carbonatação está perto de atingir as armaduras é suficiente que se substitua este betão por um mais denso e com melhores propriedades físicas, isto é menos porosidade, mais

resistente [3]. Deverá também proceder-se ao aumento do recobrimento das armaduras e se possível à aplicação e um impermeabilizante à superfície.

Deve-se proceder da seguinte forma:

- 1- Remoção de todo o betão contaminado, sendo possível usar várias técnicas como por exemplo: escarificação manual ou mecânica, disco de corte, jato de água etc.
- 2- Limpeza de todas as impurezas com a técnica mais conveniente;
- 3- Aplicação da nova camada de betão com recurso a uma das técnicas: Betão projetado, adesivos à base de epóxi para união do betão velho com o novo, betões e argamassas comuns, etc.

2.4.2. MÉTODOS DE PROTEÇÃO/REPARAÇÃO ELETROQUÍMICA

Segundo Costa [10], o objetivo destas técnicas é a alteração dos potenciais das armaduras através da aplicação de um campo elétrico. Estas técnicas têm melhores resultados quando são aplicadas antes da corrosão se instalar pois são medidas preventivas.

A grande vantagem deste sistema é que apenas é removido o betão delaminado. A desvantagem é a possibilidade de originar reações álcalis-agregado e originar a perda de aderência e fragilização do aço sob tensão (estruturas pré-esforçadas) [10].

Pela sua complexidade esta técnica exige técnicos especializados, planeamento e projeto do sistema e ainda é necessário proceder à monitorização de forma a analisar a eficácia e evolução do sistema.

2.4.2.1. REALCALINIZAÇÃO

Para Ribeiro [32], este processo é um método eletroquímico e utiliza-se quando a profundidade de carbonatação está perto de atingir as armaduras. Neste caso utiliza-se uma técnica preventiva de corrosão, pois esta só ocorre quando a profundidade de corrosão atingir as armaduras. O objetivo deste método é repor a alcalinidade no betão de recobrimento e a repassivação do aço.

Esta técnica é normalizada pela EN 14038-1 [36].

Segundo Salta [36], esta técnica tem uma duração de tratamento entre 1 a 2 semanas e procede-se da seguinte forma:

- 1- Remoção do betão só nas zonas delaminadas (não devemos proteger a superfície das armaduras de modo a garantir continuidade elétrica entre betão e armaduras);

- 2- Colocação do sistema composto por o ânodo (malha de titânio ou aço), solução eletrolítica (carbonato de sódio, carbonato de potássio ou hidróxido de lítio) e o suporte eletrolítico (pastas de fibras de celulose, mantas de feltro ou tanques) (Figura 8); O objetivo da solução eletrolítica é a transmissão de corrente elétrica, e o do suporte eletrolítico é reter ou suspender a solução eletrolítica;
- 3- Introdução de corrente elétrica, como demonstrado na Figura 9, com as características apresentadas no Quadro 1.



Figura 8: Exemplo de aplicação num pilar: a) colocação da malha (ânodo) sobre uma 1ªcamada de fibra de celulose embebida em solução Na_2CO_3 e b) colocação de nova camada de fibra de celulose sobre a malha e selagem com plástico, retirado de [32].

Quadro 1: Características da corrente elétrica, adaptado de [10].

Densidade de corrente usual	0,5 a 2 A/m ²
Densidade de corrente máxima	4 A/m ²
Voltagem máxima	50 V DC (EN 12696:2000)

- 4- Após o período de tratamento deverá ser introduzido uma proteção superficial do betão.

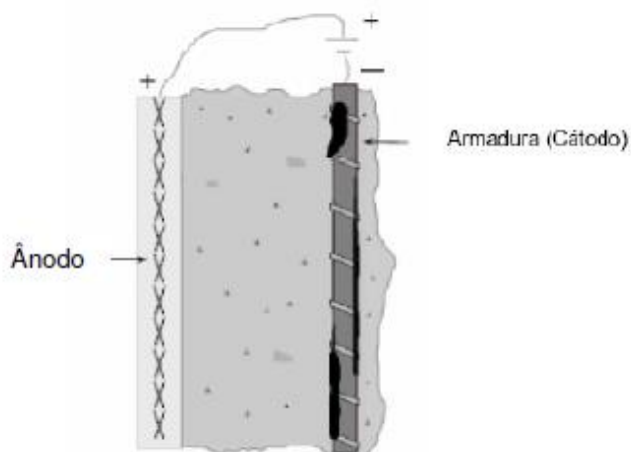


Figura 9: Esquema do sistema.

2.4.2.2. DESSALINIZAÇÃO

Esta técnica deve ser utilizada quando estamos perante uma elevada concentração de cloretos, mas onde o mecanismo de corrosão ainda não se iniciou. Esta é uma técnica preventiva. O objetivo da técnica é a remoção dos cloretos no betão de recobrimento e a repassivação das armaduras [10]. Esta técnica é normalizada pela EN 14038-1 [36].

Salta [36] estima um prazo de aplicação de tratamento com uma duração de 6 a 10 semanas.

O procedimento de aplicação [10] deste método é muito semelhante à dessalinização sendo a diferença no sistema eletrolítico:

- 1- Remoção do betão só nas zonas delaminadas (não devemos proteger a superfície das armaduras de modo a garantir continuidade elétrica entre betão e armaduras);
- 2- Colocação do sistema composto por o ânodo (malha de titânio ou aço), solução eletrolítica (água, hidróxido de sódio ou borato de lítio) e o suporte eletrolítico (pastas de fibras de celulose, mantas de feltro ou tanques) (Figura 10);
- 3- Introdução de corrente elétrica com as características apresentadas no Quadro 2:

Quadro 2: Características da corrente elétrica, adaptado de [36].

Densidade de corrente usual	0,5 a 2 A/m ²
Densidade de corrente máxima	4 A/m ²
Voltagem máxima	30 a 50 V DC

4- Após o tratamento é necessário a introdução de um revestimento impermeável aos cloretos;



Figura 10: Aplicação do eletrólito sobre a malha metálica, extraído de [36].

No quadro seguinte estão descritas as principais características do sistema eletrolítico (solução eletrolítica + suporte eletrolítico).

Quadro 3: Solução eletrolítica, adaptado de [10].

	Água	Hidróxido de sódio	Borato de lítio
Custo	Baixo	Moderado	Elevado
Risco de acidificação	Elevado	Baixo	Baixo
Risco de ocorrência reações álcalis-sílica	Inviável	Inviável	Apropriado

Quadro 4: Suporte eletrolítico, adaptado de [10].

	Pasta de fibras de celulose	Mantas de feltro	Tanques
Caraterísticas	Elevada aderência	Custo reduzido e capacidade de reutilização	Capacidade de reutilização
Aplicabilidade	Superfícies irregulares	Superfícies horizontais	Superfícies verticais (abrange áreas elevadas)
Condicionantes	Necessidade de limpeza no final	Risco de evaporação ou difusão da solução eletrolítica	Fugas e evaporação do eletrólito

2.4.2.3. PROTEÇÃO CATÓDICA

Existe muita investigação acerca da proteção catódica, e seria impossível aprofundar este assunto neste trabalho, portanto proponho-me apenas a apresentar um pequeno resumo da aplicação desta técnica e dos materiais a utilizar.

Esta é uma técnica permanente que tem como objetivo polarizar as armaduras a um potencial de proteção. Esta polarização pode ser atingida com recurso a duas técnicas, por corrente impressa ou por ânodos sacrificiais. Esta técnica é reconhecida mundialmente como a única técnica que elimina totalmente a corrosão [27].

A corrente impressa, é a mais utilizada em estruturas de betão armado devido à elevada resistividade do betão. O objetivo é garantir a passagem de uma corrente contínua pelas armaduras [27]. A corrente pode ser impressa através de ânodos tipo revestimento ou por ânodos localizados.

- 1- Corrente impressa por ânodos tipo revestimento: esta tecnologia implica o revestimento da estrutura com uma malha de titânio recoberta por argamassa (Figura 11) [36];

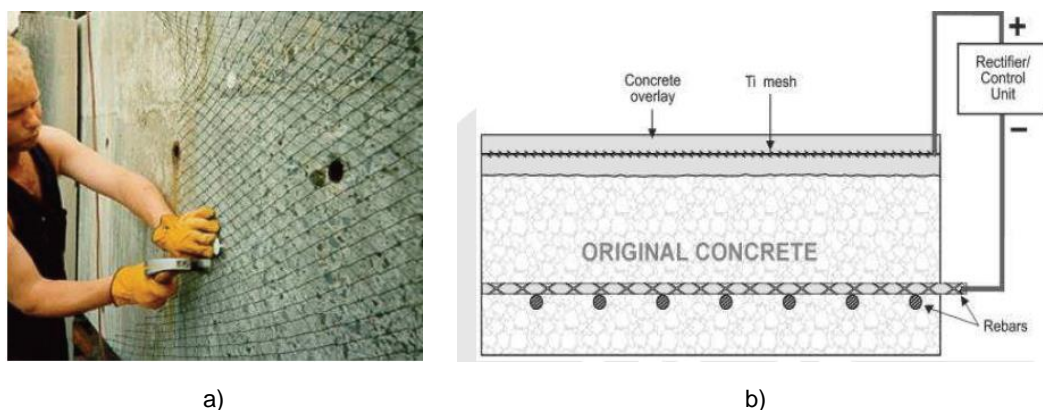


Figura 11: a) aplicação da malha de titânio ativado com fixadores de plástico, b) esquema de funcionamento de PC corrente impressa por ânodos tipo revestimento.

- 2- Corrente impressa por ânodos localizados: neste sistema utiliza-se ânodos em forma de sonda, inseridos em furos na estrutura (Figura 12). Estes furos devem ser preenchidos por um material condutor, como pasta ou gel de grafite ou argamassas de baixa resistividade.

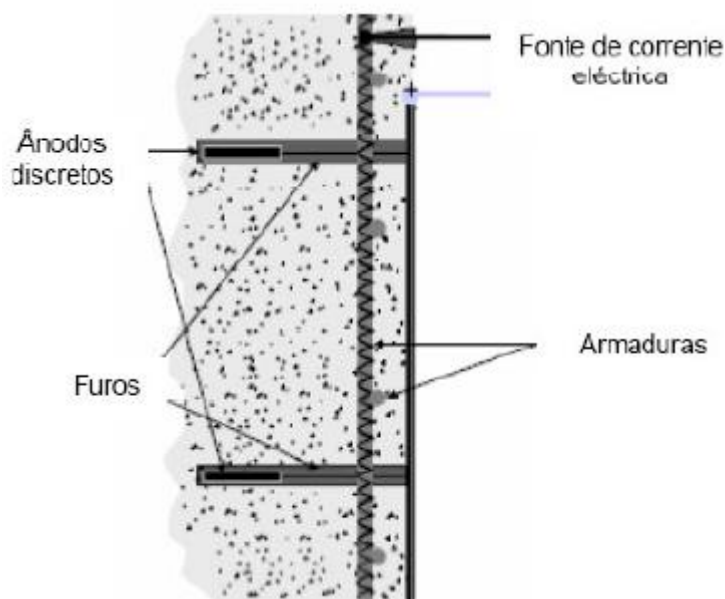


Figura 12: Esquema de funcionamento de PC corrente impressa por ânodos localizados.

Os ânodos sacrificiais consistem na colocação de um ânodo sacrificial junto às armaduras (Figura 13). Este ânodo deve ser formado por um metal que corroe mais facilmente que o aço das armaduras.



Figura 13: Colocação dos ânodos sacrificiais

Na altura de escolher o tipo de ânodo a utilizar deve-se ter em atenção os seguintes fatores [27]:

- 1- Facilidade de instalação;
- 2- Tipo de estrutura a proteger
- 3- Condições ambientais de exposição;
- 4- Tempo de vida esperado;
- 5- Efeitos da instalação do ânodo na estrutura;

6- Custo;

7- Estética.

A título de curiosidade, esta técnica foi aplicada em estruturas de betão armado nos anos 70, pelo Departamento de Transportes da Califórnia, com o objetivo de controlar a corrosão das armaduras nos tabuleiros de pontes [27].

2.4.3. SUBSTITUIÇÃO DAS ARMADURAS

Neste sub - capítulo abordar-se-à a utilização de varões de aço inoxidável e a problemática da ligação entre o novo varão e o varão antigo.

2.4.3.1. SUBSTITUIÇÃO POR ARMADURAS DE AÇO INOXIDÁVEL

A substituição das armaduras de aço não ligado, por aço inoxidável tem sido uma técnica bem aceite pelo mercado principalmente em obras em zonas marítimas, ambientes de elevada agressividade ou em reabilitação de edifícios de elevado valor patrimonial, onde é fundamental reduzir os efeitos a curto e longo prazo da corrosão. Sendo assim tem havido bastante investigação na área dos aços inoxidáveis com o intuito de melhorar o comportamento químico deste material [35].

Este material pode ser utilizado como uma medida preventiva da corrosão, se for usado na construção da estrutura, mas também pode ser utilizado como material de reparação, substituindo as armaduras corroídas por armadura de aço inoxidável. A Ópera de Sydney é um exemplo de uma estrutura armada com aço inoxidável [36], pois encontra-se muito próxima do mar e sendo um edifício icónico é importante reduzir o número de intervenções na sua vida útil.



Figura 14: Construção da Ópera de Sydney

Vantagens segundo Salta [35] e [36]:

- Teor crítico de cloretos 2 a 8 vezes superior ao do aço não ligado;
- Não sofrem corrosão uniforme, logo a progressão da corrosão não origina fissuração nem delaminação do betão de recobrimento;
- Menor sensibilidade a anomalias no betão de recobrimento;
- Maior resistência à tração e maior ductilidade;
- Redução de custos de manutenção em 50%.

Desvantagens:

- Preço é 5 a 7 vezes mais caro que o aço não ligado o que leva a um aumento no custo inicial da estrutura na ordem dos 10% [35];
- Coeficiente de expansão térmico superior ao do betão ($1,8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Ao nível de custos os valores salientados anteriormente foram extraídos de bibliografia referente a estruturas com aço inoxidável. No entanto em [12], [35] e [8] é salientado que consegue-se reduzir os custos usando apenas o aço inox nas zonas da estrutura onde a agressividade dos agentes é mais elevada, onde estima-se que o recobrimento será menor ou ainda em zonas de onde seja difícil garantir uma correta vibração do betão. A investigação que tem sido feita com este material é maioritariamente em construções de raiz com este tipo de varões, mas os mesmos podem ser utilizados na reparação de estruturas. Em [12], o autor recomenda que se utilize aço inoxidável na reabilitação de edifícios de alto valor patrimonial.

Do ponto de vista financeiro a reabilitação encontra-se dentro do patamar de otimização deste material pois este, só será utilizado em zonas problemáticas, como são as zonas da estrutura mais exposta aos cloretos, as zonas com menos recobrimento, e locais de difícil acesso para trabalhos, tal como é preconizado pelos vários autores.

Dentro dos aços inoxidáveis existe aços com diferentes características mecânicas e químicas [35]. No Quadro 5 seguinte indica-se o mais apropriado para a função a desempenhar e uma análise comparativa de preço:

Quadro 5: Principais características dos vários aços inoxidáveis, adaptado de [33].

Aço Inoxidável	Resistência à corrosão	Resistência mecânica	Custo
Austeníticos	Elevada	Reduzida	Médio
Duplex	Elevada	Elevada	Alto
Aços com azoto como elemento de liga	Elevada	Elevada	Alto
Ferríticos	Reduzida	Média	Baixo

2.4.3.2. LIGAÇÕES ENTRE VARÕES

A substituição dos varões corroídos implica que se realize uma ligação entre o varão em bom estado existente na estrutura, e o elemento novo a introduzir. Esta ligação pode ser feita de várias formas, sendo a mais tradicional através de um comprimento de emenda onde a transmissão de esforços é concretizada pela aderência entre os varões. No entanto existem outras alternativas por vezes mais simples de aplicar pois não necessita que seja extraído betão para cumprir o comprimento de emenda. De seguida apresentam-se técnicas recomendadas por [19], fazendo algumas adaptações para as normas portuguesas:

1. Comprimento de emenda: a transmissão de esforços é efetuada pela aderência entre varões. Neste caso deve-se garantir, em obra, que o comprimento de emenda definido é cumprido. A introdução da armadura de costura (Figura 15) é uma sugestão de Helene [19], podendo-se proceder a esta técnica sem esta armadura. O comprimento de emenda (L) e a espessura de recobrimento (d) variam com o produto de recobrimento e com o funcionamento das armaduras (tração ou compressão):
 - a. Armaduras comprimidas:
 - i. Argamassa de cimento de Portland: $L \geq 40\varnothing$ e $d \geq 5$ cm;
 - ii. Argamassa com base epóxi: $L \geq 30\varnothing$ e $d \geq 0,5$ cm;
 - iii. Argamassa com base poliéster: $L \geq 30\varnothing$ e $d \geq 0,5$ cm.
 - b. Armaduras tracionadas:
 - i. $\varnothing \leq 12,5$ mm e até 50% das emendas na mesma secção – utilizam-se as regras das armaduras comprimidas;
 - ii. $\varnothing \leq 12,5$ mm e 100% das emendas na mesma secção – aumentar em 50% o comprimento das emendas;

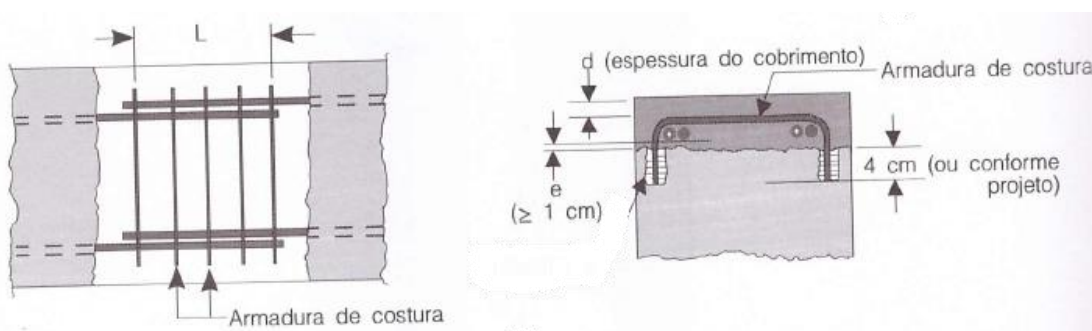


Figura 15: Emenda dos varões, extraído de [19].

2. Acopladores: esta é vista como a solução ideal, pois é fácil de instalar, não necessitando de técnicos especializados. Atualmente existem várias opções no mercado sendo a mais comum o

acoplador com rosca (Figura 16). A desvantagem é a dificuldade para fazer a rosca no varão existente na estrutura. Outra opção é o acoplador de aperto lateral (Figura 17).



Figura 16: Acopladores de rosca



Figura 17: Acopladores de aperto lateral, extraído de Halfen.de

3. Soldada: a solda deve ser aplicada nos dois lados do varão como demonstrado na Figura 18. A soldadura deve ser efetuada por um técnico especializado e deve seguir o EC3-1-8. Deve-se ter especial atenção no calor emitido pela soldadura, que pode danificar o betão na zona [19].

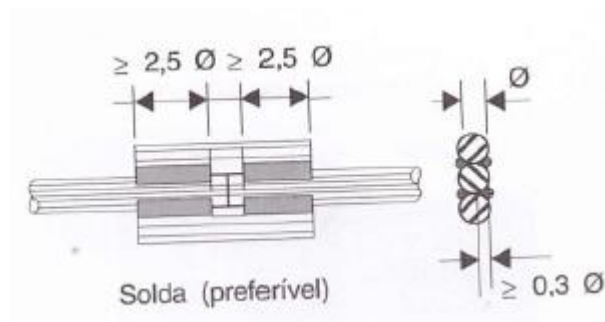


Figura 18: Emenda por soldadura, extraído de [19].

2.5. SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

Neste subcapítulo serão descritas algumas soluções possíveis, para reabilitação de estruturas degradadas pela corrosão.

De seguida apresenta-se uma sugestão de reabilitação para uma estrutura danificada pela penetração de cloretos sugerida por Farinha [12]:

- 1- Saneamento do betão degradado;
- 2- Reposição com argamassas de reparação, tixotrópicas com retração controlada reforçadas com fibras de polipropileno;
- 3- Aplicação de tinta acrílica de elevado desempenho, resistente à penetração de cloretos e dióxido de carbono e permeável ao vapor de água.

Nesta sugestão não se procede à substituição das armaduras, sendo que a sua substituição passaria pela remoção das armaduras corroídas e colocação de novas cumprindo o comprimento de amarração.

Em seguida apresenta-se outra solução adaptada de Helene[19]. Neste caso procede-se à substituição das armaduras corroídas:

1. Remover o betão que envolve as armaduras, deixando 2,5 cm livres em volta das mesmas. Para além do betão em volta das armaduras corroídas, deve-se ainda remover o betão num comprimento que permita as emendas das armaduras;
2. Remoção das armaduras corroídas, utilizando equipamento apropriado. Na zona onde os varões antigos continuam deve-se proceder à limpeza das mesmas com um jato de areia;
3. Colocação das novas armaduras com especial atenção ao tipo de ligação escolhido;
4. Remover todos os detritos com recurso a ar comprimido;
5. Aplicar adesivo à base de epóxi com o objetivo de proteger as armaduras e de melhorar a aderência do betão.
6. Aplicar uma das argamassas apresentadas em 2.3.1, com atenção à espessura requerida por cada um dos materiais e as exigências na obra.

Salienta-se o facto que a substituição das armaduras deverá se realizar quando exista uma diminuição da secção do varão de aço entre 25% e 30% [12].

2.6. SOLUÇÕES DE REFORÇO

Deve-se proceder ao reforço de uma estrutura quando é necessário aumentar a capacidade resistente, o nível de segurança, proceder a modificações da geometria da estrutura, por degradação da estrutura

devido a assentamentos de apoio ou aumentar o isolamento eletro-magnético de uma estrutura de betão armado. Neste trabalho vão-se discutir as seguintes técnicas de reforço:

- 1- Aumento de secção;
- 2- Adição de armaduras;
- 3- Encamisamento com betão;

Outras técnicas possíveis são o encamisamento com perfis metálicos, pré-esforço exterior mas não serão abordadas neste trabalho.

2.6.1. AUMENTO DA SECÇÃO

Aquando da intervenção de reforço deverá se garantir que os elementos pré-existentes estão sujeitos ao menor esforço possível, aliviando os elementos de cargas adicionais passíveis de se retirar [40]. Este aumento de secção de betão aumenta a capacidade resistente da secção e a rigidez da estrutura [12]. O enchimento de betão deve ser solidarizado com a estrutura através de conectores.

2.6.2. ADIÇÃO DE ARMADURAS

Esta técnica consiste no aumento da área de armaduras sem o aumento da secção. Na Figura 19 mostra-se um exemplo de aplicação desta técnica no reforço de uma viga à flexão, onde são acrescentados 4 varões aos 2 já existentes.

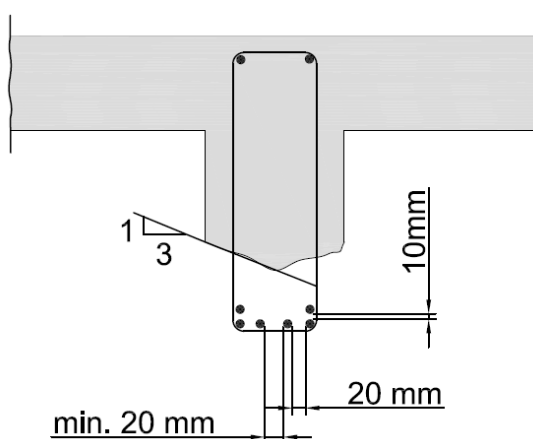


Figura 19: Reforço, à flexão, por adição de armaduras.

Também é possível o reforço ao esforço de corte, na Figura 20 apresenta-se uma sugestão de colocação das armaduras. Em a) é mostrado como se procede à preparação do elemento e em b) mostra-se um corte da viga antes da colocação da argamassa de recobrimento.

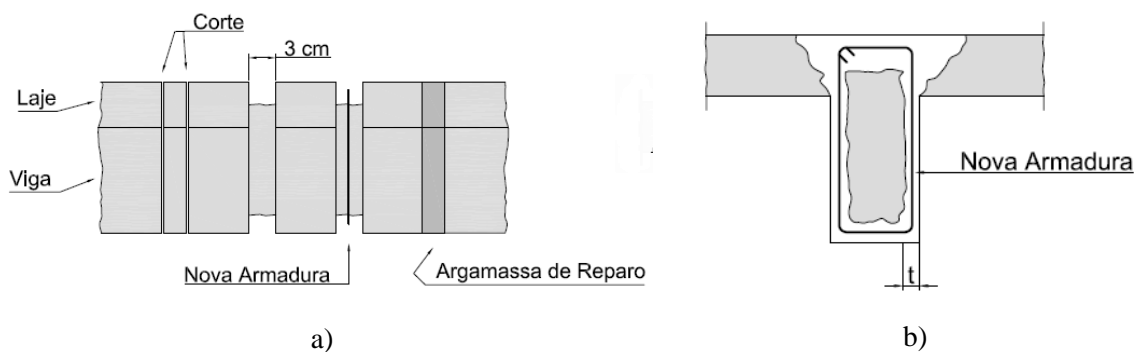


Figura 20: Reforço de vigas ao corte, adaptado de [19].

Outra alternativa para o reforço ao corte passaria pela inserção de varões em furos verticais previamente abertos na viga, como apresentado na Figura 21. Estes varões devem possuir na ponta um sistema de ancoragem que permita a mobilização da resistência. Em caso de necessidade o furo poderá ser preenchido com uma calda de cimento. O sistema de ancoragem pode passar por a soldadura de uma chapa em ambas as extremidades do varão.

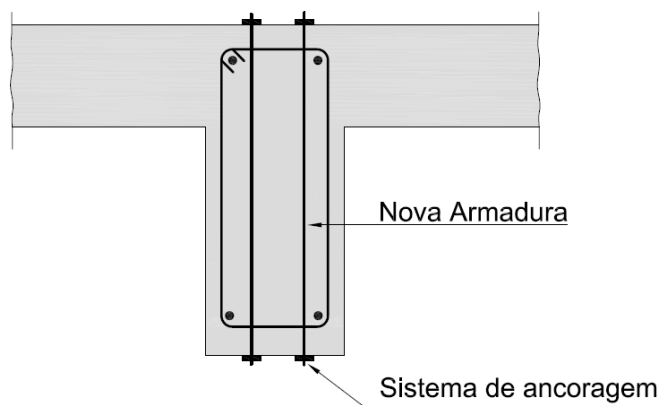


Figura 21: Reforço de vigas ao corte.

Em caso de laje, em que a fendilhação ultrapassou o valor limite pode-se recorrer à técnica apresentada na Figura 22e Figura 23.

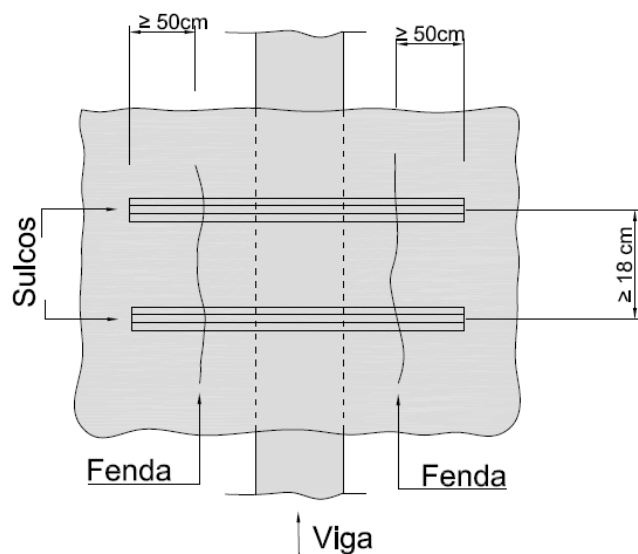


Figura 22: Reforço e reabilitação de lajes, adaptado de [19].

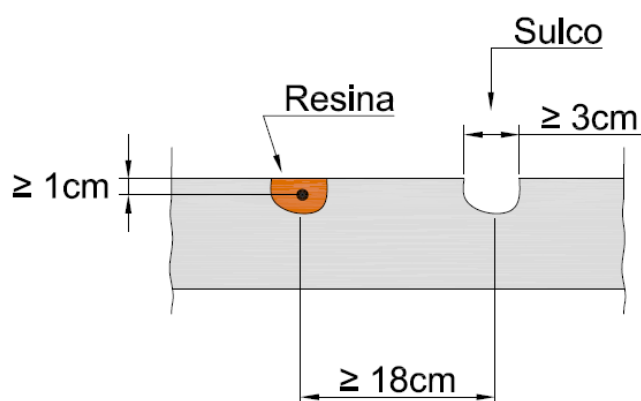


Figura 23: Colocação do varão de reforço.

Na Figura 22 apresenta-se uma laje com fendilhação excessiva na face superior. A solução recomendada como forma de reforço/reabilitação a este elemento é a colocação de varões em sulcos criados na laje. Esta técnica adequa-se a lajes fendilhadas devido a deformação excessiva, provocada pelas cargas de serviço. Quando a fendilhação é por efeitos de deformações impedidas (variações de temperatura, retração e/ou assentamentos diferenciais) esta técnica não trará benefícios à estrutura. Assim, salienta-se a importância de um correto diagnóstico antes da intervenção. Continuando com a descrição da Figura 22, Helene [19] destaca que o comprimento de amarração deve ser cumprido, e na imagem sugere que seja superior a 50 cm. O autor apresenta uma alternativa que passa pela dobragem nos extremos do varão seguido de colagem com resina.

Na Figura 23 apresenta-se um corte da laje onde é visível a colocação da armadura e posterior aplicação de argamassa. O autor sugere a aplicação de argamassa base epóxi ou argamassa polimérica. Os requisitos essenciais na escolha da argamassa são a baixa retração, boa aderência ao elemento, baixa permeabilidade, elevada resistência à compressão, e compatibilidade em termos de deformabilidade com o betão inicial [16].

Esta mesma técnica é apresentada por Farinha [12] como possibilidade para reforço de pilares. O processo descrito é o seguinte: “inserir varões em ranhuras abertas no elemento de betão, injetando posteriormente um resina epoxídica, de forma a solidarizar com a estrutura existente. Caso se pretenda a ligação das novas armaduras às existentes, pode-se escolher entre empalme e soldadura elétrica. A soldadura tem a vantagem de garantir melhor aderência entre os varões mas deve ser executada com a corrente elétrica, o mais reduzida possível, de forma a evitar fenómenos de recristalização no betão, devido ao calor emanado.”

2.6.3. ENCAMISAMENTO

Segundo Gomes e Appleton [16], esta técnica consiste “no aumento da secção transversal através da adição de uma armadura suplementar e de uma camada de betão que envolve a secção inicial e na qual ficam inseridas as novas armaduras.” Na Figura 24 apresenta-se a colocação de armaduras de reforço de um pilar. Em [40], o autor faz a seguinte recomendação em relação a elementos pilar: “aconselha-se o sobredimensionamento da armadura transversal de modo a garantir um confinamento tal ao betão original, que melhore a sua ductilidade garantindo assim, que a capacidade resistente da nova camada de betão é totalmente aproveitada.” Outra recomendação em relação ao encamisamento de pilares é que, no dimensionamento do reforço deve ser ignorada a resistência do núcleo, ficando esta a favor da segurança [29].

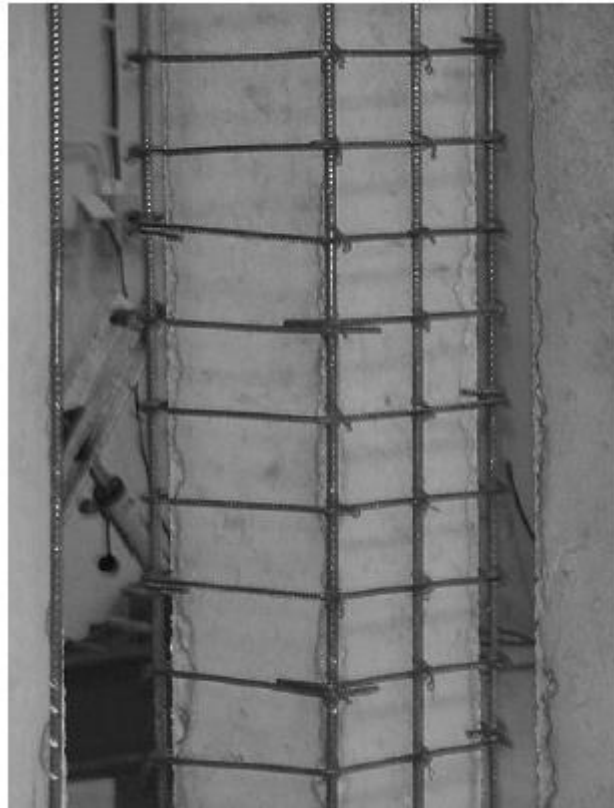


Figura 24: Encamisamento de um pilar, extraído de [23].

2.6.3.1. VANTAGENS DO ENCAMISAMENTO

- 1- Aumenta a resistência das zonas comprimidas;
- 2- Protege as armaduras de agentes químicos agressivos;
- 3- Facilidade de execução;

2.6.3.2. DESVANTAGENS DO ENCAMISAMENTO

- 1- Aumento da secção transversal, com implicações na arquitetura;
- 2- Implica restrições de utilização da estrutura;
- 3- Incompatibilidade dos materiais;
- 4- Retração do novo material aplicado;
- 5- Em elemento pilares é necessário ter especial atenção ao lançamento do betão de modo a evitar a segregação do betão [29].

2.6.3.3. CAMPO DE APLICAÇÃO

Esta técnica é utilizada no reforço de vigas (Figura 25), pilares (Figura 26) e lajes. Deve ser aplicada quando há necessidade de aumentar a resistência das zonas comprimidas, aumentar a área de armadura ou quando a estrutura apresenta fendilhação devido a excesso de cargas.

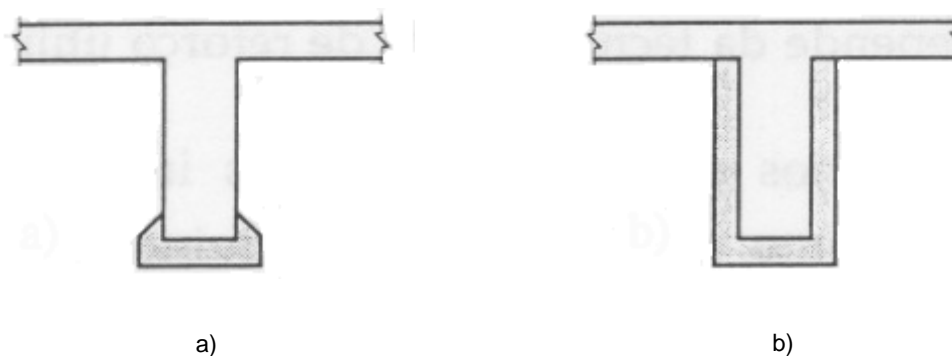


Figura 25: a) Viga reforçada à flexão por encamisamento; b) Viga reforçada à flexão e ao corte por encamisamento, extraído de [16].

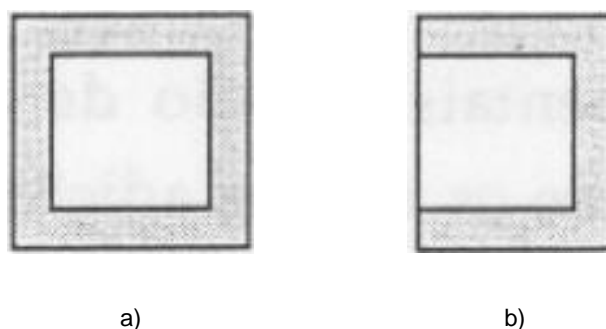


Figura 26: a) Encamisamento de pilar; b) Encamisamento aberto, extraído de [16].

Esta técnica tem uma grande variabilidade de formas de aplicação, desde a colocação das armaduras, à forma de aplicação do recobrimento. Gomes e Appleton [16] aconselham que sejam seguidos os seguintes passos na aplicação desta técnica:

- 1- Escoramento da estrutura: permite que se alivie os esforços dos elementos a reforçar, reduzindo desta forma a deformabilidade dos mesmos;
- 2- Preparação da superfície: necessário para garantir a aderência entre o material novo e o antigo. Esta tarefa passa pela remoção de todo o betão deteriorado, aumento da rugosidade da estrutura e limpeza com jato de água e/ou ar comprimido. A remoção do betão não deve ser feita com recurso ao martelo elétrico pois a sua utilização cria micro-fissuração no elemento [23]. Para

aumentar a rugosidade o jato de areia é o meio mais apropriado [23]. O estado do betão irá condicionar a quantidade de betão a remover:

- a. Se o betão do elemento estiver em bom estado será apenas necessário o aumento de rugosidade da superfície, Figura 27a);
- b. Caso o betão esteja contaminado por carbonatação deve-se remover toda a camada de recobrimento, Figura 27b);
- c. Em situações que o betão esteja muito deteriorado (por agentes químicos, ou por processos de erosão natural), deve-se garantir que o betão em volta das armaduras é todo removido, permitindo a limpeza das mesmas com jato de areia, Figura 27c). Se as armaduras estiverem muito corroídas deve-se ter especial atenção ao dimensionamento das armaduras de reforço.

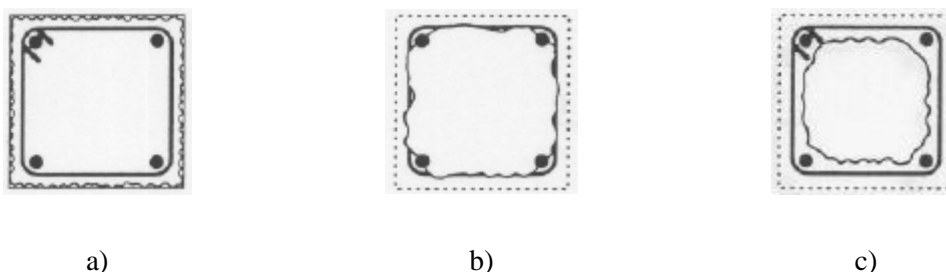


Figura 27: Preparação da superfície do elemento, extraído de [16].

- 3- Colocação das armaduras de reforço: deve ser efetuada após a limpeza do substrato. Como já foi referido anteriormente, se for detetado que as armaduras originais estão em mau estado, deve-se rever o dimensionamento das armaduras de reforço.
- 4- Betonagem do recobrimento: poderá ser efetuada com as mais variadas técnicas sendo as mais comuns as apresentadas no sub-capítulo 2.3.1. Aconselha-se a utilização de um adesivo entre camadas de betão;
- 5- Deve-se ter bastante atenção na cura do material. Deve-se fazer molhagens de forma a diminuir a retração do betão adicionado.

2.6.3.4. PORMENORIZAÇÕES DE REFORÇO DE VIGAS POR ENCAMISAMENTO

1- Reforço à flexão:

Na Figura 28 sugere-se o reforço à flexão de uma viga. Em a) apresenta-se a colocação de armaduras e em b) a colocação do material de recobrimento. Na colocação das armaduras procede-se à furação da viga com espaçamento de 20cm entre furos, ao longo da viga, e após a colocação dos estribos estes devem ser chumbados com argamassa ou resina apropriada. Após a fixação do estribo procede-se à colocação dos varões longitudinais. O recobrimento, tal como representado, pode ser efetuada com betão

ou micro betão. Aconselha-se que o material de recobrimento seja apenas colocado por um lado da cofragem de modo a evitar bolhas de ar na zona inferior da cofragem.

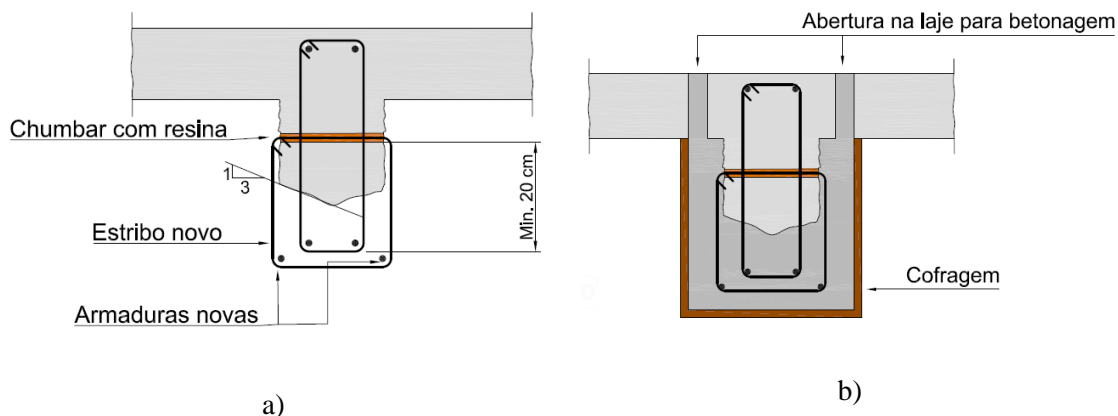


Figura 28: Reforço à flexão de vigas, adaptado de [19].

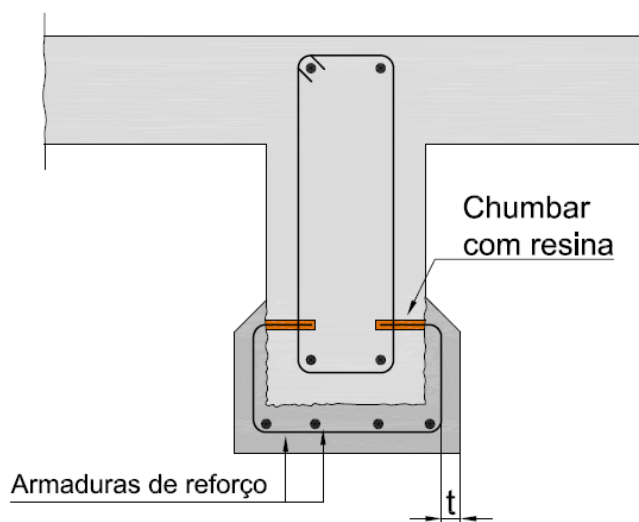


Figura 29: Reforço à flexão por encamisamento, adaptado de [16].

Na Figura 29 apresenta-se uma alternativa de reforço à flexão. Tem a vantagem de reduzir a quantidade de material necessária e por ser uma intervenção mais simples pois não é necessário a remoção de tanto material de recobrimento.

Na Figura 30 é apresentada uma sugestão de reforço à flexão de vigas, juntamente com um reforço da laje. O reforço da laje dá-se através do aumento de secção juntamente com a introdução de uma armadura (A's), em forma de malha de varões de Ø8 espaçados a 20 cm, na face superior do elemento. A utilização

dos conectores permite a melhoria da aderência entre os materiais, mas em sua substituição poderá ser utilizado um adesivo à base de epóxi.

Na viga, Martins [29] sugere que a armadura (A_s) seja superior a $3\phi 12$. As espessuras de recobrimento (t e t') variam consoante a tecnologia adotada.

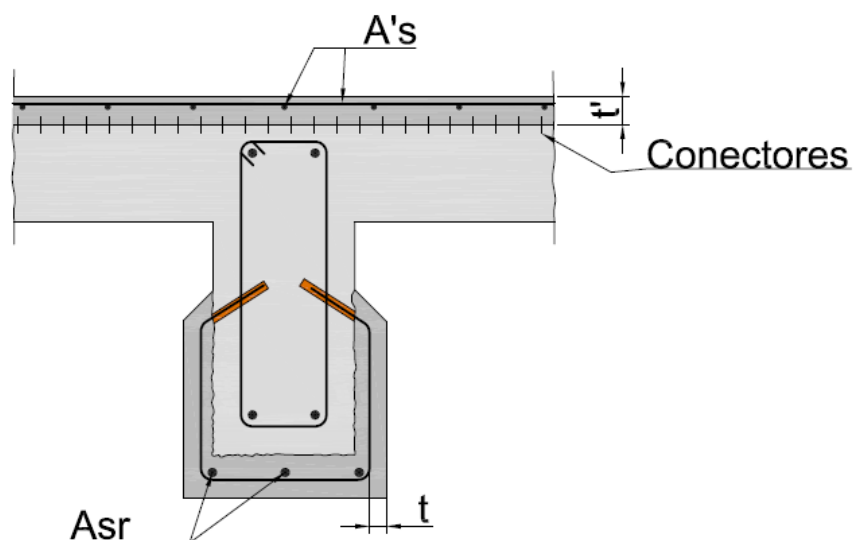


Figura 30: Reforço à flexão de viga e laje, adaptado de [29].

Em alternativa ao betão armado ou se existir condicionamentos ao aumento de secção, pode-se recorrer ao betão projetado, pois permite a diminuição de espessura de recobrimento, Figura 31. A aplicação do betão projetado deverá seguir as seguintes regras:

- Começar por projetar os cantos e cavidades;
- Revestir as armaduras;
- Projetar em camadas consecutivas com espessura inferior a 5 cm até obter-se a espessura desejada.

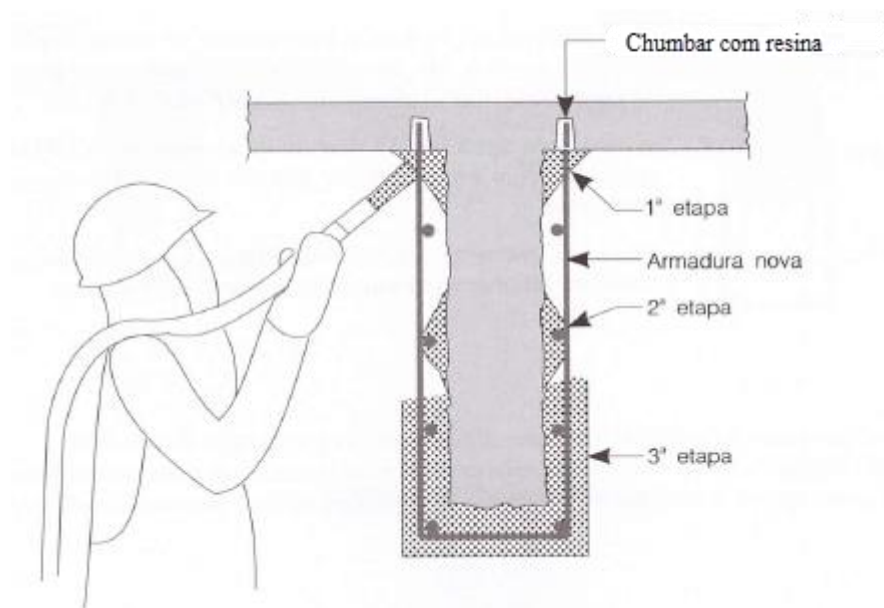


Figura 31: Reforço à flexão por encamisamento com betão projetado, extraído de [19].

2- Reforço ao Corte:

No que se refere ao reforço ao corte a grande diferença será na disposição dos varões. No reforço ao corte deve-se garantir a amarração das armaduras de reforço à laje (Figura 32). Normalmente é inserido um estribo que amarre a viga à laje.

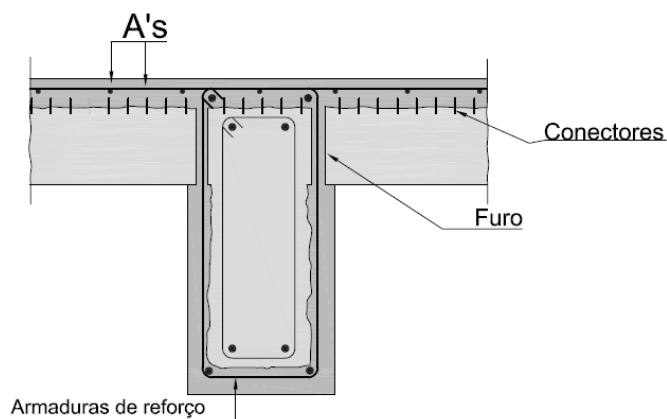


Figura 32: Reforço de vigas ao corte e à flexão, adaptado de [12].

3- Reforço à Torção:

Em casos em que é necessário aumentar a resistência à torção de uma viga, a introdução de estribos e varões longitudinais suplementares, juntamente com um aumento de secção serão suficientes para garantir a segurança. Na Figura 33 mostra-se uma pormenorização de reforço à torção com recurso ao betão projetado. Ter em atenção que o estribo deve ser chumbado antes da projeção do betão.

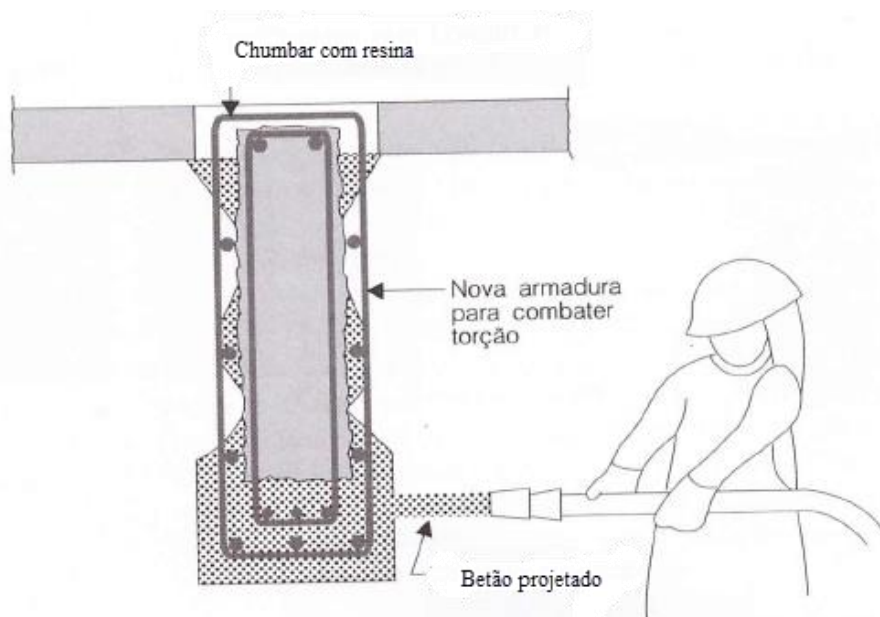


Figura 33: Reforço de uma viga, à torção, com betão projetado, extraído de [19].

Um aspeto muito importante a ter em atenção no encamisamento de vigas é a ancoragem com os elementos verticais. É necessário chumbar os varões corretamente de forma a garantir a perfeita adesão e distribuição de esforços. Martins [29] faz algumas recomendações sobre esta matéria: o diâmetro do furo deve ser, aproximadamente 5 mm superior ao do varão, e o furo deve ser limpo e seco, antes da aplicação da resina.

Na Figura 34a) apresenta-se uma pormenorização de ancoragem através de um furo preenchido por resina ou argamassa apropriada. Esta ancoragem tira partido da aderência do varão à resina injetada no furo. Caso o material de enchimento seja resina aconselha-se um furo com comprimento igual ou superior a 20 diâmetros, e um diâmetro de furo (d') 5 mm superior ao diâmetro do varão. Se o material for argamassa é aconselhável que o comprimento do furo seja igual ao comprimento de amarração de um elemento novo [16].

Na Figura 34b) mostra-se uma pormenorização por aparafusamento, ou por sistema mecânico de fixação por aperto. O varão deve atravessar todo o pilar, e para além da fixação, o furo deve ser preenchido por uma resina de forma a proteger o varão, contribuindo para a amarração do varão, embora de forma muito ténue.

Outra opção é a soldagem do varão de reforço a elementos metálicos pré-colocados como na Figura 34c) e Figura 34d). Este tipo de ligação consiste em chumbar um elemento metálico à viga (Figura 34c)) ou ao pilar (Figura 34d)) e posteriormente soldar o varão do reforço a este elemento.

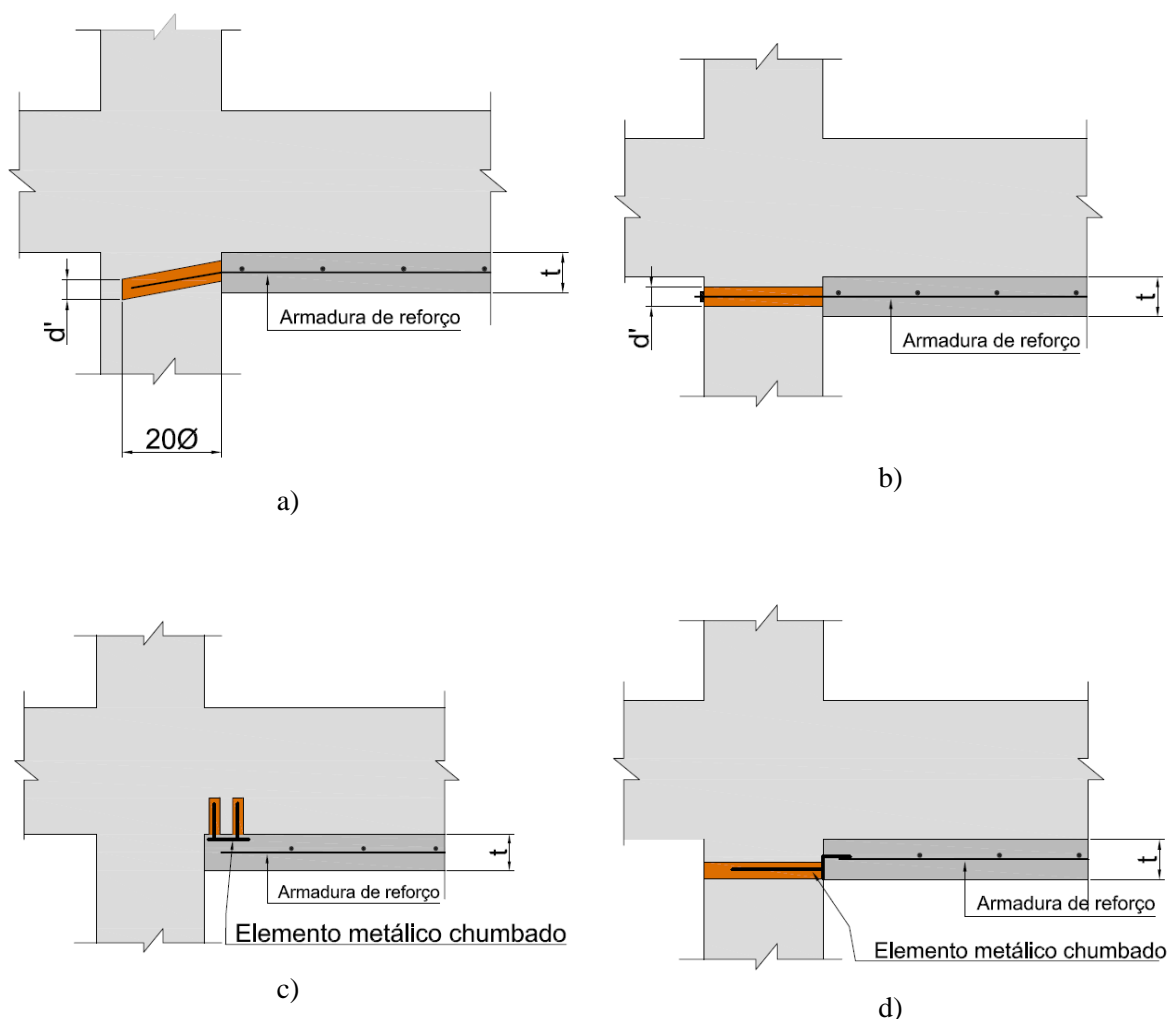


Figura 34: Ancoragem dos varões de reforço, a) por adesão; b) por aparafusamento; c) e d) por soldagem a elemento metálico; adaptado de [16].

2.6.3.5. PORMENORIZAÇÕES DE REFORÇO DE LAJES POR ENCAMISAMENTO

Caso a laje apresente deformação ou fendilhação excessiva deve-se proceder ao reforço da mesma. Recorrendo ao encamisamento é possível reabilitar a estrutura e ainda reforça-la, melhorando assim o seu comportamento.

Na Figura 35 temos um exemplo de pormenorização de reforço de laje. Neste caso estamos perante um reforço da face inferior, e a tecnologia adotada é o betão projetado. Segundo Helene [19], a nova armadura deve distar, no mínimo, 0,5 cm do betão antigo. A utilização dos pinos tem como objetivo a fixação das armaduras de reforço. A amarração no pilar deve seguir as regras apresentadas anteriormente.

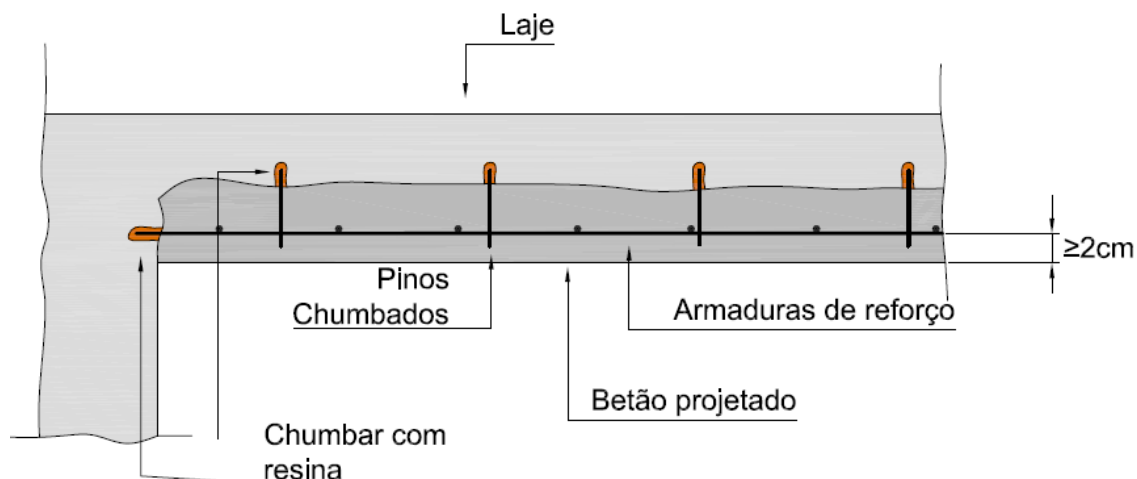


Figura 35: Reforço da face inferior de uma laje, com betão projetado, adaptado de [19].

Para os casos em que a fendilhação ocorre na face superior da laje, o reforço por encamisamento pode ser realizado através da técnica apresentada na Figura 30.

2.6.3.6. PORMENORIZAÇÕES DE REFORÇO DE PILARES POR ENCAMISAMENTO

Normalmente procede-se ao reforço de pilar, quando este apresenta deformação excessiva, quando se pretende mudar a utilização da estrutura, isto é, aumento de solicitações, ou ainda para melhorar o comportamento sísmico da estrutura.

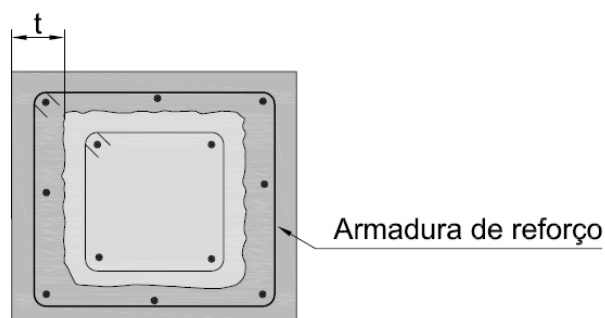


Figura 36: Reforço de pilar por encamisamento.

Normalmente o encamisamento de pilares dá-se ao longo de todo o seu comprimento e secção (Figura 36). Existem no entanto, alguns casos particulares em que a configuração das armaduras é ligeiramente diferente. Normalmente isto acontece por imposição da arquitetura. Por exemplo: pilares de fachada, Figura 37a), e pilares de canto, Figura 37b).

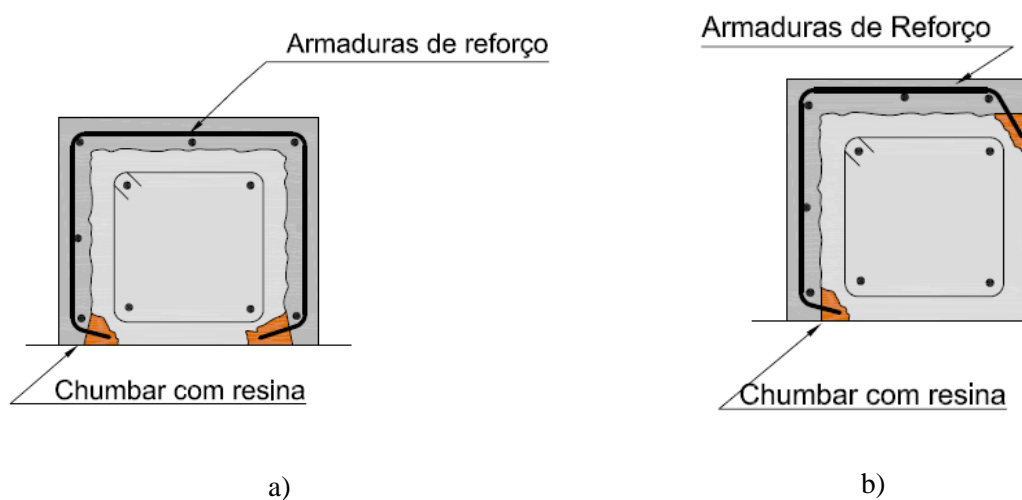


Figura 37: Configurações especiais. a) Pilar de fachada; b) Pilar de canto.

No caso dos pilares de fachada em vez de chumbar os varões como na Figura 37a), pode-se optar por outras soluções furar o pilar e o estribo atravessa o pilar, ficando embebido (Figura 38).

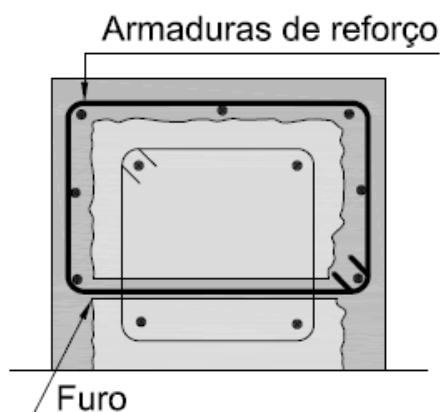


Figura 38: Reforço de pilar de fachada.

Pode-se proceder igualmente ao encamisamento de pilares com betão projetado (Figura 39). Neste caso temos a amarração dos varões de reforço à sapata. Esta ligação segue as mesmas regras apresentadas anteriormente (Figura 34).

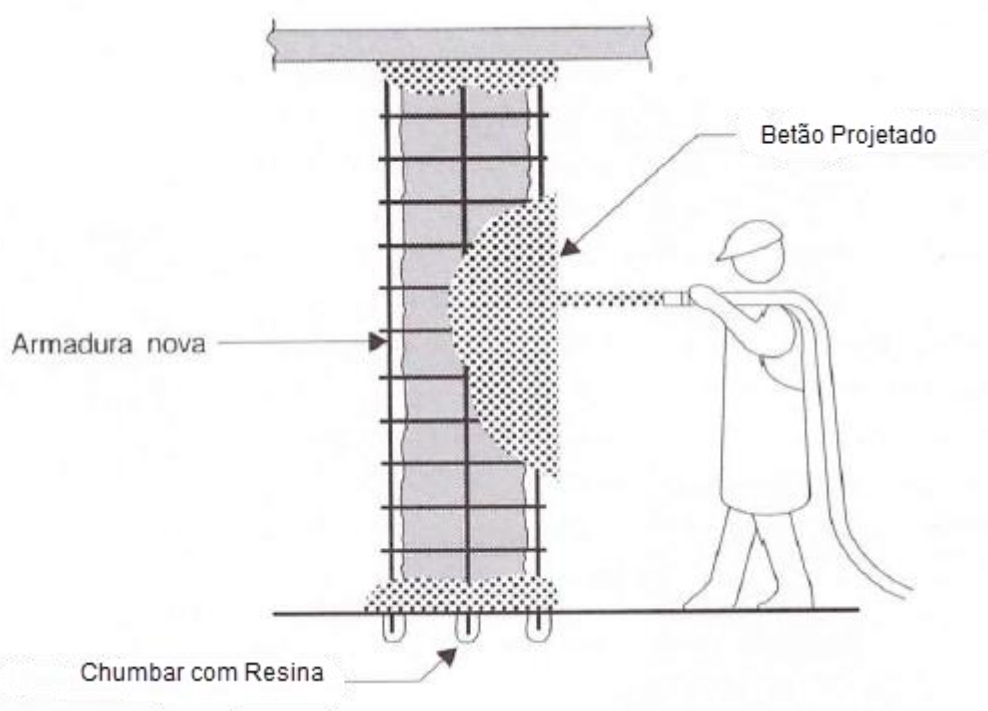


Figura 39: Encamisamento de pilar com betão projetado, extraído de [19].

Se optar-se por outra tecnologia ou outro material é preciso ter atenção à colocação das armaduras e da cofragem. Nas Figura 40 e Figura 41 mostram-se algumas alternativas ao betão projetado. Quando se recorre a argamassas ou betão, Helene [19] recomenda que a betonagem seja parcelada em comprimento de 1,10 m, assegurando a não ocorrência de segregação no material. Outra recomendação é a colocação de espaçadores de forma a garantir um mínimo de 2 cm entre as armaduras e o núcleo do pilar e de recobrimento. De modo a obter um recobrimento o menor possível, aconselha-se a utilização de um adesivo à base de epóxi na interface dos betões.

Na Figura 40, apresenta-se um caso em que, a betonagem da última parcela faz-se através de 2 aberturas na laje. Helene [19] recomenda que esta parcela tenha uma altura inferior a 30 cm. Quando não é possível realizar as aberturas na laje, a alternativa será o enchimento pela lateral. Não sendo possível betonar todo o pilar pela lateral, no topo do pilar aplica-se argamassa seca (Figura 41). Esta argamassa deve ser colocada numa altura inferior a 8 cm.

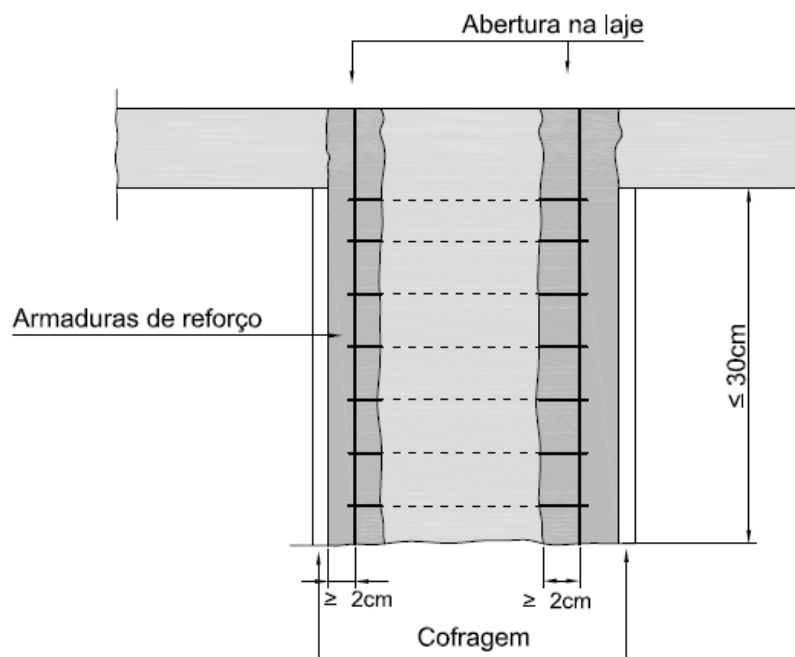


Figura 40: Reforço de pilar, por encamisamento, adaptado de [19].

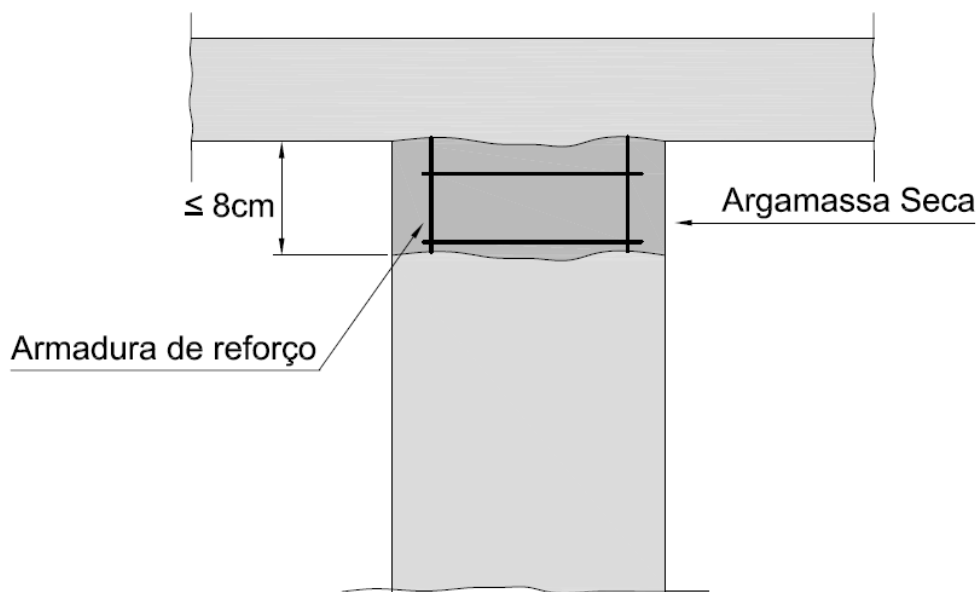


Figura 41: Reforço de pilar, por encamisamento.

2.6.3.7. PORMENORIZAÇÕES DE REFORÇO AO PUNÇOAMENTO POR ENCAMISAMENTO

Na Figura 42 apresenta-se uma sugestão de reforço ao punçoamento, adaptada de Helene [19]. Nesta pormenorização, a solução de reforço passa pela criação de um capitel em betão armado. Deve-se ter

especial atenção à colocação de espaçadores entre as armaduras e a cofragem de modo a garantir o recobrimento necessário. Na escolha/aplicação da cofragem deve ser tido em conta que esta deve ser estanque.

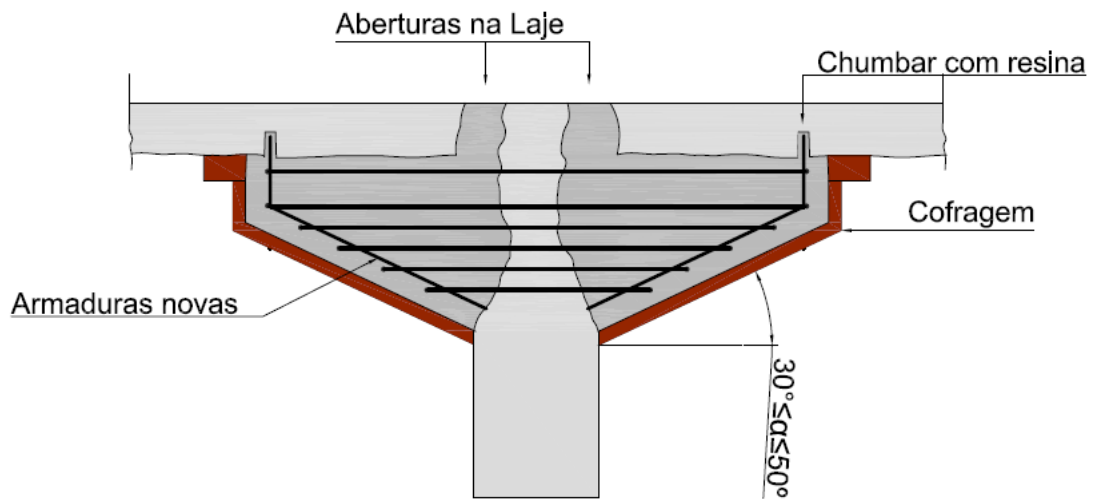


Figura 42: Reforço de um pilar ao punçoamento.

3

CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL GFRP

3.1. DESCRIÇÃO DO MATERIAL

O material que pretende-se descrever são as fibras reforçadas por polímeros (FRP), material já amplamente utilizado em indústrias como a aeronáutica, eletrónica entre outras e que foi aplicado na construção civil muito recentemente.

Devido ao impacto positivo que este material teve no mercado da construção, a indústria da construção é atualmente o 4º maior mercado deste tipo de material (Figura 43).

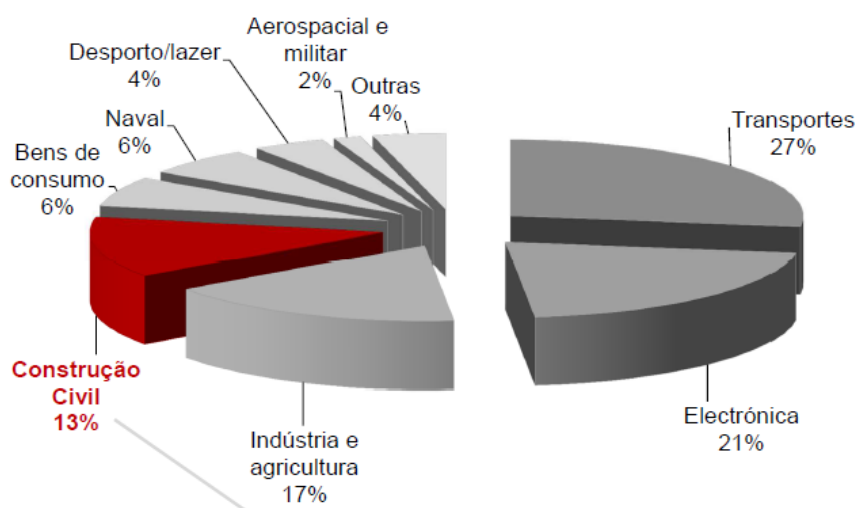


Figura 43: Campos de aplicação dos FRP, extraído de [15].

Os FRP's têm como componentes base uma matriz polimérica e fibras de reforço. A matriz polimérica tem como objetivo proteger as fibras e garantir a continuidade do material [15]. As fibras são a componente que confere a capacidade de carga e rigidez [11].

Atualmente existem 4 tipos de fibras no mercado: fibras de vidro, fibras de carbono, fibras de aramida e fibras de basalto, sendo que este último ainda se encontra numa fase de desenvolvimento precoce.

O objeto de estudo deste trabalho são os varões GFRP portanto será apenas abordado as fibras de vidro.

As principais características destes materiais são a leveza, elevada resistência e rigidez, resistência à corrosão, resistência à fadiga, transparência eletromagnética.

As vantagens da utilização das fibras de vidro são:

- Grande resistência a temperaturas elevadas;
- Boa aderência às matrizes poliméricas;
- Boas propriedades elétricas;
- Boa relação qualidade/preço;

As desvantagens deste material focam-se principalmente ao nível mecânico:

- Grande suscetibilidade a danos de superfície;
- Características mecânicas inferiores às das outras fibras, principalmente o módulo de elasticidade.

3.2. PROPRIEDADES DAS FIBRAS

A orientação e disposição das fibras de reforço são fatores preponderantes nas características do FRP. Sendo assim passo a descrever as orientações e disposições recorrentes neste material:

- Fibras contínuas e alinhadas têm um comportamento mecânico que depende de vários fatores, entre os quais a direção na qual a tensão é aplicada [41]. Se a tensão for aplicada numa direção normal à fibra temos o comportamento ótimo;
- Fibras descontínuas e alinhadas têm menor eficiência de reforço mas são cada vez mais utilizadas.
- Fibras descontínuas e aleatórias: aplica-se quando as tensões são totalmente multidirecionais. Este tipo de distribuição torna o material muito menos eficiente comparando com as fibras contínuas alinhadas, mas cobre um mais vasto campo de aplicação. As vantagens deste tipo de distribuição é a grande taxa de produção, a possibilidade de moldar formas complexas, e o menor custo de produção.

Estes materiais apresentam-se sobre várias formas, podendo até, como referido anteriormente, ser moldadas na forma desejada. As formas mais comuns comercializadas, são as barras e as mantas. Nas barras engloba-se os laminados, varões, grelhas e perfis [11]. As mantas são trabalhadas como tecidos, e as fibras podem ser dispostas em várias direções [6].

3.3. PROPRIEDADES DA MATRIZ POLIMÉRICA

A matriz destes materiais é composta por resinas poliméricas que dividem-se em dois grandes grupos: i) termoplásticas e ii) termoendurecíveis.

As resinas termoplásticas fundem quando aquecidas, assumindo formas específicas que retêm após arrefecer [15]. Neste grupo encontra-se o polipropileno, a poliamida, o polietileno e o polibutileno.

As resinas termoendurecíveis são polímeros reticulados formados através de reações químicas irreversíveis [15]. As principais resinas termoendurecíveis são: o vinil éster, epóxicas e as fenólicas [6].

As resinas mais utilizadas são as termoendurecíveis pois têm melhor capacidade de impregnação das fibras e boas propriedades adesivas. Para além destas características mecânicas podemos ainda acrescentar que estas resinas são mais baratas [13] No quadro seguinte indicam-se as resinas termoendurecíveis mais utilizadas:

Quadro 6: Propriedades físicas e mecânicas das resinas termoendurecíveis [6].

Propriedades	Poliéster	Epóxicas	Viniléster	Fenólicas
Resistência à Tração [MPa]	20 - 70	60 - 80	68 - 82	30 - 50
Módulo de elasticidade em tração [GPa]	2.0 - 3.0	2.0 - 4.0	3.5	3.6
Extensão na rotura em tração [%]	1.0 - 5.0	1.0 - 8.0	3.0 - 4.0	1.8 - 2.5
Densidade [g/cm ³]	1.20 – 1.30	1.20 – 1.30	1.12 – 1.16	1.00 – 1.25
Temperatura de transição vítrea [°C]	70 - 120	100 – 270	102 - 150	260

Para além das resinas, é habitual a matriz polimérica incorporar aditivos e material de enchimento (denominado por carga). A carga serve para reduzir o custo de produção e os aditivos permitem melhorar o comportamento a determinados fenómenos (estabilidade à radiação UV, inflamabilidade) e também permite dar cor à matriz.

3.4. PROCESSO DE FABRICO

Existem duas grandes técnicas de fabrico de FRP's, a pultrusão ou a moldagem manual.

Por pultrusão entende-se o processo de fabrico através de linhas de produção automáticas, capaz de produzir continuamente peças com secção transversal constante [6]. Este processo é utilizado na fabricação de varões e perfis.

Compreende-se por moldagem manual, o processo onde as fibras de reforço são colocadas sucessivamente em camadas, e impregnadas com uma dada matriz polimérica, que após a cura forma um elemento FRP. Este é o método utilizado na aplicação em obra, de mantas de reforço. Esta técnica pode ser melhorada através do controlo do volume e posicionamento das fibras e ainda pelo volume de vazios. Para tal, é possível recorrer a temperaturas elevadas, pressão e até vácuo, de forma a melhorar a cura das várias camadas [6].

3.4.1. FORMAS DE APLICAÇÃO:

- Laminados
- Varões;
- Perfis;
- Painéis

Este tipo de materiais pode ser aplicado como varão no interior do betão, reforço ou reparação exterior sob a forma de laminados, em estruturas híbridas ou mistas, ou ainda em estruturas 100% compósitas. Atualmente a construção de pontes com recurso a este tipo de materiais tem sido muito explorada pois torna a estrutura muito mais leve, aumenta a velocidade de construção e reduz a influência da exposição ambiental.

3.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS VARÕES DE GFRP

A performance do compósito reforçado com fibras é avaliada pelo comprimento, forma, orientação, e composição das fibras bem como pelas propriedades mecânicas da matriz [41].

No Quadro 7 são apresentadas as principais características dos varões de GFRP. Uma das principais desvantagens deste material é o facto de o coeficiente de dilatação térmica ser diferente na direção axial e direção transversal. A resistência à tração axial também é muito superior à resistência dos varões de

aço. De salientar que esta resistência varia com o diâmetro do varão sendo o maior valor correspondente ao menor diâmetro. Os valores apresentados no Quadro 7 correspondem a valores máximo, podendo estes valores variar de fornecedor para fornecedor.

Quadro 7: Propriedades físicas e mecânicas típicas de varões de GFRP, adaptado de [6].

Propriedade	GFRP
Densidade [g/cm ³]	1.25 – 2.10
Teor em fibras [%]	50 – 60
Coeficiente de dilatação térmica [x10 ⁻⁶ /°C]	Axial 6.0 – 10.0
	Transversal 21.0 – 23.0
Resistência à tração axial [MPa]	483 – 1600
Módulo de elasticidade axial [GPa]	35 – 51
Extensão na rotura axial [%]	1.2 – 3.1

3.6. FABRICANTES DE VARÕES DE GFRP

Neste subcapítulo irá apresentar-se os principais produtores de varões de GFRP a nível mundial, e o preço base destes varões. Irá ainda abordar-se os principais materiais produzidos por estas, e ainda algumas das principais obras que constam nos seus portefólios.

3.6.1. Pultrall Inc.

Empresa sediada no Canadá, fundada em 1987 por Fernand Bernard e Christian Bernard. Já recebeu várias distinções, pelo seu volume de vendas e pela sua inovação. Esta empresa tem o certificado de qualidade e gestão ambiental, pela ISO (International Organization for Standardization) desde 1994. Presença assídua no World Concrete, a mais importante feira sobre betão da América do Norte. Esta empresa especializou-se na produção de varões de compósitos com recurso a pultrusão. Os varões de FRP produzidos por esta empresa têm a designação de V•ROD. Já forneceram varões de GFRP para inúmeras obras no Canadá, desde pontes (Figura 44), obras marítimas, centrais de tratamento de água, muros de contenção, salas equipadas com equipamentos de ressonância magnética e reabilitação de garagens de edifícios.



Figura 44: Instalação dos varões no tabuleiro da ponte da Highway 410, extraído de www.vrod.ca.

Esta empresa oferece ainda assistência técnica ao comprador. Desde projetos a estudos de viabilidade financeira da utilização de V•ROD. Dão ainda formações de dimensionamento com este material.

Segundo estudos desta empresa a utilização de V•ROD em substituição do aço pode reduzir os custos durante a vida útil (construção + manutenção) entre 15% e 25% [30] (Figura 45).

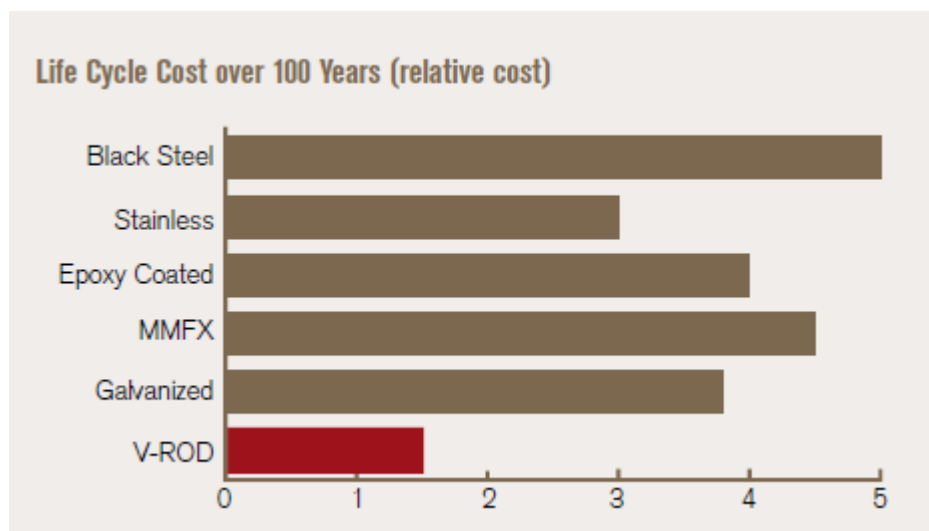


Figura 45: Custo relativo para vida útil de 100 anos, extraído de [30].

3.6.2. HUGHES BROTHERS

Empresa criada em 1921, no Nebraska, está na área dos FRP desde 1993 e os seus produtos compósitos têm a designação de Aslan. Têm uma gama de produtos bastante grande, produzindo varões de GFRP e de CFRP, laminados de CFRP, CFRP “tapes” (barras retangulares), e GFRP “dowel bars”, entre outros.

Com interesse para este trabalho estão os varões de GFRP, e o GFRP “dowel Bars”. Estes materiais têm a designação comercial de Aslan 100 e Aslan 600, respetivamente. Fabricam também varões dobrados, com medidas a pedido do comprador ou escolhidas do catálogo disponibilizado. Por não fazerem estribos fechados, aconselham a utilização de 2 varões dobrados em U de forma a fazer um quadrado fechado. Esta empresa produz também um produto inovador que consiste numa ancoragem passiva (Figura 46), que permite que os varões de GFRP sejam retirados, de modo a proceder a algum tipo de intervenção na estrutura, pois estes varões são facilmente esmagados.



Figura 46: Ancoragem passiva para varões de GFRP, extraído de [20].

Esta empresa já forneceu varões GFRP (Aslan 100) para construção e/ou reabilitação de pontes, estradas, obras marítimas, linhas ferroviárias (Figura 47), salas de ressonância magnética, reforço de alvenarias, reforço de estruturas de madeira, restauração de edifício históricos, pré-fabricação de elementos arquitetónicos.

O outro produto fabricado por esta empresa é o GFRP “Dowel bars”, é um transmissor de cargas e deve ser instalado nas juntas de betonagem de lajes, de forma a melhorar o comportamento mecânico desta zona (Figura 48).



Figura 47: Construção de linha ferroviária em Miami, extraído de www.aslanfrp.com.



Figura 48: Aplicação dos "GFRP Dowel Bars", extraído de [21].

3.6.3. SCHÖCK

Empresa alemã criada em 1962 e está na área dos GFRP desde 1997. Atualmente, tem escritórios distribuídos por 29 países, entre eles, Japão, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos da América. Os varões de GFRP produzido têm a designação de ComBAR e já foram utilizados em fundações de transformadores elétricos na Áustria, num centro de Nano-tecnologia na Suíça, em obras marítimas no Qatar e Inglaterra (Figura 49), em tabuleiros de pontes no Canadá, em túneis na África do Sul, em linhas ferroviárias na Suíça (Figura 50), e em muitas outras obras espalhadas pelo mundo.



Figura 49: Elemento pré-fabricados usados em obras marítimas, em Inglaterra, extraído de [38].



Figura 50: Laje de pavimento de linha ferroviária, extraído de [38].

No Quadro 8 apresenta-se os preços fornecidos pelos fabricantes abordados no trabalho. Os preços são por metro linear de varão. Este preço não inclui transporte e pode variar tendo em conta o volume de compra, e foi calculado à taxa de conversão de 12-06-2013. As características do varão também têm influência no preço, visto que as características do varão mudam de fabricante para fabricante. Faz-se também uma comparação com o preço do aço A500.

Quadro 8: Preços de varões GFRP por metro linear dos vários fabricantes abordados no trabalho.

	10	12	16	20	22	25	32
Schöck		5,60€	7,90€			16,50€	24,10€
Pultrall	1,47€	1,84€	2,70€	3,93€	6,40€	6,58€	11,89€
Hughes Brothers	1,18€	1,90€	2,88€	4,10€	5,46€	7,33€	11,55€
Aço	0,44€	0,61	1,07	1,68€		2,66	4,55
Relação	2,68	3,02	2,52	2,34		2,47	2,54

Pelo Quadro 8 facilmente se conclui que o GFRP é muito mais caro que o aço, cerca de 2,5 mais. Mas se se tiver em consideração a força resistente, o custo do varão GFRP é praticamente igual ao do varão de aço [25]. A título de curiosidade, Juvandes e Reis [25] fazem uma análise de custo composto (engloba o custo dos materiais, mão de obra e transporte dos materiais) de uma estrutura construída de raiz com varões GFRP.

4

REFORÇO E REABILITAÇÃO COM VARÕES DE GFRP

Os varões de GFRP não são, atualmente, muito associados à reabilitação, pois embora exista muita investigação em torno deste material, esta recai sobretudo no reforço e na construção de raiz de estruturas. No entanto, o facto de as empresas produtoras facultarem as características do material, torna possível o dimensionamento de uma solução de reabilitação, exigindo criatividade e conhecimento por parte do Engenheiro que dimensiona o projeto de intervenção.

Na reabilitação estrutural um dos fatores mais importantes é saber o objetivo da estrutura e para que esforços foi dimensionada. Tendo acesso ao projeto inicial, estes parâmetros são facilmente detetados, tornando mais acessível o dimensionamento com os varões de GFRP. De qualquer forma, mesmo tendo acesso ao projeto inicial, é necessário proceder à adequação dos cálculos com os valores normalizados para coeficientes de segurança. As cargas regulamentares também devem ser revistas.

O estado de degradação da estrutura também terá influência na solução a adotar, pois se tivermos casos pontuais de corrosão adotar-se-á uma solução diferente de casos com uma grande área corroída.

As condições de amarração são um pormenor importante na utilização deste material e tem merecido muita investigação por parte do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC). Pelo comportamento mecânico e características do material que constitui estes varões, a utilização dos intervalos normalizados para o aço poderá levar à diminuição da capacidade resistente da estrutura. Sendo assim torna-se importante, o cálculo desta dimensão, seguindo as recomendações da FIB, ACI e/ou ISIS.

Pelas suas características este material terá grande viabilidade quando aplicado em estruturas que sofrem ataques de cloretos ou outros agentes químicos, como são os casos de estruturas costeiras, centrais de tratamento de água, pavimentos de pavilhões industriais, garagens etc.

O processo de intervenção passará pela substituição das armaduras de aço por armaduras de GFRP.

Paralelamente à reabilitação, outro tipo de intervenção a executar é o reforço de estruturas. Para este tipo de intervenção já existe muito mais investigação no uso do GFRP. Os laminados são o material mais utilizado mas os varões também têm a sua utilidade neste âmbito.

Estes varões podem ser utilizados no reforço de elementos estruturais, de alvenarias, de estruturas de madeira, de edifícios históricos, entre outros.

De forma a utilizar os varões de GFRP para reforço de um elemento é importante proceder ao seu correto dimensionamento. Por ter características distintas do aço, o dimensionamento é calculado de forma diferente. Neste âmbito, [4] é um excelente guia para o dimensionamento. A principal dificuldade que o projetista encontrará é no dimensionamento do comprimento de amarração pois esta é uma área onde ainda não existem regulamentos.

As técnicas de reforço de elementos com GFRP não divergem das apresentadas no subcapítulo 2.6. O encamisamento e a adição de armaduras são técnicas perfeitamente adaptáveis ao GFRP. Apenas será necessário ter em atenção ao comprimento de amarração que terá de ser especificado para cada caso.

Por ser um material não metálico, logo não sofre corrosão, torna-se válida a utilização deste material exteriormente ao betão (Figura 51). Mas esta técnica tem limitações, pois o GFRP não suporta elevadas temperaturas (limitado pela matriz polimérica) e em caso de acesso público pode ser facilmente vandalizado. Recomenda-se a utilização desta técnica em elementos de difícil acesso bem como em lugares onde não exista a possibilidade de incêndio. O mais comum nesta técnica é a utilização de laminados mas a utilização de varões pode trazer vantagens ao nível da amarração.

A amarração (t') ao pilar deve ser garantida por colagem com resina epóxida. Recomenda-se a colagem dos varões à face inferior da viga. Em alternativa à colagem exterior pode-se recorrer à abertura de rasgos na viga embebendo o varão no rasgo e coberto por resina epóxida. Na aplicação desta técnica deve-se ter atenção ao estado do betão de recobrimento. Se este não estiver em bom estado deve ser removido e colocado novo recobrimento após a colocação das armaduras.

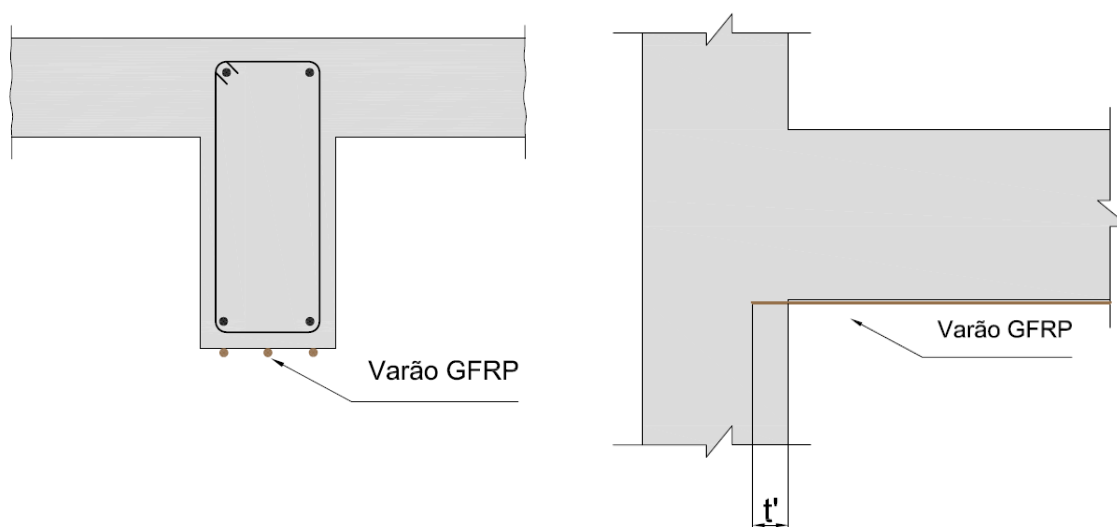


Figura 51: Reforço de vigas à flexão com GFRP.

Se o objetivo for o reforço ao corte, uma possível solução é a apresentada na Figura 52. Consiste na abertura de 2 furos na viga/laje. O furo deverá ser mais largo numa profundidade “ t ” que corresponde ao comprimento de amarração do varão. O varão deverá ter numa das pontas uma cabeça de ancoragem. Em ambas as extremidades do varão este deve ser chumbado com resina epóxida, devendo também ser injetado resina no furo de modo a ter uma componente resistente por adesão. No cálculo de “ t ” deverá se ter em conta o diâmetro do varão, as propriedades da resina, as propriedades do betão e esforços atuantes.

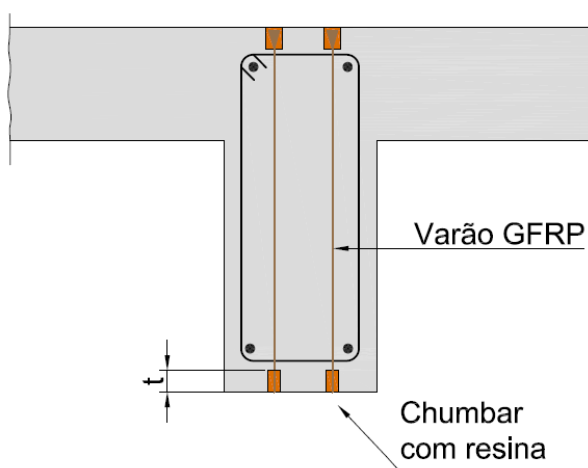


Figura 52: Reforço ao corte com GFRP.

4.1. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1.1. REABILITAÇÃO DE VARANDAS

A extremidade das varandas é uma zona que facilmente fendilha, possibilitando assim a entrada dos cloretos. Sendo assim, esta é uma zona que facilmente ficará com marcas de corrosão, tais como manchas castanhas ou em casos extremos, destacamento do recobrimento. Uma solução para reabilitar este elemento é apresentada na Figura 53. De seguida passo a descrever o processo construtivo:

- 1- Remoção de todo o betão de recobrimento e se necessário das armaduras corroídas;
- 2- Abertura de furos na superfície;
- 3- Nestes furos devem ser chumbados varões que permitam a amarração do varão longitudinal;
- 4- Após a colocação dos varões procede-se ao recobrimento das armaduras, podendo-se recorrer a qualquer tipo de material apresentado no capítulo 2.3.1., sendo neste caso a utilização de argamassa de betão, com recurso a cofragem a mais prática.



Figura 53: Reabilitação de varanda (retirado de aslanfrp.com)

4.1.2. MUROS

Na Figura 54 apresenta-se uma doca seca, estrutura que por estar exposta a ciclos de molhagem-secagem com água salgada facilmente apresentará deterioração proveniente do ataque de cloretos. Se apresentar

uma grande área deteriorada a substituição total das armaduras de aço por armaduras de GFRP seria a medida ideal. Neste caso procede-se da seguinte forma:

- 1- Escarificação de todo o betão contaminado e remoção das armaduras corroídas.
- 2- Colocação de uma malha de varões GFRP (Figura 54). Esta malha deve ser bem fixa à estrutura, com um ligeiro afastamento de modo a garantir a correta adesão entre os materiais. A fixação poderá ser feita com recurso a varões de GFRP chumbados ao muro com resina epóxida.
- 3- Colocação do betão de recobrimento. O betão a utilizar, por ser utilizada uma armadura que não reage aos ataques dos cloretos, não necessita de ter as características do betão inicialmente utilizado (baixa permeabilidade e classe XC).



Figura 54: Substituição das armaduras de aço por armaduras de GFRP

Na reabilitação de pavimentos de pavilhões industriais procede-se da mesma maneira, mas deve-se ter especial atenção à possibilidade de contacto de produtos químicos com o pavimento. Caso exista essa possibilidade, deve-se verificar a compatibilidade entre o produto e o GFRP e escolher um betão que se adeque a essa compatibilidade.

4.1.3. REFORÇO DE ALVENARIAS

Neste subcapítulo vou descrever algumas técnicas que podem ser utilizadas, tanto no reforço de alvenarias simples, como também no reforço de alvenarias estruturais. As técnicas apresentadas são aplicáveis em parede de alvenaria com fendilhação excessiva.

O reforço de alvenarias simples consiste na abertura de um rasgo, Figura 55a), no qual deverá ser inserido o varão GFRP. A orientação do rasgo deverá ser, sempre que possível, perpendicular à fenda na parede, horizontal caso a fenda seja vertical, Figura 55 a), ou vertical caso a fenda seja horizontal, Figura 55 b).

Após a abertura do rasgo, deve-se colocar fita adesiva nos contornos do mesmo, por questões de limpeza. Deverá ser aplicado uma primeira camada de um material adesivo (silicone ou equivalente) no rasgo (Figura 55 b)). A quantidade utilizada deve ser a suficiente para garantir a correta colagem do varão. O período entre a aplicação do silicone e a colocação do varão deverá ser o mínimo possível, garantindo assim que as propriedades adesivas do silicone são completamente aproveitadas (Figura 56). A última camada poderá ser novamente silicone, como mostra a Figura 57 a), ou se for uma obra exterior, por razões de segurança ao vandalismo poderá ser utilizado argamassa, Figura 57 b). O silicone se exposto a condições ambientais adversas, rapidamente se deteriora, sendo mais fácil o seu arrancamento.



Figura 55: a) Abertura de rasgo em parede de alvenaria de tijolo cerâmico; b) Colocação de silicone no rasgo (extraído de HB).



Figura 56: Colocação dos varões de GFRP no rasgo.



a)



b)

Figura 57: Selagem do rasgo: a) com silicone; b) com argamassa.

Também é possível a utilização destes varões aquando da construção dos paramentos de alvenarias. Este procedimento consiste na colocação de varões horizontais entre blocos, e verticais nos furos dos mesmos, como demonstrado na Figura 58.



Figura 58: Reforço de alvenarias estruturais com varões GFRP.

4.1.4. REFORÇO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

Como já foi abordado anteriormente, as intervenções nos edifícios históricos devem ser realizadas de maneira a que o tempo de vida da estrutura aumente significativamente, evitando assim nova intervenção num curto espaço de tempo. Desta forma, e devido à natural degradação dos materiais usados na construção, não permitir a verificação das exigências de segurança atuais, a utilização do GFRP permite reforçar a estrutura garantindo que não haverá problemas de corrosão, algo que seria comum se se utilizasse varões de aço.

Sem querer aprofundar muito apresenta-se algumas fotos de intervenções, disponibilizadas no site da Hughes Brothers.



Figura 59: Reforço de paredes em pedra com varões GFRP.

4.1.5 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Embora um pouco fora do âmbito desta tese, apresentam-se as potencialidades deste material no reforço de estruturas de madeira. A colocação de varões no interior da madeira torna esta menos deformável e com melhor comportamento à flexão e ao corte. Já se utiliza varões de aço mas estes têm que ser cuidadosamente isolados para não oxidar pois a madeira é um material com alguma permeabilidade, e as ligações são um ponto de entrada de humidade e água. A utilização do GFRP elimina estas preocupações (Figura 60), bastando apenas verificar as condições de amarração, onde normalmente utiliza-se uma resina epóxida.



a)



b)

Figura 60: Reforço de ligação entre elementos estruturais de madeira, retirado de aslanfrp.com.

5

CASOS DE ESTUDO E SOLUÇÕES

Neste capítulo apresenta-se um levantamento fotográfico, levado a cabo na Região Autónoma da Madeira, onde apresenta-se estruturas que apresentam deterioração provocada por corrosão das armaduras de aço. Para além disso, propõe-se apresentar uma possível solução para estes casos com recurso aos varões de GFRP. Por não se ter os recursos apropriados para a identificação exata das causas da corrosão, a solução ou os materiais sugeridos podem ter de ser alterados caso haja o interesse em reabilitar e/ou reforçar as estruturas apresentadas.

5.1. ESTRUTURAS MARÍTIMAS

5.1.1. MARINA DO LUGAR DE BAIXO

Embora seja uma estrutura que tem sido muito afetada pelas intempéries, levando mesmo ao seu encerramento, esta estrutura apresenta sinais claros de degradação devido à corrosão. Em certas zonas consegue-se ver os varões corroídos devido ao destacamento do betão de recobrimento. As causas desta degradação são: a ação dos cloretos e a deterioração provocado pelo impacto das ondas. A utilização dos varões GFRP nos módulos pré-fabricados evitaria o aparecimento de matéria resultante da corrosão, diminuindo assim um dos problemas comuns neste tipo de construção.

Como é possível ver na Figura 61, o destacamento do betão já ocorreu devido ao aumento de volume das armaduras. Mesmo em locais onde ainda não é possível ver as armaduras nota-se a ação da corrosão através da cor do betão.

A solução a adotar para este caso seria semelhante à apresentada na Figura 54. Procedia-se à escarificação de todo o betão contaminado, remoção das armaduras corroídas e colocação das armaduras

de GFRP em forma de malha. Para o dimensionamento destas armaduras poderia se ter de ter em conta o impacto das ondas.



Figura 61: Marina do Lugar de Baixo

Ainda na Marina do Lugar de Baixo, encontrou-se a mesma anomalia mas por razões diferentes. Na Figura 62 apresenta-se um caso de corrosão devido à falta de recobrimento. Sendo neste caso corrosão localizada, a solução seria mais simples. A substituição das armaduras de aço por armaduras de GFRP seria de fácil execução e não comportaria grandes custos. O recobrimento poderia ser executado com uma argamassa simples, sendo apenas necessário ter atenção à zona de amarração entre armadura GFRP e armadura de aço. Neste local a utilização de uma resina que envolvesse a emenda evitaria problemas futuros de corrosão no aço.

No Anexo 1 apresenta-se mais fotos da estrutura.



Figura 62: Corrosão de armaduras por falta de recobrimento.

5.1.2. PORTO DE ABRIGO DO PORTO SANTO



Figura 63: Corrosão em muro do porto de acostagem do Porto Santo.

Na Figura 63 e Figura 64 apresenta-se um caso de corrosão existente no Porto Santo. Este caso tem um impacto visual bastante elevado, mas estruturalmente ainda não tem influência na estrutura, pois ainda não houve desprendimento de betão. Como se pode observar nas figuras, a corrosão desenvolve-se de

maneira linear ao longo de todos os módulos pré-fabricados. Na opinião do autor deve-se ao mau recobrimento das armaduras. Tal como no caso da Marina do Lugar de Baixo a substituição das armaduras mais corroídas seria uma excelente opção de reabilitação. A técnica a utilizar é em tudo semelhante.



Figura 64: Corrosão em muro do porto de acostagem do Porto Santo.

Ainda no Porto do Porto Santo encontrou-se o caso da rampa rol-on rool off, que permite o acesso de veículos ao interior do barco. Este tipo de rampas é caracterizado pela presença de perfis metálicos externos ao betão, com a função de reduzir o impacto do portão do barco, quando é aberto. Estes perfis sofrem muito com os ataques dos cloretos, e mesmo com proteção o impacto do portão provoca um desgaste na superfície, eliminando a proteção. No entanto para este caso seria impossível a utilização de perfis de GFRP pois estes esmagariam facilmente.

5.1.3. CAIS DO PORTO NOVO

Esta estrutura (Figura 65) encontra-se na freguesia de Gaula, e serve principalmente para acostagem de areeiros. Nas Figura 66 e Figura 67 é possível ver o estado avançado de degradação desta estrutura.



Figura 65: Cais de acostagem do Porto Novo.



Figura 66: Muro de proteção do cais do Porto Novo



Figura 67: Muro de proteção do cais do Porto Novo

Sendo uma estrutura com 17 anos, a profundidade de penetração dos cloretos já deverá ter atingido as armaduras. Juntando a este facto a natural deterioração do betão e ainda o impacto dos camiões que por ali circulam, temos as principais causa dos danos presentes.

Uma solução a longo prazo para esta estrutura será substituição das armaduras de aço pelas de GFRP. Outro tipo de solução seria a substituição parcial de apenas as armaduras que apresentem uma perda de secção superior a 25%. De modo a perceber a adequabilidade desta solução deverão ser retirados carotes na estrutura de modo a perceber a profundidade de penetração dos cloretos. Se ao contrário do que se diagnosticou, os cloretos ainda não tiverem atingido as armaduras, a substituição parcial é uma boa solução, que deve ser complementada com a aplicação de uma nova camada de recobrimento em toda a estrutura.

Considerando a 2ª solução, a intervenção deverá incluir os seguintes passos:

- 1- Remoção do betão de recobrimento nas zonas onde a profundidade de penetração dos cloretos já tenha atingido as armaduras, removendo ainda betão suficiente de forma a amarrar as novas armaduras;
- 2- Remoção das armaduras corroídas;
- 3- Lavagem, com recurso a jato de água de toda a estrutura;

- 4- Colocação das armaduras de GFRP em forma de malha, cumprindo o comprimento de amarração calculado.
- 5- Aplicação de tinta nas armaduras de aço expostas;
- 6- Aplicação de revestimento de betão projetado.

Deverá se ter em atenção o tempo de exposição aos cloretos durante a intervenção. Esta deverá ser feita por fases de modo a acelerar a intervenção não permitindo que os cloretos penetrem no betão exposto.

Apresentam mais fotos no Anexo 2.

5.2. ESTRUTURAS EM ZONAS COSTEIRAS

Neste subcapítulo entram todas as estruturas que se encontram a uma distância igual ou superior a 200 metros do mar (segundo o Eurocódigo 1, esta é a distância até à qual considera-se a ação dos cloretos na escolha do betão).

5.2.1. PORTO DE RECREIO DE SANTA CRUZ

Aqui encontra-se o caso mais extremo da Região. Estamos perante um caso que apresenta corrosão total de muitos varões. A estrutura em questão é, a estrutura que sustenta a Via Rápida/Via Litoral, na qual encontram-se vários pontos a necessitar de reabilitação devido à corrosão. A origem desta degradação deve-se principalmente aos ataques dos cloretos, mas a má qualidade do betão e má execução da estrutura deverão ser fatores com muita influência nesta degradação. Como já foi dito anteriormente, só após a realização de ensaios de modo a aferir a qualidade do betão se pode chegar a conclusões sendo esta uma análise meramente qualitativa. O elemento estrutural, delimitado a preto na Figura 68, é o elemento em pior estado e será sobre este o elemento analisado. Na mesma figura mostram-se ainda outras zonas onde já se deu o destacamento do betão e as armaduras estão à vista.

Sendo este o pior caso encontrado pelo autor na RAM, fez-se uma análise mais aprofundada à estrutura.

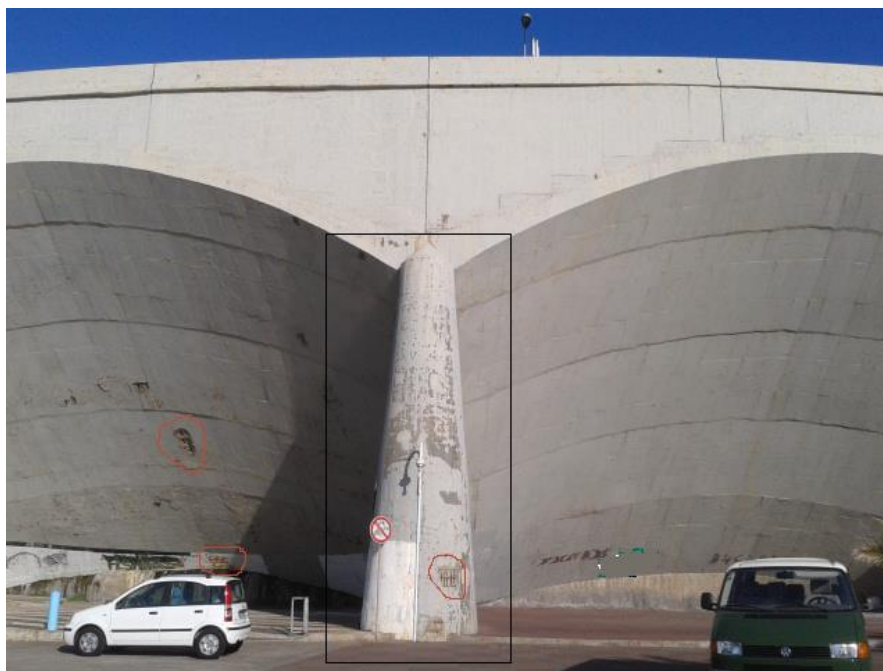


Figura 68: Elemento estrutural analisado.



Figura 69: Lado oeste da estrutura.

Na Figura 69 pode-se ver o estado de um dos elementos estruturais a analisar. Como já referido anteriormente o ataque de cloretos em conjunto com a má qualidade do betão e/ou aplicação serão as principais razões desta degradação. Pela análise efetuada in-loco (Figura 70), pode-se aferir que o revestimento é regulamentar. A área com varões expostos é aproximadamente de 5m². Na Figura 71 observa-se que alguns varões já foram completamente corroídos e já nem existem.



Figura 70: Medição do recobrimento.



Figura 71: Perda de secção dos varões.

Neste mesmo elemento mas do lado oposto encontra-se uma situação muito semelhante (Figura 72) mas que apresenta uma deterioração diferente. Apresenta na mesma uma grande área de varões expostos, mas para além disso, apresenta uma distância entre o recobrimento e as armaduras invulgar (Figura 73). Esta anomalia deve-se ao destacamento do betão por efeito dos produtos corrosivos, mas poderá ter outras causas que não se conseguiu identificar. Esta anomalia apresenta-se em outras partes da estrutura (Figura 74), ameaçando o destacamento de grandes áreas de betão.



Figura 72: Estado degradado da estrutura.



Figura 73: Destacamento do betão de recobrimento.

Numa análise à Figura 75 pode-se concluir que os agregados grossos têm tamanho regulamentar mas existe um volume excessivo dos mesmos, podendo significar segregação do betão ou excesso de agregados grossos no betão. Esta é uma das razões para o fraco comportamento do betão.



Figura 74: Destacamento do betão.



Figura 75: Agregados grossos.

Como já foi referido, antes de proceder a qualquer tipo de intervenção teria se de realizar análises ao betão de modo a verificar a sua conformidade com o projeto tal como o seu estado de degradação.

Devido ao estado bastante avançado de degradação, visto que muitos dos varões expostos já se encontram com uma perda de secção bastante considerável, sugere-se uma intervenção profunda, pois mesmo que estes sejam construtivos a progressão da corrosão irá levar ao aumento da área de betão destacado. A solução possível de adotar teria o seguinte procedimento:

- 1- Colocação de vedação em volta da estrutura;
- 2- Extração de carotes de modo a analisar o estado do betão em laboratório e também para perceber até onde terá de ir a intervenção.
- 3- Remoção de todo o betão degradado pela corrosão, incluindo o pavimento de modo a permitir a amarração à sapata. Para retirar o betão do pavimento deve-se recorrer a um martelo elétrico. No betão de recobrimento deve-se ter em atenção a área a remover. Inicialmente deve ser delimitada com o disco de corte uma área com mais 0,5 metros para além da zona degradada. De seguida procede-se à remoção de todo o betão nesta área com recurso a martelo elétrico e/ou escarificação manual. No caso em que o betão de recobrimento encontra-se afastado deve-se ter especial atenção ao perigo de queda de placas de betão com dimensões elevadas.
- 4- Remoção de todas as armaduras que tiverem uma perda de diâmetro superior a 20%, utilizando um disco de corte;
- 5- Limpeza de toda a área com recurso a jato de água e/ou jato de areia;
- 6- Colocação de varões de Ø16 com espaçamento de 10 cm, cintados com varão de Ø8 espaçados a 20cm, devidamente chumbados ao betão da parede e da sapata. O procedimento seria a colocação dos varões verticais, em furos previamente abertos na sapata e preenchidos de resina epóxi. Após isto colocar-se-ia os varões horizontais, sendo se possível chumbados ao betão em bom estado;
- 7- Após finalizada esta tarefa, deve-se aplicar uma pintura protetora sobre os varões de aço aos quais amarrou-se a malha de GFRP;
- 8- Deve-se então proceder à colocação do recobrimento, utilizando betão projetado. A aplicação do betão deve ser efetuada com imenso cuidado, seguindo as recomendações da Figura 31.

No Anexo 3 apresenta-se fotos de outros pontos degradados na mesma estrutura. Como já foi dito anteriormente esta estrutura apresenta um grau de degradação muito elevado, e são muitos os pontos a necessitar de intervenção.

5.2.2. MURO DA PROMENADE DOS REIS MAGOS

Este é um tipo de estrutura que não tendo funções estruturais tem importância ao nível estético e de segurança. Como é possível confirmar na Figura 76 o muro está muito degradado perdendo todo o seu valor estético. Ao nível da segurança também poderá desempenhar um papel nefasto para os transeuntes deste passeio pois apresenta alguns pontos salientes que podem ferir os mais distraídos.



Figura 76: Muro da promenade dos Reis Magos

A contaminação por cloretos deverá ser a principal razão para esta deterioração mas a qualidade do betão também deverá ter responsabilidade no estado da estrutura. Normalmente, utiliza-se neste tipo de estruturas um betão “mais fraco” pois não é um elemento estrutural. O problema é que muitas vezes descarta-se a resistência à penetração dos cloretos.

Na Figura 77 é possível verificar que em certas zonas já se apresenta um estado de corrosão bastante avançado, pois os estribos já desapareceram. Na Figura 78 vê-se que o muro encontra-se muito fendilhado o que permite a entrada dos agentes corrosivos com muita facilidade. Devido à proximidade ao mar, conclui-se que toda a estrutura está contaminada pelos cloretos e que é uma questão de tempo até que toda a estrutura esteja completamente degradada.



Figura 77: Corrosão total de alguns estribos



Figura 78: Estado de degradação

A solução para esta estrutura, devido ao seu grau de degradação passa pela demolição da mesma e a sua construção de raiz com utilização de varões de GFRP. Esta seria uma ótima estrutura para testar a importância da qualidade do betão nas estruturas com este tipo de varões. Como eliminamos a problemática da corrosão, a única preocupação seria garantir que o betão não fendilhasse muito, por motivos estéticos.

No entanto, sabendo de antemão que esta estrutura não tem valor patrimonial, não tem importância estrutural, esta é uma solução pouco viável, até à data em que os varões GFRP sejam comercializados em Portugal por valores muito inferiores. Atualmente estes varões custam mais 2,5x por metro que o aço A500 (segundo [25] custam cerca de 2,3 a 4,7 vezes mais). Se a isto adicionarmos o preço da importação, atinge-se valores pouco viáveis para pequenas obras, por isso salienta-se o facto de a comercialização em Portugal ser de extrema importância.

5.2.4. CONTRAFORTES FUNCHAL

Estrutura de contenção de terras que se encontra perto da Pontinha. Foram construídos com o objetivo de reforçar o muro em alvenaria de pedra, aquando da construção dos silos de cereais que ali existiam, e que foram demolidos no âmbito do alargamento da Avenida Sá Carneiro.



Figura 79: Contrafortes no Funchal.

Esta estrutura apresenta um grau de degradação bastante elevado, fruto do ataque de cloretos às armaduras, mas também do embate de equipamentos aquando da demolição dos silos (Figura 80). A falta de recobrimento e o excesso de varões encostados (Figura 81) tiveram igualmente responsabilidades no estado da estrutura (não é possível apresentar foto com escala por difícil acesso à estrutura).

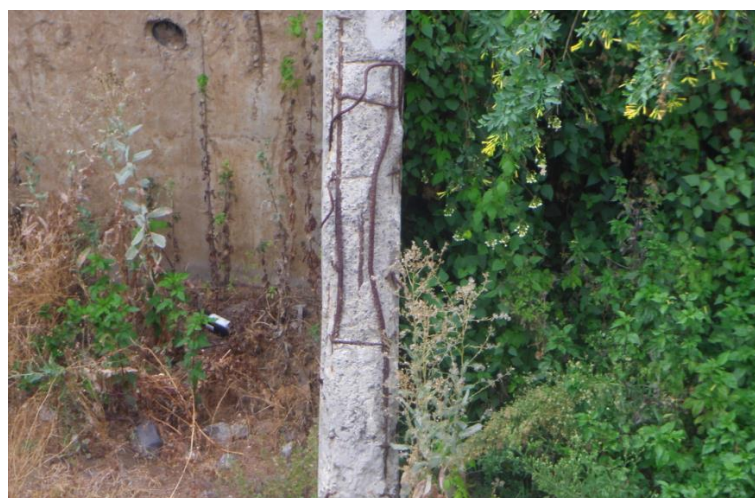


Figura 80: Danos provocados pelo impacto de equipamentos.

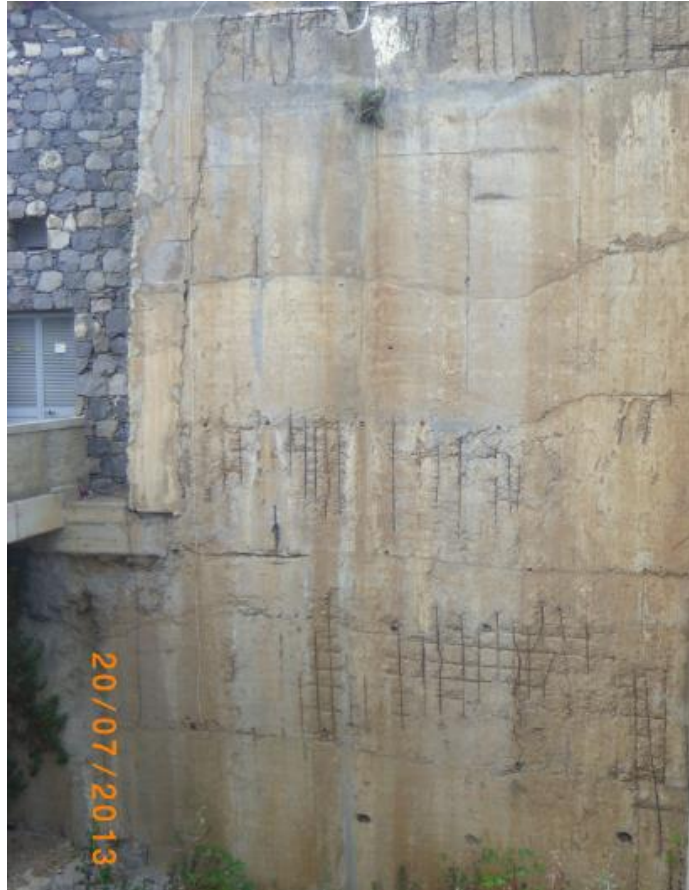


Figura 81: Parede com falta de recobrimento.



Figura 82: Excesso de varões encostados.

Estando detetados as principais causas da degradação da estrutura a intervenção deverá consistir em 3 fases: parede, vigas e contrafortes. Para todas estas fases deverá ser retirado carotes com o objetivo de analisar a profundidade de carbonatação, de penetração dos cloretos e de qualidade do betão.

PAREDE

Considerando que a profundidade de penetração de cloretos já atingiu as armaduras em toda a parede, opta-se por apresentar uma solução profunda:

- 1- Remoção de todo o recobrimento das armaduras e análise do diâmetro útil das mesmas.
- 2- Remoção de todas as armaduras que apresentem mais de 25% de perda de secção devido à corrosão, bem como todas as armaduras que não estejam com a sua geometria inicial. Se mais de 75% das armaduras apresentarem uma perda de secção considerável deverá optar-se pela substituição global das armaduras;
- 3- Lavagem de todo o betão e das armaduras que ainda se apresentem em bom estado;
- 4- Colocação de malha de varões de GFRP;
- 5- Betonagem do recobrimento com recurso a betão projetado. O recobrimento deverá ser superior a 5cm.

CONTRAFORTES

Nesta parte da intervenção é necessário ter especial atenção à estabilidade da estrutura. Recomenda-se que seja efetuada intervenção a um contraforte de cada vez e nunca ao contraforte seguinte. A maior parte das anomalias encontradas nos contrafortes são na sua extremidade superior, zona onde a secção é mais pequena. Devido ao excesso de armadura junta, uma excelente solução seria um aumento de secção.

A intervenção nos contrafortes engloba também intervir na zona de cruzamento com a viga. Sendo assim recomenda-se que a viga seja também reabilitada pelo menos 1 metro para cada lado do contraforte.

Após a realização dos ensaios procede-se da seguinte forma:

- 1- Remoção de todo o betão que se encontre contaminado por cloretos e nas zonas em volta das armaduras tornando estas livres;
- 2- Corte e remoção de todas as armaduras com perda de secção superior a 25%;
- 3- Limpeza da estrutura com jato de água;

- 4- Colocação dos varões de GFRP dimensionados; Deverá se ter o cuidado na colocação dos varões de modo a não coloca-los muito juntos. Os varões na extremidade superior do contraforte devem ser inseridos em furos abertos nas vigas. O furo deve ser preenchido com resina epóxida.
- 5- Betonagem com recurso a cofragem e vibração. A escolha do betão dependerá da quantidade de armadura de aço retirada. Se se retirar todo o aço o betão não necessita de resistência ao ataque de cloretos. Se não for esse o caso recomenda-se um betão XS1 em toda a estrutura. Deverá se realizar um aumento de secção entre 5 a 10 cms. Desta forma temos a possibilidade de afastar os varões de canto. Deverá ser cumprido um recobrimento de 6 cms.

VIGAS

Para este elemento segue-se o mesmo procedimento do adotado nos contrafortes. A única diferença será na cofragem a adotar. Necessário ter especial atenção à amarração dos varões de GFRP. Nas zonas de empalme com os varões de aço deverá ser aplicada uma camada protetora de modo a proteger o aço.

No Anexo 4 encontram-se mais fotos desta estrutura.

5.2.5. ESPAÇO COMERCIAL NA PONTINHA

Esta estrutura encontra-se na Pontinha, ao lado do posto da PSP. Atualmente encontra-se fechado. Apresenta um grau de deterioração bastante elevado no vão de entrada (Figura 83).



Figura 83: Espaço comercial na Pontinha.



Figura 84: Pormenor do vão.



Figura 85: Pormenor 2.

Devido ao elevado grau de degradação, como fica provado nas Figura 84 e Figura 85, a solução seria a remoção de todo o betão e armaduras e construção de raiz. Por ser uma estrutura pequena e num ambiente agressivo seria um excelente teste ao desempenho dos varões de GFRP.

A intervenção consiste nos seguintes passos:

- 1- Demolição de toda a viga, tendo em atenção o escoramento do muro que assenta em cima desta;
- 2- Construção de uma viga com recurso a armaduras de GFRP utilizando cofragem e betão.

5.2.6. PONTE DO RIBEIRO SECO OU PONTE MONUMENTAL

Esta ponte é uma estrutura histórica, construída em pedra em 1848, sendo mais tarde alargada com recurso a betão armado. Anexo a esta ponte existe uma estrutura com área técnica, por onde passa canalização de esgotos e também elétrica. Esta área é suportada por 2 pilares independentes à ponte, como mostrado na Figura 86. São estes mesmos pilares que apresentam um grau de deterioração bastante elevado junto ao solo (Figura 87).



Figura 86: Estrutura de suporte das instalações técnicas.



a)



b)

Figura 87: Degradação na parte inferior do pilar: a) pilar oeste; b) pilar este.

No que toca às causas desta deterioração o autor encontrou 3 causas que deverão ter tido grande influência. Passa-se agora à enumeração das mesmas:

- 1- Má qualidade do betão que aliado à idade da estrutura facilitou a fendilhação da estrutura;
- 2- Ataque de cloretos que em conjunto com a fraca resistência à penetração aos cloretos, do betão facilitou a corrosão das armaduras;
- 3- Destacamento de betão provocado pelas raízes das plantas.

No Anexo 5 apresentam-se mais fotos onde são facilmente detetáveis estas causas.

O estado de degradação dos varões devido à corrosão já é bastante elevado, principalmente nos estribos, como apresentado na Figura 88.



Figura 88: Perda de secção dos estribos.

Devido ao estado do betão e das armaduras uma intervenção nesta estrutura exigiria a completa remoção do betão de recobrimento de modo a ser possível a sua substituição por varões GFRP. A construção de novos pilares e posterior demolição dos atuais talvez fosse a melhor solução do ponto de vista estrutural mas o relevo dificultaria a implantação das sapatas.

Focando-se então na reabilitação dos 2 pilares existentes uma possível técnica de intervenção seria:

- 1- Desmatação da zona circundante;
- 2- Escoramento da estrutura com um cimbra ao solo;
- 3- Remoção de todo o recobrimento e de betão suficiente para remover as armaduras deterioradas;
- 4- Corte e remoção de todas as armaduras que apresentem perda de secção acima dos 25%.

- 5- Colocação das armaduras de GFRP colocando conectores no núcleo de betão e espaçadores para a cofragem.
- 6- Recobrimento de toda a estrutura com recurso a cofragem em painéis e um betão fluido. O recobrimento deverá ser feito em fases de 2 metros (ou a altura de um painel de cofragem) garantindo que não se dá a segregação do betão e que o mesmo preenche todos os espaços vazios.

5.2.7. VIGA DE BORDADURA DA ZONA BALNEAR DA QUINTA MAGNÓLIA

Nas fotos apresentadas (Figura 89, Figura 90) mostra-se o estado degradado da viga de bordadura desta zona balnear.



Figura 89: Viga de bordadura.



Figura 90: Pormenor do destacamento do betão.

Uma das causas para esta deterioração será a fraca qualidade do betão de recobrimento que em conjunto com a penetração dos cloretos provocou o destacamento do betão. Sendo esta uma zona balnear a contaminação do betão devido ao cloro da água da piscina também deverá ser uma das causas.

A demolição deste elemento e reconstrução seria uma excelente solução tendo em conta a dimensão da estrutura.

5.2.8. RAMPA DE ACESSO ÀS PISCINAS NATURAIS DO PORTO MONIZ

O muro de proteção da rampa de acesso à bilheteira apresenta sinais claros de degradação. Este é composto por um muro em bloco de betão ou alvenaria de pedra, sob o qual assentam elementos pré-fabricados de betão armado. São estes elementos (Figura 91) que devido ao destacamento do betão, apresentam uma deterioração fora do normal.

As causas para esta anomalia é a qualidade do betão utilizado e a defeitos de construção pois alguns elementos apresentam um recobrimento inferior aos restantes (Figura 92).



Figura 91: Deterioração do elemento pré-fabricado.



Figura 92: Elemento com menor espessura de recobrimento.

Devido à proximidade ao mar, após estas armaduras serem expostas rapidamente perdem secção (Figura 93), com a agravante de que são usados varões de Ø8.

Visto não serem elementos estruturais, esta perda de secção não tem consequências a nível da resistência. Esta degradação apenas tem consequências ao nível estético dando um impacto visual indesejável nesta zona turística.

A solução a adotar passaria pela substituição dos elementos danificados por novos elementos construídos com armaduras de GFRP. Na pré-fabricação deverá exigir-se maiores cuidados na colocação das armaduras, de forma a garantir o recobrimento adequado. O betão a utilizar também deverá garantir resistência ao impacto e menor fendilhação.



Figura 93: Diminuição da secção dos varões.

No Anexo 6 apresentam-se mais algumas fotos desta estrutura.

5.2.9. ESTAÇÃO DE CORREIOS DO PORTO MONIZ

Os canteiros que estão colocados à entrada da estação de correios apresentam uma deterioração elevada como demonstrado na Figura 94. Grande parte das armaduras encontram-se expostas, por destacamento do betão de recobrimento. O mau controlo de qualidade aquando da sua construção, e o ataque dos cloretos e a idade da estrutura são os principais responsáveis por o estado da estrutura.

A solução para esta estrutura seria a sua demolição e construção de raiz. A utilização dos varões GFRP preveniria o destacamento do betão devido ao aumento de volume, provocado pela ação da corrosão nas armaduras.

Apresentam-se mais fotos no Anexo 7.



Figura 94: Canteiro na estação de correios do Porto Moniz.

5.2.10. INSTALAÇÕES DA CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO VICENTE (CMSV)

A anomalia encontrada nesta estrutura (Figura 95) situa-se numa viga exterior. O revestimento caiu, deixando a nu os defeitos na construção deste elemento, como se demonstra na Figura 96. Não houve o cuidado de colocar espaçadores de forma a garantir o correto recobrimento das armaduras.



Figura 95: Estaleiro da CMSV.



Figura 96: Defeito de construção na estrutura.

A solução para este caso passaria pela substituição dos varões expostos por varões GFRP. O método de intervenção seria simples.

- 1- Remover o betão de recobrimento em toda a volta da viga; A última camada de alvenaria deverá ter que ser removida na zona a intervir. Deverá ter-se atenção ao escoramento da viga;
- 2- Colocar estribos (ou equivalente) de GFRP. Se o varão longitudinal também estiver danificado deverá ser substituído.

- 3- Colocação da cofragem garantindo pelo menos 5cms de recobrimento, para possibilitar a betonagem;
- 4- Betonagem da estrutura deve ser feita utilizando um betão fluido de modo a preencher todos os vazios existentes.

5.2.11. PONTE DA ESTRADA COMANDANTE CAMACHO FREITAS - RIBEIRA BRAVA

Esta ponte localiza-se junto à praia da Ribeira Brava e apresenta deterioração nos muros de contorno e também no muro de suporte, como demonstrado na Figura 97. No Anexo 8 apresentam-se outros pontos desta estrutura a necessitar de reabilitação.

Na Figura 98 apresenta-se o estado do muro de suporte, sendo possível aferir que os varões horizontais já não estão amarrados às restantes armaduras. Este facto deve-se à corrosão dos arames que amarram as armaduras entre si, e ao aumento de volume dos varões devido à corrosão.

Numa 1ª análise, o betão também apresenta uma qualidade pouco satisfatória pois descasca muito facilmente, notando-se ainda alguma segregação. Para além disso, e devido à proximidade ao mar, o recobrimento deveria ser maior.



Figura 97: Estado geral da estrutura.



Figura 98: Estado do muro de suporte.

Quanto ao estado geral dos varões, estes apresentam uma perda de secção considerável (Figura 99).



Figura 99: Pormenor do estado dos varões.

Na reabilitação desta estrutura proceder-se-ia da mesma forma que em “5.2.1. Porto de recreio de Santa Cruz”.

5.2.12. PROMENADE DA MADALENA DO MAR

A estrutura que apresenta o estado de degradação apresentado na Figura 100, encontra-se no extremo este da promenade da Madalena do Mar, e é uma escada de acesso à praia.

A qualidade do betão utilizado na construção das escadas deve ser a principal causa para esta anomalia. Apresenta um grande volume de agregados grossos (Figura 101), o que facilita a erosão do betão. Os varões apresentam um grau de corrosão bastante elevado, e a intervenção deverá passar pela total substituição dos mesmos.

Na opinião do autor o estado global da estrutura implica que a intervenção passe pela demolição e construção de nova estrutura. A execução de carotes e consequente análise da profundidade de penetração dos cloretos e da qualidade do betão deveram concluir isto mesmo.



Figura 100: Escada de acesso à praia na Madalena do Mar.



Figura 101: Grande volume de agregados grossos.

No Anexo 9 são apresentadas mais fotos que mostram o estado avançado de degradação desta estrutura.

5.3. OUTROS CASOS

5.3.1. TÚNEL DA NAZARÉ

5.3.1.1. EXTERIOR DO TÚNEL:

Esta estrutura já denota os sinais do tempo pois foi construída há cerca de 30 anos e que por falta de manutenção apresenta um elevado grau de degradação, quer no seu interior como no emboquilhamento.



Figura 102: Emboquilhamento do túnel da Nazaré.

Na Figura 102 apresenta-se a anomalia presente na entrada do túnel no lado da Nazaré. A delaminação do betão deu-se numa área aproximada de $3 \times 2 \text{ m}^2$ e deverá ter sido provocado por carbonatação visto que esta estrutura situa-se a mais de 200 metros da costa. Outra das causas identificadas é espessura de recobrimento dos varões que apresenta-se bastante reduzida, como fica demonstrado na Figura 103.



Figura 103: Espessura de recobrimento do emboquilhamento do túnel da Nazaré.



Figura 104: Anomalia no emboquilhamento do túnel da Nazaré.



Figura 105: Estado de degradação da viga de emboquilhamento.

Na Figura 104 nota-se que já foi feita uma intervenção com o intuito de cobrir os varões mas na mesma foto vê-se que tal não resultou. A fina camada de argamassa aplicada facilmente destacou, devido à sua espessura e também à má preparação do betão da estrutura que não garantiu a correta aderência. Sendo assim a intervenção que propõe-se passaria pela remoção da camada superficial do betão, substituição das armaduras corroídas e aplicação de betão projetado. O método de intervenção seria:

- 1- Remoção de 10 cm de betão com recurso a martelos elétricos;

- 2- Corte de todas as armaduras de aço;
- 3- Lavagem de toda a superfície do betão com jato de água;
- 4- Colocação das armaduras GFRP. Visto que as armaduras de GFRP não permitem um grande ângulo de dobragem deve-se ter atenção na sua colocação;
- 5- O recobrimento a utilizar será o betão projetado. O betão a utilizar não necessita ter resistência de exposição.

5.3.1.2. INTERIOR DO TÚNEL:

No interior do túnel a origem da degradação da estrutura deverá ser a carbonatação do betão. O grau de carbonatação no interior dos túneis é sempre amplificado por ação dos gases expelidos pelos veículos. Esta estrutura já sofreu reparações (Figura 106), com o intuito de recolocar o recobrimento nas armaduras e tapar as fendas existentes. Tal intervenção não resolveu o problema, sendo a principal razão deste fracasso as características da argamassa de reparação utilizada.



Figura 106: Intervenção no interior do túnel da Nazaré.

Nas Figura 106 e Figura 107 é ainda possível observar manchas brancas, que correspondem ao fenómeno da eflorescência. Esta patologia pode resultar da contaminação dos agregados por sais marinhos. A presença destes sais significa que a estrutura foi contaminada com cloretos aquando da sua estrutura. Esta contaminação amplifica a velocidade de corrosão das armaduras. A dúvida é se a eflorescência é na argamassa de reparação ou no betão da estrutura.

Na Figura 107 é ainda possível ver a elevada perda de secção nas armaduras provocadas pela corrosão. Esta perda de secção foi confirmada in-situ, pelo autor.



Figura 107: Degradação do interior do túnel.

Esta estrutura não apresenta sinais de que necessite de um reforço estrutural, sendo apenas necessário a correção da área de armadura bem como o estado do betão.

Por haver um percurso alternativo viável, o encerramento deste túnel permitiria uma intervenção mais rápida e com maior profundidade. Se não for possível o encerramento do túnel, a solução passaria por uma intervenção faseada que acarretaria maiores custos com a segurança, e mais demorada.

Sendo assim, de modo a reparar este túnel para garantir corretas condições de segurança e de serviço recomenda-se uma reparação profunda que consiste em:

- 1- Retirar o betão de recobrimento das armaduras;
- 2- Escorar toda a estrutura com recurso a um cimbreiro ao solo;
- 3- Cortar todas as armaduras que apresentem uma perda de secção superior a 25%;
- 4- Lavar com recurso a jato de água toda a superfície, e se necessário lavar as armaduras com jato de areia;
- 5- Aplicar tinta protetora nas armaduras de aço de forma a protegê-las;
- 6- Nas zonas onde foram cortadas as armaduras colocar armaduras de GFRP em forma de malha;
- 7- Betonagem de recobrimento tendo em atenção aos tubos de drenagem existentes.

Na escolha do betão a aplicar deve-se ter especial atenção a que este deve apresentar um grau de permeabilidade bastante reduzido. Deve-se também garantir a qualidade dos agregados, principalmente o agregado fino.

A técnica de aplicação do betão podia variar tendo em conta o acabamento desejado. O uso de moldes metálicos permite um melhor acabamento mas importa mais custos. O betão projetado deixa um acabamento mais rugoso mas tem melhor rentabilidade e menos custos.

No Anexo 10 apresentam-se mais fotos da estrutura.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÃO

No levantamento fotográfico, levado a cabo na RAM, conclui-se que a Região apresenta um número elevado de estruturas degradadas pela corrosão das armaduras. Esta patologia, numa análise qualitativa, é na maior parte das vezes provocada pela fraca qualidade do betão, que não garante proteção suficiente às armaduras, e também por erros de conceção, como por exemplo a falta de recobrimento.

O caso mais grave encontrado foi o do Porto de Recreio de Santa Cruz, mais propriamente a estrutura que sustenta a Via Litoral. Esta estrutura apresenta um grau de degradação elevado, colocando em risco o bem-estar físico das pessoas que por ali transitam. Certos elementos desta estrutura estão num limite de possibilidade de intervenção, pois o grau de degradação apresentado torna a intervenção bastante dispendiosa, portanto recomenda-se uma intervenção o mais brevemente possível da entidade competente. A intervenção tem um grau de dificuldade e área de intervenção bastante elevada.

A utilização do GFRP na reabilitação das estruturas é um caminho a ser explorado tendo em conta os custos a longo-prazo e pelo seu comportamento seria o material ideal a utilizar na reabilitação da maior parte dos casos apresentados. Embora seja um material pouco ou nada explorado na RAM, é um material com imensas potencialidades, principalmente ao nível da degradação por corrosão, que é uma das principais patologias encontradas na região.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Seria interessante a análise de algumas das estruturas em questão. A realização de um trabalho de investigação mais aprofundado, que incluísse análises ao betão e às armaduras, principalmente no Porto de Recreio de Santa Cruz seria bastante interessante para perceber o estado exato da estrutura, tornando assim possível o dimensionamento de uma solução de reabilitação, de preferência com recurso a varões de GFRP.

A aplicação de uma solução de reabilitação a uma caso prático também seria muito interessante de forma a monitorizar o comportamento da estrutura. Um elemento sem funções estruturais seria um excelente 1º passo para a implementação do material na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI 440.1R-06, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2006.
- [2] L. C. Bank, Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [3] F. A. Branco, J. d. Brito and J. d. Santos, "Análise das Patologias nas obras de Arte da 2ª Circular," in *REPAR 2000*, Lisboa, 2000.
- [4] L. d. F. C. Camacho, "A Utilização de varões de GFRP nas Estruturas de Betão Armado," Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade da Madeira, 2011.
- [5] J. R. Correia, F. Branco and J. Ferreira, "Estudo de comportamento estrutural de uma solução híbrida GFRP-Betão," *Revista Internacional Construlink*, vol. 2, Junho 2004.
- [6] J. R. Correia, M. Sá, J. Gonilha, I. Almeida, F. Branco and M. Garrido, "Pontes em Plásticos Reforçados com Fibras (FRP) e em Betão - FRP," *1ª Jornadas de Materiais de Construção*, pp. 115-148, 2011.
- [7] J. R. Correia, *Utilização de materiais FRP na reabilitação e reforço de estruturas*, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2012.
- [8] Cortartec, *Technical Information*, Arminox Stainless, 2010.

- [9] A. Costa, "Degradação de estruturas de betão armado e pré-esforçado por corrosão de armaduras," in *REPAR 2000*, Lisboa, 2000.
- [10] A. Costa, *Reparação de Estruturas de Betão Armado*, Instituto Superior Técnico: Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas.
- [11] J. S. Cruz, *Projecto de Reforço com FRP*, Instituto Superior Técnico: Mestrado em Engenharia Civil, Reabilitação e Reforço de Estruturas, 2012.
- [12] B. Farinha, *Reabilitação e manutenção de edifícios*, 1ª ed., Lisboa: Dashofer: Edições Profissionais, 2006.
- [13] FIB-Bulletin 40, FRP reinforcement in RC structures, Federation Internationale du beton, 2007.
- [14] S. C. Fonseca, *Utilização de materiais compósitos na reabilitação de estruturas de betão*, Seminário Materiais em Ambiente Marítimo, LNEC: Funchal, 2007.
- [15] S. C. Fonseca, *Utilização de Materiais compósitos de matriz polimérica na reabilitação urbana*, Jornadas LNEC: Lisboa, 2012.
- [16] A. Gomes and J. Appleton, *Reforço de Estruturas de betão Armado por Encamisamento das Secções*.
- [17] A. Gonçalves, A. Pinto, V. Barros and C. Morais, "Casos Práticos de Soluções de Reparação e Reforço de Estruturas," in *REPAR 2000*, Lisboa, 2000.
- [18] E. Guades, T. Aravinthan, M. Islam and A. Manalo, "A review on the driving performance of FRP composite piles," *Composite Structures 94*, pp. 1932-1942, 2012.

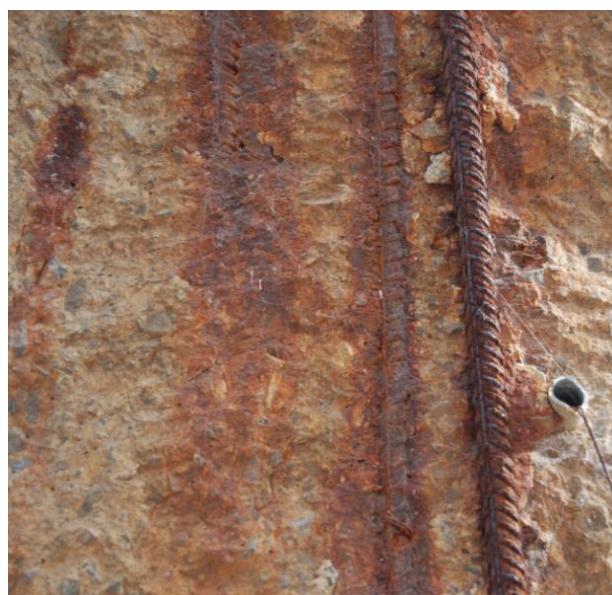
- [19] P. Helene, Manual para reparo, reforço e protecção de estruturas de Concreto, Pini, 1992.
- [20] Hughes Brothers, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar - Aslan 100 Series, Nebraska: Aslan FRP, 2011.
- [21] Hughes Brothers, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Dowel Bars - Aslan 600, Nebraska: Aslan FRP, 2011.
- [22] ISIS Design Manual No.3, Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, ISIS Canada Research Network, 2007.
- [23] E. S. Júlio, F. Branco and V. D. Silva, "Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 5, pp. 29-37, 2003.
- [24] L. F. P. Juvandes, *Reforço e Reabilitação de Estruturas, Módulo 2*, Madeira: Formação Profissional - Ordem dos Engenheiros, 2002.
- [25] L. F. P. Juvandes and V. L. F. Reis, "Construção de Estruturas de betão armado com Varões de FRP," *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões - Mecânica Experimental*, vol. 20, pp. 13-24, 2012.
- [26] P. Lança, *Conservação e Reabilitação de Construção*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, Conservação de Edifícios.
- [27] Z. Lourenço, "Protecção Catódica de Estruturas de Betão Armado," *Corrosão e Protecção de Materiais*, vol. 26, no. 3, pp. 79-85, 2007.
- [28] J. G. Martins, Identificação e tratamento de patologias em edifícios, 1ª ed., Série Reabilitação, Universidade Fernando Pessoa, 2005.

- [29] J. G. Martins, *Patologia do Betão, Reparação e Reforço de Estruturas*, 1ª ed., Série Reabilitação, 2006.
- [30] Pultrall, *Composite Rebar for Concrete Structures - V-ROD*, Canada.
- [31] J. Revathy, K. Suguna and P. N. Raghunath, "Strength and ductility of GFRP Wrapped Corrosion - Damaged Concrete Columns," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 4, no. 6, pp. 989-998, 2009.
- [32] P. C. Ribeiro, *Recalibração eletroquímica de estruturas de concreto armado carbonatadas inseridas no meio urbano - influência de características da estrutura no comportamento do tratamento*, Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- [33] A. Said and M. L. Nehdi, "Use of FRP for RC Frames in Seismic Zones: Part I. Evaluation of FRP Beam-Column Joint Rehabilitation Techniques," *Applied Composite materials*, no. 11, pp. 205-226, 2004.
- [34] A. M. Said and M. L. Nehdi, "Use of FRP for RC Frames in Seismic Zones: Parte II. Performance of Steel-Free GFRP-Reinforced Beam-Column Joints," *Applied Composite Materials*, no. 11, pp. 227-245, 2004.
- [35] M. M. SALTA, "A utilização de armaduras de aço inoxidável como medida preventiva da corrosão em estruturas em ambiente marítimo," in *REPAR 2000*, Lisboa, 2000.
- [36] M. M. Salta, *Prevenção da corrosão no betão armado*, Seminário Materiais em Ambiente Marítimo, LNEC: Funchal, 2007.
- [37] D. M. Santos, *Processos de construção na reabilitação estrutural de edifícios antigos*, Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de especialização em Edificações, apresentado no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.

- [38] Schöck, Technical Information, Schöck Combar, 2011.
- [39] P. M. d. Silva, *Modelação e Análise de Estruturas de Betão Reforçadas com FRP*, Porto: Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999.
- [40] J. P. Vasconcelos, J. Aguiar and A. Pinho, Guia Técnico de Reabilitação habitacional, 1^a ed., Lisboa: Instituto Nacional de Habitação, LNEC, 2006.
- [41] A. Ventura, "Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas," *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, no. 3/4, pp. 10-19, 2009.

ANEXOS

ANEXO 1 – MARINA DO LUGAR DE BAIXO



Marcas de corrosão dos varões de aço.

ANEXO 2 – CAIS DO PORTO NOVO

Falta de recobrimento das armaduras provocadas pelo destacamento do betão.







ANEXO 3 – PORTO DE RECREIO DE SANTA CRUZ



Destacamento de grandes áreas de betão.









Destacamento do betão. Mesmo ainda existindo uma camada de recobrimento, pode-se ver que há um destacamento de uma camada de 2 cm de betão.





Afastamento das armaduras do núcleo do elemento, e perda de secção do varão.



Vazio existente entre revestimento e núcleo do elemento.



Tamanho dos produtos de corrosão dos varões em aço.





Destacamento de um bloco de betão com armadura incluída.

ANEXO 4 – ESTRUTURA DE SUPORTE COM CONTRAFORTES, FUNCHAL



Falta de recobrimento na parede e vigas provocou a corrosão das armaduras.

Os contrafortes apresentam um grau de deterioração bastante elevado. Embora não haja uma perda de secção considerável, estas já não têm recobrimento em vários pontos. O excesso de varões tendo em conta a área da secção pode ter provocado falhas na betonagem.







ANEXO 5 – PONTE DO RIBEIRO SECO



Estado bastante avançado de deterioração, tanto do betão como das armaduras. O betão está bastante fendilhado e as armaduras já apresentam uma perda de secção considerável, principalmente nos estribos.



ANEXO 6 – RAMPA DE ACESSO À PISCINA DO PORTO MONIZ

Degradação dos elementos pré-fabricados.





ANEXO 7 – ESTAÇÃO DE CORREIOS DO PORTO MONIZ





O estado avançado da degradação e por ser um elemento que apresenta parede com pouca espessura torna esta estrutura difícil de reabilitar. A possível solução passa pela demolição e reconstrução.

ANEXO 8 – PONTE DA ESTRADA COMANDANTE CAMACHO FREITAS, RIBEIRA BRAVA



Nas fotos apresenta-se a degradação dos elementos pré-fabricados utilizados, o que prova na má conceção do elemento.





ANEXO 9 – PROMENADE DA MADALENA DO MAR



Possível ver nas fotos o estado geral da estrutura. Varões encontram-se bastante danificados, bem como o betão.



ANEXO 10 - TÚNEL DA NAZARÉ

Nestas fotos apresenta-se os 3 principais focos de preocupação com esta estrutura. Duas zonas no emboquilhamento e o interior do túnel.



