



Samuel Patrício Maló das Neves

Licenciado em Engenharia Civil

Pré-Esforço Exterior no Reforço de Estruturas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Ramo de Estruturas e Geotecnia

Orientador: Eng.º Vítor Manuel da Cruz Marchão
Co-orientador: Prof. Doutor António Manuel Pinho
Ramos

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Corneliu Cismasiu
Arguente:	Prof. Doutor António Lopes Batista
Vogais:	Eng.º Vítor Manuel da Cruz Marchão
	Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos

 **FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Abril de 2012

Pré-Esforço Exterior no Reforço de Estruturas

Copyright

Samuel Patrício Maló Neves

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores. Ao Eng^o Vitor Marchão pela compreensão, dedicação, amizade e aos conhecimentos concedidos durante a elaboração da presente dissertação. E ao Professor Doutor António Pinho Ramos pela amizade e aos conhecimentos prestados.

Ao departamento de Engenharia Civil da Faculdade de tecnologia e Ciências da Universidade Nova de Lisboa que me proporcionou as melhores oportunidades para o meu desenvolvimento profissional.

Ao Professor Doutor Corneliu Cismasiu que contribuiu na procura de temas aliciantes para os alunos de dissertação, o qual conduziu inicialmente o processo de colaboração entre a faculdade e a empresa VSL Sistemas Portugal.

Quero expressar o meu profundo agradecimento à empresa VSL Sistemas Portugal, especialmente à Eng^a Zenóbia dos Quadros Martins, que liderou todo o processo durante o período de realização da dissertação.

Quero agradecer a todos os colaboradores da VSL sistemas Portugal, no qual estive em contacto directo durante o período de estágio profissional. Sempre que eu tive alguma dúvida, fui me prontamente e devidamente esclarecida pelos respectivos técnicos das várias áreas de actuação. E pela amizade e companheirismos prestados pelos mesmos. Também quero prezar a meu profundo agradecimento por ter contribuído para um grupo pequeno, dotado de excelentes pessoas e profissionais, designadamente o departamento técnico da VSL. Constituído pelo Eng^o Carlos Pereira, Eng^a Joana Pereira, Eng^o Pedro Silva e o meu orientador Eng^o Vítor Marchão.

Quero agradecer à Eng^a Carla Marchão pelos apontamentos prestados, os quais tiveram grande importância em parte da dissertação.

Guardando os agradecimentos especiais para o fim, dedico-os a todos os meus amigos e familiares que me apoiaram e incentivaram durante esta longa caminhada, que por vezes se tornou muito acidentada.

Quero agradecer fortemente aos meus pais, por tudo o que eles fizeram por mim, para que eu pudesse alcançar este objectivo. E aos valores que eles me ensinaram durante a minha vida, que tornaram-me no homem que sou.

Pré-Esforço Exterior no Reforço de Estruturas

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os vários sistemas de pré-esforço exterior aplicáveis ao reforço de estruturas, sendo descritos todos os componentes que os constituem. Também são apresentadas algumas obras nacionais e internacionais, onde o pré-esforço exterior foi aplicado. Foi também realizado um trabalho prático, que consistiu no reforço de uma laje fungiforme aligeirada de betão armado com pré-esforço exterior. A aplicação do pré-esforço exterior serviu para recuperar parte da deformada presente na laje e estabilizar a mesma.

Foram realizadas análises à laje, ao nível do estado limite de deformação, de forma a determinar o traçado do pré-esforço exterior mais eficiente em termos de deformação. Foi também verificada a segurança face aos estados limite últimos. Estas análises foram executadas através de um programa de elementos finitos comercial.

Foram dimensionados alguns componentes do pré-esforço exterior, tais como, as ancoragens passivas, as selas de desvio e os chumbadores. A aplicação do pré-esforço exterior foi acompanhada em obra, sendo descritas as várias etapas do processo construtivo e o resultado final do reforço.

Palavras-chave: Pré – Esforço Exterior, Reforço, Betão Pré-esforçado, Pré-esforço, Pós-tensão, Laje fungiforme.

Retrofitting of Structures Using External Post-Tensioning

ABSTRACT

This work presents the various systems of external post tensioning applicable to reinforcement of structures and describes all the components that comprise them. Some nationally and internationally structures are presented, where external post tensioning was applied. A practical work was carried out also, which involves the strengthening of a flat slab with external post tensioning. The application of external post tensioning served to recover part of the deformation on the slab and therefore stabilizing it.

The slab was analyzed by the limit state of deformation, in order to determine the best layout of the external post- tensioning. It was also verified the security against the ultimate limit states. These analyzes were performed using a commercial finite element program.

Some components of external post tensioning were designed, such as passive anchors, the deviation saddles and anchor bolts. The application of external post tensioning was accompanied on site, and described the various stages of the construction process and outcome of reinforcement.

Key-words: External Post tensioning, Strengthening, Pre-stressed concrete, Prestressing, Post tensioning, Flat slab.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Capítulo 1	1
1 – Introdução	1
1.1 – Generalidades	1
1.2 – Objectivos	2
1.3 – Organização da Dissertação.....	2
1.4 – Âmbito de Realização da Dissertação	3
Capítulo 2	5
2 – Estado da Arte	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Princípio do Pré-Esforço	12
2.3 - Vantagens e Desvantagens do Pré-Esforço Exterior	14
2.4 – Materiais.....	14
2.4.1 – Betão.....	14
2.4.2 – Aço	15
2.4.3 - Fibras	16
2.5 – Classificação dos Sistemas de Pré-Esforço Exterior.....	17
2.6 – Pré-Esforço Exterior em Cordões	19
2.6.1 - Generalidades.....	19
2.6.2 – Sistema Aderente.....	22
2.6.2.1 – Aço Nú Injectado com Calda de Cimento (Não substituível).....	22
2.6.2.2 – Aço Nú Injectado com Calda de Cimento (Substituível).....	24
2.6.3 – Sistema Não Aderente.....	25
2.6.3.1 – Tipos de Aço Auto-Embainhado	26
2.6.3.2 – Sistema Sem bainha Colectiva	27
2.6.3.3 – Sistema Com bainha Colectiva.....	29
2.6.4 – Resumo dos Sistemas	32
2.6.5 – Ancoragens	33
2.6.5.1 – Ancoragem Multicordão	34
2.6.5.2 – Ancoragem Monocordão.....	34
2.6.6 – Bainha	34
2.6.7 – Dispositivos de União	36
2.6.8 – Desviadores	38
2.6.9 – Tarefas de Aplicação de Pré-esforço Exterior	39
2.6.9.1 – Faseamento Geral	39
2.6.9.2 – Tensionamento	40
2.6.9.3 – Protocolo de Tensionamento	41
2.6.9.4 – Injecção de Material.....	41
2.7 – Pré – Esforço Exterior em Barras	43

2.7.1 – Generalidades.....	43
2.7.2 – Sistema Aderente.....	45
2.7.3 – Sistema Não Aderente.....	46
2.7.4 – Ancoragem.....	46
2.7.5 – Operações de Execução.....	49
2.7.5.1 – Tensionamento.....	49
2.7.5.2 – Protocolo de Tensionamento.....	49
2.7.5.3 – Injecção de Material.....	49
2.8 – Pré – Esforço Exterior em Fibras.....	49
2.8.1 – Generalidades.....	49
2.8.2 – Sistema Aderente.....	50
2.8.3 – Sistema Não Aderente.....	51
2.8.4 – Ancoragens.....	51
2.8.5 – Tensionamento.....	53
Capítulo 3.....	55
3 – Experiência Portuguesa no Pré-Esforço Exterior.....	55
3.1 – Introdução.....	55
3.2 – Edifício Residencial.....	55
3.3 – Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Meia Serra.....	57
3.4 – Ponte Edgar Cardoso.....	59
3.5 – Viaduto de Caparide.....	63
3.6 – Faculdade de Psicologia do Porto.....	68
3.7 – Ponte de Fagilde.....	71
3.8 – Passagem Superior - Mangualde.....	75
3.9 - Ponte de Lanheses.....	77
3.10 - Ponte da Lezíria.....	79
3.11 - Ponte sobre o Rio Limpopo.....	81
3.12 – Viadutos de Alviela, Alcaidaria e Cabanos.....	83
3.13 – Ponte sobre o Rio Leça.....	85
3.14 – Ponte sobre o Rio Dão.....	87
3.15 – Ponte de Mosteirô.....	88
Capítulo 4.....	91
4 – Reforço de Laje Fungiforme com Pré-Esforço Exterior.....	91
4.1 – Introdução.....	91
4.2 – Inspeção Preliminar.....	92
4.3 – Ante – Projecto.....	92
4.3.1 – Cordões.....	92
4.3.2 – Barras.....	95
4.3.3 – Fibras.....	95
4.3.4 – Cargas.....	96
4.3.6 – Modelo Numérico.....	97

4.3.7 – Combinação de Acções	98
4.3.8 – Resultados	98
4.3.9 – Conclusão	99
4.4 – Inspecção Integral.....	99
4.5 – Projecto de Reforço Estrutural.....	99
4.5.1 – Descrição Geral	99
4.5.2 – Pré-esforço Exterior em Cabos.....	100
4.5.3 – Verificação dos Estados Limites	102
4.5.3.1 – Estado Limite de Utilização.....	102
4.5.3.2 – Estado Limite Último	102
4.6 – Projecto de Aplicação	105
4.6.1 – Descrição Geral	105
4.6.2 – Materiais.....	105
4.6.3 – Processo Construtivo.....	106
4.6.4 – Descrição dos Cabos e Ancoragens.....	107
4.6.5 – Força de Pré-esforço Aplicar	108
4.6.6 – Plano Genérico de Puxe	108
4.6.7 – Cálculo das Perdas de Pré-esforço	108
4.6.7.1 - Perdas Instantâneas.....	108
4.6.7.2 - Perdas Diferidas Resultantes da Relaxação das Armaduras	111
4.6.7.3 - Determinação do Alongamento Teórico dos Cabos.....	111
4.6.7.4 - Resultados	113
4.6.8 – Verificações de Segurança Locais.....	113
4.6.8.1 – Ancoragem Passiva	113
4.6.8.2 – Sela de Desvio	114
4.6.8.3 – Chumbadouros.....	114
4.6.9 – Pormenorizações	115
4.7 – Acompanhamento de obra.....	116
4.7.1 – Descrição Geral	116
4.7.2 – Marcação dos Dispositivos	116
4.7.3 – Aplicação dos Dispositivos	117
4.7.4 – Colocação dos Cabos	118
4.7.5 – Tensionamento	120
4.7.6 – Trabalhos Finais.....	122
4.7.7 – Aspecto Final	123
Capítulo 5	125
5 – Conclusões	125
5.1 – Introdução	125
5.2 – Traçado dos Cabos.....	125
5.3 – Estado Limite Último de Flexão	126
5.4 – Estado Limite de Deformação.....	127

5.5 – Observações Finais	127
Bibliografia	130
Anexos	134
Anexo 1 – Protocolo de Tensionamento	134
Anexo 2 – Inspeção Preliminar	136
Anexo 3 – Desenhos – Ante-Projecto	138
Anexo 4 – Inspeção Integral.....	140
Anexo 5 – Desenhos – Projecto de Reforço.....	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Disposição dos cabos de pré-esforço exterior (Suntharavadivel 2008).	5
Figura 2.2 – Ponte ferroviária de Aue, projectada por Dischinger (VSL International 1992).	6
Figura 2.3 – Viatudo de Sylans (Janberg's 1998)	6
Figura 2.4 – Viaduto de Echinghen (Janberg's 1998).	6
Figura 2.5 – Corte longitudinal - disposição de cabos. (VSL international).	7
Figura 2.6 – Viaduto de Rumbeck na fase de construção (Weiher e Zilch 2008).	7
Figura 2.7 – Viaduto de Rumbeck depois de construído (Weiher e Zilch 2008).	7
Figura 2.8 – Alçado da estrutura (Barchas 1991).	8
Figura 2.9 – Viaduto em Bicesse, Portugal.	9
Figura 2.10 – Viaduto Bois de Rosset, Suíça.	9
Figura 2.11 – Reforço final (Khaleghi)	9
Figura 2.12 – Amarração da bainha (Khaleghi).	9
Figura 2.13 – Reforço final (Khaleghi)	10
Figura 2.14 – Viga danificada (Khaleghi).	10
Figura 2.15 – Plano geral do viaduto (Andra e Maier 2000).	10
Figura 2.16 – Ancoragens e laminado de CFRP sobre o pilar. (Andra e Maier 2000).	10
Figura 2.17- Corte longitudinal de uma das paredes a eliminar (SIKA 2006).	11
Figura 2.18 – Ancoragem.	11
Figura 2.19 – Pilar reforçado.	11
Figura 2.20 – Viga de betão armado sob carga (Corven e Moreton 2004).	12
Figura 2.21 – Viga simplesmente apoiada.	13
Figura 2.22 – Consola.	13
Figura 2.23 – Diagrama tensão - extensão dos vários aços (Coutinho 2005).	15
Figura 2.24 – Aço laminado a quente	15
Figura 2.25 – Aço trefilado a frio	15
Figura 2.26 – Relação tensão – extensão de fibras. (Ghallab e Beeby 2005).	16
Figura 2.27 – Classificação dos sistemas de pré-esforço exterior com cordões.	19
Figura 2.28 – Cordões.	20
Figura 2.29 – Designação do cordão (prEN10138-3 2006).	21
Figura 2.30 – Cabo de pré-esforço exterior aderente.	23
Figura 2.31 – Sistema de pré-esforço exterior aderente.	24
Figura 2.32 – Sistema de pré-esforço exterior aderente substituível.	25
Figura 2.33 - Três camadas: Galvanizado, cera ou graxa, bainha individual em PEAD.	26
Figura 2.34 - Duas camadas: Cera ou graxa, Bainha em PEAD (Auto-embainhado).	26
Figura 2.35 - Três camadas: Galvanizado, graxa, bainha aderida em PEAD.	26
Figura 2.36 – Cabo sem bainha colectiva.	28
Figura 2.37 – Sistema não aderente sem bainha colectiva.	28

Figura 2.38 – Sistema não aderente com produto flexível.....	30
Figura 2.39 – Cordões auto-embainhados com bainha colectiva.....	31
Figura 2.40 – Sistema não aderente com cordões protegidos e bainha colectiva.	32
Figura 2.41 – Ancoragem activa da VSL tipo E (VSL International).	34
Figura 2.42 – Ancoragem activa da VSL tipo S – 6 (VSL International).	34
Figura 2.43 – Bainha metálica lisa.	35
Figura 2.44 – Bainha metálica corrugada.	35
Figura 2.45 – Bainhas de PEAD lisas.	36
Figura 2.46 – Bainha de PEAD corrugada, PT-PLUS.....	36
Figura 2.47 - Soldadora de tubo em polietileno..	37
Figura 2.48 – Manga de polietileno.	37
Figura 2.49 – Abraçadeira mecânica.l.....	38
Figura 2.50 – União electrossoldável.	38
Figura 2.51 – União Termo-Retráctil.	38
Figura 2.52 – Desviador em tubo metálico.....	38
Figura 2.53 – Desviador “Diabolo”.	38
Figura 2.54 – Macaco mono – cordão.....	40
Figura 2.55 – Macaco Multi – cordão.	40
Figura 2.56 – Procedimento de tensionamento dos cabos (VSL International Ltd. 2010).	41
Figura 2.57 – Misturadora.	42
Figura 2.58 – Procedimento de injeção de calda de cimento. (Corven e Moreton 2004).....	42
Figura 2.59 – Classificação dos sistemas de pré-esforço exterior com barra.	43
Figura 2.60 – Barra nervurada	43
Figura 2.61 – Barra lisa	43
Figura 2.62 – Designação de barra pela (prEN10138-4 2006).	44
Figura 2.63 – Secção transversal da armadura de pré-esforço exterior em barra.	45
Figura 2.64 – Ancoragem activa	47
Figura 2.65 – Ancoragem passiva.....	47
Figura 2.66 – Ancoragem activa e passiva	47
Figura 2.67 – Placa quadrada	48
Figura 2.68 – Placa QR.	48
Figura 2.69 – Placa rectangular.	48
Figura 2.70 – Porca normal.....	48
Figura 2.71 – Porca com reentradas.....	48
Figura 2.72 – Acoplador (ETA-05/0122 2010).	48
Figura 2.73 – Laminados, fios e cordões de fibras (Nordin 2005).	49
Figura 2.74 – Viga pré-esforçada com fibras (Nordin 2005).	50
Figura 2.75 – Sistema de pré-esforço exterior com CFRP (Matta, Aquino, et al. 2008).	51
Figura 2.76 – Ancoragem activa e passiva do tipo Sika LEOBA carboDur SLC II (SIKA).	52
Figura 2.77 – Ancoragem passiva e activa do tipo StressHead (SIKA).....	52

Figura 2.78 – Ancoragem activa para barra de CFRP. (Matta, Aquino, et al. 2008)	53
Figura 2.79 – Macaco Hidráulico. (SIKA)	53
Figura 3.1 – Planta original do edifício.	55
Figura 3.2 – Planta de reforço.	56
Figura 3.3 – Corte pela barra 1, 2, 3, 4.	56
Figura 3.4 – Corte pela barra 5, 6, 7, 8.	56
Figura 3.5 – Demolição de laje.....	57
Figura 3.6 – Colocação de barras.	57
Figura 3.7 – Nichos de ancoragem.	57
Figura 3.8 – Disposição final das barras.	57
Figura 3.9 – Corte transversal do lado esquerdo do edifício.	58
Figura 3.10 – Pormenor da Ligação pilar - viga e ancoragem da barra.	58
Figura 3.11 – Ponte Edgar Cardoso (Fernando 2011).....	59
Figura 3.12 – Corte Longitudinal na extremidade sobre o encontro.	60
Figura 3.13 – Corte A	60
Figura 3.14 – Corte B.	60
Figura 3.15 – Saneamento de betão.	61
Figura 3.16 – Cabos finais.....	61
Figura 3.17 – Pormenor da sela de desvio.	61
Figura 3.18 – Corte transversal A..	62
Figura 3.19 – Corte transversal B.	62
Figura 3.20 – Corte transversal C..	62
Figura 3.21 – Centradores.....	62
Figura 3.22 – Sela de desvio.....	62
Figura 3.23 – Sela de desvio aplicada à carlinga.	62
Figura 3.24 – Planta estrutural.	63
Figura 3.25 – Pormenor da amarração dos cabos de pré-esforço exterior na extremidade sobre o encontro.....	64
Figura 3.26 – Corte transversal A..	64
Figura 3.27 – Corte transversal B.	64
Figura 3.28 – Corte transversal C..	64
Figura 3.29 – Corte transversal D.	64
Figura 3.30 – Corte longitudinal da sela de desvio.	65
Figura 3.31 – Cortes transversais A e B.	65
Figura 3.32 – Corte transversal C	66
Figura 3.33 – Montagem de sela de desvio..	66
Figura 3.34 – Sela de desvio final.	66
Figura 3.35 – Pormenor do desviador na carlinga.....	67
Figura 3.36 – Planta de reforço da estrutura do edifício.	68
Figura 3.37 – Corte longitudinal do lado esquerdo do sistema.....	69

Figura 3.38 – Corte longitudinal do maciço de ancoragem.....	70
Figura 3.39 – Corte longitudinal da sela de desvio.	70
Figura 3.40 – Sistema de ancoragem..	70
Figura 3.41 – Sela de desvio.....	70
Figura 3.42 – Corte longitudinal da ponte.	71
Figura 3.43 – Planta da ponte.	71
Figura 3.44 – Aberturas na laje.	72
Figura 3.45 – Armaduras no maciço.	72
Figura 3.46 – Maciço betonado.....	72
Figura 3.47 – Bainha colectiva.	72
Figura 3.48 – Armadura do bloco.....	73
Figura 3.49 – Maciço betonado.	73
Figura 3.50 – Tensionamento..	73
Figura 3.51 – Tampa de protecção.	73
Figura 3.52 – Cofragem do septo.....	74
Figura 3.53 – Armadura do septo.....	74
Figura 3.54 – Diafragma.....	74
Figura 3.55 – Colocação dos cabos.....	74
Figura 3.56 – Dispositivo anti-vibratório.	74
Figura 3.57 – Corte longitudinal do viaduto.....	75
Figura 3.58 – Traçado do cabo de pré-esforço exterior.....	76
Figura 3.59 – Pormenorização das ancoragens das barras.....	76
Figura 3.60 – Corte transversal da estrutura.....	76
Figura 3.61 – Corte longitudinal.	77
Figura 3.62 – Tubos de ancoragem pré-fabricados.	77
Figura 3.63 – Pormenor da sela de desvio.	78
Figura 3.64 – PEAD Ø110 c/ centrador PEAD	78
Figura 3.65 - PEAD Ø100 c/ centrador metálico.....	78
Figura 3.66 – PEAD Ø110 c/ centrador PEAD.....	79
Figura 3.67 – PEAD Ø125 c/ centrador PEAD.....	79
Figura 3.68 – Ponte da Lezíria.	79
Figura 3.69 – Abraçadeira mecânica..	80
Figura 3.70 – União electrossoldável.	80
Figura 3.71 – Dispositivo anti-vibratório ajustável.....	80
Figura 3.72 – Dispositivo anti-vibratório ajustável.....	80
Figura 3.73 – Ancoragens sobre o pilar.	81
Figura 3.74 – Trajectória dos cabos entre pilar e o meio vão.....	81
Figura 3.75 – Trajectória dos cabos a meio vão.....	81
Figura 3.76 – Ancoragens e cabos..	82
Figura 3.77 – União dos cabos e macaco.....	82

Figura 3.78 – Auxiliar de levantamento do macaco hidráulico.....	82
Figura 3.79 – Pré-esforço exterior no capitel devido a ampliação estrutural.....	83
Figura 3.80 – Aparelho de ancoragem exterior.....	84
Figura 3.81 – Aparelho de ancoragem interior.....	84
Figura 3.82 – Uniões electrossoldáveis..	84
Figura 3.83 – Janelas telescópicas.....	84
Figura 3.84 – Corte longitudinal da ponte.....	85
Figura 3.85 – Planta da ponte.....	85
Figura 3.86 – Maciço junto ao encontro.....	86
Figura 3.87 – Maciço sobre o pilar central.....	86
Figura 3.88 – Vista lateral da sela de desvio.....	86
Figura 3.89 – Vista frontal da sela de desvio.....	86
Figura 3.90 – Aspecto final do reforço.....	87
Figura 3.91 – Ponte sobre o Rio Dão.....	87
Figura 3.92 – Interior do caixão.....	88
Figura 3.93 – Ponte de Mosteirô.....	88
Figura 3.94 – Berço da laje de fundo.....	89
Figura 3.95 – Corte longitudinal da ponte.....	89
Figura 3.96 – Planta da ponte.....	89
Figura 4.1 – Laje de estudo.....	91
Figura 4.2 – Esquema do traçado 1 e 2 e representação das forças devidas ao pré-esforço.....	93
Figura 4.3 – Esquema do traçado 3 e representação das forças devidas ao pré-esforço.....	94
Figura 4.4 – Esquema do traçado 4 e representação das forças devidas ao pré-esforço.....	95
Figura 4.5 – Modelo numérico.....	97
Figura 4.6 – Esquema da variante de traçado com uma sela de desvio.....	100
Figura 4.7 – Esquema de variante com duas selas de desvio.....	101
Figura 4.8 – Momentos segundo x antes do reforço (kN.m).....	103
Figura 4.9 – Momentos segundo x pós reforço (kN.m).....	104
Figura 4.10 – Momentos segundo y antes do reforço (kN.m).....	104
Figura 4.11 – Momentos segundo y pós reforço (kN.m).....	105
Figura 4.12 – Determinação de ângulos de desvio.....	109
Figura 4.13 – Esquema de reentrada de cunhas.....	110
Figura 4.14 – Esquema para o cálculo do alongamento teórico.....	112
Figura 4.15 – Gabarito.....	116
Figura 4.16 – Furação.....	116
Figura 4.17 – Colocação dos varões roscados.....	117
Figura 4.18 – Ancoragens passivas.....	117
Figura 4.19 – Vista das ancoragens passivas.....	117

Figura 4.20 – Vista das ancoragens passivas.	118
Figura 4.21 – Selas de desvio.	118
Figura 4.22 – Selas de desvio aplicadas.	118
Figura 4.23 – Ancoragem dos cabos.	119
Figura 4.24 – Cabo aplicado na sela de desvio.	119
Figura 4.25 – Ancoragens activas.	119
Figura 4.26 – Traçado dos cabos em obra.	120
Figura 4.27 – Traçado dos cabos entre obstáculos.	120
Figura 4.28 – Macaco hidráulico.	120
Figura 4.29 - Tensionamento dos cordões.	121
Figura 4.30 – Aplicação de calor na manga termo-retráctil.	122
Figura 4.31 – Selagem das ancoragens activas.	122
Figura 4.32 – Ligação bainha à ancoragem passiva.	122
Figura 4.33 – Vista geral da laje com o pré-esforço exterior aplicado.	123
Figura 4.34 – Ancoragens activas protegidas.	123
Figura 4.35 – Cabos de pré-esforço exterior.	123
Figura 4.36 – Vista frontal esquerda.	124
Figura 4.37 – Vista frontal direita.	124
Figura 4.38 - Colocação do tecto falso.	124
Figura 4.39 – Aspecto final da obra.	124
Figura 5.1 – Momentos flectores segundo x, antes e pós reforço (kN.m).	124
Figura 5.2 – Momentos flectores segundo y, antes e pós reforço (kN.m).	124

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características de cordão de 7 fios (ETA-06/0006 2011).....	20
Tabela 2.2 – Sistemas de pré-esforço exterior com cordões.....	33
Tabela 2.3 – Adequabilidade de bainhas (ETA-06/0006 2011).....	35
Tabela 2.4 – Raios mínimos de curvatura dos desviadores (VSL International Ltd. 2010).....	39
Tabela 2.5 – Barras de pré-esforço. (ETA-05/0122 2010).....	44
Tabela 2.6 – Características de alguns fabricantes de FRP (Benmokrane, Zhang e Chennouf 2000).....	50
Tabela 2.7 – Características da resina epoxídica (SIKA 2009).....	51
Tabela 4.1 – Cálculo de forças devidas ao pré-esforço do traçado 1 e 2.....	94
Tabela 4.2 – Cálculo das forças de pré-esforço do traçado 3.....	94
Tabela 4.3 – Cálculo das forças de pré-esforço do traçado 4.....	95
Tabela 4.4 – Resultados de flechas elásticas.....	98
Tabela 4.5 – Forças devidas ao pré-esforço.....	100
Tabela 4.6 – Forças devidas ao pré-esforço dos cabos 3.3 e 2.6.....	101
Tabela 4.7 – Forças devidas ao pré-esforço para os cabos indicados.....	101
Tabela 4.8 – Forças devidas ao pré-esforço para os cabos indicados.....	101
Tabela 4.9 – Deformada antes e pós reforço.....	102
Tabela 4.10 – Resultados do cálculo automático.....	113
Tabela 4.11 – Esforços de dimensionamento.....	115
Tabela 4.12 – Esforços de dimensionamento.....	115

NOTAÇÃO

LETRAS LATINAS

- f_{pk} – Valor característico da tensão de rotura à tracção do aço das armaduras de pré-esforço.
- F_{pk} – Valor característico da força de rotura à tracção do aço das armaduras de pré-esforço.
- $f_{p0,1}$ – Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% do aço das armadura de pré-esforço.
- $f_{p0,1k}$ – Valor característico da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% à tracção do aço das armaduras de pré-esforço.
- A_p – Área transversal da armadura de pré-esforço.
- D – Diâmetro da secção transversal.
- D_i – Estimativa da deformada antes do reforço.
- D_f – Estimativa da deformada pós reforço.
- P_{max} = Força máxima aplicada à armadura de pré-esforço na ancoragem activa.
- M – Momento flector concentrado.
- e - Excentricidade do cordão ao centro de gravidade da laje.
- h - Dimensão entre a ancoragem e a face inferior da sela de desvio.
- L_i – Comprimento entre a ancoragem e a sela de desvio.
- L_e – Comprimento entre a ancoragem e a sela de desvio.
- $P \cdot \text{tg}\alpha$ - Força vertical devida ao traçado de pré-esforço.
- P – Valor representativo de uma acção de pré-esforço.
- Q – Valor característico da acção variável.
- G – Valor característico da acção permanente.
- $F_{v,Ed}$ – Valor de cálculo do esforço transversal actuante.
- $F_{t,Ed}$ – Valor de cálculo do esforço normal actuante.
- $M_{i,Ed}$ – Valor de cálculo do momento flector actuante.
- P_x - Representa a perda de força por atrito por metro.
- x - Representa a distância da secção considerada à extremidade em que é aplicado o pré-esforço.
- P_0' - Representa o valor da força de pré-esforço aplicada (força de puxe).
- k - Representa o coeficiente de atrito em recta (produto do desvio angular parasita pelo coeficiente de atrito em curva).
- R - Raio curvilíneo do cabo em planta.
- h - Cota do cabo em relação à origem do mesmo.
- E_p - Módulo de elasticidade do aço de pré-esforço.
- L - Comprimento do cabo de pré-esforço.

LETRAS GREGAS

Φ - Diâmetro interno da bainha.

α - Ângulo formado entre o cabo de pré-esforço e a horizontal.

φ_0 - Coeficiente para a determinação do valor de combinação de uma acção variável.

φ_1 - Coeficiente para a determinação do valor frequente de uma acção variável.

φ_2 - Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma acção variável.

φ - Diâmetro da bainha.

γ - Peso específico do material.

α_1 - Representa a soma dos valores absolutos, em radianos, dos ângulos de desvio do traçado do cabo ao longo da distância x .

α_2 - Ângulo de desvio entre duas secções consecutivas, em perfil longitudinal é determinado pela seguinte expressão.

α_3 - Ângulo de desvio em planta entre duas secções consecutivas.

α_4 - Ângulo de desvio total entre duas secções consecutivas.

μ - Representa o coeficiente de atrito em curva entre o cabo de pré-esforço e a bainha.

ΔL - representa o comprimento de reentrada dos cordões.

ΔP - Perda de força na ancoragem.

ΔL_{puxe} - Alongamento teórico do cordão.

ρ_{1000} - Representa a relaxação após 1000 h a 20 °C e a 70% da rotura.

$\sigma_i(x)$ - representa a tensão após perdas imediatas, na secção x .

σ'_0 - Tensão no aço de pré-esforço devido à força de puxe.

$\sigma_{\text{após atrito}}$ - Tensão no aço de pré-esforço após perdas de atrito no comprimento L .

μ_0 - Representa o coeficiente, para aço de baixa relaxação.

β - Somatórios dos ângulos de desvio desde a origem até à secção em estudo.

ABREVIATURAS

FRP – Fiber Reinforcement Polymer

CFRP – Carbon Fiber Reinforcement Polymer

AFRP – Aramid Fiber Reinforcement Polymer

EC0 – Eurocódigo 0 – EN NP1990

EC1 – Eurocódigo 1 – EN NP1991

EC2 – Eurocódigo 2 – EN NP1992

EC3 – Eurocódigo 3 – EN NP1993

REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado

RSA – Regulamento de Segurança e Acções

PPparedes – Peso próprio das paredes de alvenaria

REV – Revestimentos

ETA – European Technical Approval

Cd. – Cordão

FS – Factor de segurança

PEAD – Polietileno de alta densidade

Capítulo 1

1 – Introdução

1.1 – Generalidades

O pré-esforço exterior foi utilizado inicialmente na Alemanha, no decorrer da segunda grande guerra, dada a urgência em recuperar pontes vitais para o País. O pré-esforço exterior foi aplicado a várias pontes e viadutos de então, que foram reforçados com barras de aço. No entanto, devido à falta de conhecimento alargado desta técnica e à limitação dos materiais da altura, caiu em desuso durante algum tempo. Contudo, esta técnica viria a ressurgir nos anos 90, com o desenvolvimento de novos materiais, tais como o aço de elevada resistência e as fibras, que foram intensivamente aplicados e estudados, de modo a compreender o comportamento do pré-esforço exterior com a estrutura e a todos os fenómenos associados.

Actualmente o pré-esforço exterior é aplicado tanto na construção de estruturas como no reforço das mesmas. A explicação deve-se ao facto do pré-esforço exterior suportar parte das cargas instaladas na estrutura, e dessa forma, as peças resistentes podem ter dimensões mais reduzidas, o que resulta um menor peso próprio proveniente das peças mencionadas. Ao nível do reforço, esta técnica permite um reforço activo, ou seja, é possível aplicar cargas devidas ao pré-esforço na estrutura e aliviar o nível de tensões da mesma. Enquanto, nos reforços passivos é necessário a estrutura atingir determinado nível de tensões para os elementos resistentes de reforço começarem a funcionar.

O pré-esforço exterior consiste tradicionalmente na aplicação de uma ancoragem passiva numa extremidade da estrutura considerada, e uma ancoragem activa na extremidade oposta. Os cabos são limitados a trajectos rectos, excepto na zona das selas de desvio. Essas podem ser construídas "in situ" em betão armado com recurso a moldes em tubos metálicos ou em PEAD (Polietileno de alta densidade), ou pré-fabricadas. Sendo que as ancoragens e as selas de desvio que transmitem a carga de pré-esforço à estrutura.

No início da implementação desta técnica, o sistema de pré-esforço exterior aplicado era exclusivamente aderente, não sendo possível a substituição ou retensionamento dos mesmos. No entanto, com a experiência adquirida nas diversas obras realizadas, o sistema evoluiu naturalmente. Sendo que, o último sistema desenvolvido e aplicado na actualidade é não aderente, e possibilita a substituição e retensionamento dos cordões.

1.2 – Objectivos

O objectivo deste trabalho visa abordar os vários sistemas de pré-esforço exterior, e também descrever as particularidades dos sistemas de pré-esforço exterior que foram aplicados por empresas nacionais em obras nacionais e internacionais.

O objectivo do trabalho prático da presente dissertação consistiu no desenvolvimento de um sistema de pré-esforço exterior que solucione o problema de deformação excessiva da laje fungiforme aligeirada em betão armado de um edifício habitacional. A aplicação do pré-esforço exterior permite recuperar parte da deformada presente na laje e estabilizar a mesma, de forma a funcionar em boas condições de serviço.

O objectivo prático está dividido nos seguintes sub-objectivos:

- 1) Análise e determinação da combinação, traçado e material a utilizar no pré-esforço exterior.
- 2) Implementação dos traçados finais de pré-esforço de acordo com o resultado do primeiro sub-objectivo e às condições em obra. E determinar a deformada teórica final após implementação dos traçados finais no modelo numérico.
- 3) Comparação da deformada teórica com a obtida em obra, e apresentar os devidos fundamentos.

1.3 – Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, sendo que, no primeiro descreve sucintamente a problemática do tema a estudar e os objectivos a cumprir.

No segundo capítulo é apresentado o estado da arte. Inicia-se com uma breve descrição de várias obras que implementaram diversos tipos de pré-esforço exterior, tanto ao nível nacional como internacional. De seguida é apresentado o princípio do pré-esforço, e as vantagens e desvantagens do pré-esforço exterior de acordo com os autores especificados. Também são descritos os materiais adoptados para a materialização dos vários sistemas de pré-esforço exterior. Posteriormente é apresentada a classificação do pré-esforço exterior de acordo com os pressupostos indicados no respectivo subcapítulo. Depois são apresentados ao pormenor todos sistemas para cada tipo de material, ou seja, para cordões, barras e fibras. Neste ponto também são expostos, tipos de ancoragens, bainhas, dispositivos de união, desviadores, e o processo de tensionamento, protocolo de tensionamento e injeção das bainhas.

No terceiro capítulo são apresentadas algumas obras que utilizaram pré-esforço exterior em Portugal. São descritas as características das estruturas originais e dos sistemas adoptados para cada obra, sendo um grande foco ao nível dos sistemas e componentes adoptados.

No quarto capítulo é descrito o caso de estudo da presente dissertação. Tem início com uma introdução à estrutura e ao problema a estudar. De seguida é apresentada uma inspecção preliminar elaborada à estrutura para a realização do ante-projecto. Este consiste na comparação de traçados e materiais a utilizar, para solucionar o problema, de modo a obter a combinação mais eficiente. De seguida é apresentada a segunda inspecção à estrutura, onde consta detalhes específicos da estrutura a reforçar. Que posteriormente são utilizados para a realização do projecto de reforço e aplicação. Nessa fase são determinados os traçados finais e o resultado final teórico de forma a comparar com o obtido em obra. Também são apresentados os princípios de verificação de segurança aos vários componentes, de acordo com os regulamentos específicos. Posteriormente à fase de projecto, é apresentado o acompanhamento de obra, onde são expostas as principais fases da mesma e apresentado o resultado final prático.

Por último, no quinto capítulo é apresentada uma síntese do problema a tratar, e as respectivas conclusões retiradas do trabalho prático. Também são apresentadas algumas observações finais ao sistema adoptado.

1.4 – Âmbito de Realização da Dissertação

A presente dissertação foi elaborada com o apoio da VSL Sistemas Portugal, tendo os trabalhos decorrido nesta empresa. Assim, as referências e os exemplos apresentados dizem respeito a publicações e trabalhos desta empresa, como é natural. No entanto, existem muitos outros sistemas de pré-esforço com homologação europeia, que poderiam ser considerados.

Capítulo 2

2 – Estado da Arte

2.1 – Introdução

O pré-esforço exterior tem vindo a ganhar grande visibilidade no plano actual, devido à possibilidade de permitir a concepção de novas estruturas e o reforço de estruturas que estão sujeitas a novas solicitações, que normalmente passa pelo incremento de carga.

No pré-esforço exterior os elementos mais utilizados são as barras e os cordões em aço de alta resistência, e os laminados à base de fibras. O material das bainhas pode variar entre metálicas e as plásticas, no qual, posteriormente são utilizados materiais de selagem que são injectados dentro das mesmas. Tais materiais variam entre a calda de cimento, a graxa ou cera.

O pré-esforço exterior tem uma particularidade no que diz respeito à disposição dos cabos, eles só se dispõem em trajectos rectos, excepto nas zonas que estão auxiliadas por selas de desvio que provocam a rotação dos cabos devido à sua curvatura.

A figura 2.1 ilustra um exemplo de aplicação de pré-esforço a uma estrutura, bem como os elementos que transmitem as forças de desvio do cabo de pré-esforço à estrutura, tais como, os desviadores e as ancoragens.

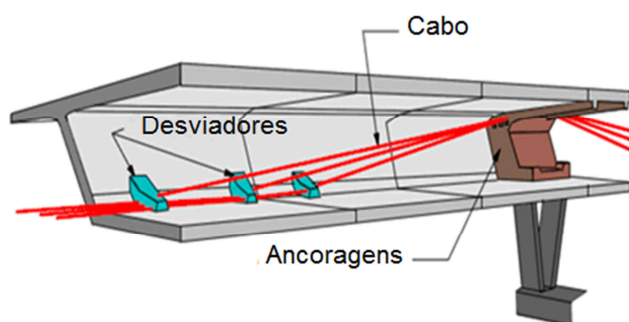


Figura 2.1 – Disposição dos cabos de pré-esforço exterior (Suntharavadivel 2008).

O pré-esforço exterior tem um plano bastante alargado no que diz respeito à sua aplicabilidade nas diversas estruturas que hoje em dia são construídas, desde as estruturas comuns de betão armado, as de aço, as estruturas mistas e por último as estruturas de madeira.

A primeira obra a usar pré-esforço exterior foi uma ponte ferroviária em Aue na Saxónia, actual Alemanha, em 1936 projectada por Dischinger, com um conjunto dos seguintes vãos 25,20 – 69,00 – 23,40 m (VSL International 1992). Foram utilizadas barras de aço lisas com tensão de cedência de 520 MPa (figura 2.2).



Figura 2.2 – Ponte ferroviária de Aue, projectada por Dischinger (VSL International 1992).

Contudo, o maior desenvolvimento desta técnica retomou nos anos 80, até à data, os sistemas de protecção dos cabos eram bastante limitados e com bastantes deficiências (VSL International 1992).

A partir dos anos 80, vários investigadores estudaram o comportamento do pré-esforço exterior na estrutura. Todo este vasto conhecimento tem vindo a ser implementado na construção de novas pontes, especialmente nas pontes pré-fabricadas por avanços sucessivos. Algumas delas têm utilizado o pré-esforço exterior para permitir a utilização de secções em caixão com almas homogéneas metálicas ou em treliça de betão ou aço, tornando os tabuleiros mais leves, como é o caso do viaduto de Sylans (1989), figura 2.3 e o viaduto de Echinghen (1997), figura 2.4. Deste modo, é possível a estrutura atingir grandes vãos e possuir bom comportamento às solicitações exigidas.

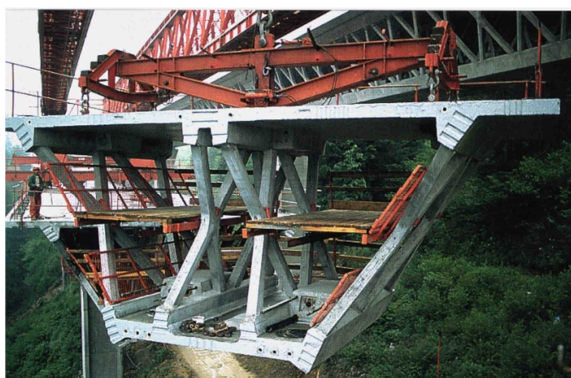


Figura 2.3 – Viaduto de Sylans (Janberg's 1998). Figura 2.4 – Viaduto de Echinghen (Janberg's 1998).

No caso do viaduto de Echingen, é possível observar na figura 2.5 a complexidade de um projecto que combina o pré-esforço exterior com o interior, e a secção transversal é uma treliça metálica com a laje superior e de fundo em betão armado.

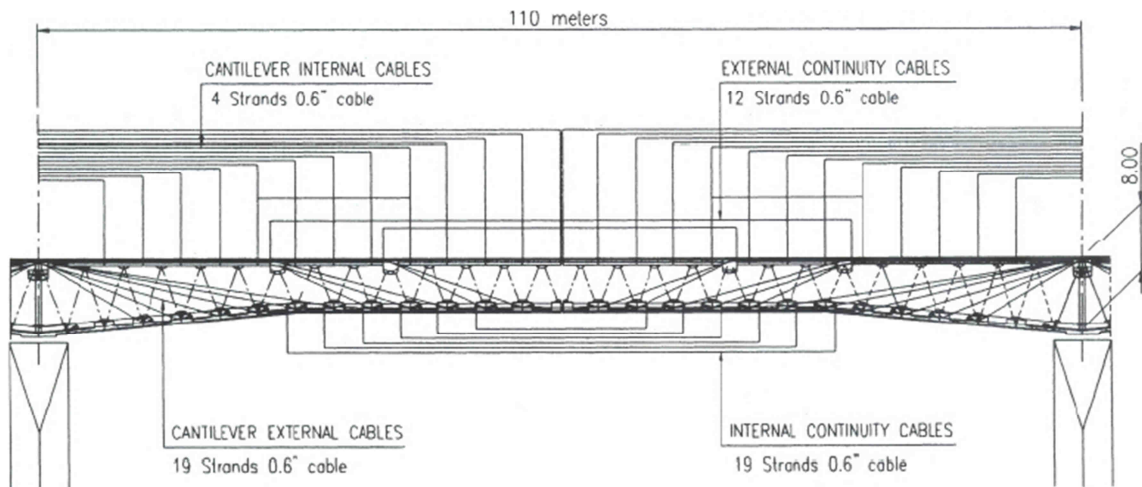


Figura 2.5 – Corte longitudinal - disposição de cabos. (VSL international).

As pontes que combinam vários tipos de pré-esforço funcionam da seguinte forma. Os cabos de pré-esforço interior têm um traçado parabólico e asseguram a segurança face às cargas permanentes, enquanto o pré-esforço exterior tem um traçado poligonal que balanceia os efeitos das sobrecargas. Também é aplicável na construção de novas pontes convencionais em caixão em que só se utiliza pré-esforço exterior, como é o caso do viaduto de Rumbeck que foi construído em 2002. (Weiher e Zilch 2008) (figura 2.6 e 2.7).



Figura 2.6 – Viaduto de Rumbeck na fase de construção (Weiher e Zilch 2008).

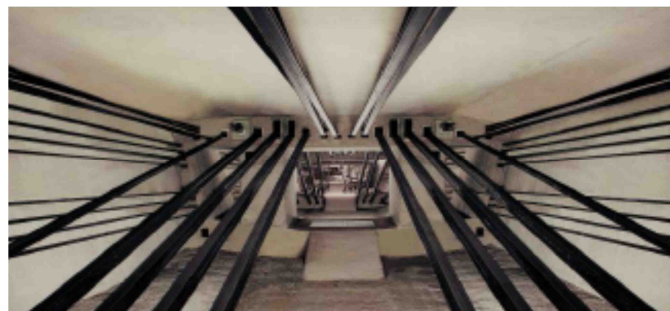


Figura 2.7 – Viaduto de Rumbeck depois de construído (Weiher e Zilch 2008).

No âmbito da reparação e reforço de estruturas, o pré-esforço exterior possui um vasto campo de aplicações. O uso desta técnica está indicado para acções de reparação e reforço devido à facilidade de montagem (Alkhrdaji e Thomas 2009), em que o mesmo só necessita de alguns pontos para transmitir a carga de pré-esforço, permanecendo o cabo exteriormente à estrutura.

Actualmente o conceito de durabilidade tem vindo a ganhar grande importância nos Países mais desenvolvidos, é de prever um amplo campo de aplicação para o pré-esforço exterior substituível e retensionável num futuro próximo.

O pré-esforço exterior tem vindo a ser investigado com recurso a vários tipos de materiais, tais como, fios e barras de aço, ou as fibras, mais conhecidas por FRP (Fiber Reinforcement Polymer). A utilização de cordões de aço de alta resistência no pré-esforço exterior tem sido utilizada no caso de reforço de pontes ou viadutos, de modo a tornar essas mesmas capazes de suportar as novas solicitações devidas ao desenvolvimento das sociedades modernas. No caso de edifícios para além de poder reforçar a capacidade resistente dos elementos, permite também adequar as estruturas às novas configurações arquitectónicas.

Porém, antes de aplicar qualquer tipo de reforço é necessário compreender o funcionamento das estruturas originais e entender as anomalias que as estruturas apresentam.

No início de 1980, segundo (Barchas 1991) foi construído um condomínio de luxo de 15 andares em Los Angeles com uma estrutura comum de betão armado. Erigida a estrutura, o proprietário faliu. Em 1987 o edifício foi comprado por um novo proprietário, o qual procedeu à reestruturação arquitectónica de modo a ganhar mais espaço. O arquitecto procedeu à modificação da posição das cozinhas e casas de banho. Para tal, foi necessário abrir novas coretes para a passagem das canalizações, bem como a eliminação de pilares, o que deu origem a problemas estruturais. Para resolver o problema, foi adoptado uma solução com pré-esforço exterior, devido ao custo e a facilidade de instalação do sistema. Na figura 2.8 é possível observar o alçado da estrutura.

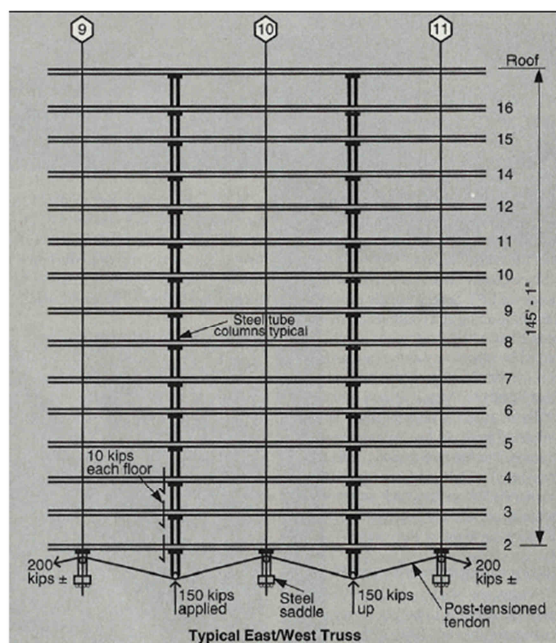


Figura 2.8 – Alçado da estrutura (Barchas 1991).

Na primavera de 1997, segundo (Alkhrdaji e Thomas 2009) foi utilizado um sistema de pré-esforço exterior para reabilitar duas vigas pré-esforçadas interiormente devido a um excessivo acumular de

neve no telhado que levou à rotura. Esta estrutura pré-esforçada é um parque de estacionamento em Washington D.C. com 6 pisos. A técnica referida consiste em encamisar a viga danificada com betão e introduzir no mesmo cabos de pré-esforço.

O pré-esforço exterior também é bastante utilizado no reforço de pontes e viadutos, como é o caso do reforço do viaduto em Bicesse, ver figura 2.9, e o viaduto Bois de Rosset, ver figura 2.10.



Figura 2.9 – Viaduto em Bicesse, Portugal.



Figura 2.10 – Viaduto Bois de Rosset, Suíça.

O pré-esforço exterior também pode ser aplicado com barras, e em particular em acções de reforço. (Khaleghi) descreve três casos de reforço em que são utilizadas barras pré-esforçadas exteriormente à estrutura. O primeiro caso refere-se ao reforço da viga para momentos negativos e positivos, ver figuras 2.11 e 2.12. O segundo caso é o reforço de um tabuleiro para momentos positivos devido às deficiências na sua concepção, ver figura 2.13. E o terceiro caso é o reforço de uma viga danificada por uma colisão de um veículo, ver figura 2.14.



Figura 2.11 – Reforço final (Khaleghi).



Figura 2.12 – Amarração da bainha (Khaleghi).



Figura 2.13 – Reforço final (Khaleghi).



Figura 2.14 – Viga danificada (Khaleghi).

Actualmente o pré-esforço exterior com fibras tem vindo a ser bastante investigado. Vários investigadores têm estudado o comportamento da interacção dessas fibras pré-esforçadas com a estrutura e os próprios elementos de apoio, como as ancoragens e desviadores. As fibras mais desenvolvidas são as fibras de aramida, vidro e de carbono, podendo apresentar-se em fios, cordões, barras ou laminados.

Em Outubro de 1998, o viaduto de LauterBridge em Gomadingen (Figura 2.15) foi alvo de obras de reabilitação, para tal, a solução foi a aplicação de um sistema de pré-esforço exterior com laminados de carbono nas zonas junto aos apoios, onde se verificava excessiva fendilhação (Figura 2.16). (Andra e Maier 2000)



Figura 2.15 – Plano geral do viaduto (Andra e Maier 2000).



Figura 2.16 – Ancoragens e laminado de CFRP sobre o pilar. (Andra e Maier 2000).

Em Dezembro de 2006, na Áustria, foi utilizado um sistema de pré-esforço exterior com laminados de carbono para remover duas paredes e assim aumentar a área útil do edifício (SIKA 2006). O sistema consistiu na utilização de laminados de carbono, que são ancorados às paredes adjacentes, ver figura 2.17.

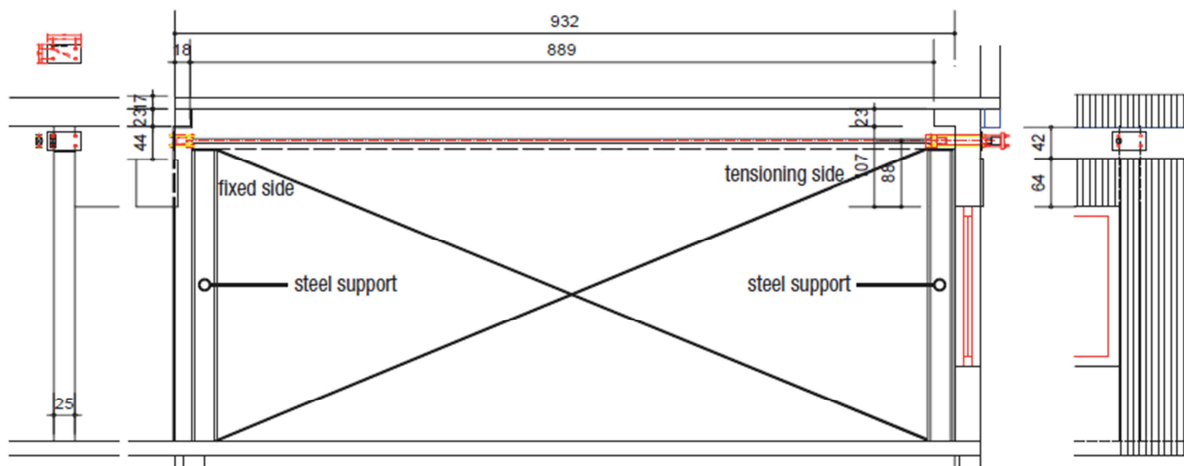


Figura 2.17- Corte longitudinal de uma das paredes a eliminar (SIKA 2006).

Em Portugal, o armazém da Delta Café foi alvo de obras de reforço estrutural, de modo a suportar o aumento de sobrecarga. Foram utilizadas fibras nos vários elementos da estrutura. Em particular, nos pilares, foram reforçados com fibras de aramida pré-esforçadas (Figura 2.18 e 2.19). Os referidos pilares localizam-se no alinhamento perpendicular à maior dimensão dos mesmos, onde existia uma junta de dilatação que seccionava a estrutura e os respectivos pilares. O reforço dessa zona consistiu em preencher a junta de dilatação e vazio entre as duas meias secções transversais dos pilares com grout (argamassa fluida de alta resistência), e posteriormente cintar o pilar com fibras pré-esforçadas.



Figura 2.18 – Ancoragem.



Figura 2.19 – Pilar reforçado.

2.2 – Princípio do Pré-Esforço

A resistência do betão à tracção é cerca de um décimo da resistência à compressão, de modo a evitar a excessiva fendilhação e deformação nos elementos de betão simples, são colocadas armaduras ordinárias por forma a resistir às tensões de tracção. A armadura colocada assume que a zona de tracção do betão não resiste a nenhuma carga, e que a resistência de tracção é unicamente através das forças instaladas na armadura ordinária. Resultando que o elemento de betão fendilhe mas suporte as devidas cargas, ver figura 2.20. Embora ocorra fendilhação, as fendas são normalmente de pequena espessura e uniformemente distribuídas, no entanto a fendilhação pode reduzir a durabilidade do elemento.

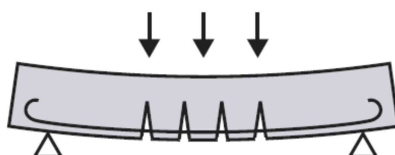


Figura 2.20 – Viga de betão armado sob carga (Corven e Moreton 2004).

A introdução de um meio de compressão na zona tracionada do elemento de betão para compensar os posteriores esforços, reduz ou elimina a fendilhação e assim aumenta a durabilidade do elemento.

O princípio do pré-esforço consiste em colocar a estrutura inicial de betão em compressão nas zonas onde existe tracções causadas pela aplicação de cargas. A tracção causada pela carga será anulada pela compressão do elemento de pré-esforço antes que ele possa fendilhar. Na figura 2.21-a e 2.22-a, ilustra uma viga simplesmente apoiada e uma consola ambas em betão armado, fendilhadas devido às cargas aplicadas. As figuras 2.21-b e 2.22-b mostram as mesmas estruturas sem carregamentos mas com as forças de pré-esforço aplicadas através de cabos de pré-esforço de alta resistência. Ao colocar os cabos de pré-esforço abaixo do centro de gravidade na viga simplesmente apoiada e acima do centro de gravidade na consola, introduz um estado de compressão nas zonas de tracção no qual irá criar uma determinada curvatura, ou seja, momentos flectores opostos ao carregamento. (Corven e Moreton 2004).

Os projectistas de pontes equilibram os efeitos das cargas e do pré-esforço de tal forma que a tracção é compensada pela compressão introduzida pelo pré-esforço, deste modo, a tracção é eliminada sob a combinação dos dois e a fendilhação é prevenida, ver figuras 2.21-c e 2.22-c. (Corven e Moreton 2004)

Elemento de betão armado fendilhado devido ao carregamento.

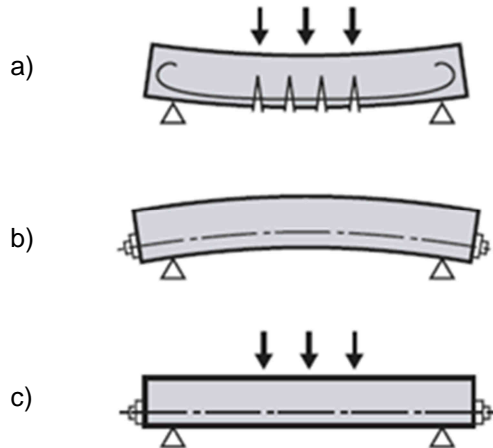


Figura 2.21 – Viga simplesmente apoiada. (Corven e Moreton 2004).

Elemento pré-esforçado.

Combinação do pré-esforço com o carregamento.

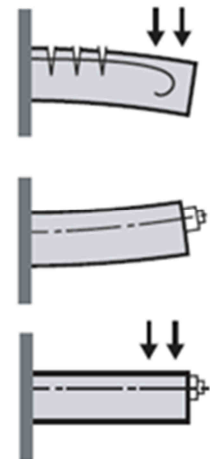


Figura 2.22 – Consola. (Corven e Moreton 2004).

O pré-esforço é aplicado aos elementos de duas formas, através de:

- Pré-tensão
- Pós-tensão

Pré-tensão

Os cabos de pré-esforço são inicialmente tensionados contra suportes e posteriormente procede-se à betonagem sobre um molde. O elemento de betão é deixado a endurecer até atingir resistência suficiente, de modo que os cabos de pré-esforço sejam libertados dos suportes e transmitam as forças por aderência ao elemento de betão armado.

Pós-tensão

Os cabos de pré-esforço são inseridos no elemento de betão armado, e de seguida betonado. Após a cura e endurecimento do betão, os cabos de pré-esforço são tensionados até a carga de projecto. A transmissão de esforços é feita através das extremidades e ao longo do cabo.

2.3 - Vantagens e Desvantagens do Pré-Esforço Exterior

De acordo com (Picard, Massicotte e Bastien 1995), (Rombach 1997), (Burdet e Badoux 2000), as principais vantagens consistem na possibilidade de inspecção, fácil instalação dos cabos, adequada protecção contra a corrosão, menos peso próprio devido à esbelteza da estrutura, menos perdas por atrito, a possibilidade de retensionar ou destensionar os cabos, e por último, a substituição dos cabos de pré-esforço. Estes últimos só são possíveis quando previsto em projecto. Esta técnica também tem sido aplicada na ligação de tabuleiros de pontes pré-fabricados, o que promove menores custos de instalação.

As desvantagens subsistem dos cabos, que têm traçados exclusivamente rectos, excepto nas zonas pontuais de desvio, onde são transmitidas as cargas devidas ao pré-esforço. Resultando assim, uma baixa eficiência, comparado com o pré-esforço interior com traçado parabólico. Os sobrecustos devido aos vários componentes que constituem o sistema, tais como, vários diâmetros de bainhas, uniões de bainhas, selas de desvio, e por vezes o dimensionamento de ancoragens especiais. A concentração de tensões devido às forças de pré-esforço, leva ao aumento das armaduras ordinárias nos pontos de desvio dos cabos.

O retensionamento ou substituição dos cabos em pontes envolve sobrecustos na ordem dos 5% nas secções em caixão. (Corven e Moreton 2004)

2.4 – Materiais

2.4.1 – Betão

O betão a utilizar em estruturas pré-esforçadas deve ser de classe de resistência igual ou superior a C25/30, porque o betão pré-esforçado fica sujeito, desde muito cedo a tensões de compressão muito elevadas, no qual deverá assegurar boa qualidade ao longo da vida da estrutura. No entanto, deve-se ter em conta aos fenómenos específicos do material, tais como a fluência, que é a deformação do betão ao longo do tempo sob carga constante.

2.4.2 – Aço

Os aços utilizados em armaduras pré-esforçadas devem ser aços de alta resistência, no qual as tensões de rotura nos cordões variam entre os 1770 MPa e os 1860 MPa, e em barras à volta dos 1030MPa, terem baixa relaxação e apresentarem baixa susceptibilidade à corrosão sob baixa tensão.

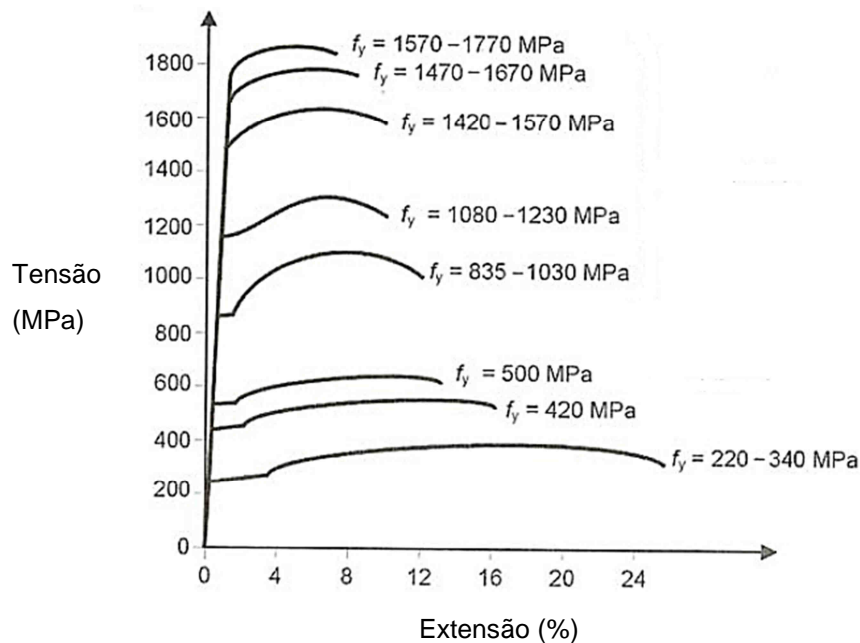


Figura 2.23 – Diagrama tensão - extensão dos vários aços (Coutinho 2005).

É possível observar na figura 2.23 o comportamento dos vários aços, para armaduras ordinárias como para armaduras de pré-esforço, verifica-se que, quanto maior for a resistência menor será a extensão do aço, tornando-se um aço menos dúctil.

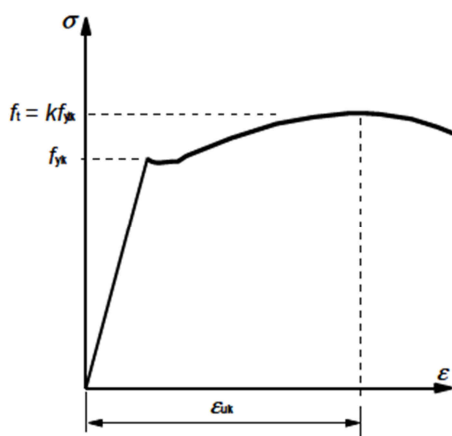


Figura 2.24 – Aço laminado a quente (EN1992-1-1 2010).

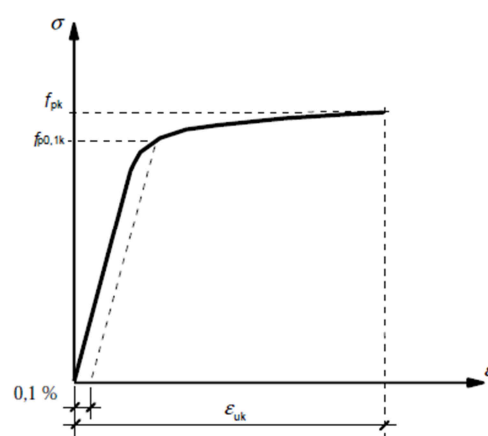


Figura 2.25 – Aço trefilado a frio (EN1992-1-1 2010).

O comportamento dos aços laminados a quente (Figura 2.24) apresenta três fases distintas. Inicialmente apresentam um comportamento elástico linear, de seguida o patamar de cedência e por fim o endurecimento e rotura. O comportamento deste tipo de aço designa-se dúctil, devido à capacidade de dissipação da energia que é expressa fisicamente em deslocamentos.

Os aços trefilados a frio (Figura 2.25) possuem uma fase elástica linear e de seguida o endurecimento e conseqüente rotura, o que resulta um comportamento frágil. No caso específico das armaduras de pré-esforço é necessário ter em conta o fenómeno da relaxação. Visto que, quando as armaduras são tensionadas acima dos 50% da tensão de rotura, exibem um comportamento diferido, caracterizado pela perda de tensão (sob tensão constante).

2.4.3 - Fibras

Actualmente, cada vez mais têm sido utilizados FRP's (Fiber reinforced polymer), devido às suas vantagens, tais como a facilidade de montagem, facilidade de manuseamento, bom acabamento final, não interferindo muito na arquitectura da estrutura. Contudo, existem algumas desvantagens em relação a este material, principalmente à pouca eficiência do sistema de pré-esforço exterior, nomeadamente a fenómenos de flexão. O conhecimento ao nível das ancoragens das fibras ainda é limitado. O custo deste material, em comparação com os anteriores, é mais elevado.

Segue na figura 2.26, alguns tipos de fibras de carbono (CFRP) e de aramida (AFRP), com as respectivas propriedades mecânicas, de acordo com os fabricantes apresentados.

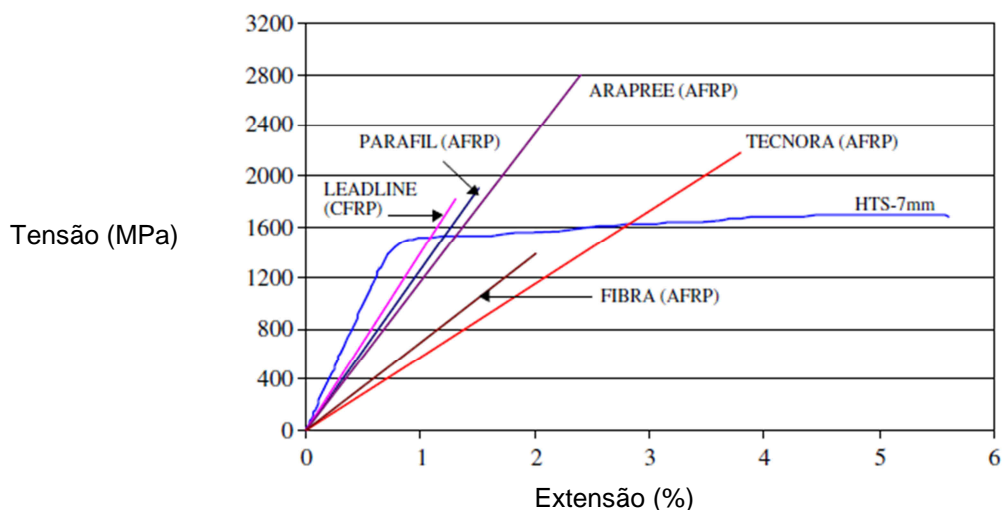


Figura 2.26 – Relação tensão – extensão de fibras. (Ghallab e Beeby 2005).

2.5 – Classificação dos Sistemas de Pré-Esforço Exterior

Em função da exigência estrutural e de serviço, o pré-esforço exterior é classificado da seguinte forma (ATEP 1996):

I. Condicionantes Estruturais

I.1. Pré-esforço exterior aderente

Neste sistema todos os elementos funcionam em conjunto por aderência, sendo essa propriedade conferida pela injeção de calda de cimento. Desse modo, o sistema não permite a variação de comprimento dos cordões ou barras sem o fissuramento do material envolvente, tornando impraticável o retensionamento ou destensionamento, e a sua substituição será total, utilizando meios destrutivos para o efeito.

I.2. Pré-esforço Exterior não aderente

O pré-esforço não aderente permite o deslocamento dos cordões ou barras dentro da bainha de pré-esforço. Contudo, nas ancoragens não é permitido deslocamentos dos cordões, de modo a assegurar o tensionamento e ancoragem dos mesmos. No entanto, nas zonas do desviador é permitido movimentos.

II. Facilidade de substituir os cordões

II.1. Pré-esforço exterior substituível

Entende-se como pré-esforço exterior substituível, aquele que é desmontável de uma maneira simples, sem necessidade de realizar operações destrutivas nos elementos da estrutura de betão armado.

II.2. Pré-esforço exterior não substituível

O pré-esforço não substituível é aquele cuja sua configuração não permite a desmontagem de uma forma razoavelmente simples.

III. Possibilidade de variar a força nos cabos de pré-esforço

III.1. Pré-esforço exterior retensionável

Entende-se por pré-esforço exterior retensionável, aquele que permite depois de tensionados os cabos, o ajustamento da força de pré-esforço.

III.2. Pré-esforço exterior não retensionável

O presente sistema, ao contrário do ponto anterior, é aquele que não permite o ajustamento da força de pré-esforço posterior ao tensionamento dos cabos, sendo este sistema definitivo, assim que os cabos estejam tensionados e injectados.

IV. Tipo de protecção contra a corrosão

IV.1. Pré-esforço exterior com bainha colectiva.

Entende-se por tal, a bainha que envolve todos os cordões no seu interior.

IV.2. Pré-esforço exterior sem bainha colectiva

Este sistema não contém nenhuma bainha que envolva no seu interior todos os cordões nus ou auto-embainhados, ficando assim, todos expostos ao meio em que se encontram.

IV.3. Pré-esforço exterior com cordões protegidos e bainha colectiva

Entende-se por tal, aquele que utiliza cordões protegidos ou auto-embainhados dentro de uma bainha colectiva. A bainha colectiva pode ser injectada com calda de cimento, graxa ou cera.

2.6 – Pré-Esforço Exterior em Cordões

2.6.1 - Generalidades

O sistema de pré-esforço exterior com cordões é classificado da seguinte forma:

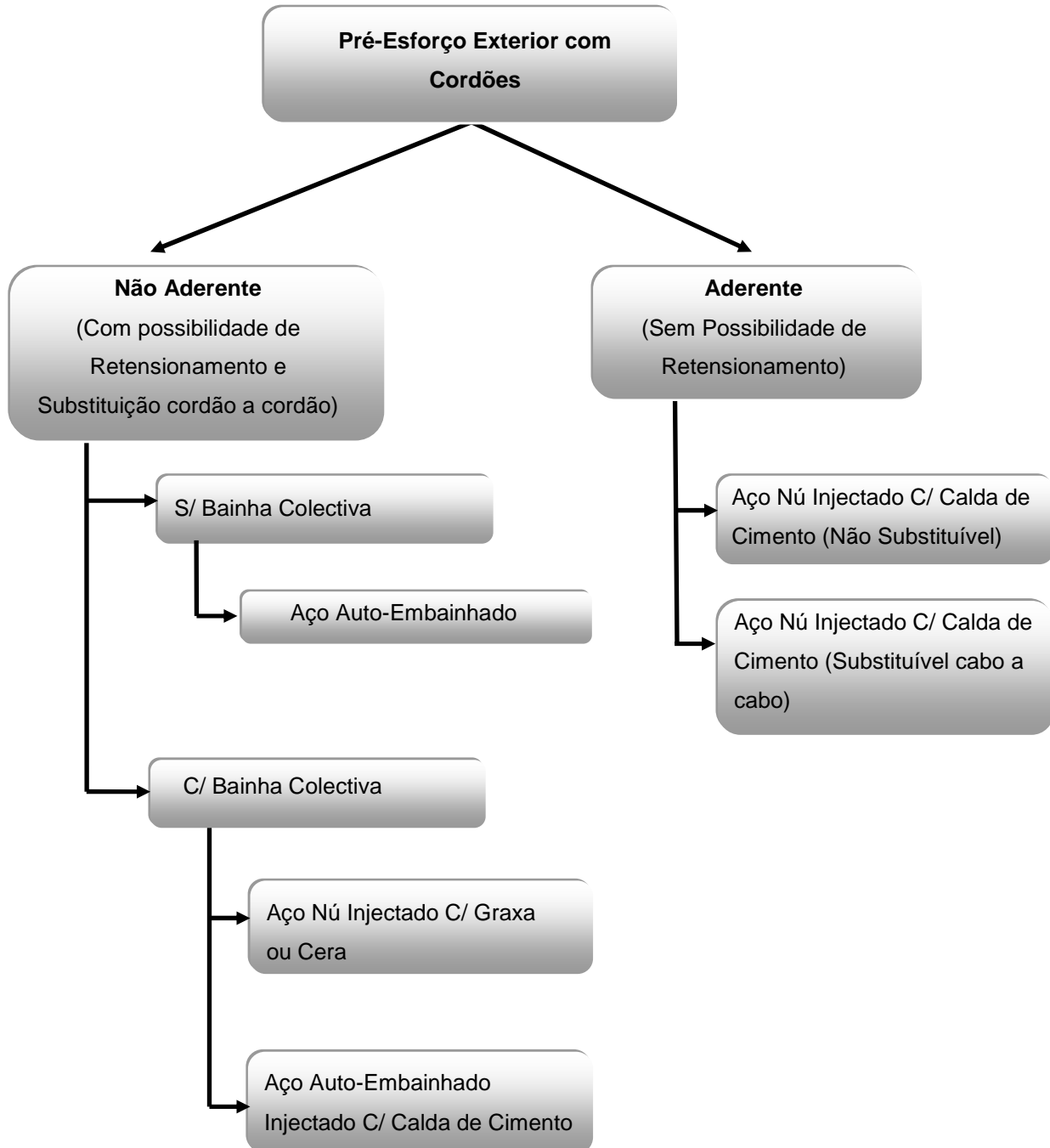


Figura 2.27 – Classificação dos sistemas de pré-esforço exterior com cordões.

O cabo de pré-esforço é composto por um ou vários cordões, em que cada cordão é formado por um feixe de fios de aço de alta resistência, em que os cordões são ancorados aos maciços de betão por intermédio de ancoragens. Os cordões normalmente são revestidos pelo menos com uma bainha de plástico ou de metal e o vazio produzindo entre a bainha e os cordões é injectado com material aderente ou não, e inibidor à corrosão.



Figura 2.28 – Cordões.

A constituição dos cordões é definida pela prEN 10138-3, no qual os cordões podem ser constituídos por 2, 3 ou 7 fios entrelaçados. Os mais utilizados actualmente são os cordões de 7 fios, no qual existem dois tipos, normal e super. Segue na tabela 2.1 as características de cordões de 7 fios.

Tabela 2.1 – Características de cordão de 7 fios (ETA-06/0006 2011).

		0,6"	
Tipo de cordão		Normal	Super
D	mm	15,2	15,7
A_p	mm ²	140	150
f_{pk}	MPa	1860	
F_{pk}	kN	260	279

A (ETA-06/0006 2011) define o seguinte critério para os cabos de pré-esforço:

- Alongamento na máxima força $\geq 3,5\%$
- Relaxação em $0,70 f_{pk}$ depois de 1000 horas $\leq 2,5\%$
- Relaxação em $0,80 f_{pk}$ depois de 1000 horas $\leq 4,5\%$
- Comportamento a fadiga ($0,7 f_{pk}$; 190 N/mm^2) $\geq 2 \times 10^6$ ciclos
- Módulo de elasticidade: 195 GPa

O sistema de pré-esforço deve permitir alojar cordões desprotegidos, revestidos e auto-embainhados. A designação prevista pela pr EN 10138-3 é a seguinte:

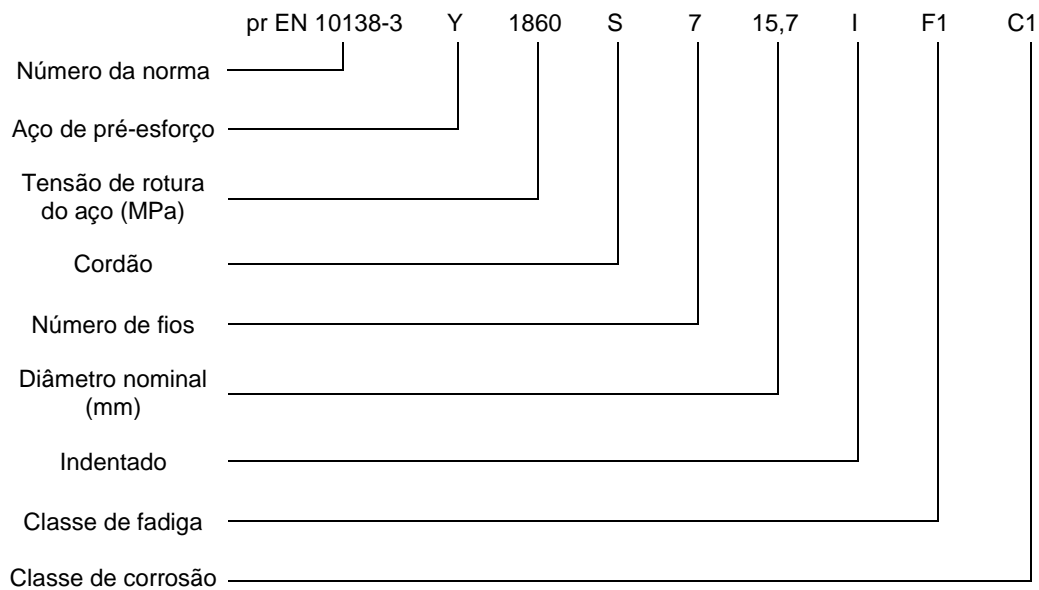


Figura 2.29 – Designação do cordão (prEN10138-3 2006).

No caso do sistema da VSL a designação prevista pela (ETA-06/0006 2011), é a seguinte:

6-1...6-55 ou 6s-1...6s-55

O primeiro dígito refere-se ao diâmetro do cordão, e o número seguinte referente ao número de cordões que compõe o cabo de pré-esforço. De modo a fornecer o maior número de detalhes, a designação da unidade começa com o nome das ancoragens nas extremidades do cabo. Um exemplo da designação:

Cabo tipo VSL E – E 6S – 12 L=50,000 (1)

A leitura da designação apresentada em acima é, um cabo tipo VSL, ambas as ancoragens são do tipo E, o diâmetro do cordão adoptado é de 0,6"Super, no qual o cabo é composto por 12 cordões desse tipo com 50,000m de comprimento.

Com base nas características dos cordões, previsto pela pr EN 10138-3, e os valores das secções transversais A_p . A força máxima aplicada na armadura de pré-esforço recomendada pelo EC2, deve ser:

$$P_{m\acute{a}x} = \min\{k_1 \cdot A_p \cdot f_{pk}; k_2 \cdot A_p \cdot f_{p0,1k}\} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

em que:

P_{max} = Força máxima aplicada à armadura de pré-esforço na ancoragem activa (entre a 7 a 14 dias nas estruturas novas)

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,9$$

$$f_{p0,1k} = 0,88 \cdot f_{pk}$$

O sistema de pré-esforço pode ser usado com cordões com tensão característica de rotura à tracção inferior a 1860 MPa, tal como o aço de pré-esforço com $f_{pk} = 1770$ MPa. As disposições para os cabos com cordões com $f_{pk} = 1860$ MPa também são aplicáveis a cabos de pré-esforço com resistência inferior (ETA-06/0006 2011).

2.6.2 – Sistema Aderente

O presente sistema é definido genericamente no ponto 2.5 – I.1, no qual, são introduzidas algumas novidades no que diz respeito às especificidades dos cabos. Este sistema é semelhante ao pré-esforço tradicional, sendo composto pela bainha em PEAD, e cordões nus em aço, que posteriormente são injectados com um material rígido, como por exemplo calda de cimento (Figura 2.30). As bainhas são ligadas entre si por elementos de união que devem ter em conta a natureza dos materiais em causa (ATEP 1996). Este sistema pode ser ou não substituível, sendo detalhados nos seguintes pontos.

2.6.2.1 – Aço Nú Injectado com Calda de Cimento (Não substituível)

A dificuldade deste sistema prende-se essencialmente à impossibilidade de substituição e retensionamento dos cordões. Visto que, os cordões nus são colocados dentro da bainha e posteriormente injectados com calda de cimento até às ancoragens. Ficando assim todo o sistema injectado com calda de cimento.

Este sistema tem as suas particularidades bem patentes no que diz respeito à aplicação das bainhas. Dado que, elas necessitam de especial atenção consoante a zona onde se encontram. São assim estabelecidos três tipos de zonas, a zona de ancoragem, desviador e cabo livre. Essas razões são explicadas nos seguintes pontos.

a) Cabo livre

- Geralmente são utilizadas bainhas de polietileno de alta densidade. Têm bom comportamento contra os agentes exteriores (raios ultra violeta, água), resistentes a elevadas temperaturas, elevada resistência mecânica, tanto à compressão como a tracção, baixa densidade e baixo custo.
- Tubos metálicos, necessitam de tratamentos adequados contra a corrosão, como pinturas, galvanização ou a utilização de aço inoxidável.
- Polipropileno, mecanicamente mais resistente que o polietileno mas susceptível aos raios ultra violeta e aos agentes de oxidação, baixo custo e de fácil moldagem e coloração.

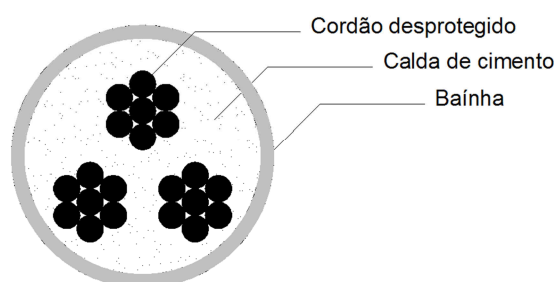


Figura 2.30 – Cabo de pré-esforço exterior aderente.

b) Na zona de ancoragens:

- A bainha é formada por um tubo de aço em forma de trompete (Trompete metálica), que é inserida no maciço de betão e ligada à casting de uma das extremidades. A casting é a parte da ancoragem que fica embebida no betão que normalmente é composta por uma trompete metálica. Na outra extremidade é ligada ao cabo de pré-esforço (Figura 2.31). Essas ligações são feitas com dispositivos que garantem a devida estanquidade do cabo.
- Outro sistema consiste na utilização de uma bainha de polietileno que liga a casting ao cabo de pré-esforço, com as devidas uniões.

c) Na zona de desviadores

- Bainha é formada por um tubo liso curvo de aço que é introduzido no septo de betão armado, ver figura 2.31.
- Outro sistema consiste na acoplagem de um tubo metálico em meia cana ou não ao septo de betão armado, que posteriormente irá receber o cabo de pré-esforço exterior.

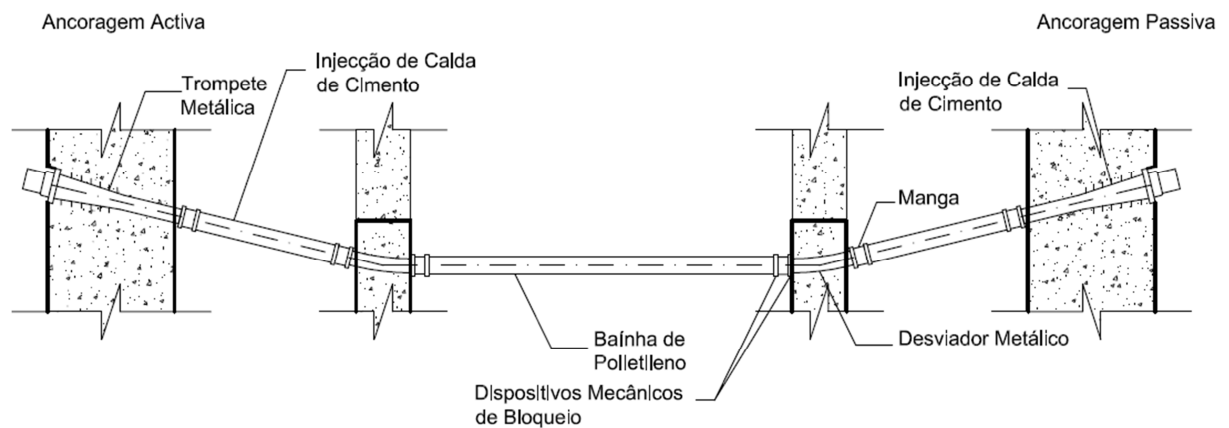


Figura 2.31 – Sistema de pré-esforço exterior aderente.

Uma vez montada toda a bainha, procede-se ao enfiamento dos cordões, ao tensionamento e por fim a injeção da calda de cimento, sendo esta última a que determina a aderência do cabo de pré-esforço.

2.6.2.2 – Aço Nú Injectado com Calda de Cimento (Substituível)

Para permitir a desmontagem e substituição do cabo de pré-esforço é necessário isolar a estrutura do cabo em todo o seu comprimento. Como tal, na zona de ancoragem e desviador, é utilizado um sistema de tubo mais bainha. É assim, utilizada uma bainha contínua, normalmente em PEAD ao longo do cabo, que passa pelo interior do tubo metálico de cofragem na zona de ancoragem e nos desviadores. (ATEP 1996)

A principal dificuldade de fixar o cabo de pré-esforço, centra-se na zona de ancoragem. No qual é necessário garantir que a calda não entra em contacto com a trompeta da ancoragem normalmente em aço. O sistema mais utilizado para assegurar a estanquidade, é a adopção de uma dupla trompeta (Figura 2.32), em que uma trompeta é maior que a outra, de modo que a mais pequena se insira dentro da maior. (ATEP 1996)

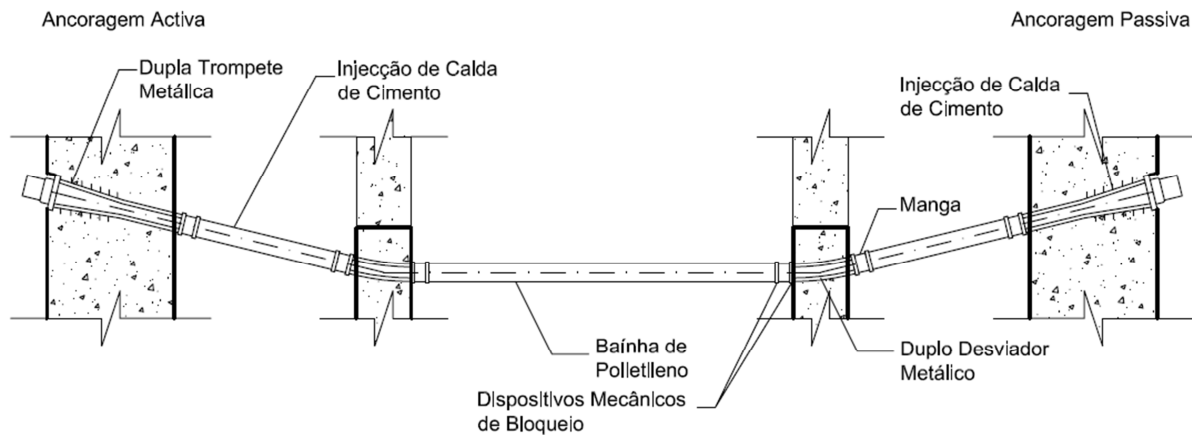


Figura 2.32 – Sistema de pré-esforço exterior aderente substituível.

O tipo de bainha mais frequentemente utilizada é de PEAD devido aos motivos apresentados no ponto 2.6.2-a. Na zona dos desviadores, quando o raio de curvatura é relativamente pequeno existe a tendência de concentração de pressões radiais importantes, tais que, os cordões podem danificar a bainha de PEAD e dependendo da sua espessura, podem levar à rotura. (VSL International Ltd. 2005)

A zona dos desviadores é um dos pontos mais frágeis da protecção dos cordões contra a corrosão, como tal, são recomendadas as seguintes medidas para prevenir essas fragilidades:

- A utilização de duas bainhas metálicas em lugar da bainha de PEAD, dando lugar a um duplo tubo metálico (bainha e cofragem perdida). É necessário ter em conta determinadas medidas de precaução na ligação de uma bainha metálica com uma de PEAD.
- Ao utilizar bainhas de PEAD na zona dos desviadores, deve ser alterada a espessura da mesma. De modo adoptar na zona dos desviadores uma espessura mínima que suporte uma pressão de 1,0MPa. (ATEP 1996)

2.6.3 – Sistema Não Aderente

Actualmente têm sido utilizados diversos sistemas de pré-esforço não aderentes. Sendo compostos genericamente por uma bainha, cordões em aço e posteriormente injectados com produtos flexíveis. O sistema de pré-esforço exterior não aderente foi definido genericamente no ponto 2.5 – 1.2.

A diversificação dos sistemas não aderentes deve-se essencialmente ao nível de protecção, à possibilidade de retensionamento e de substituição dos cordões de pré-esforço.

2.6.3.1 – Tipos de Aço Auto-Embainhado

Os cordões auto-embainhados podem ser uma combinação das seguintes camadas:

- Galvanização
- Graxa ou cera
- Bainha individual (auto-embainhado)

O cordão nu com tratamento de galvanização como única camada de protecção contra a corrosão foi empregue há algum tempo em obra, mas caiu em desuso pelas seguintes razões:

- A incerteza geral sobre a integridade e durabilidade do tratamento de galvanização.
- As dificuldades colocadas em obra, em particular os danos locais na galvanização durante o processo de aplicação.
- As dificuldades de protecção das cabeças de ancoragem (cunhas, uniões e trompete).
- Os danos do galvanizado do desviador devido ao contacto com os tubos de aço.
- As marcas das cunhas nos cordões galvanizados na zona das ancoragens.

Assim sendo, os cordões auto-embainhados utilizados actualmente são os seguintes (Figura 2.33, 2.34, 2.35):

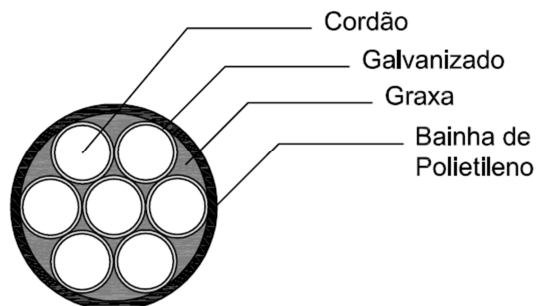


Figura 2.33 - Três camadas: Galvanizado, cera ou graxa, bainha individual em PEAD.

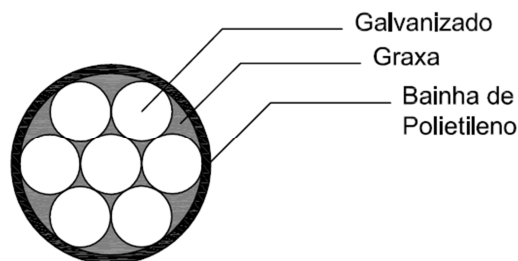


Figura 2.34 - Duas camadas: Cera ou graxa, Bainha em PEAD (Auto-embainhado).

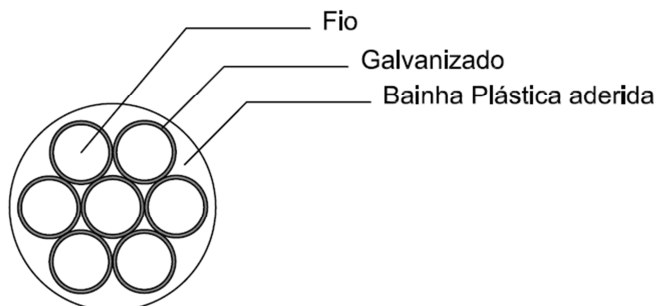


Figura 2.35 - Três camadas: Galvanizado, graxa, bainha aderida em PEAD.

Os cordões auto-embainhados, também designados por monocordões, são produzidos em fábrica. No qual são incorporados todos os intervenientes, produzindo assim, o monocordão final. Ao aplicar este tipo de monocordão, não é necessário injectar cera ou graxa, ou adicionar novas camadas de protecção, excepto se o projectista assim o exigir, dado que ele já incorpora esse tipo de materiais.

Dada a evolução do nível de protecção dos monocordões, verificou-se que era possível aumentar o nível de protecção dos mesmos, ao inserir-se em bainhas colectivas. Contudo, também é possível utilizar monocordões isoladamente, ou seja, sem bainha colectiva, facilitando as inspecções aos referidos cabos.

A aplicação deste tipo de monocordões veio permitir o retensionamento e substituição dos monocordões. Nos pontos seguintes são detalhados todos esses aspectos.

2.6.3.2 – Sistema Sem bainha Colectiva

2.6.3.2.1 – Aço Auto-Embainhado

Este sistema é composto por um conjunto de monocordões protegidos que funcionam isoladamente, ou seja, sem uma bainha colectiva. Os cabos mais usuais actualmente são os cordões auto-embainhados. A origem destes cordões remonta aos anos 70. Foram inicialmente concebidos para aplicação em tirantes de pontes atirantadas, mas com o passar do tempo, tem ganho grande aplicabilidade no pré-esforço exterior e nas lajes de edifícios. Este tipo de monocordão pode ser adicionado galvanização, conferindo-lhe uma nova camada contra a corrosão, adquirindo assim maior durabilidade.

As vantagens que este sistema apresenta são:

- Facilidade de montagem, o que leva à poupança de mão-de-obra.
- Economia através da poupança em bainhas colectivas.
- Ausência de injeção de ceras ou graxas.
- Possibilidade de tensionamento mediante macaco mono-cordão, ligeiro e de dimensões reduzidas.
- Destensionamento e retensionamento individual dos cordões.
- Substituição individual de cordões.

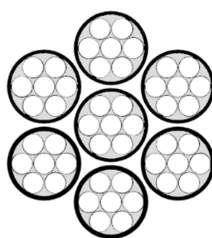


Figura 2.36 – Cabo sem bainha colectiva.

A bainha individual em PEAD que protege o cordão tem uma espessura pequena, da ordem de 1,5mm e pode ser utilizado em grupo (figura 2.36). Isso faz com que os cabos com os vários monocordões tenham problemas nas zonas dos desviadores, devido às forças de desvio. Ou seja, os cordões ao pressionarem as bainhas individuais contra a cofragem perdida, pode levar à rotura das bainhas individuais (figura 2.37), pelo que se recomenda:

- Proteger a zona dos desviadores com bainha colectiva injectada com calda de cimento.
- Separar cada cordão dos demais para produzir desvios individuais. Esta separação física de cada cordão, pode ser elaborado com um sistema de tubos separados por argamassa ou de resina epóxi.

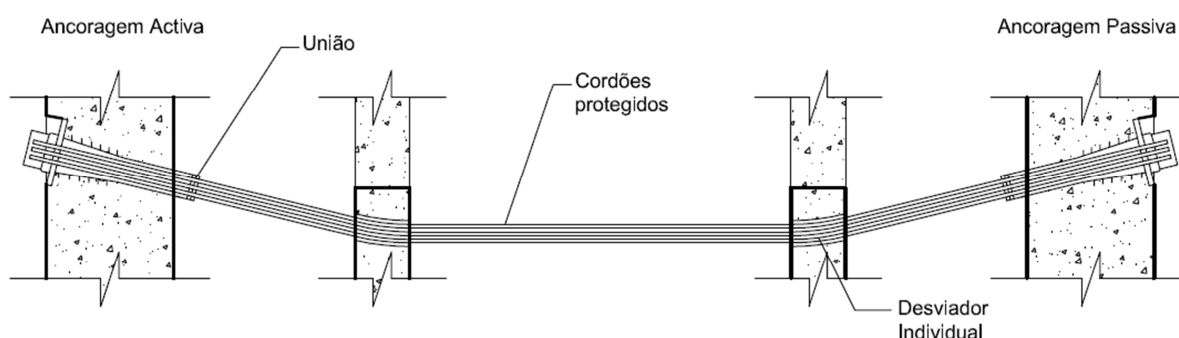


Figura 2.37 – Sistema não aderente sem bainha colectiva.

Cuidados a ter devido à protecção contra a corrosão:

- O manuseamento em obra dos cordões protegidos deve ser feito com especial cuidado, visto que são sensíveis a cortes e golpes que podem danificar a bainha individual. Pelo que se recomenda tomar algumas precauções durante a montagem e em particular durante o enfiamento dos cordões.
- Os cordões devem ser nus e desprotegidos de ceras ou graxas na zona de ancoragem, a fim de garantir a acção das cunhas directamente sobre os cordões. A protecção dos cordões nas zonas de ancoragem é estabelecida através de uma bainha colectiva (trompette ou outro sistema similar) injectada com cera ou graxa contida pela tampa de protecção.

2.6.3.3 – Sistema Com bainha Colectiva

2.6.3.3.1 – Aço Nú Injectado com Graxa ou Cera

O sistema é composto por cordões nus sem protecção ou com algum nível de protecção (galvanização ou revestimento em epóxi), os quais são inseridos dentro de uma bainha em PEAD e posteriormente injeção com produto flexível (Figura 2.38). Esta técnica de injeção de materiais flexíveis tem vindo a desenvolver-se a partir das experiências nos recipientes de contenção das centrais nucleares. Os produtos flexíveis injectáveis mais utilizados são as ceras petrolíferas e as graxas.

Os primeiros materiais flexíveis a serem injectados foram as graxas, as quais são compostas por uma mistura de petróleo e sabão. O petróleo tem a tendência a escapar pelas juntas, pelo que, a estanquidade de todo o cabo tem que ser muito eficaz. Estes materiais sofrem de solvabilidade. Ou seja, estes produtos têm a tendência de mudar as suas características ao longo do tempo, transformando-se em sabão.

Os procedimentos idealizados para injectar uma graxa de um elevado grau de viscosidade a temperatura ambiente, são os seguintes:

- Injeção a baixa temperatura (40°C). Exige uma pressão da injeção elevada entre 1,5 e 2,0 MPa e tubos de purga bastante próximos. As bainhas têm de ser de elevada resistência.
- Injeção a alta temperatura (entre os 80°C e 100°C). Exige uma perfeita estanquidade nas juntas, de modo a evitar a excreção de graxa. As bainhas utilizadas são metálicas ou de PEAD. No caso de utilização de bainhas em PEAD no cabo livre, é necessário que resista a uma pressão mínima de 0,6MPa.

Os procedimentos para injectar ceras petrolíferas compreendem:

Determinadas composições de cera que tenham em atenção as condições de aplicação em obra e equipas especializadas para injeção. Essas equipas devem dispor de equipados e procedimentos adequados para injectar cera a elevada temperatura e garantir uma perfeita injeção do sistema.

É recomendado a injeção de cabos de pré-esforço com ceras petrolíferas devido:

- Composição homogénea das ceras, sólidas a temperatura ambiente.
- A descompressão da cera em ambientes quentes.
- O gotejamento das graxas que provoca um aspecto de sujidade em obra.
- A falta de equipas portáteis para injeção de graxa.

Tanto as graxas como as ceras petrolíferas têm um coeficiente de dilatação na ordem das 10 vezes superior ao aço e do betão. Em consequência, as graxas ou as ceras ao preencherem completamente a bainha à temperatura ambiente, um aumento importante da temperatura provocará um aumento da pressão sobre a bainha, favorecendo as fugas. Portanto, é necessário que todas as uniões e bainhas, tanto no cabo livre como na zona dos desviadores e ancoragem, suportem essas pressões.

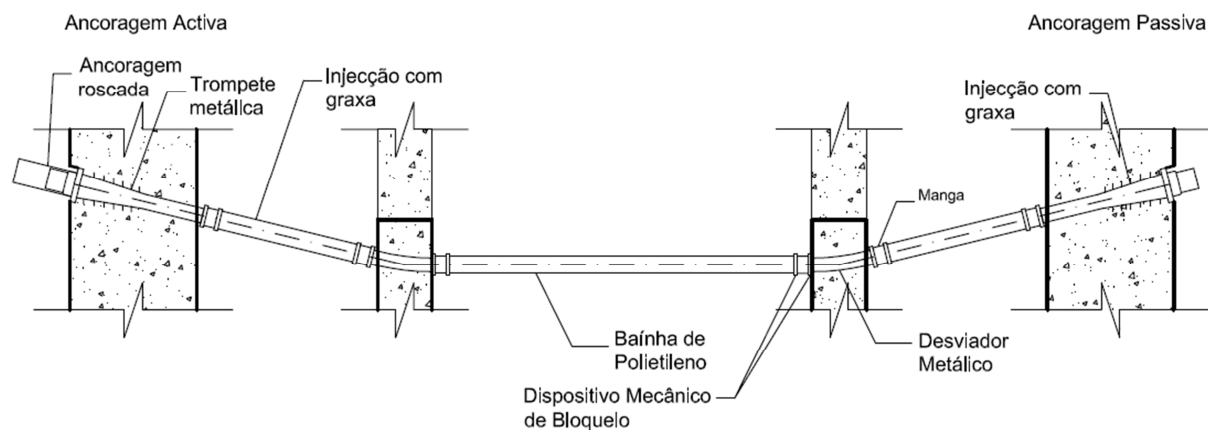


Figura 2.38 – Sistema não aderente com produto flexível.

Na zona dos desviadores a alteração da curvatura provoca pressões radiais que podem romper o tubo de plástico. Dado que, o produto de injeção é flexível, esta rotura pode acontecer durante o tensionamento do cabo ou ao longo da vida útil da estrutura. Pelo que se recomenda:

- Emendar a bainha de PEAD no cabo livre, com o tubo metálico usado como cofragem perdida na zona dos desviadores. Neste caso a união do tubo de PEAD com o tubo de aço deve garantir a estanquidade da junta.
- Substituir a bainha de PEAD usada no cabo livre, por uma bainha metálica que por sua vez passa por dentro da cofragem perdida, no qual é necessário utilizar um desviador de bainha dupla. Também neste caso a união do tubo de plástico com o tubo de aço deve garantir a estanquidade da junta.

- Bainha de PEAD percorre todo o cabo passando pelo interior dos desviadores. Neste caso, na zona dos desviadores, as bainhas de plástico devem ser reforçadas interiormente com bainhas metálicas. É assim composta por três tubos (cofragem metálica, bainha de plástico e bainha de reforço).

A injeção com um produto flexível é o indicado para o sistema de pré-esforço exterior retensionável e substituível, visto que:

- Este tipo de injeção permite o ajuste de forças nos cabos de pré-esforço (retensionamento/destensionamento) devido à liberdade de movimentos dos cordões conferida pela não aderência do material flexível. Neste caso as ancoragens devem estar dotadas de dispositivos especiais para esse tipo de acções.
- Permite a substituição dos cordões sempre que as ancoragens assim o permitirem.

Contudo, esta técnica também veio a cair em desuso, devido aos custos associados, e há dificuldade de injeção desses materiais dentro de bainhas de plástico.

2.6.3.3.2 – Aço Auto-Embainhado Injectado com Calda de Cimento

Este sistema de pré-esforço exterior é o mais adequado, visto que é composto por um conjunto de cordões auto-embainhados inseridos dentro de uma bainha colectiva e injectada com calda de cimento (Figura 2.39). Logo, o nível de protecção contra a corrosão, mecânica e ao fogo aumenta comparando com os demais.

Este sistema permite o destensionamento e retensionamento individual dos cordões com recurso a macaco hidráulico monocordão, e à substituição individual dos respectivos cordões. Não é necessária a injeção de graxa ou cera, devido à utilização de monocordões protegidos que incorporam esses materiais de fábrica.

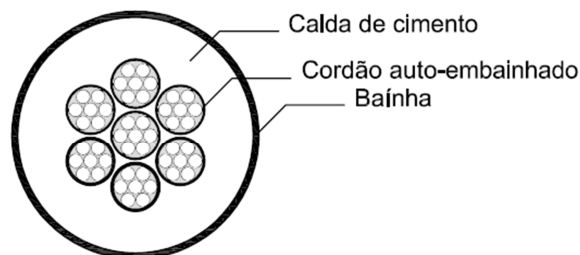


Figura 2.39 – Cordões auto-embainhados com bainha colectiva.

A separação dos monocordões dentro da bainha é conseguida através centradores e da calda de cimento que é injectada posteriormente ao enfiamento dos monocordões na bainha colectiva. Para depois serem tensionados os respectivos monocordões, ver figura 2.40.

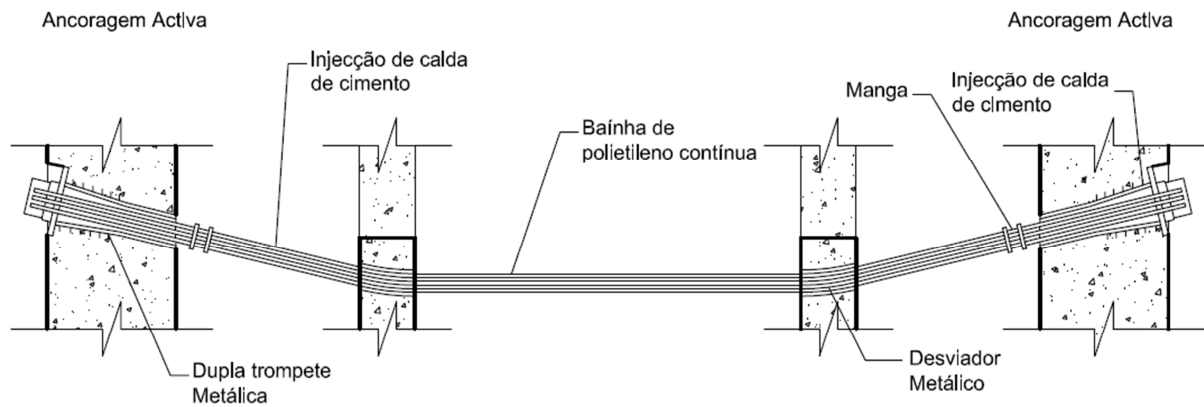


Figura 2.40 – Sistema não aderente com cordões protegidos e bainha colectiva.

As cabeças de ancoragem no final são protegidas por uma tampa de protecção injectada com cera petrolífera ou graxa. Contudo, a maior desvantagem deste sistema é a quantidade de componentes e materiais a utilizar, o que implica sobrecustos, comparado com os outros sistemas mais simples.

2.6.4 – Resumo dos Sistemas

Nos pontos anteriores foram apresentados todos os sistemas de pré-esforço exterior ao pormenor. A tabela 2.2 apresenta o resumo das principais características dos sistemas expostos, de forma a possibilitar aos técnicos ferramentas simples de escolha do sistema. Os sistemas encontram-se relacionados com os capítulos anteriores.

Tabela 2.2 – Sistemas de pré-esforço exterior com cordões.

Sistema (cap.)	Aderência	Bainha Colectiva	Injecção de calda de cimento	Injecção de graxa ou cera	Aço nu	Aço auto-embainhado	Substituição	Retensionamento	Camadas de protecção
2.6.2.1	Aderente	sim	sim	não	sim	não	não	não	2
2.6.2.2	Aderente (1)	sim	sim	não	sim	não	sim	não	2
2.6.3.2.1	Não Aderente	não	não	não	não	sim	sim	sim	2 ou 3 (2)
2.6.3.3.1	Não Aderente	sim	não	sim	sim	não	sim	sim	2
2.6.3.3.2	Não Aderente	sim	sim	não	não	sim	sim	sim	4 ou 5 (2)
(1) - O sistema necessita de dupla trompeta nas ancoragens para ser substituível									
(2) - Depende do tipo de aço auto-embainhado									

O item camadas de protecção compreende o somatório do número de protecções do referido sistema. No entanto, nalguns casos pode variar, devido ao tipo de aço auto-embainhado. Os tipos de aços auto-embainhados existentes, são apresentados no ponto 2.6.3.1.

2.6.5 – Ancoragens

As ancoragens são os dispositivos que possibilitam o tensionamento dos cabos e a transmissão de cargas à estrutura. No caso específico do pré-esforço exterior, as ancoragens tomam especial importância, visto serem um dos principais componentes do sistema, para além das selas de desvio, ao permitirem a transferência de forças de pré-esforço à estrutura.

Existem três tipos de ancoragens, activas, passivas e de continuidade. As ancoragens activas são aquelas onde é aplicada tensão aos cabos. As passivas são aquelas que são inseridas no betão e permanecem intactas sem aplicação directa de tensão, e as de continuidade promovem a continuidade do cabo, sendo elas activas e passivas ao mesmo tempo. Existem diversos tipos de ancoragens, variando o número e o diâmetro de cordões e a próprio molde. As ancoragens subdividem-se segundo o número de cordões, sendo as que utilizam vários cordões denominadas multicordão e aquelas que utilizam um único cordão, de monocordão. No pré-esforço exterior as ancoragens comerciais mais utilizadas são as ancoragens activas devido à versatilidade em obra. Por vezes, no pré-esforço exterior é necessário conceber novas ancoragens, de forma a resolver determinadas situações muito específicas.

2.6.5.1 – Ancoragem Multicordão

A figura 2.41 ilustra um exemplo de uma ancoragem comercial multicordão.



Figura 2.41 – Ancoragem activa da VSL tipo E (VSL International).

2.6.5.2 – Ancoragem Monocordão

A figura 2.42 ilustra um exemplo de uma ancoragem comercial monocordão.

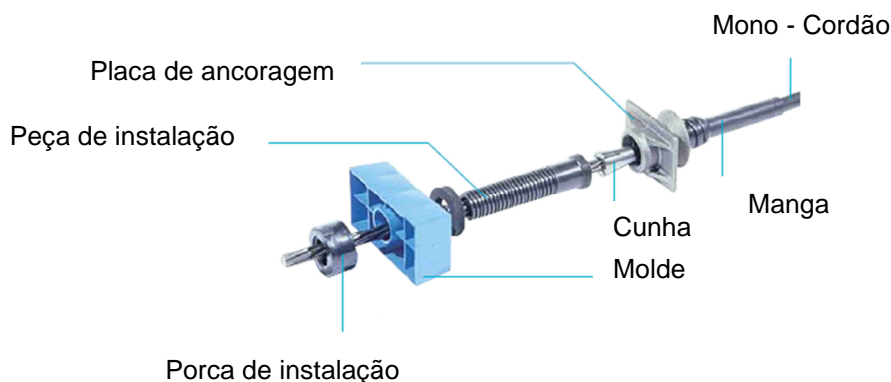


Figura 2.42 – Ancoragem activa da VSL tipo S – 6 (VSL International).

2.6.6 – Bainha

A bainha faz parte dos elementos que impedem a corrosão dos cordões e promove a instalação dos mesmos. A bainha pode ser fabricada através de diversos materiais e configurações, sendo as mais usuais de aço liso ou corrugado (figura 2.43 e 2.44), e em plástico liso ou corrugado (figura 2.45 e

2.46). As bainhas em PEAD são as mais utilizadas no pré-esforço exterior. Na tabela 2.3 é indicado o tipo de bainha a aplicar, de acordo com o tipo de sistema de pré-esforço exterior da VSL.

Tabela 2.3 – Adequabilidade de bainhas (ETA-06/0006 2011).

			Bainha Metálica		Bainha Plástica	
			Bainha metálica corrugada	Bainha metálica lisa	Bainha VSL PT-PLUS	Bainha plástica lisa (polietileno, polipropileno)
Cabos externos	Com injeção aderente	Standard + encapsulado	Não Permitido	Aconselhado (1)	Não Recomendado	Aconselhado
		Electricamente isolado	Não Permitido	Não Permitido	Não Recomendado	Aconselhado
	Com injeção não aderente	Standard + encapsulado	Não Permitido	Aconselhado (1)	Não Recomendado	Aconselhado
		Electricamente isolado	Não Permitido	Não Recomendado (2)	Não Recomendado	Aconselhado
		Retensionável e/ou substituível	Não Permitido	Aconselhado (1)	Não Recomendado	Aconselhado
	(1) As bainhas de polietileno e polipropileno são as mais comuns					
(2) Uso de Monocordão						

- Bainha metálica

A bainha metálica é bastante utilizada no pré-esforço interior, devido à facilidade de fabricação, ao relativo baixo preço e à capacidade de se adaptar a várias situações. Pode ser lisa (Figura 2.43) ou corrugada (Figura 2.44) de acordo com as exigências estipuladas, e no caso de, ser sujeita a condições extremas pode ser galvanizada. Contudo, este tipo de bainha não é aplicável no pré-esforço exterior, como consta na tabela 2.2, visto que, os cabos de pré-esforço estão normalmente expostos às condições ambientais e como tal, devem estar protegidos a essas mesmas condições.



Figura 2.43 – Bainha metálica lisa.



Figura 2.44 – Bainha metálica corrugada.

- Bainha Plástica

Durante a evolução dos sistemas, as bainhas de polietileno ou de polipropileno vieram ganhar espaço nos sistemas de pré-esforço. Ao serem bastante eficientes contra a corrosão e à fadiga. O valor monetário destes elementos tem vindo a ser menor devido ao elevado uso actual deste recurso. O qual, pode ter a seguinte configuração, lisa (Figura 2.45) ou corrugada (Figura 2.46). Nos sistemas de pré-esforço exterior actuais as bainhas aplicadas são as de PEAD lisas.



Figura 2.45 – Bainhas de PEAD lisas.



Figura 2.46 – Bainha de PEAD corrugada, PT-PLUS.

O diâmetro da bainha é dado pela seguinte expressão, (VSL International Ltd. 2010)

$$\varphi_i = 1,7 \cdot \sqrt{A_p} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Em que,

A_p – Área transversal da armadura de pré-esforço [mm²]

φ_i – Diâmetro da bainha [mm]

Normalmente o diâmetro da bainha varia entre 16 a 18 da razão, diâmetro/espessura da bainha.

Os tubos de purga normalmente são constituídos por elementos pré-fabricados do mesmo material, que são acoplados “*in situ*” à bainha nas cotas mais elevadas. Estes permitem a expulsão do ar e da calda de cimento de dentro das bainhas, durante a injeção das mesmas.

2.6.7 – Dispositivos de União

Os dispositivos de ligação de bainhas têm grande importância, visto que tem impacto directo na durabilidade do sistema de pré-esforço exterior. De tal modo, foram desenvolvidos vários dispositivos de união adequados aos vários sistemas de pré-esforço exterior, de forma a preservar a estanquidade dos cabos de pré-esforço exterior. (VSL International Ltd. 2005) (VSL International Ltd. 2007), tais como:

- Soldadura topo a topo

A soldadura topo a topo consiste em unir as faces entre bainhas, que são previamente aquecidas e posteriormente unidas. Esta operação requer extremo cuidado, e deve cumprir requisitos muito exigentes de modo a salvaguardar a operacionalidade do sistema (Figura 2.47).

- Manga em polietileno

Este dispositivo é um dos mais simples para ligar bainhas, consiste num pequeno comprimento de tubo que sobrepõem as bainhas a unir (Figura 2.48).

- Abraçadeira mecânica

A abraçadeira mecânica é dos sistemas mais práticos em obra, devido à facilidade de unir bainhas com recurso unicamente ao aperto de parafusos inseridos na mesma (Figura 2.49).

- União electrossoldável

Este dispositivo tem umas resistências eléctricas, que após à introdução das bainhas dentro da respectiva união, são ligadas, soldando as paredes da bainha à união, selando assim o sistema naquele ponto. (Figura 2.50).

- União termo-retráctil

Este dispositivo estabelece a união entre bainhas que se baseia numa manga, que depois de instalada sobre as mesmas é sujeita a um tratamento de aquecimento que posteriormente irá aderir às bainhas (Figura 2.51).

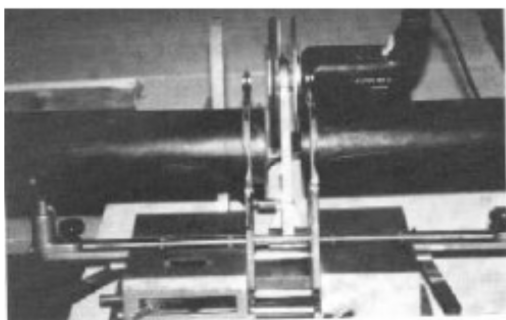


Figura 2.47 - Soldadora de tubo em polietileno.



Figura 2.48 – Manga de polietileno.

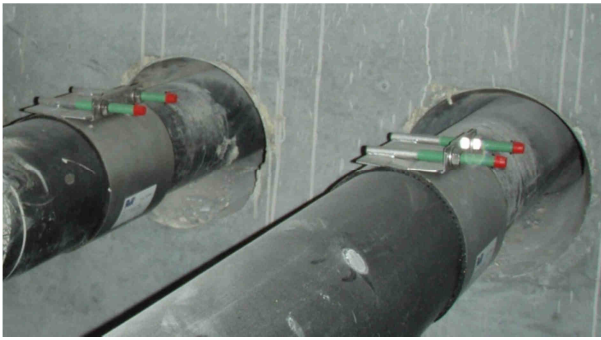


Figura 2.49 – Abraçadeira mecânica.

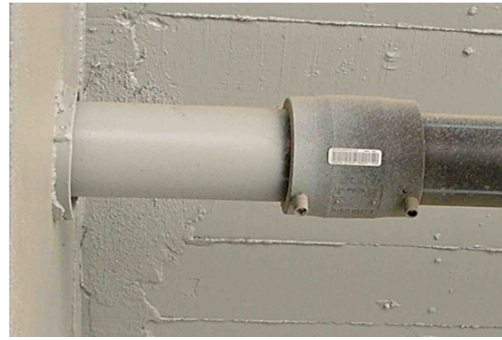


Figura 2.50 – União electrossoldável.



Figura 2.51 – União Termo-Retráctil.

2.6.8 – Desviadores

Os desviadores são dispositivos alojados ou ligados à estrutura que, com a sua geometria e posição, transmitem as forças de desvio de pré-esforço à estrutura. Os desviadores são constituídos por tubos metálicos, tubos de plástico ou tubos que combinam ambos os materiais descritos anteriormente. Os tubos de aço não devem ter irregularidades no seu interior, ver figura 2.52. Os desviadores também podem ser construídos através de cofragens recuperáveis ou perdidas, exemplo do dispositivo designado “Diabolo”, ver figura 2.53. (VSL International Ltd. 2010)



Figura 2.52 – Desviador em tubo metálico.



Figura 2.53 – Desviador “Diabolo”.

Os desviadores devem cumprir raios mínimos de acordo com o número de cordões e o respectivo diâmetro nominal do cordão utilizado, de modo a assegurar a segurança em relação às tensões radiais introduzidas por esses elementos na estrutura, ver tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Raios mínimos de curvatura dos desviadores (VSL International Ltd. 2010).

Diâmetro do cordão 0,6"	Raio mínimo (m)
Nº de cordões	
≤ 7	2,00
≤ 12	2,50
≤ 22	3,00
≤ 31	3,50
≤ 37	4,00
≤ 43	4,50
≤ 55	5,00

- O raio mínimo também é calculado pela seguinte expressão,

$$R_{min} (m) = (1,3 a 1,5) \times \sqrt{F_{pk}[MN]}, \geq 2,0 m \quad (\text{Eq. 2.3})$$

em que,

F_{pk} – Valor característico da força de rotura à tracção do aço das armaduras de pré-esforço.

2.6.9 – Tarefas de Aplicação de Pré-esforço Exterior

2.6.9.1 – Faseamento Geral

- **Sistema de pré-esforço exterior não aderente**

É apresentada a descrição das várias fases que compreende os sistemas de pré-esforço exterior não aderente:

- I. Pré-montagem das bainhas.
- II. Enfiamento dos cordões, um a um, com imediata pré-tensão (baixo nível).
- III. Fecho das bainhas.
- IV. Injecção de material.
- V. Tensionamento final dos cabos.

- **Sistema de pré-esforço exterior aderente**

Neste ponto é descrito as fases que o presente sistema deve compreender:

- I. Montagem das bainhas.
- II. Enfiamento dos cordões.
- III. Tensionamento dos cabos.
- IV. Injecção dos cabos.

2.6.9.2 – Tensionamento

A aplicação de tensão nos cabos de pré-esforço é uma operação que consiste em puxar os cordões a determinada força considerada no projecto. Essa força é imposta através de um macaco hidráulico com auxílio de uma bomba de óleo. Os macacos são escolhidos de acordo com o número de cordões a puxar e ao diâmetro dos mesmos. (VSL International Ltd. 2010)



Figura 2.54 – Macaco mono – cordão.
(VSL International Ltd. 2010)



Figura 2.55 – Macaco Multi – cordão.
(VSL International Ltd. 2010)

Procedimento de aplicação de tensão nos cabos de pré-esforço é o apresentado na figura 2.56.

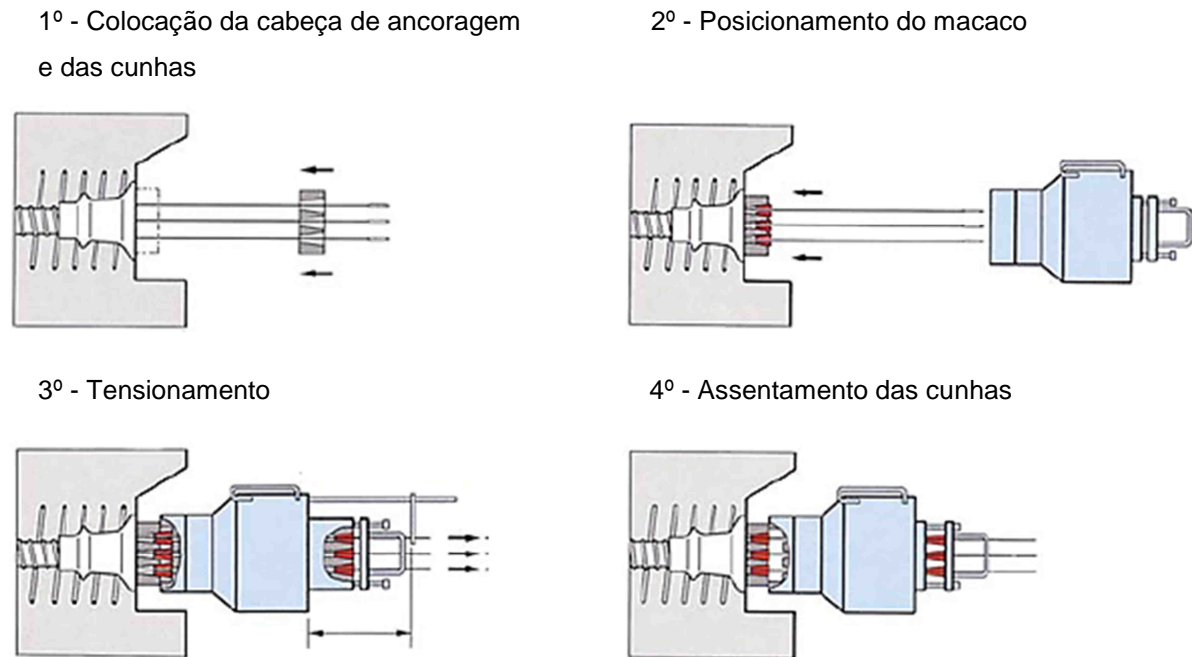


Figura 2.56 – Procedimento de tensionamento dos cabos (VSL International Ltd. 2010).

2.6.9.3 – Protocolo de Tensionamento

Durante o tensionamento do cabo de pré-esforço é necessário preencher o protocolo para posterior análise e validação dos trabalhos pela equipa de fiscalização. Segue no Anexo 1 um exemplar do protocolo a preencher.

2.6.9.4 – Injecção de Material

O material mais utilizado na injecção é a calda de cimento. No entanto, também é possível a injecção de graxa ou cera, mas é difícil a sua aplicação em obra, o que leva a ser pouco utilizada. A injecção de calda de cimento nas bainhas é umas das operações mais usuais no pré-esforço. No entanto, o pré-esforço exterior tem as suas particularidades. A injecção é feita através dos tubos de injecção colocados nos pontos baixos do cabo de pré-esforço, de modo a garantir que todo o cabo fica preenchido totalmente com calda de cimento. No caso, do cabo ter mais de 50m, é recomendado que se instale tubos de purga intermédios.

É apresentado um exemplo na figura 2.58, onde se começa por injectar a calda de cimento pelo ponto B, e nos pontos A,C,D,E são colocados tubos de purga para expelir a calda de cimento e o ar. Garantindo assim, que a bainha fique completamente preenchida só com calda de cimento. Esta operação é auxiliada por uma misturadora que faz a mistura de água e cimento (figura 2.57).

A injeção de calda de cimento no pré-esforço exterior deve ser injectada a baixa pressão. Visto que, a bainha encontra-se visível, desta forma é possível inspeccionar a mesma perante a eventualidade de fuga de calda de cimento.



Figura 2.57 – Misturadora.

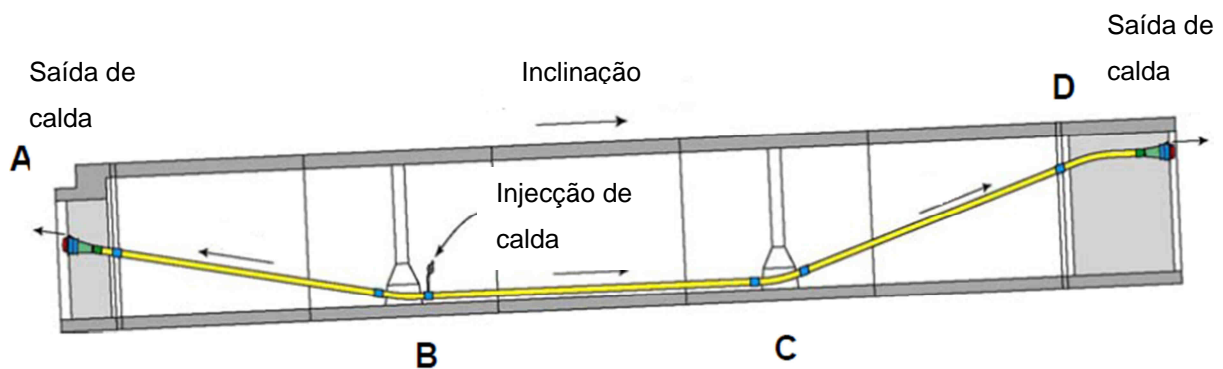


Figura 2.58 – Procedimento de injeção de calda de cimento. (Corven e Moreton 2004)

2.7 – Pré – Esforço Exterior em Barras

2.7.1 – Generalidades

O sistema de pré-esforço exterior com barras é classificado da seguinte forma:

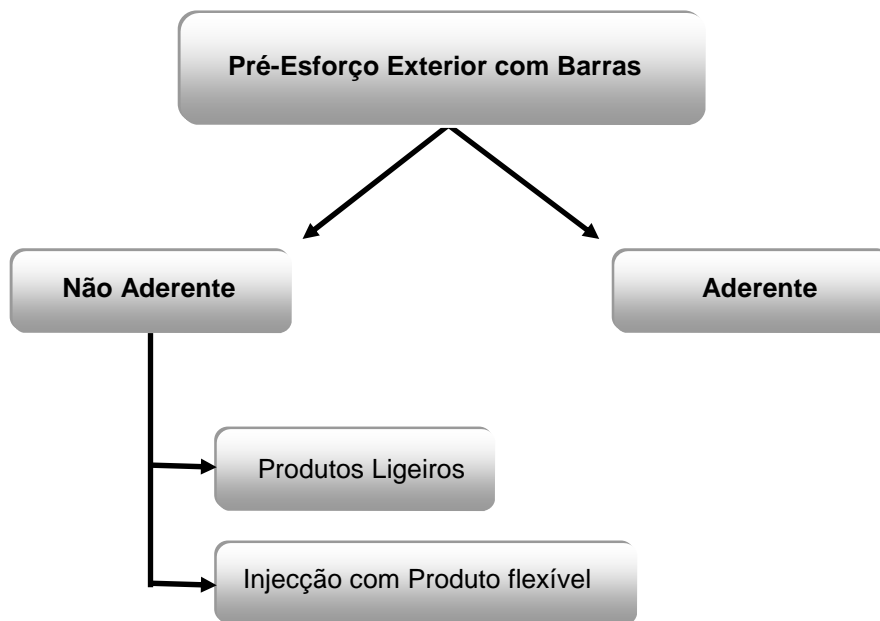


Figura 2.59 – Classificação dos sistemas de pré-esforço exterior com barra.

A armadura de pré-esforço é composta por uma barra de aço de alta resistência juntamente com um conjunto de ancoragens. A barra normalmente é revestida por uma bainha de aço, de polietileno de alta densidade ou com algum material similar. O vazio produzido entre a bainha e a barra é preenchido com material flexível ou rígido, dependente do sistema adoptado no projecto. As barras podem ser nervuradas (figura 2.60) ou lisas (figura 2.61).



Figura 2.60 – Barra nervurada
(DYWIDAG-Systems 2009).



Figura 2.61 – Barra lisa
(DYWIDAG-Systems 2009).

A definição da armadura de pré-esforço com barra é estabelecida pela (prEN10138-4 2006). Segue na figura 2.62 a designação pela norma anteriormente mencionada:

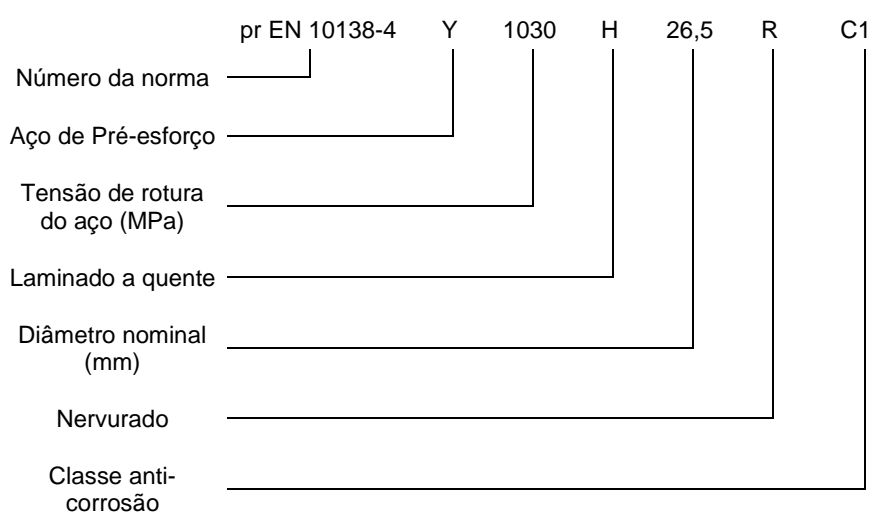


Figura 2.62 – Designação de barra pela (prEN10138-4 2006).

As barras utilizadas devem estar de acordo com todas as normas europeias e nacionais em vigor, o que pode levar a diversos produtos com características diferentes, tais como, o diâmetro da barra, e a respectiva resistência à rotura. Na tabela 2.5 segue as características de alguns tipos de barras.

Tabela 2.5 – Barras de pré-esforço. (ETA-05/0122 2010)

D	mm	17,5	26,5	32	36	40	47
Barra nervurada - WR							
Designação	-	18 WR	26,5 WR	32 WR	36 WR	40 WR	47 WR
f_{pk}	N/mm ²	1050					
Barra lisa - WS							
Designação	-	-	-	32 WS	36 WS	-	-
f_{pk}	N/mm ²	1050					

E=205 GPa

onde,

D – Diâmetro nominal da barra de pré-esforço.

f_{pk} - Valor característico da tensão de rotura à tracção do aço das armaduras de pré-esforço.

O valor máximo de força aplicada à armadura de pré-esforço deve respeitar a seguinte condição:

$$\min (k_1 f_{pk}, k_2 f_{p0,1k}) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

em que:

$$k_1 = 0,8$$

$$k_2 = 0,9$$

$$f_{p0,1k} = 0,88 \cdot f_{pk}$$

O excesso de força é permitido desde que o macaco de pré-esforço tenha uma precisão de +5% do valor final de pré-esforço. As disposições feitas pela Aprovação Técnica Europeia são baseadas num suposto tempo de vida de 100 anos, com excepção de 3 anos para a protecção contra a corrosão temporária (ETA-05/0122 2010).

2.7.2 – Sistema Aderente

O presente sistema assemelha-se ao mencionado com cordões, diferindo unicamente na introdução de barra na bainha de pré-esforço, o qual é embebido em calda de cimento revestido com uma bainha metálica ou plástica. Não permite o alongamento da armadura de pré-esforço sem que o material envolto fendilhe. Na figura 2.63 observa-se a secção transversal da armadura de pré-esforço aderente.

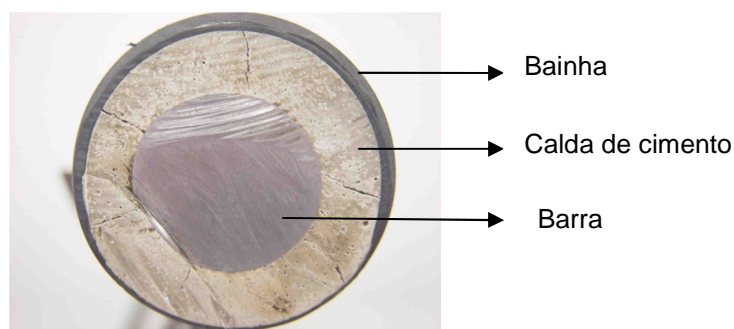


Figura 2.63 – Secção transversal da armadura de pré-esforço exterior em barra.

2.7.3 – Sistema Não Aderente

2.7.3.1 – Injecção com produto flexível

O presente sistema de pré-esforço exterior assemelha-se ao anterior, diferindo somente no material de injecção. O material de injecção introduzido na armadura de pré-esforço deve permitir o destensionamento ou retensionamento do aço de pré-esforço, bem como a possível substituição do mesmo. Os materiais de injecção mais comuns são a cera e a graxa.

2.7.3.2 – Produtos ligeiros

O sistema de pré-esforço exterior não aderente com produto ligeiro é composto pela barra de pré-esforço que pode ser revestida com:

- Pintura.
- Fita adesiva.
- Plástico vulcanizado.
- Metalização a quente ou a frio.
- Galvanização.
- Zincagem.

No caso da galvanização é necessário ter cuidados acrescidos, de modo a não fragilizar essa camada anti-corrosiva durante o manuseamento e colocação. Alguns destes sistemas podem ser combinados, aumentando assim, o nível de protecção contra a corrosão.

2.7.4 – Ancoragem

As ancoragens em barras de pré-esforço podem ser do tipo, activas ou passivas e aderente ou não. As descrições destes elementos seguem nas figuras 2.64 a 2.66.

- Sistema aderente

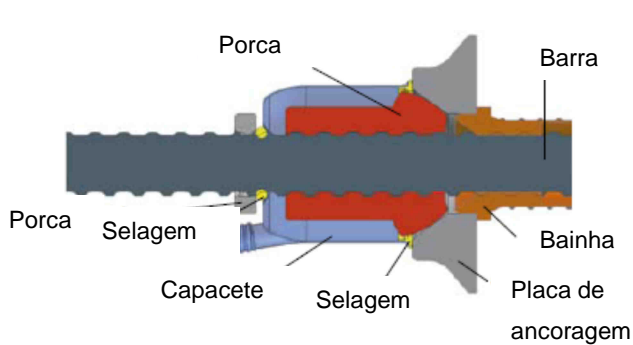


Figura 2.64 – Ancoragem activa (DYWIDAG-Systems 2009).

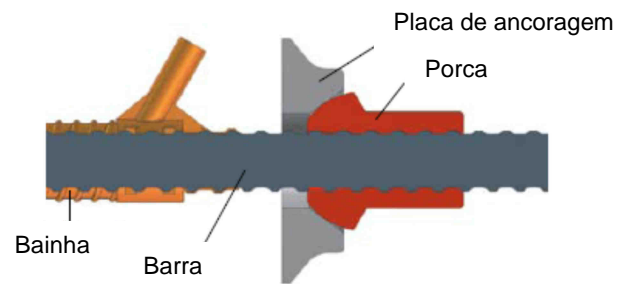


Figura 2.65 – Ancoragem passiva (DYWIDAG-Systems 2009).

- Sistema não aderente

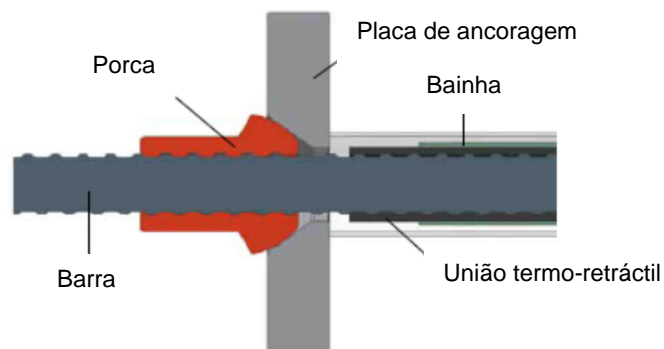


Figura 2.66 – Ancoragem activa e passiva (DYWIDAG-Systems 2009).

Os elementos que constituem as ancoragens são os seguintes;

- Placas

As placas de ancoragens são feitas em aço, no qual existem três modelos, placa quadrada (figura 2.67), placa QR (figura 2.68) e placa rectangular (figura 2.69). (DYWIDAG-Systems 2009)



Figura 2.67 – Placa quadrada.
(DYWIDAG-Systems 2009)

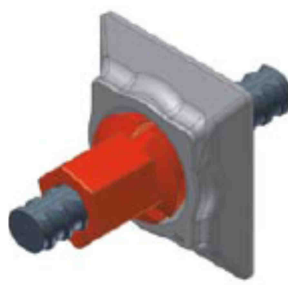


Figura 2.68 – Placa QR.
(DYWIDAG-Systems 2009)

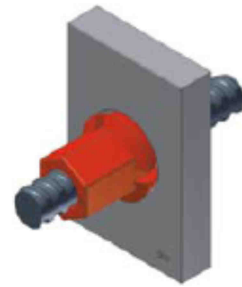


Figura 2.69 – Placa rectangular.
(DYWIDAG-Systems 2009)

- Porcas

As porcas admitidas pela (ETA-05/0122 2010) são a porca normal (figura 2.70) e a porca com reentradas (2.71).



Figura 2.70 – Porca normal.
(ETA-05/0122 2010)



Figura 2.71 – Porca com reentradas.
(ETA-05/0122 2010)

- Acopladores

As barras tem um comprimento limitado de fábrica, desta forma os acopladores permitem ligar duas barras pelas extremidades, na figura 2.72, segue um exemplo de um acoplador permitido pela (ETA-05/0122 2010).



Figura 2.72 – Acoplador (ETA-05/0122 2010).

2.7.5 – Operações de Execução

2.7.5.1 – Tensionamento

O tensionamento das barras é executado através de macacos hidráulicos destinados para tal acção. Nesta etapa são retirados todos os dados de forma a preencher o protocolo de tensionamento.

2.7.5.2 – Protocolo de Tensionamento

Registados os dados durante a operação de tensionamento das barras, posteriormente é avaliado pela equipa de fiscalização de modo a prosseguir com os trabalhos.

2.7.5.3 – Injecção de Material

A injecção de material no vazio entre a bainha e a barra deve ser introduzido segundo o mesmo procedimento do sistema de pré-esforço exterior com cordões, descrito no ponto 2.6.9.4.

2.8 – Pré – Esforço Exterior em Fibras

2.8.1 – Generalidades

O sistema de pré-esforço exterior com fibras é uma tecnologia recente, o qual ainda se encontra a ser intensamente estudada pelos diversos institutos mundiais, a fim de compreender o funcionamento dos materiais aplicados às estruturas e a interacção entre ambos, e para futuramente conceber normas que regulamentam a aplicação desses materiais em segurança.

O pré-esforço exterior com fibras pode ser constituído por fios, cordões ou laminados, sendo esses elementos fixados nas extremidades por ancoragens. Numa extremidade é colocada uma ancoragem activa e na outra, uma passiva. As fibras mais estudadas são as fibras de aramida, de vidro e as de carbono.

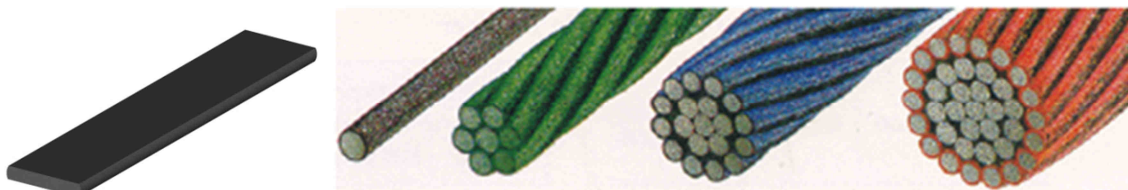


Figura 2.73 – Laminados, fios e cordões de fibras (Nordin 2005).

Na tabela 2.6 são descritas algumas características técnicas sobre fibras de alguns fabricantes mundiais.

Tabela 2.6 – Características de alguns fabricantes de FRP (Benmokrane, Zhang e Chennouf 2000).

Cabo	Diâmetro nominal (mm)	Secção transversal (mm ²)	Resistência média à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão última (%)	Densidade (g/m ³)	Coefficiente de poisson
Arapree - 8	7,5	44,2	1506	62,5	2,4	1,25	0,38
Technora	8	50,2	2140	54	3,7	1,3	0,35
Leadline	7,9	46,1	2550	150	1,3	1,67	-
CFCC	7,5	30,4	2120	137,3	1,57	2,1	-

As fibras produzidas pela Arapree são de aramida embebida em resina epoxídica. A Technora produz varões em fibras, a Leadline elabora varões em carbono e por fim a CFCC fabrica fios e varões em fibra de carbono.

2.8.2 – Sistema Aderente

O presente sistema com fibra é aderente, devido à existência da resina epoxídica que confere essa propriedade a ambos os elementos a pré-esforçar. Ou seja, o laminado é colado à estrutura por intermédio de resina epoxídica que funcionará em solidariedade com a mesma. As fibras são fixadas a ancoragens nas extremidades, como nos sistemas tradicionais de pré-esforço. Segue na figura 2.74 um exemplo do processo de pré-esforço com fibras.

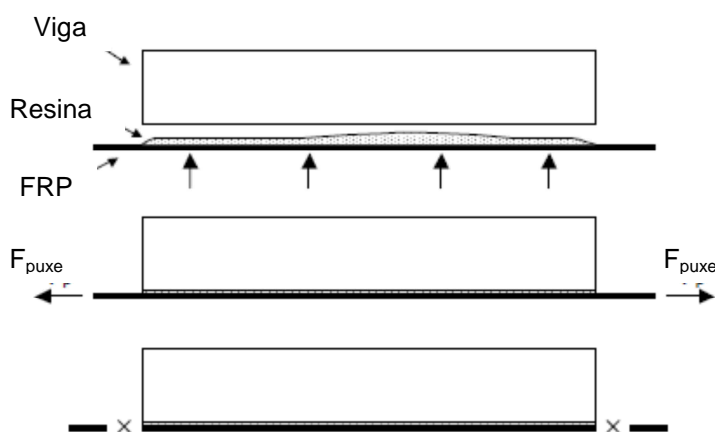


Figura 2.74 – Viga pré-esforçada com fibras (Nordin 2005).

A resina epoxídica é uma argamassa tixotrópica adesiva que é composta por dois componentes, a resina e o endurecedor. Ao juntar-se os dois componentes, a resina começa imediatamente a cura. Como exemplo, na tabela 2.7 ilustram-se algumas características da resina sikadur-30.

Tabela 2.7 – Características da resina epoxídica (SIKA 2009).

Base química	Resina epoxídica
Escorrimento	Não escorre em superfícies verticais até espessura de 3 a 5 mm (35°C)
Espessura de camada	Máximo de 30 mm por camada (1)
Retracção	0,04%
Coef. de dilatação térmica	$2,5 \times 10^{-5}$ °C (2)
E (tracção)	11,2 GPa
E (compressão)	9,6 GPa
(1) - É possível aplicar várias camadas sobrepostas desde que a anterior esteja endurecida.	
(2) - Temperatura ambiente entre os -20°C e os +40°C	

2.8.3 – Sistema Não Aderente

(Matta, Nanni, et al. 2007), (Matta, Aquino, et al. 2008) desenvolveram um sistema completo de pré-esforço exterior com varão em CFRP, que permite uma extrema facilidade de adaptar o sistema à estrutura a pré-esforçar. Também desenvolveu o procedimento de cálculo para o respectivo sistema.

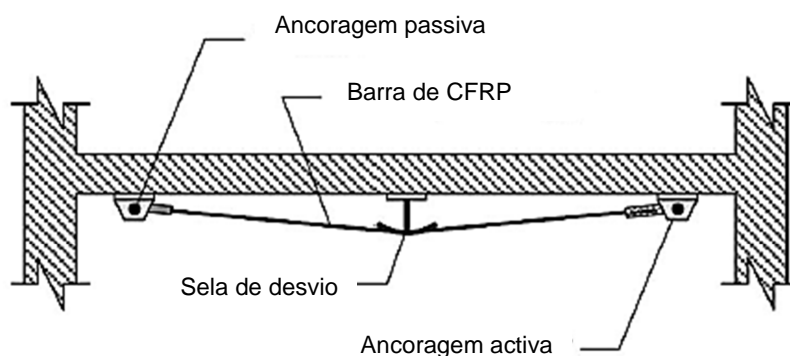


Figura 2.75 – Sistema de pré-esforço exterior com CFRP (Matta, Aquino, et al. 2008).

2.8.4 – Ancoragens

As ancoragens de fibras são pontos a ter em elevada consideração, visto que elas são extremamente perigosas, se algum pormenor falhar pode levar a rotura do sistema e até da própria estrutura. Vários estudos têm vindo a ser elaborados a fim de compreender o comportamento das estruturas com fibras e em especial o comportamento das ancoragens com a estrutura. Um sistema de pré-esforço com laminado de fibra foi desenvolvido na Suíça tensionado por um macaco hidráulico cilíndrico em

miniatura (Andra e Maier 2000). Com o desenvolvimento dessa tecnologia, deu origem à ancoragem do tipo SikaLEOBA CarboDur SLC II (figura 2.76), no qual são aparafusadas à estrutura a pré-esforçar.

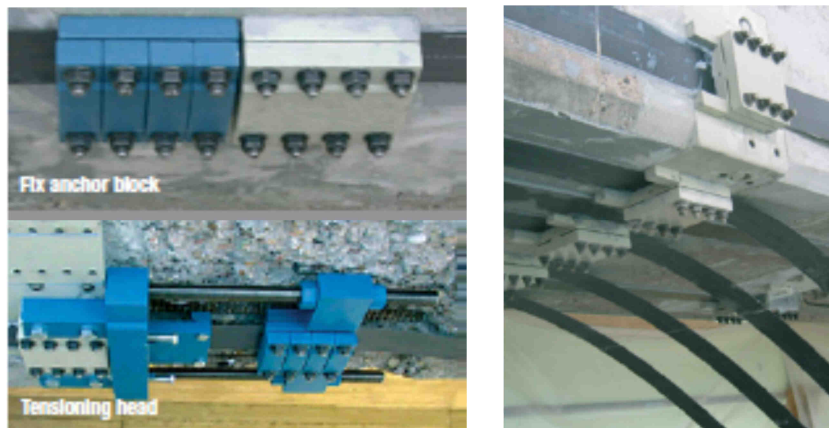


Figura 2.76 – Ancoragem activa e passiva do tipo Sika LEOBA carboDur SLC II (SIKA).

A investigação neste campo de conhecimento tem vindo a desenvolver-se bastante, dando origem a outro tipo de ancoragem, designada por StressHead. Este novo sistema permite ancorar o bolbo do laminado às ancoragens que se encontram nas extremidades da estrutura a pré-esforçar. Este sistema é constituído por uma ancoragem passiva e activa, em que a ancoragem activa é solicitada para tensionar o respectivo laminado (Figura 2.77).



Figura 2.77 – Ancoragem passiva e activa do tipo StressHead (SIKA).

A maior dificuldade deste sistema e de todos os que utilizam fibras é a amarração das fibras à ancoragem e a respectiva correcta transmissão de cargas à estrutura. Na figura 2.78 é ilustrado a ancoragem activa do respectivo sistema.

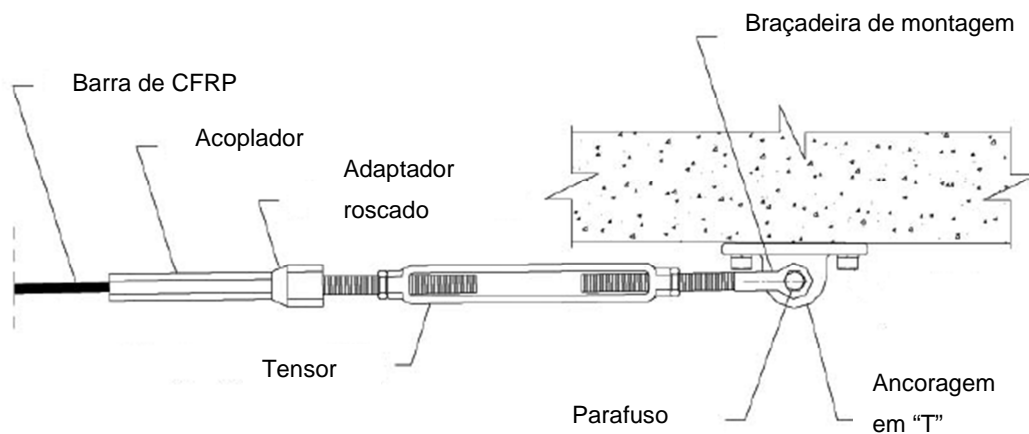


Figura 2.78 – Ancoragem activa para barra de CFRP. (Matta, Aquino, et al. 2008)

2.8.5 – Tensionamento

O tensionamento é feito com recurso a mini macaco hidráulico com suporte a bomba de óleo, o procedimento é idêntico aos sistemas anteriores mencionados com cordões ou barras. Pode-se observar os pormenores da ancoragem e o respectivo posicionamento do macaco na figura 2.79.



Figura 2.79 – Macaco Hidráulico. (SIKA)

Capítulo 3

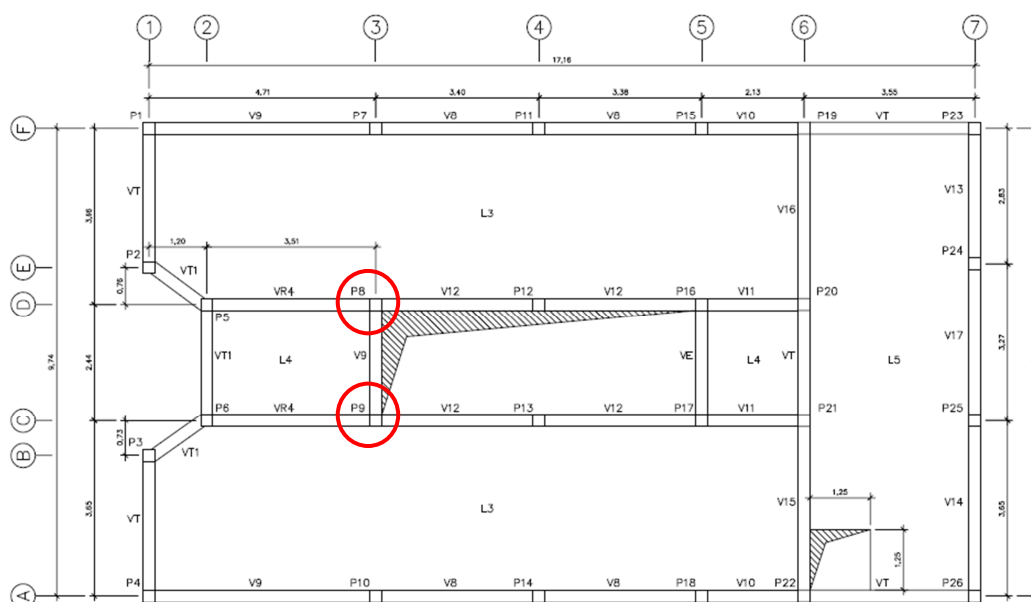
3 – Experiência Portuguesa no Pré-Esforço Exterior

3.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentadas algumas obras em que várias empresas portuguesas implementaram pré-esforço exterior nas mesmas, tanto a nível nacional como internacional. Também é apresentado a evolução dos sistemas de pré-esforço exterior até à actualidade. Em cada obra é descrito um conjunto de características próprias da estrutura, fornecidos pelo dono de obra, projectista, empreiteiro geral e sub-empreiteiros, de modo a contextualizar a obra e explicar as razões da implementação do pré-esforço exterior.

3.2 – Edifício Residencial

O presente edifício localiza-se em Lagoa, Algarve, o qual é destinado a serviços. É composto por uma estrutura portificada em betão armado. A laje tem uma espessura de 0,25m, as vigas 0,25m x 0,40m e os pilares de secção quadrada com 0,25m de lado. Durante a fase de construção o projectista demonstrou a intenção de remover dois pilares da estrutura inicial. Indicam-se na figura 3.1 os pilares em causa.



○ - Pilar a demolir

Figura 3.1 – Planta original do edifício.

A solução encontrada pelo projectista consistia na introdução de um sistema de pré-esforço exterior com cordões, ancorados a maciços de betão armado construídos em torno dos pilares adjacentes aos removidos, segundo o alinhamento 3.

Concluiu-se que essa disposição não era a mais adequada e o próprio sistema também não era o mais indicado. A VSL propôs um novo sistema com uma nova disposição, perpendicular à inicial, segundo os eixos C e D. O novo sistema consiste na utilização de barras não aderentes, injectadas com graxa, ver figura 3.2, 3.3 e 3.4.

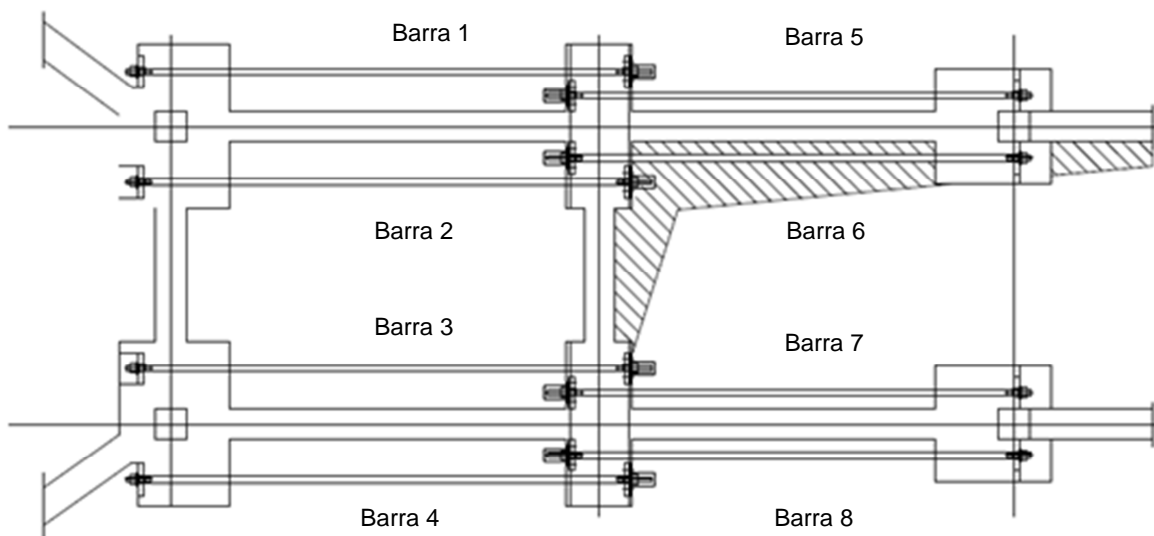


Figura 3.2 – Planta de reforço.

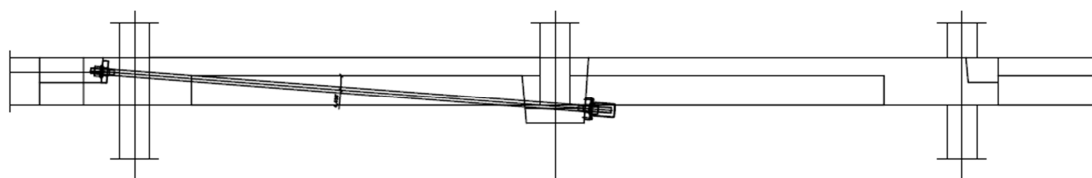


Figura 3.3 – Corte pela barra 1, 2, 3, 4.

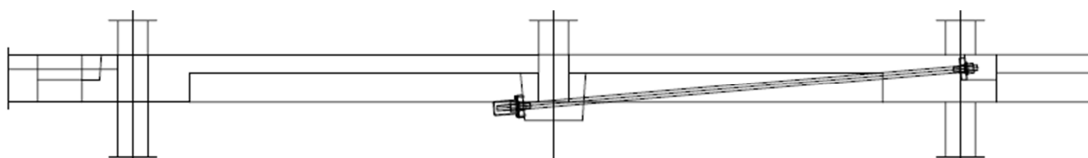


Figura 3.4 – Corte pela barra 5, 6, 7, 8.

Seguem nas fotos 3.5 a 3.8 alguns pormenores relevantes do sistema de pré-esforço exterior adoptado para esta obra.



Figura 3.5 – Demolição de laje.



Figura 3.6 – Colocação de barras.



Figura 3.7 – Nichos de ancoragem.

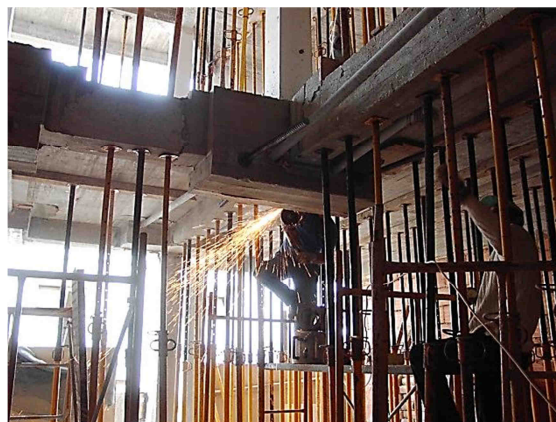


Figura 3.8 – Disposição final das barras.

3.3 – Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos da Meia Serra

Este edifício situa-se na meia serra na Ilha da Madeira, e tem função de armazém. É composto por uma estrutura porticada em betão armado com uma cobertura em estrutura metálica, o qual foi alvo de reforço.

A solução encontrada para resolver a problemática da cobertura consiste na aplicação de um sistema de barra não aderente, ancorada ao fio inferior da viga junto aos apoios. Na figura 3.9 é apresentado o sistema de pré-esforço exterior no corte transversal do edifício. Na figura 3.10 é ilustrado o pormenor de ancoragem do sistema de pré-esforço exterior e da ligação pilar – viga.

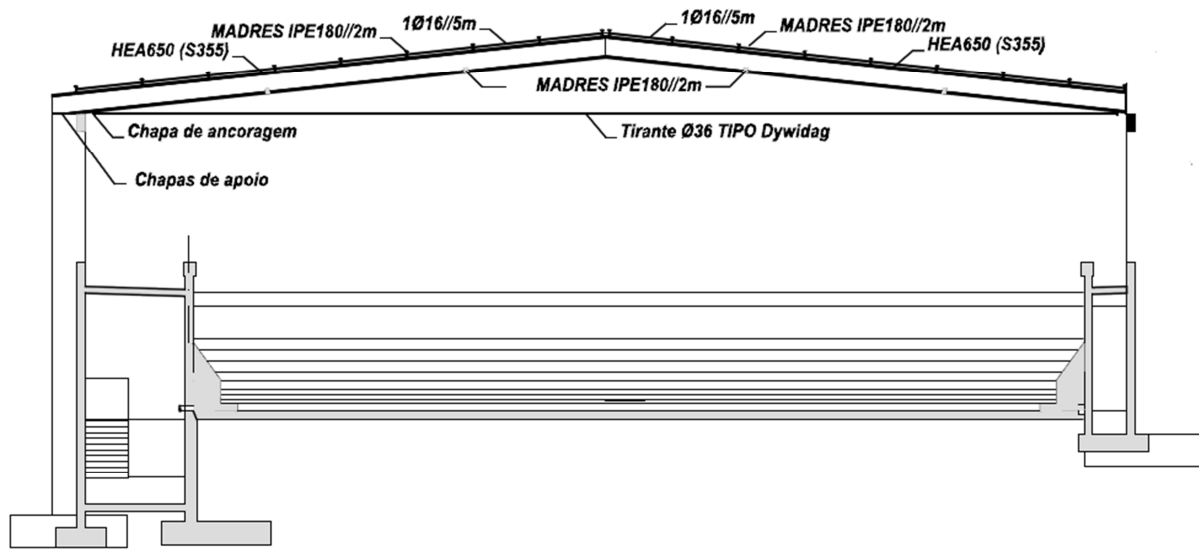


Figura 3.9 – Corte transversal do lado esquerdo do edifício.

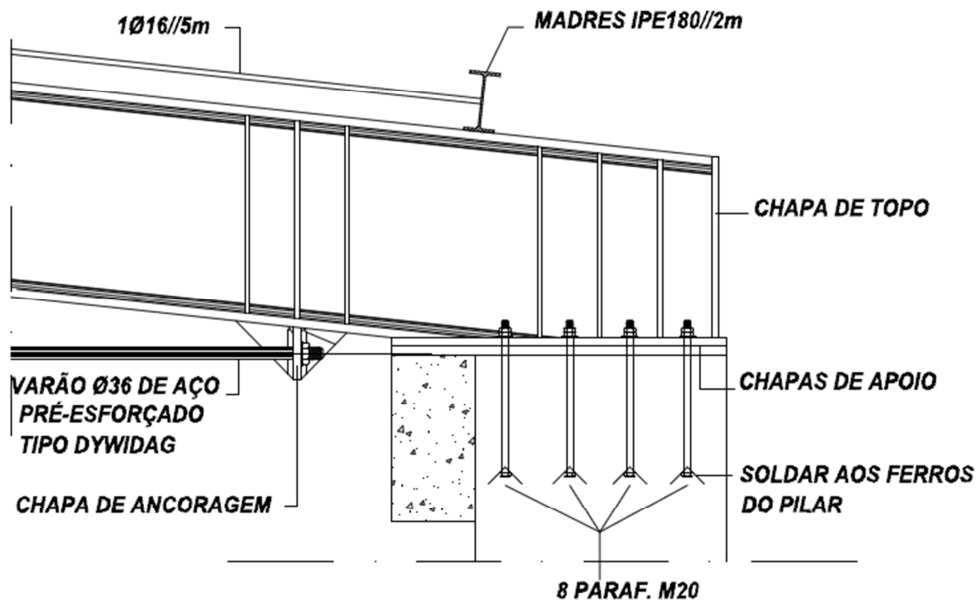


Figura 3.10 – Pormenor da Ligação pilar - viga e ancoragem da barra.

3.4 – Ponte Edgar Cardoso

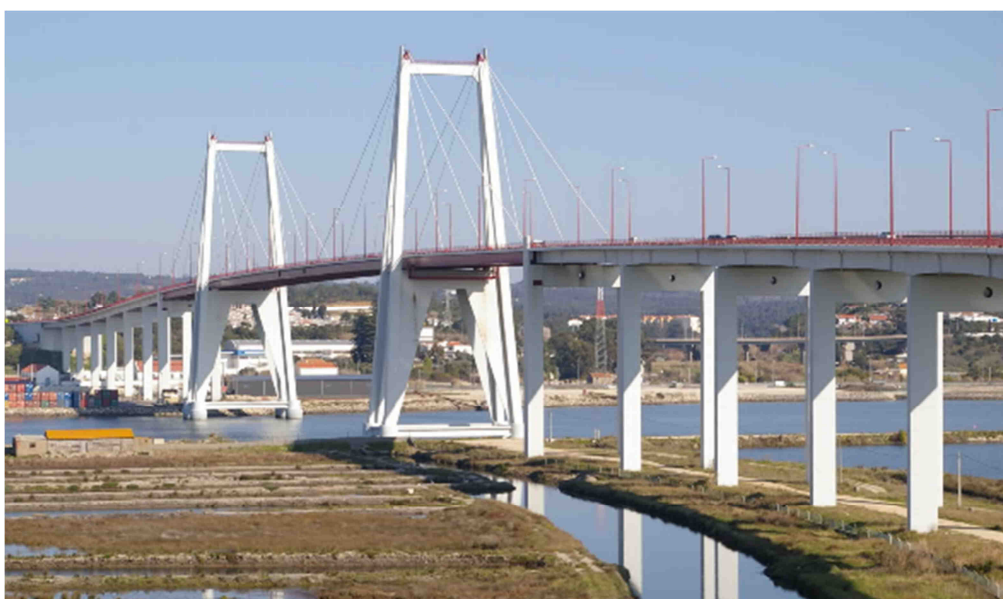


Figura 3.11 – Ponte Edgar Cardoso (Fernando 2011).

A ponte Edgar Cardoso, conhecida como ponte sobre o rio Mondego e antigamente como ponte da Figueira da Foz, foi inaugurada em 1982, tendo sido projectada pelo Engenheiro Edgar Cardoso. Localiza-se na Figueira da Foz, no litoral centro de Portugal, estando integrada na EN109/IC1. A ponte e os respectivos viadutos de acesso beneficiaram de uma reabilitação profunda, a qual foi dada como concluída a 28 de Julho de 2005, ocasião a qual a estrutura adquiriu o seu presente nome.

A solução de reforço dos viadutos de acesso projectada pelo Engenheiro Armando Rito, baseia-se na introdução de um sistema de pré-esforço exterior com cordões aderentes e substituíveis. Este sistema é constituído por 2 cabos paralelos às vigas de extremidade e 4 cabos paralelos às vigas interiores. Cada cabo contém 4 cordões e são ancorados nos apoios, tramo a tramo. Os desviadores são colocados a 1/3 e a 2/3 do vão, coincidindo com as carlingas dos respectivos viadutos.

Com base no projecto inicial, a VSL introduziu algumas alterações em relação ao sistema e detalhou-o de modo a aplicar em obra. As alterações em relação ao sistema inicial consistiram na alteração dos cabos, tendo sido recomendado a utilização de 16 cabos, de 4 e 3 cordões de 0,6" em aço nu, com comprimento máximo de 45m, sendo colocados 4 cabos por viga.

As ancoragens utilizadas são do tipo VSL tipo Ec (6-4), as bainhas são metálicas e plásticas de acordo com o projecto inicial. Os dispositivos de ligação entre bainhas foram uniões termo-retrácteis e uniões electrossoldáveis. Nesta obra foram utilizados os primeiros centradores de cordões, no qual tiveram de ser intensamente estudados, e introdução de dispositivos anti-vibratórios de modo que os cabos não entrem em ressonância, evitando a rotura dos mesmos.

Na figura 3.12 é possível observar os pormenores do maciço de ancoragem, construído junto ao encontro do viaduto.

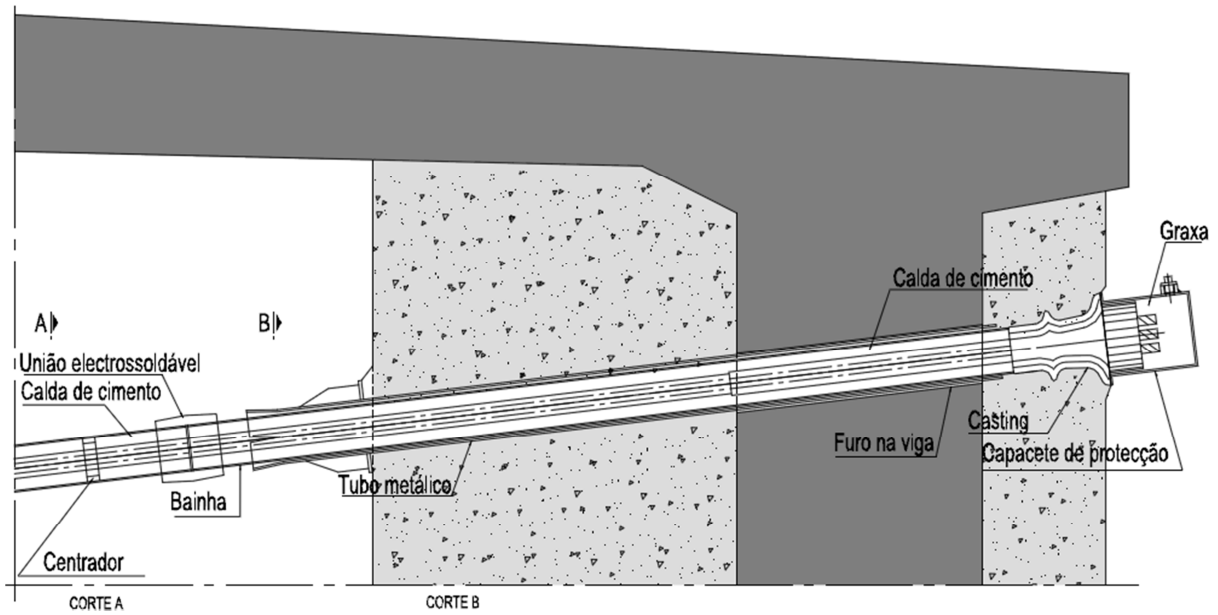


Figura 3.12 – Corte Longitudinal na extremidade sobre o encontro.

Na figura 3.13 e 3.14 são apresentados os cortes transversais dos cabos de pré-esforço referentes à figura 3.10. Na figura 3.15 é ilustrado o saneamento do betão do encontro, de modo a ser construído o respectivo maciço de ancoragem.

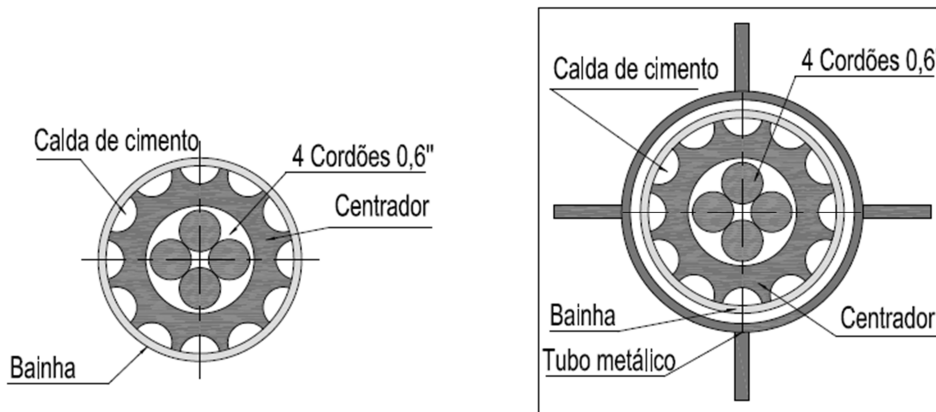


Figura 3.13 e 3.14 – Corte A e corte B.

Na figura 3.16 é apresentado o aspecto final da estrutura com os respectivos cabos de pré-esforço.



Figura 3.15 – Saneamento de betão.



Figura 3.16 – Cabos finais.

As selas de desvio foram pré-fabricadas com elementos metálicos, que depois são acoplados às carlingas. Na figura 3.17 é exposto o pormenor de uma sela de desvio e a descrição de todos os elementos que a constituem.

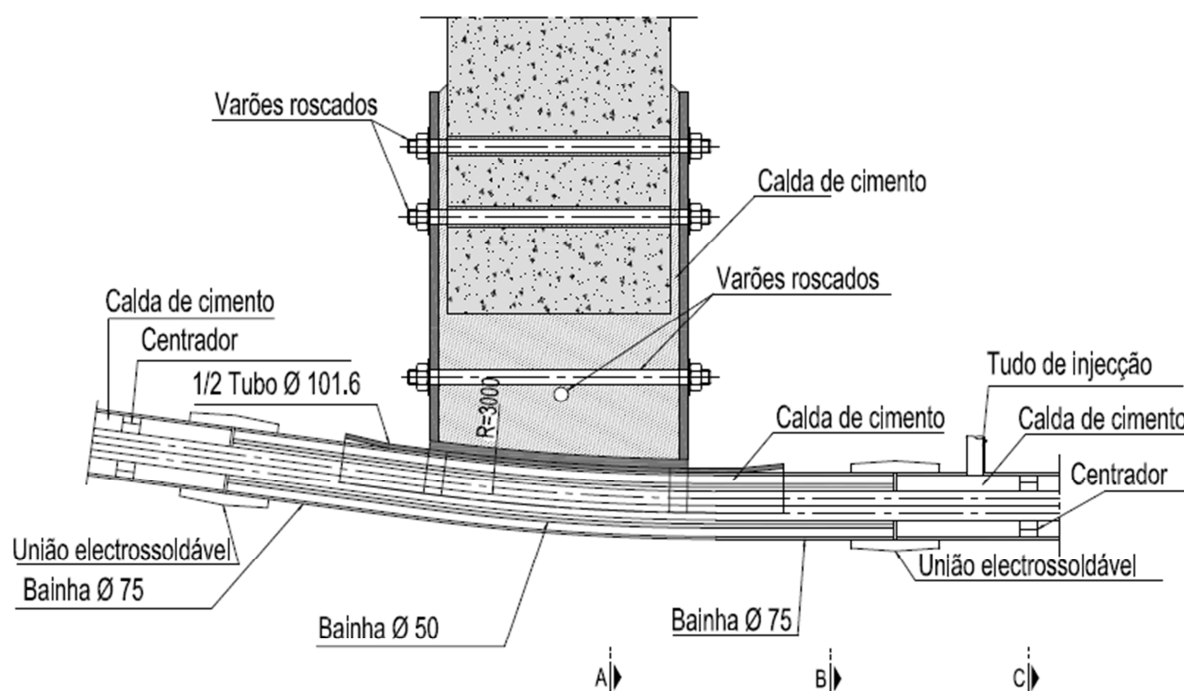


Figura 3.17 – Pormenor da sela de desvio.

Nas figuras 3.18, 3.19 e 3.20 são expostos os cortes transversais do cabo relativamente às posições referidas na figura 3.17.

Na figura 3.21 são apresentados os vários centradores que foram estudados para serem aplicados nesta obra. Os centradores servem para garantir o recobrimento e a disposição ordenada dos cordões.

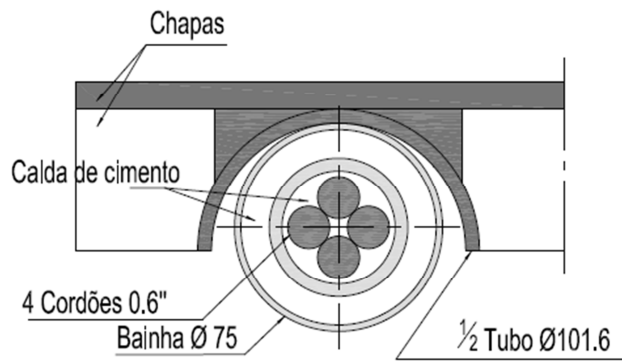


Figura 3.18 – Corte transversal A.

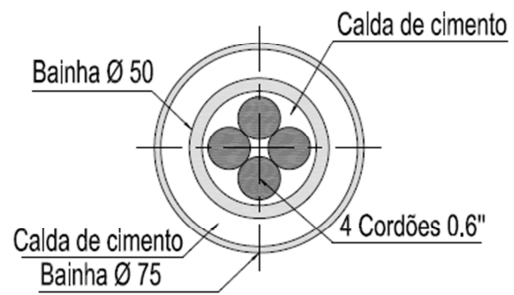


Figura 3.19 – Corte transversal B.

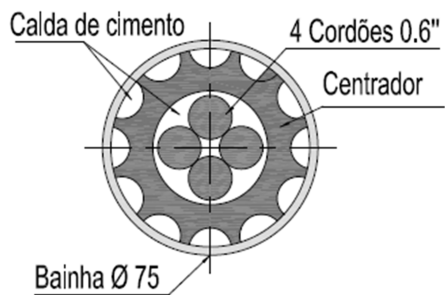


Figura 3.20 – Corte transversal C.



Figura 3.21 – Centradores.

Na figura 3.22 observa-se a sela de desvio pré-fabricada pronta para ser aplicada em obra, no qual é possível observar na figura 3.23



Figura 3.22 – Sela de desvio.



Figura 3.23 – Sela de desvio aplicada à carlinga.

3.5 – Viaduto de Caparide

O viaduto de Caparide situa-se sobre a ribeira de Caparide, inserindo-se na auto-estrada A5, no lanço estádio Nacional – Cascais, com um comprimento de 198m. Este viaduto beneficiou do alargamento da auto-estrada para 2x3vias. Para tal, foi necessário proceder ao ajuste da estrutura às novas exigências, de modo a garantir a segurança. Na figura 3.24 é apresentada a planta da estrutura.

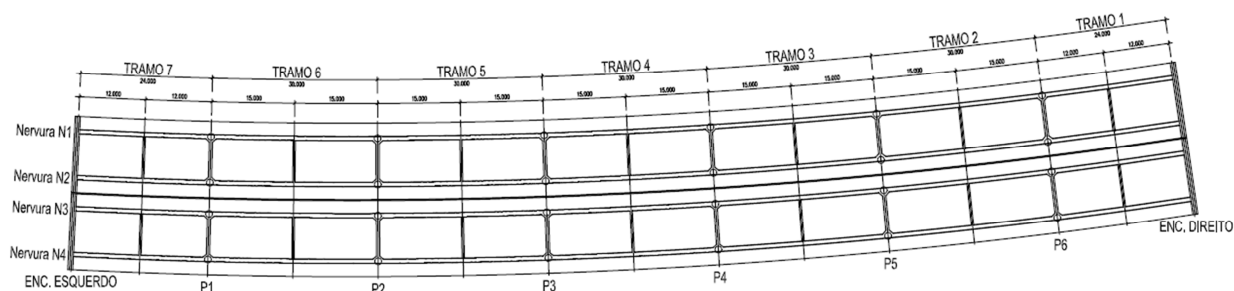


Figura 3.24 – Planta estrutural.

O projecto de reforço desta estrutura foi da autoria do Engenheiro Armando Rito, que dimensionou o pré-esforço exterior, substituível. Este sistema é semelhante ao utilizado no reforço dos viadutos de acesso à ponte Edgar Cardoso, contudo a dimensão desta obra é inferior à mencionada.

O projecto de especialidade de pré-esforço foi desenvolvido pela VSL, e consistiu na utilização de 4 cabos de 7 cordões de 0,6", com um comprimento máximo de 115m, ancoragens tipo VSL tipo Ec (6-7). Foram utilizadas bainhas metálicas e plásticas, e centradores. Os dispositivos de união de bainhas foram as uniões termo-retrácteis e uniões electrossoldáveis.

Na figura 3.25 é apresentado o pormenor da amarração dos cabos de pré-esforço exterior na extremidade sobre o encontro, onde são descritos todos os elementos que constituem o sistema de pré-esforço exterior. Junto à ancoragem, o sistema é não aderente, onde cada cordão está envolvido por uma bainha individual, preenchida com graxa. Este sistema estende-se até ao final do maciço de betão, onde vai ligar ao resto do cabo, que funciona com sistema aderente, injectado com calda de cimento, excepto nas zonas de desvio onde existem algumas particularidades que serão explicadas mais a frente. A particularidade de ter cordões embainhados individualmente junto às ancoragens permite o eventual destensionamento do cabo.

Nas figuras 3.26 a 3.29, são expostos os cortes transversais do cabo e são descritos todos os elementos contidos nele.

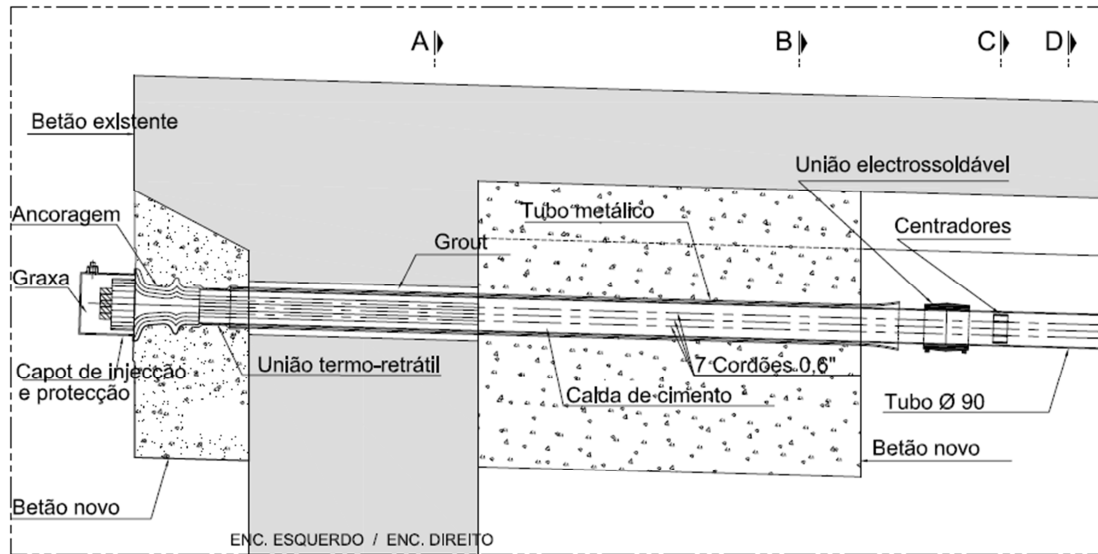


Figura 3.25 – Pormenor da amarração dos cabos de pré-esforço exterior na extremidade sobre o encontro.

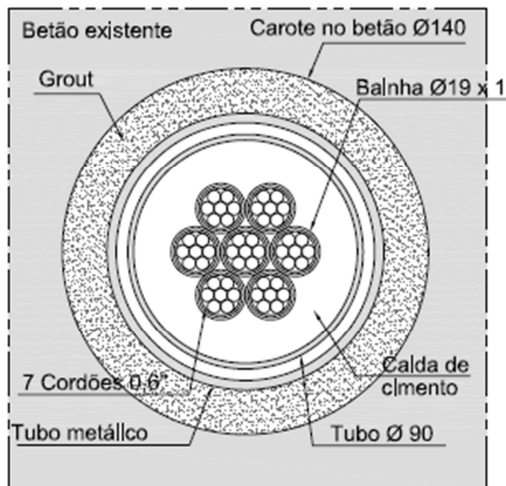


Figura 3.26 – Corte transversal A.

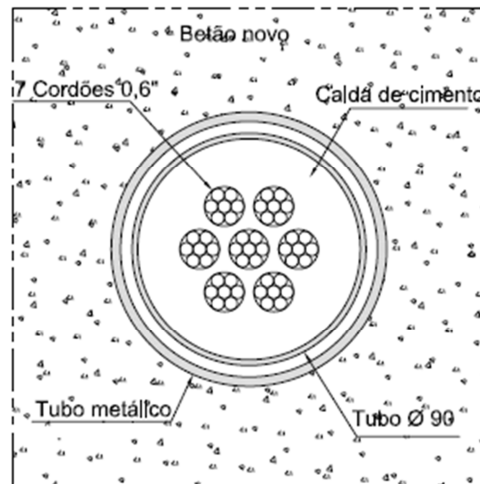


Figura 3.27 – Corte transversal B.

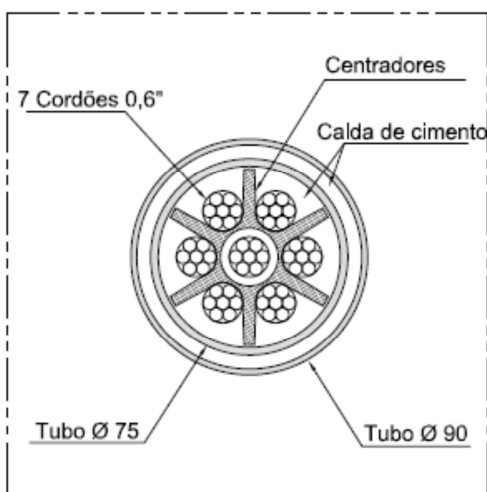


Figura 3.28 – Corte transversal C.

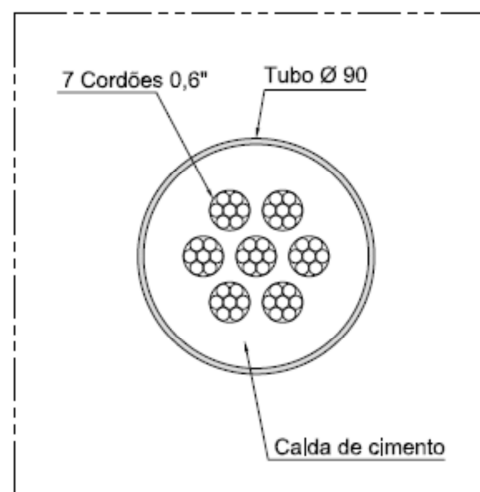


Figura 3.29 – Corte transversal D.

As selas de desvio são aplicadas no vão da estrutura, sendo constituídas por elementos metálicos pré-fabricados, no qual são acopladas a uma peça, que consiste em dois tubos de diâmetros diferentes, em que um tubo é inserido dentro do outro, e o vazio produzido por ambos é preenchido com grout, formando uma peça única, para futura colocação dos cordões individualmente embainhados no seu interior e posterior injeção com calda de cimento. Garante-se assim o recobrimento necessário aos cordões e a uniformidade de tensões aquando do tensionamento dos mesmos. Na figura 3.30 são descritos todos os elementos constituintes da sela de desvio. Na figura 3.31 e 3.32 são expostos os vários cortes transversais do cabo referente à figura 3.30.

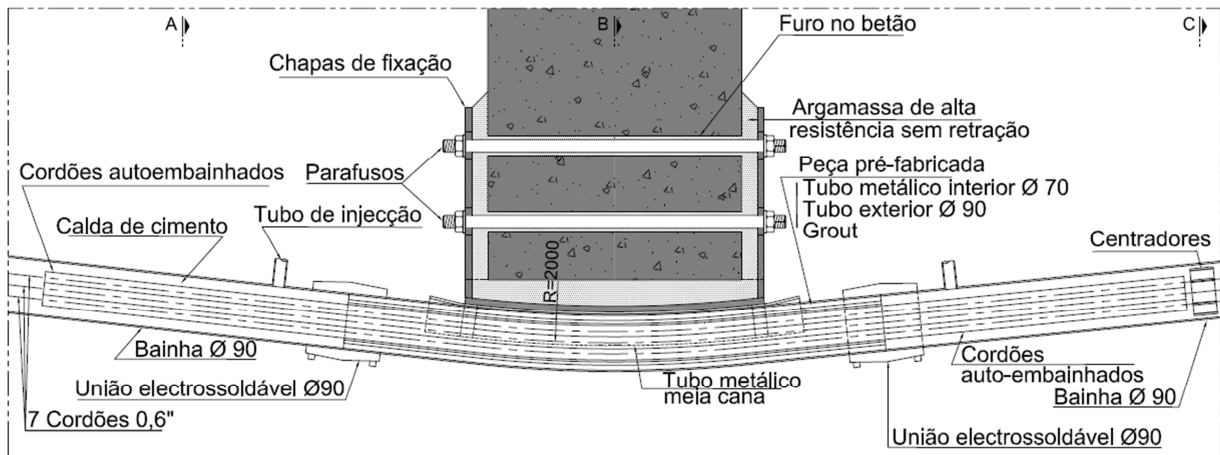


Figura 3.30 – Corte longitudinal da sela de desvio.

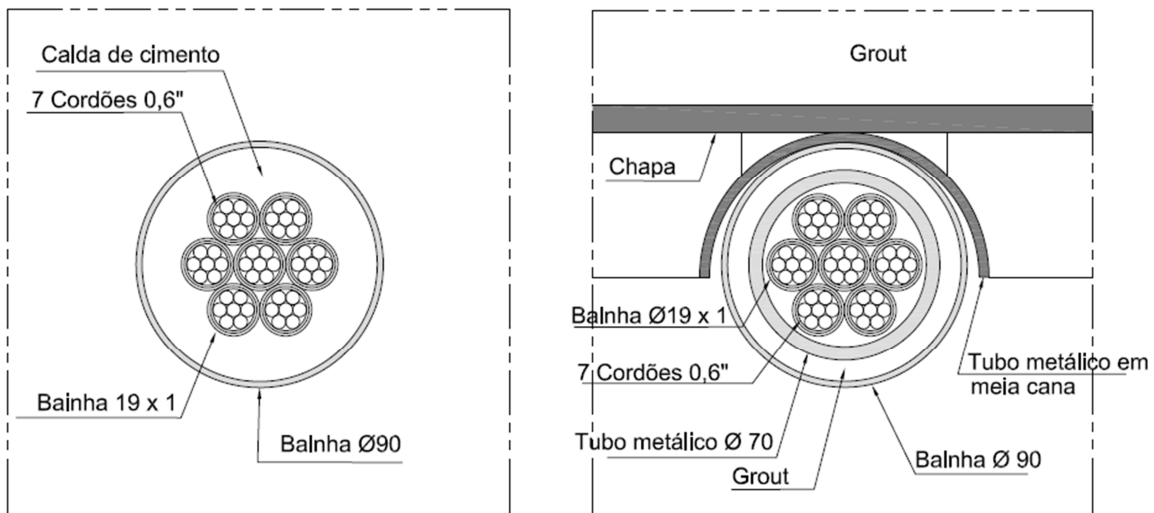


Figura 3.31 – Cortes transversais A e B.

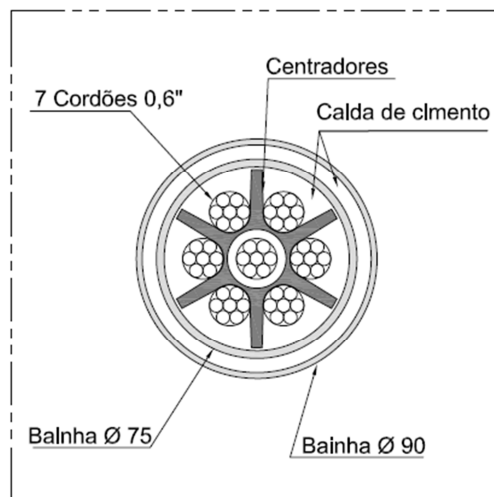


Figura 3.32 – Corte transversal C

Na figura 3.33 é visível a sela de desvio aplicada à estrutura por intermédio de uns varões roscados que atravessam a carlinga. Na figura 3.34 é apresentado a sela de desvio com o cabo de pré-esforço instalado.



Figura 3.33 – Montagem de sela de desvio.



Figura 3.34 – Sela de desvio final.

A aplicação de desviadores na zona dos apoios em estruturas previamente construídas requer a carotagem dos elementos de betão. Em seguida é inserido um molde em forma de trompeta dentro da carote, e o vazio entre a estrutura e o molde é preenchido com grout. No interior é colocado uma peça semelhante à peça pré-fabricada acoplada à sela de desvio. Dentro dessa peça irão passar os cordões embainhados individualmente que posteriormente serão unidos às bainhas adjacentes por meio de uniões electrossoldáveis (Figura 3.35).

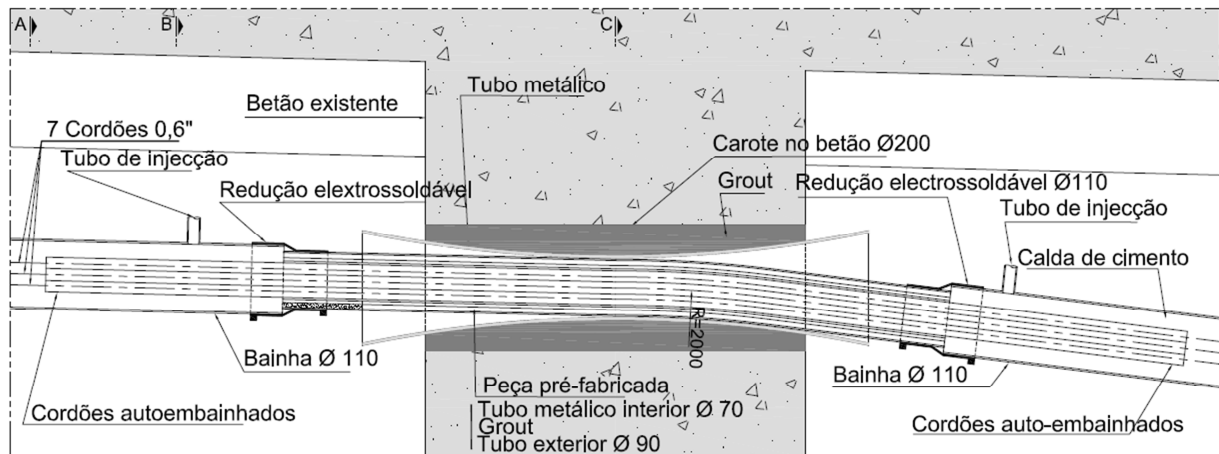


Figura 3.35 – Pormenor do desviador na carlinga.

As restantes ligações entre bainhas também são feitas através de uniões electrossoldáveis. Junto aos maciços de ancoragem e aos desviadores existem janelas telescópicas, que ajudam o manuseamento dos cordões. Ao longo do cabo de pré-esforço são colocados centradores, de modo a garantir o recobrimento e a ordenação dos cordões dentro da bainha.

3.6 – Faculdade de Psicologia do Porto

O presente edifício insere-se na Universidade do Porto, mais concretamente na FPCEUP. É composto por uma estrutura portificada em betão armado e com geometria regular tanto em planta como em corte.

O edifício foi alvo de reforço em quatro vigas de betão armado, referidas na figura 3.36. O respectivo projecto foi da autoria da ETEC. Este consiste na implementação de um sistema de pré-esforço exterior, substituível e retensionável.

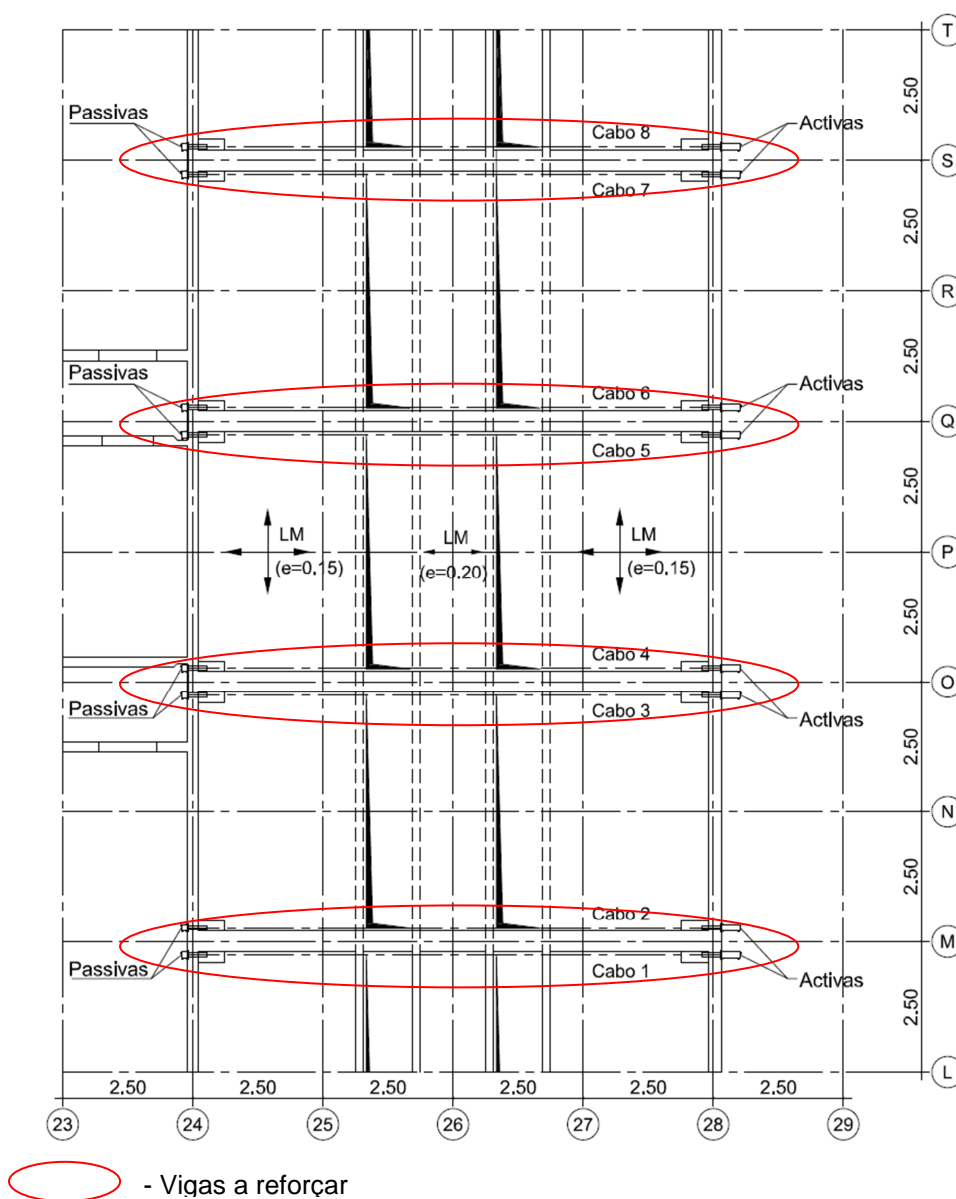


Figura 3.36 – Planta de reforço da estrutura do edifício.

O sistema é constituído por 8 cabos, sendo que, cada cabo é composto por 4 cordões com 10m de comprimento. Os respectivos cabos são ancorados através de ancoragens activas do tipo VSL tipo E (6 – 4). Os cordões são revestidos com bainhas de PEAD, e no seu interior são colocados centradores. A ligação entre bainhas é estabelecida através de uniões termo-retrácteis. As selas de desvio são pré-fabricadas em aço. Na figura 3.37 é apresentado parte do traçado do pré-esforço exterior em corte.

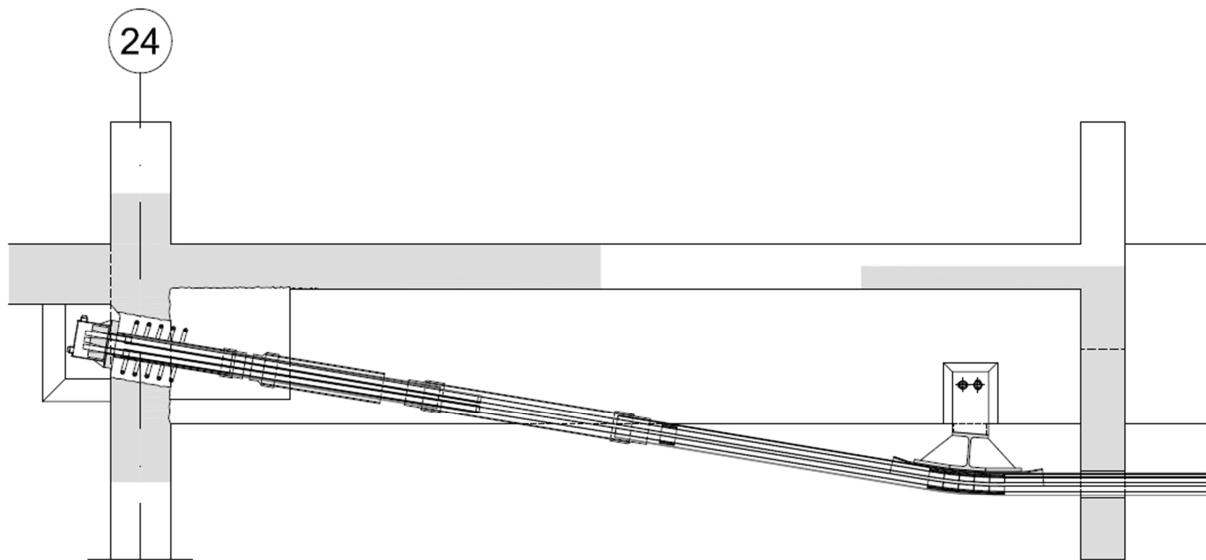


Figura 3.37 – Corte longitudinal do lado esquerdo do sistema.

De modo a satisfazer as exigências do projectista, a VSL desenvolveu um sistema que permite assegurar as referidas exigências. A particularidade deste sistema consiste no desenvolvimento de um pré-esforço exterior substituível (cordão a cordão) e retensionável. Isto é conseguido através estanquidade da ancoragem relativamente à calda de cimento injectada na bainha exterior. O capot/capacete longo é utilizado nas ancoragens activas, para alojar o comprimento de cordão necessário na eventualidade de destensionamento ou retensionado dos cabos.

Na figura 3.38 é ilustrado o corte longitudinal no maciço de ancoragem, no qual são descritos todos os elementos constituintes do sistema de pré-esforço exterior. Na figura 3.40 é possível observar a ancoragem aplicada em obra.

Os desviadores são constituídos por elementos metálicos, muito semelhantes aos utilizados nas obras anteriores. A figura 3.39 apresenta o corte longitudinal da sela de desvio e na figura 3.41 a aplicação da mesma em obra.

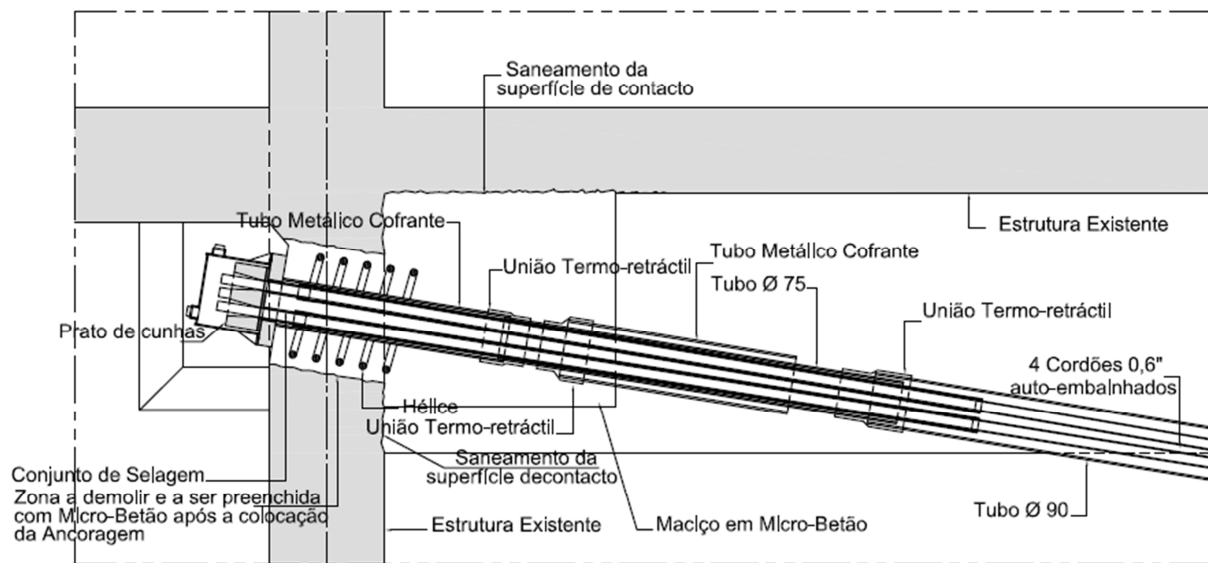


Figura 3.38 – Corte longitudinal do maciço de ancoragem.

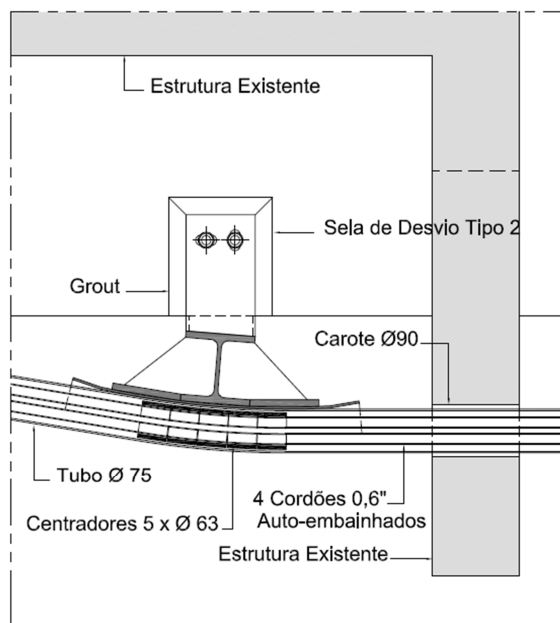


Figura 3.39 – Corte longitudinal da sela de desvio.



Figura 3.40 – Sistema de ancoragem.



Figura 3.41 – Sela de desvio.

3.7 – Ponte de Fagilde

A ponte de Fagilde localiza-se sobre o rio Dão na A25, no sentido Mangualde – Viseu. A estrutura é composta por um pórtico de secção em caixão de altura variável (Figura 3.42 e 3.43). Foi a primeira ponte a ser construída por avanços sucessivos em Portugal.

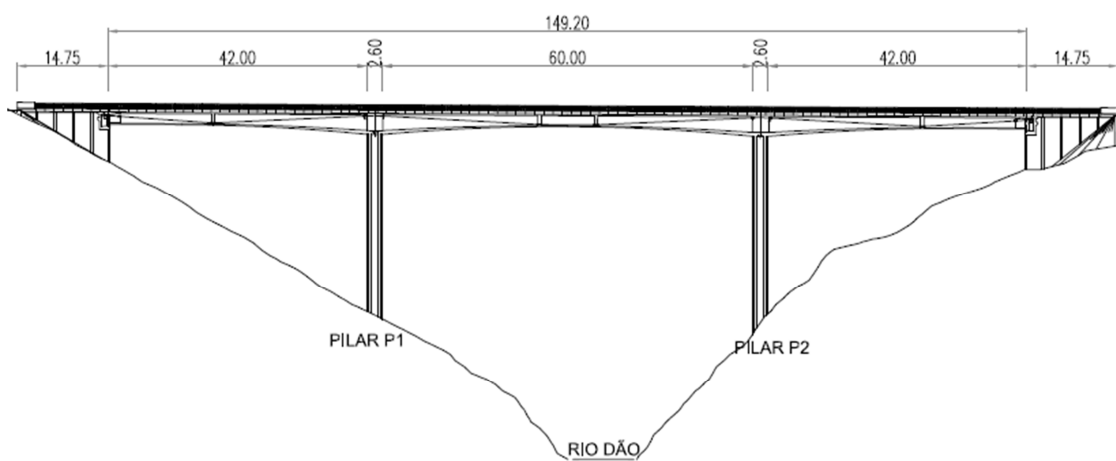


Figura 3.42 – Corte longitudinal da ponte.

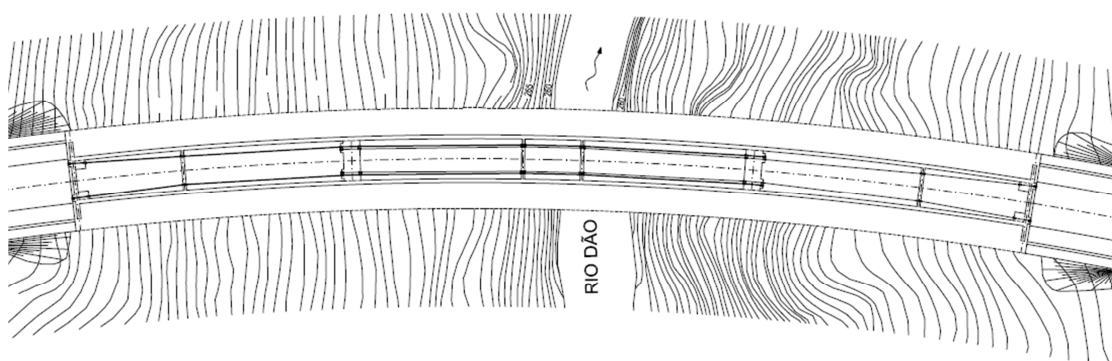


Figura 3.43 – Planta da ponte.

A presente estrutura veio a ser beneficiada por obras de reforço, sendo o projecto de reforço da autoria do Engenheiro Armando Rito, que foi o projectista inicial da obra de arte. A solução apresentada no respectivo projecto consiste na aplicação de pré-esforço exterior, substituível e retensionável, injectado com calda de cimento.

O sistema é composto por 4 cabos, e cada cabo tem 19 cordões auto-embainhados de 0,6", com comprimento de 102m e injectados com calda de cimento. Utilizou bainhas e uniões electrossoldáveis para as ligar, e no seu interior foram colocados centradores. Utilizaram-se ancoragens activas VSL tipo Ec (6-31).

De modo a evitar a vibração excessiva dos cabos aplicaram-se dispositivos anti-vibratórios. Foram construídos diafragmas de betão armado e pré-esforçado com barras aderentes, de modo a incorporar os desviadores dos cabos de pré-esforço exterior e transferir as cargas de pré-esforço em segurança à estrutura principal.

Iniciando a análise junto aos encontros da ponte onde foram construídos os maciços de ancoragem, os quais vêm no seguimento daqueles que têm vindo a ser construídos em obras anteriores. Neles foram inseridos ancoragens, que funcionam como passivas.

Na figura 3.44 é apresentada a abertura da laje de fundo da ponte, de modo a construir o maciço de ancoragem solidário com a estrutura existente. Na mesma figura também é visível a carotagem das almas da secção, para instalação de pré-esforço com barras aderentes. Na figura 3.45 é possível observar a colocação das armaduras no maciço, como a introdução das bainhas para os respectivos sistemas de pré-esforço. Na figura 3.46 é apresentado o maciço de ancoragem betonado, com as barras tensionadas e protegidas com as tampas de protecção. Na mesma figura é visível uma união electrossoldável aplicada na extremidade da bainha, o qual encontra-se preenchida com bainhas individuais, sendo apresentado com maior detalhe na figura 3.47.



Figura 3.44 – Aberturas na laje.



Figura 3.45 – Armaduras no maciço.



Figura 3.46 – Maciço betonado.



Figura 3.47 – Bainha colectiva.

Sobre os pilares foram construídos maciços de ancoragem para o tensionamento dos cabos de pré-esforço, minimizando assim o efeito das perdas de pré-esforço e cumprindo o projecto original. Nas figuras 3.48 a 3.50 são apresentados o processo construtivo dos maciços. Na figura 3.48 é visível a colocação das armaduras de reforço, com o tubo metálico, a bainha colectiva para a aplicação dos cabos e a colocação da ancoragem. Na figura 3.49 observa-se o maciço betonado, a ancoragem tensionada e a colocação de outro cabo para a passagem dos cordões auto-embainhados. Na figura 3.50 é ilustrado o tensionamento dos cordões com recurso a um macaco hidráulico monocordão. Por fim, na figura 3.51 é apresentado o sistema finalizado, com a ancoragem protegida por uma tampa de protecção longa.



Figura 3.48 – Armadura do bloco.

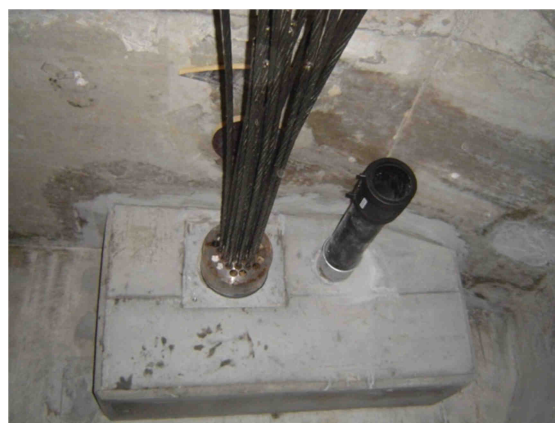


Figura 3.49 – Maciço betonado.



Figura 3.50 – Tensionamento.



Figura 3.51 – Tampa de protecção.

Os desviadores são aplicados a meio vão, e são semelhantes aos aplicados sobre os pilares, diferindo na sua posição e na criação de septos em betão armado pré-esforçado com barras aderentes. Nas figuras 3.52, 3.53 e 3.54 são apresentados o processo de construção dos referidos septos, como os elementos que constituem os sistemas de pré-esforço. Na figura 3.55 é possível observar a aplicação dos cabos de pré-esforço exterior dentro do molde do desviador.



Figura 3.52 – Cofragem do septo.



Figura 3.53 – Armadura do septo.



Figura 3.54 – Diafragma.



Figura 3.55 – Colocação dos cabos.

Na figura 3.56 é exposto um exemplar do dispositivo anti-vibratório aplicado em obra, para evitar a oscilação excessiva do cabo de pré-esforço.



Figura 3.56 – Dispositivo anti-vibratório.

3.8 – Passagem Superior - Mangualde

O viaduto localiza-se na auto-estrada A25/IP5 em Mangualde, e consiste numa estrutura em pórtico de betão armado pré-esforçado, a qual veio a ser reforçada devido ao alargamento da auto-estrada (Figura 3.57).

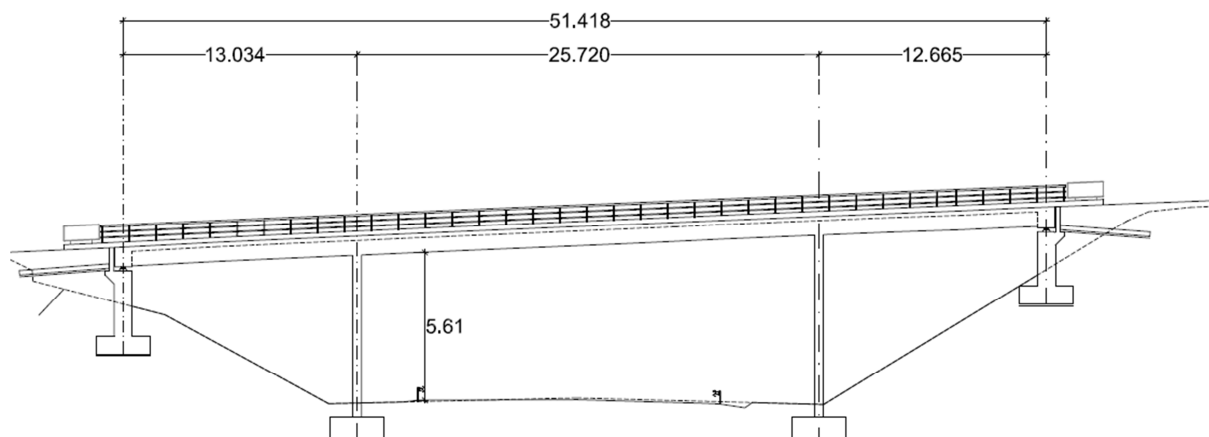


Figura 3.57 – Corte longitudinal do viaduto.

O projecto de reforço foi elaborado pela Estrutovia, que consiste num sistema de pré-esforço exterior aderente com cordões, que é amarrado por intermédio de barras pré-esforçadas.

O sistema em cordões é composto por 4 cabos de 4 cordões de 0,6", cordões nus, e bainha injectada com calda de cimento, ao qual é amarrada a ancoragens do tipo VSL tipo Ec.

A armadura de pré-esforço em barra é composta por 24 barras do tipo Dywidag 360 (1080/1230), bainha injectada com calda de cimento e ancorada com porca e placa de ancoragem. Para colocar as barras foi necessário proceder a carotagem da secção do tabuleiro, que tem um comprimento de 6m.

Na figura 3.58 é apresentada a disposição dos cabos de pré-esforço, como a área transversal de armadura de pré-esforço e a força de puxe a aplicar em cada sistema. Na figura 3.59 é visível a pormenorização das ancoragens das barras.

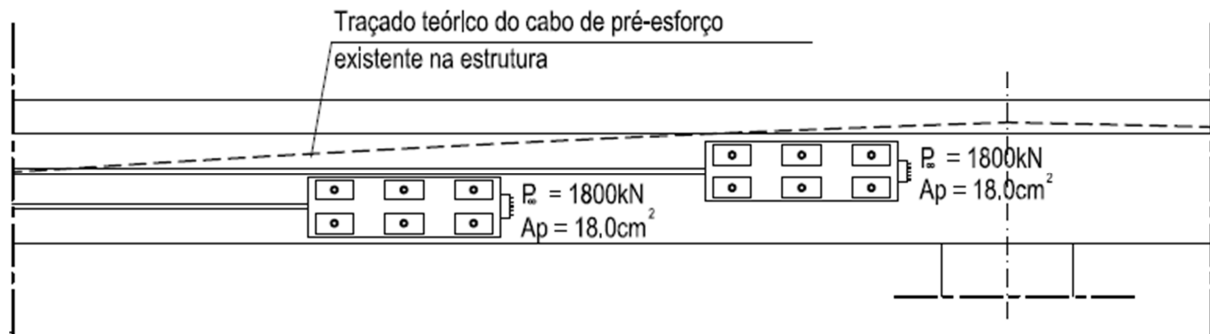


Figura 3.58 – Traçado do cabo de pré-esforço exterior.

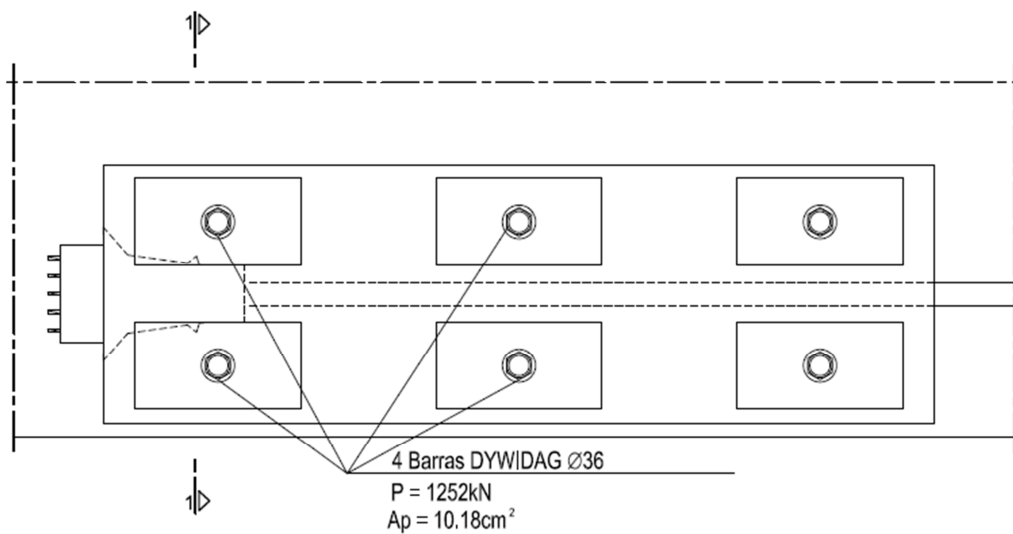


Figura 3.59 – Pormenorização das ancoragens das barras.

Na figura 3.60 é ilustrado o corte transversal da secção do viaduto, onde é possível observar o traçado do sistema de barras, e as armaduras de reforço.

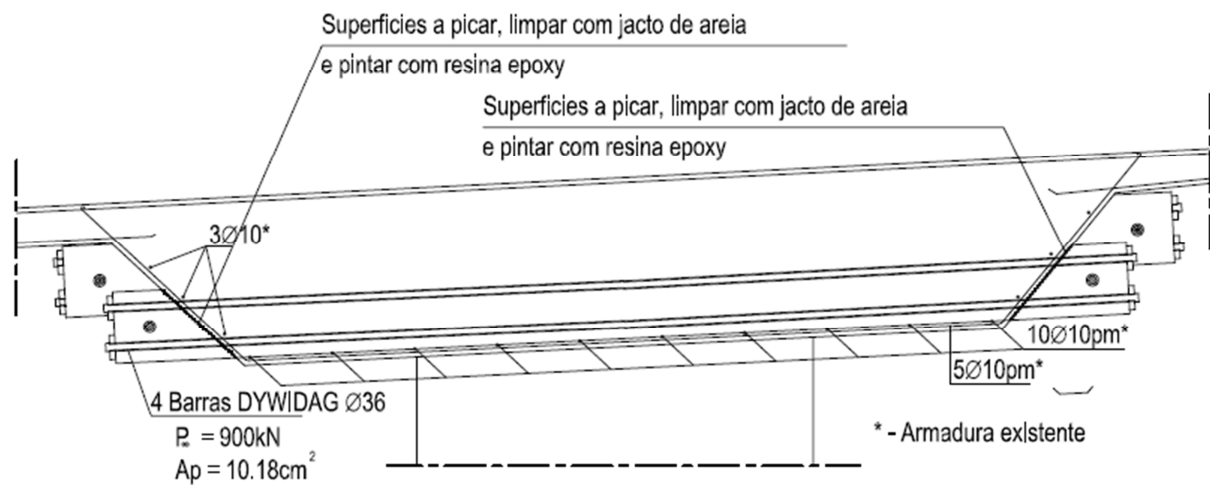


Figura 3.60 – Corte transversal da estrutura.

3.9 - Ponte de Lanheses

A ponte de Lanheses localiza-se sobre o rio Lima em Lanheses, inserida na EN 305. A ponte foi alvo de um processo de reabilitação e reforço estrutural, que teve início em 2006.

A estrutura é constituída em betão armado pré-esforçado, com comprimento total de 1218m, dividido por 41 tramos. O primeiro e o último tramo têm 24m de comprimento e os restantes têm 30m. Segue na figura 3.61 o corte longitudinal de parte da estrutura.

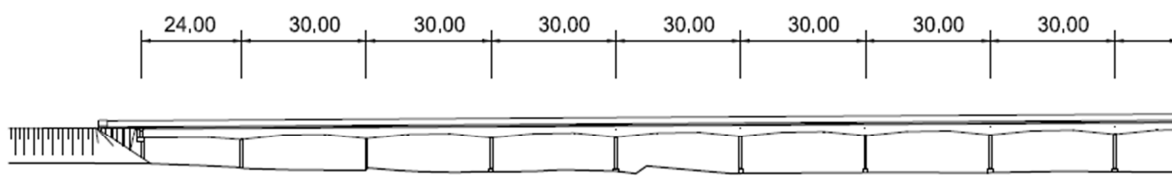


Figura 3.61 – Corte longitudinal.

O projecto de reforço foi da autoria da COBA, que adoptou pré-esforço exterior substituível e retensionável.

Os cabos de pré-esforço exterior são aplicados exclusivamente a cada tramo, ou seja, o cabo é ancorado e tensionado num único tramo, não existindo continuidade com o tramo seguinte. O sistema é muito semelhante aos utilizados em obras anteriores.

O sistema é composto por 4 cabos de 9 cordões de 0,6" autoembainhados com comprimento de 30m, revestidos com bainhas em PEAD e ordenados com centradores, sendo o sistema finalizado com injeção de calda de cimento. As ancoragens utilizadas foram do tipo VSL tipo E (6-12) e os desviadores são pré-fabricados em elementos metálicos. As bainhas são ligadas com recurso a uniões termo-retrácteis e electrossoldáveis.

Na figura 3.62 é observada a prefabricação de um conjunto de elementos que formam o molde para introduzir dentro dos maciços de ancoragem para formar a casting da ancoragem.



Figura 3.62 – Tubos de ancoragem pré-fabricados.

Na figura 3.63 são descritos todos os elementos que constituem a sela de desvio nos vãos da ponte. Em cada vão são colocados dois desviadores simétricos, excepto nos vãos de extremidade, visto que os cabos têm uma trajectória recta, tanto em planta como em corte.

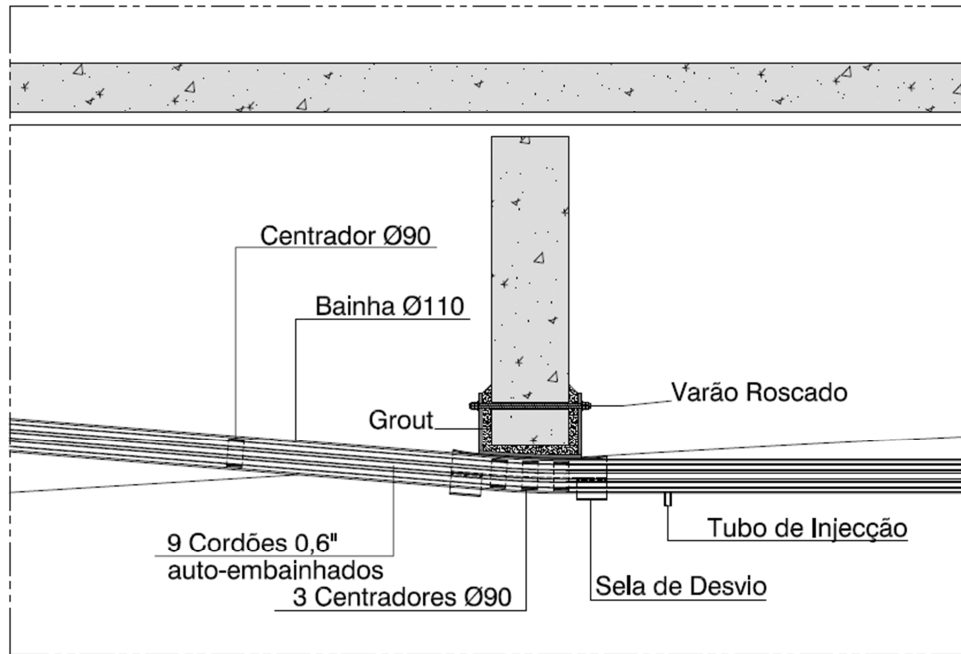


Figura 3.63 – Pormenor da sela de desvio.

Nas seguintes figuras são apresentadas as várias configurações que os cabos vão tendo segundo a sua posição ao longo da estrutura, de modo a garantir o bom funcionamento do sistema.

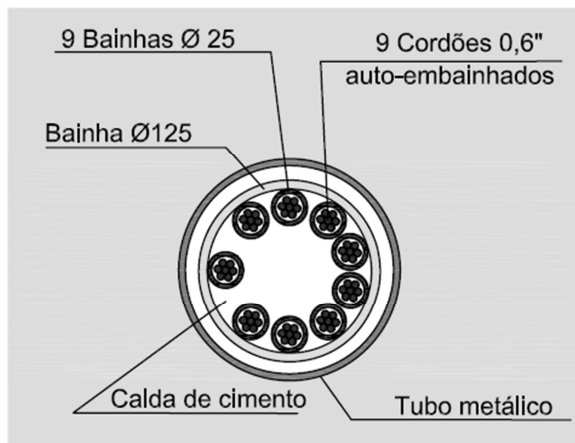


Figura 3.64 – PEAD Ø110 c/ centrador PEAD.

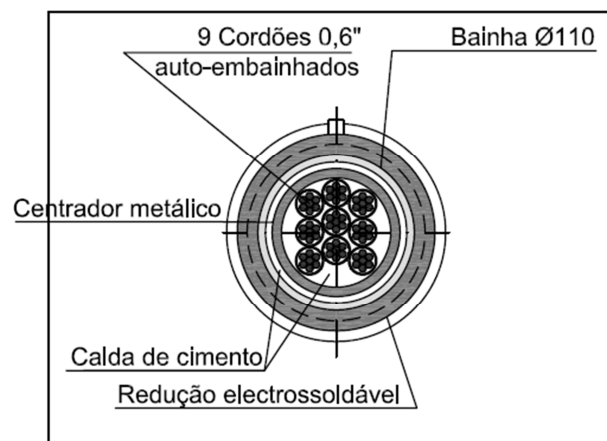


Figura 3.65 -PEAD Ø100 c/ centrador metálico.

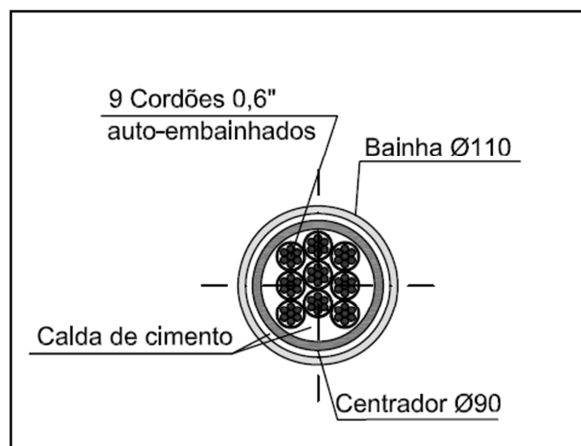


Figura 3.66 – PEAD Ø110 c/ centrador PEAD

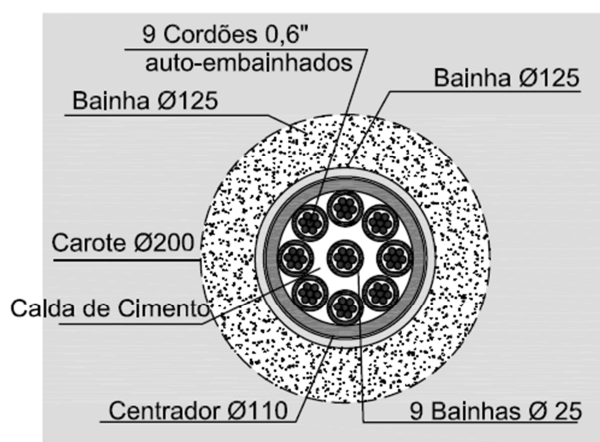


Figura 3.67 – PEAD Ø125 c/ centrador PEAD

3.10 - Ponte da Lezíria



Figura 3.68 – Ponte da Lezíria.

A ponte da Lezíria localiza-se sobre o rio Tejo, inserindo-se na auto-estrada A10, ligando o Carregado a Benavente. A construção desta obra demorou cerca de 23 meses e foi inaugurada a 8 de Julho de 2007 (Figura 3.68). A ponte e os respectivos viadutos de acesso têm uma extensão de cerca de 12 quilómetros, sendo a 9ª ponte mais extensa do mundo. A respectiva estrutura é de carácter rodoviário e possui um perfil de 2x3 vias, e tem uma extensão total de 970m, dividida em vãos parciais de 95 +127+133+ 4 x 130 + 95 m. Tem um único tabuleiro em caixão de betão armado pré-esforçado, de altura variável entre os pilares de transição e a meio vão. O caixão contém consolas laterais que são apoiadas em escoras metálicas que apoiam na laje de fundo do caixão.

A ponte foi projectada pelo Engenheiro Perry da Câmara, o qual implementou um sistema misto de pré-esforço, ou seja, pré-esforço exterior e interior à estrutura.

O sistema de pré-esforço exterior é constituído por 8 cabos de 31 cordões auto-embainhados por secção, injectado com calda de cimento, substituível e retensionável, mais 2 eventuais, com comprimento máximo de 266m. A quantidade de aço utilizado no pré-esforço exterior foi de 314 toneladas.

Este sistema foi elaborado em parceria entre a VSL e a Freyssinet, o qual implicou a utilização de componentes da Freyssinet, tais como as ancoragens 31C15 e o dispositivo de selagem, designado prensa-estopa. Foram utilizadas abraçadeiras mecânicas, devido à facilidade de montagem e aos baixos custos das mesmas. Contudo, junto aos maciços de ancoragem utilizaram-se as tradicionais uniões electrossoldáveis (Figura 3.69 e 3.70).



Figura 3.69 – Abraçadeira mecânica.



Figura 3.70 – União electrossoldável.

Também foram utilizados dispositivos anti-vibratórios ajustáveis (Figura 3.71 e 3.72), devido às diferentes trajectórias dos cabos, tanto em planimetria como em altimetria.

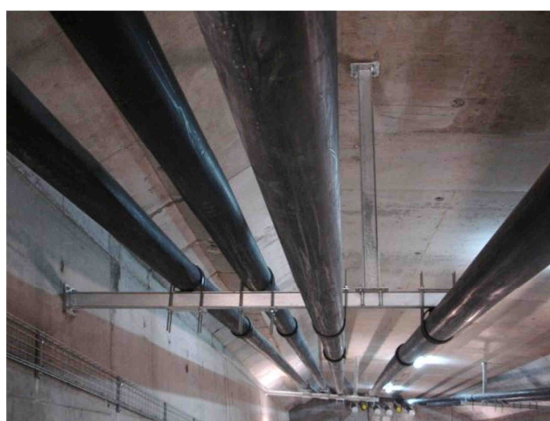


Figura 3.71 e 3.72 – Dispositivo anti-vibratório ajustável.

Finalmente é apresentado nas seguintes figuras o resultado final do pré-esforço exterior na estrutura.



Figura – 3.73 – Ancoragens sobre o pilar.



Figura 3.74 – Trajectória dos cabos entre pilar e o meio vão.



Figura 3.75 – Trajectória dos cabos a meio vão.

As selas de desvio utilizadas foram do tipo universais, ou seja, ajustáveis aos vários ângulos de desvio, ao qual, veio no sentido de responder à exigência do projectista.

3.11 - Ponte sobre o Rio Limpopo

A ponte localiza-se sobre o rio Limpopo em Moçambique, ao qual veio a beneficiar de uma reabilitação e reforço estrutural. A ponte é constituída por uma estrutura em caixão de betão armado pré-esforçado, executada através do sistema de lançamento incremental do tabuleiro.

O pré-esforço exterior dimensionado para reforçar esta estrutura foi projectado pela Lisconcebe, sendo constituído por um sistema aderente, com 4 cabos de 15 cordões nus por secção, injectados com calda de cimento e com 54m de comprimento máximo. As bainhas são em PEAD, e as uniões usadas foram as termo-retráteis e electrossoldáveis.

A utilização deste tipo de sistema teve essencialmente a ver com o impedimento do roubo de componentes do sistema de pré-esforço exterior, preservando a segurança da estrutura e dos utilizadores da mesma.

Na figura 3.76 observa-se a disposição dos cabos como as ancoragens. A figura 3.77 exhibe a união electrossoldável que une as bainhas em PEAD. Também é visível o tensionamento dos cordões por intermédio do macaco hidráulico.



Figura 3.76 – Ancoragens e cabos.



Figura 3.77 – União dos cabos e macaco.

A figura 3.78 apresenta o carro auxiliar, o qual foi utilizado para facilitar as operações de tensionamento dos cabos dentro da secção do tabuleiro.



Figura 3.78 – Auxiliar de levantamento do macaco hidráulico.

3.12 – Viadutos de Alviela, Alcaidaria e Cabanos



Figura 3.79 – Pré-esforço exterior no capitel devido a ampliação estrutural.

Os viadutos apresentados inserem-se na auto-estrada A1. O reforço destes viadutos deve-se ao alargamento da auto-estrada, o qual foi necessário adaptar as estruturas às novas exigências, reforçando os pilares e os respectivos capitéis (Figura 3.79). O projecto de reforço foi da autoria do Engenheiro Câncio Martins.

Para solucionar este problema foi adoptado um sistema de pré-esforço misto. Ou seja, parte dos cabos encontram-se exteriores à estrutura e outra parte dos cabos interiores à mesma, sendo que os últimos comportam um desvio de 180 graus em planta. O sistema referido vem na mesma óptica dos anteriormente utilizados em Portugal. É um sistema composto por 4 cabos de 12 cordões por capitel, em cordões auto-embainhados, injectado com calda, substituível e retensionável.

Nesta obra foi necessário desenvolver uma peça metálica que funciona como ancoragem. Ou seja, suporte e transmite as forças de tensionamento à estrutura e que tivesse em conta o desvio dos cabos. As referidas peças são amarradas à estrutura por intermédio de barras pré-esforçadas. O presente sistema é apresentado nas figuras 3.80 e 3.81.



Figura 3.80 – Aparelho de ancoragem exterior.



Figura 3.81 – Aparelho de ancoragem interior.

Foi introduzido um tubo em PVC tipo “AIR FLEX” como molde perdido, de modo a fazer o desvio dos cabos no interior do capitel. Os cabos de pré-esforço foram ligados entre si com uniões electrossoldáveis e termo-retrácteis (Figura 3.82).

Junto ao acrescento de capitel, foram colocadas janelas telescópicas, de modo a facilitar as operações de enfiamento dos cordões dentro das bainhas, tornando a operação mais rápida e eficiente (figura 3.83).

Esta obra foi a primeira em que houve a necessidade de substituir um cordão devido à rotura do mesmo.



Figura 3.82 – Uniões electrossoldáveis.



Figura 3.83 – Janelas telescópicas.

3.13 – Ponte sobre o Rio Leça

A ponte localiza-se sobre o Rio Leça e encontra-se inserida na auto-estrada A3, que liga o Porto a Valença. A ponte é constituída por uma estrutura em betão armado pré-esforçado. Esta ponte foi alvo de obras de reparação e reforço, ao qual o projecto de reforço é da autoria do Engenheiro Armando Rito.

O sistema de pré-esforço exterior adoptado é constituído por cordões auto-embainhados, injectado com calda de cimento, substituível e retensionável. Contém 4 cabos de 12 cordões por secção com comprimento máximo de 68m.

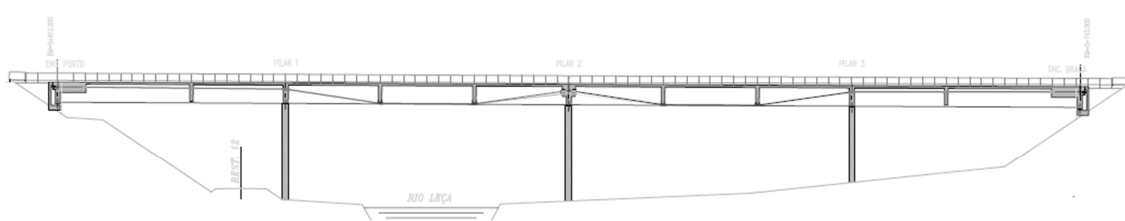


Figura 3.84 – Corte longitudinal da ponte.

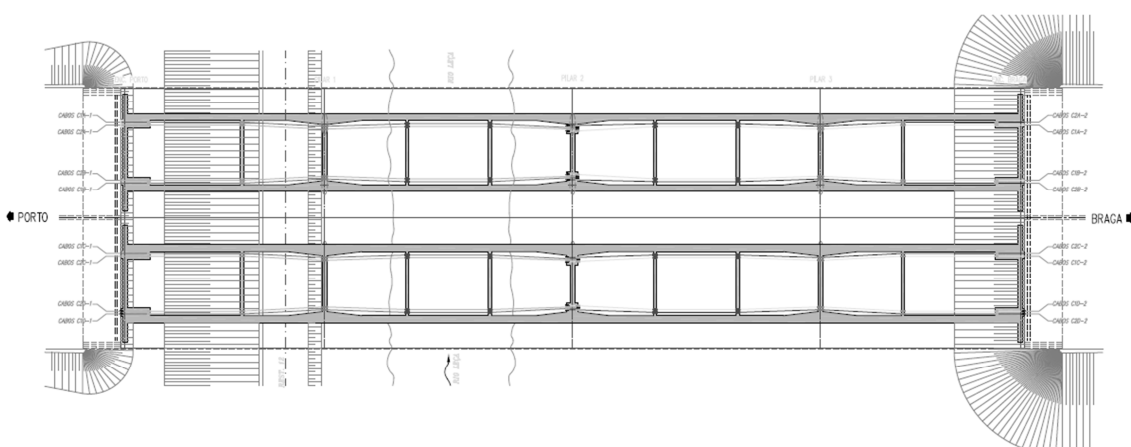


Figura 3.85 – Planta da ponte.

Na figura 3.84 e 3.85 é possível observar o traçado dos cabos de pré-esforço exterior, tanto em planta como em corte.

Foi necessária a criação de maciços de ancoragem junto aos encontros e nos apoios centrais, onde são instaladas as ancoragens passivas e activas respectivamente (Figura 3.84 e 3.85). As ancoragens utilizadas foram da VSL tipo Ec (6-19).



Figura 3.86 – Maciço junto ao encontro.



Figura 3.87 – Maciço sobre o pilar central.

As selas de desvio são idênticas às utilizadas na Ponte Edgar Cardoso, ou seja, desviadores metálicos pré-fabricados que depois em obras são acopladas à estrutura através de varões roscados. Contudo, nesta obra as selas de desvio tinham que comportar desvios altimétricos e planimétricos (figura 3.88 e 3.89).



Figura 3.88 – Vista lateral da sela de desvio.



Figura 3.89 – Vista frontal da sela de desvio.

As ligações entre os cabos de pré-esforço exterior foram executadas com recurso a uniões termo-retrácteis e electrossoldáveis, o qual foram deixadas janelas telescópicas ao longo do cabo.

O tensionamento dos cabos é efectuado após a conclusão do tensionamento das barras e será efectuado em 5 fases. Em cada fase é realizada uma sequência de 8 tensionamentos, por forma a atingir 20% da força proposta.

Por fim é apresentado na figura 3.90 o aspecto final da obra com o respectivo sistema de pré-esforço exterior.



Figura 3.90 – Aspecto final do reforço.

3.14 – Ponte sobre o Rio Dão



Figura 3.91 – Ponte sobre o Rio Dão.

A ponte sobre o rio Dão é constituída por uma estrutura em betão armado pré-esforçado em caixão de altura variável. Foi projectada pelo Engenheiro Perry da Câmara, ao qual iria servir de modelo inicial para o projecto da Ponte da Lezíria. Mas tal feito não foi possível, sendo a ponte das Lezírias primeiramente construída.

A presente ponte baseia-se no mesmo principio de pré-esforço que adoptado na ponte da Lezíria, divergindo unicamente na sua dimensão. O sistema utilizado de pré-esforço exterior foi em cordões

auto-embainhados, injectados com calda de cimento, substituíveis e retensionáveis. Utilizou 2 cabos de 7 cordões com 130m de comprimento.

As ancoragens usadas foram do tipo VSL tipo E (6-22) e as selas de desvio são constituídas por tubos metálicos pré-fabricados, inseridos dentro da carote da aduela e posteriormente preenchido com grout.



Figura 3.92 – Interior do caixão.

3.15 – Ponte de Mosteirô



Figura 3.93 – Ponte de Mosteirô.

A ponte de Mosteirô é uma das mais bonitas pontes construídas em Portugal, cruza o rio Douro e faz a ligação entre as localidades de Cinfães e Mosteirô. A ponte foi projectada pelo Engenheiro Edgar Cardoso, que adoptou um sistema estrutural completamente inovador para a altura. Consistia numa estrutura treliçada elaborada com elementos de betão armado esbeltos. A ponte tem um

desenvolvimento total de 194m. Foi necessário reparar e reforçar a estrutura devido a insuficiências estruturais e ajustá-la às novas exigências regulamentares. O projecto de reforço da estrutura foi da autoria da empresa COBA.

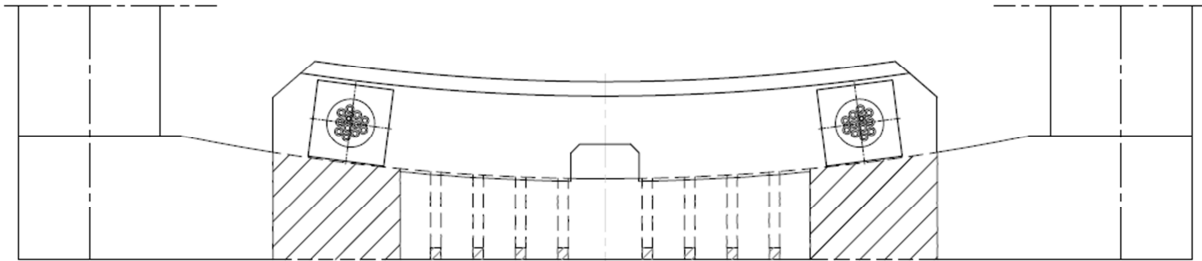


Figura 3.94 – Berço da laje de fundo.

Os traçados finais dos cabos de pré-esforço exterior são apresentados nas figuras 3.95 e 3.96. Também são apresentados os maciços de ancoragem.

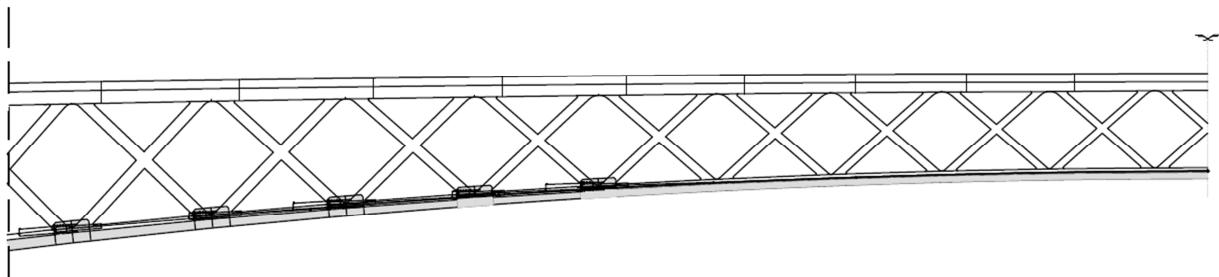


Figura 3.95 – Corte longitudinal da ponte.

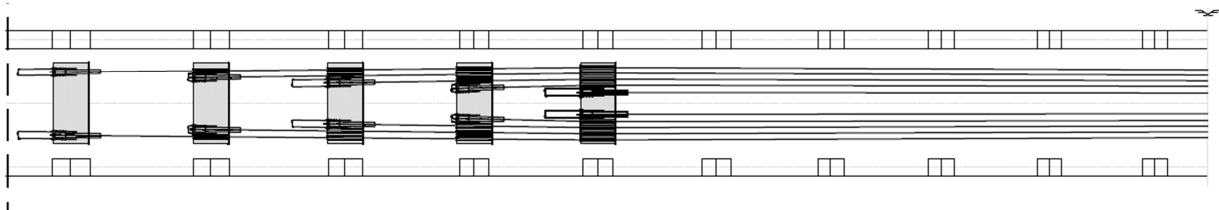


Figura 3.96 – Planta da ponte.

O sistema de pré-esforço exterior é constituído com cordões auto-embainhados, injectados com calda de cimento, substituível e retensionável, composto por 10 cabos de 9 cordões com comprimento variável, dependendo do local de ancoragem. Os cabos foram pintados de branco, de modo a enquadrar com a estética da estrutura. As ancoragens utilizadas nesta obra foram ancoragens da VSL tipo E (6-12). As bainhas foram ligadas pelas tradicionais uniões neste tipo de acções. Os desviadores consistem em tubos metálicos pré-fabricados com os devidas curvaturas a instalar em obra, mais concretamente nos maciços construídos para o efeito.

Capítulo 4

4 – Reforço de Laje Fungiforme com Pré-Esforço Exterior

4.1 – Introdução

Neste capítulo é apresentado o dimensionamento do reforço de uma laje fungiforme aligeirada com blocos de aligeiramento em betão leve do 1º piso de um edifício habitacional (Figura 4.1). A técnica adoptada para reforçar a estrutura foi pré-esforço exterior, que permite a recuperação de parte da deformada instalada na laje, e estabilização da mesma, de modo que a estrutura volte a funcionar em boas condições de utilização.

A organização do presente capítulo é composto inicialmente pela Inspeção Visual preliminar, o qual pretende avaliar as condições de aplicação do pré-esforço exterior em obra. Tais como, os revestimentos, tectos falsos que se encontra sob a laje e outros obstáculos. De modo a ter em conta na realização do ante-projecto, para que o pré-esforço exterior não interfira com os referidos obstáculos.

No ante-projecto foi realizado o pré-dimensionamento do pré-esforço exterior, no qual foram combinados diferentes materiais e traçados, de forma a obter a combinação de material e traçado que tenha a maior eficiência teórica face ao problema exposto. A análise das várias combinações referidas foi realizada através de um modelo numérico, de forma avaliar as deformadas elásticas antes e pós reforço.



Figura 4.1 – Laje de estudo.

De seguida foi elaborado o projecto de reforço, que tem em conta os resultados da análise efectuada no ante-projecto, e os dados obtidos da inspecção visual integral, onde são apresentados os obstáculos sob a laje. Também são apresentados os traçados finais de pré-esforço exterior, e as respectivas forças devidas ao pré-esforço, de forma a introduzir posteriormente no modelo numérico e determinar as deformadas elásticas teóricas, antes e pós reforço.

São apresentados todos os cálculos de verificação de segurança de acordo com os regulamentos específicos.

Por último é apresentado o acompanhamento da obra, onde são apresentados as principais fases do processo construtivo da técnica estudada. Neste ponto é obtida a deformada real pós reforço.

4.2 – Inspeção Preliminar

Foi realizada uma inspecção preliminar à estrutura de modo a analisá-la genericamente face às suas condicionantes. Verificou-se que existiam presentemente na estrutura os seguintes condicionalismos, tubagens, tectos falsos, paredes divisórias, instalações eléctricas e passagem de veículos sob a laje. Foram feitas fotografias dos referidos obstáculos, estando estes disponíveis no anexo 2.

4.3 – Ante – Projecto

4.3.1 – Cordões

A utilização de cordões de aço de alta resistência no pré-esforço exterior permite elaborar várias configurações de traçados, de modo a ajustar-se aos diversos condicionalismos encontrados em obra. O pré-esforço exterior com cordões permite também a inspecção, substituição e o retensionamento dos mesmos durante o tempo de vida útil do sistema.

Os traçados analisados com cordões foram trapezoidais e triangulares. O cordão utilizado tem um diâmetro de 0,6", com área nominal de 150mm^2 e com tensão de rotura de 1860 MPa. A força de pré-esforço a longo prazo considerada é de 110,7 kN/cordão, ou seja, 50% da força última prevista pelo EC2. A adopção de metade da resistência do cordão deve-se ao facto, de no futuro existir a possibilidade de retensionar os cordões, deixando assim, parte da capacidade resistente do cordão.

No cálculo das forças devidas ao pré-esforço, foram tomados os seguintes valores (Figura 4.2):

- $h=0,30\text{m}$.
- $e=0,15\text{m}$.
- $\alpha = \text{tg}\alpha$

A determinação de $\text{tg}\alpha$ é efectuada da seguinte forma,

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{h}{l_i} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

em que,

h - Distância entre a ancoragem e a face inferior da sela de desvio [m]

l_i – Comprimento entre a ancoragem e a sela de desvio [m]

e - Excentricidade do cordão ao centro de gravidade da laje nas zonas das ancoragens [m]

Obtida a força de puxe e a respectiva $\text{tg}\alpha$ para cada traçado, ao multiplicar ambos os termos, obtêm-se a força vertical instalada na sela de desvio.

Note-se que a força de puxe instalada na ancoragem encontra-se excêntrica ao centro de gravidade da laje, o que origina um momento concentrado nessa zona. O momento é dado por,

$$M = P \cdot e \quad (\text{Eq. 4.2})$$

em que,

M – Momento flector concentrado [kN.m]

P – Força de puxe [kN]

e - Excentricidade do cordão ao centro de gravidade da laje nas zonas das ancoragens [m]

Nas figuras 4.2 e 4.3 são ilustrados os traçados estudados, para uma melhor compreensão das acções devidas ao pré-esforço aplicadas na estrutura em causa. Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os cálculos das forças devidas ao pré-esforço para cada traçado estudado.

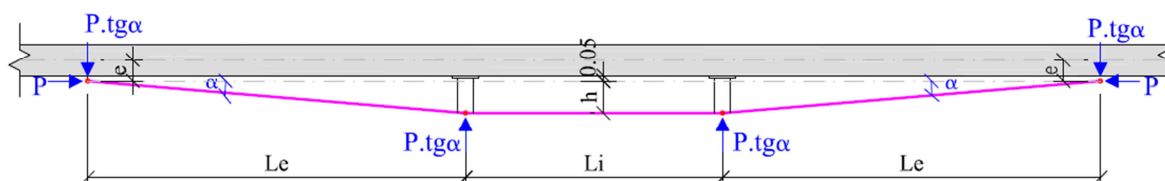


Figura 4.2 – Esquema do traçado 1 e 2 e representação das forças devidas ao pré-esforço.

Tabela 4.1 – Cálculo de forças devidas ao pré-esforço do traçado 1 e 2.

Traçado	Le (m)	Li (m)	tg α	P.tg α (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
1	3,60	2,45	0,0835	9,25	110,70	16,61
2	2,80	4,05	0,1076	11,91	110,70	16,61

onde,

h – Dimensão entre a ancoragem e a face inferior da sela de desvio [m]

Le – Comprimento entre a ancoragem e a sela de desvio [m]

Li – Distância entre as duas selas de desvio [m]

e - Excentricidade do cordão ao centro de gravidade da laje nas zonas das ancoragens [m]

α - Ângulo entre a horizontal e o cabo [rad]

P – força de puxe [kN]

P.tg α - Força vertical devida ao traçado de pré-esforço [kN]

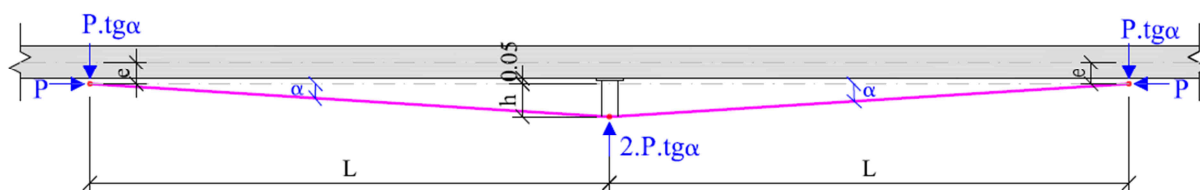


Figura 4.3 – Esquema do traçado 3 e representação das forças devidas ao pré-esforço.

Tabela 4.2 – Cálculo das forças de pré-esforço do traçado 3.

Traçado	L (m)	tg α	P.tg α (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
3	4,83	0,0622	13,77	110,70	16,61

em que,

h – Dimensão entre a ancoragem e a face inferior da sela de desvio [m]

L – Comprimento entre a ancoragem e a sela de desvio [m]

e - Excentricidade do cordão ao centro de gravidade da laje nas zonas das ancoragens [m]

α - Ângulo entre a horizontal e o cordão [rad]

P – força de puxe [kN]

2.P.tg α - Força vertical devida ao traçado de pré-esforço [kN]

P.e – Momento devido há excentricidade da força face ao centro de gravidade da laje [kN.m]

4.3.2 – Barras

O pré-esforço exterior com barras é específico para determinado tipo de obras, devido às especificidades do próprio material e às condições de aplicação em obra. As vantagens deste sistema são semelhantes ao sistema com cordões, excepto que este necessita de um plano de tensionamento faseado, o que implica um aumento de tempo e de custos.

4.3.3 – Fibras

A solução de reforço da laje com fibras pré-esforçadas é uma solução ligeira, fácil e de rápida aplicação e pouco evasiva. Contudo, as suas maiores desvantagens são os custos e a baixa eficiência do pré-esforço, visto que as fibras são coladas por intermédio de resina epoxídicas à face inferior da laje e ancoradas nas extremidades do vão, originando assim um momento concentrado na zona das ancoragens devido à excentricidade da força de puxe em relação ao centro de gravidade da laje. O momento concentrado é dado por,

$$M = P \cdot e \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Segue na figura 4.4 o traçado e as respectivas forças equivalentes aos efeitos do pré-esforço. Essas forças são transmitidas à estrutura por intermédio das ancoragens. Na tabela 4.3 encontram-se os cálculos das forças devidas ao pré-esforço,



Figura 4.4 – Esquema do traçado 4 e representação das forças devidas ao pré-esforço.

Os laminados utilizados no cálculo das forças devidas ao pré-esforço foram do tipo “S&P Laminates CFK – 200/2000”. (S&P)

Tabela 4.3 – Cálculo das forças de pré-esforço do traçado 4.

TRAÇADO	Força de tracção a 0,8% de extensão	P (kN)	e (m)	P.e (kN.m)
4	277,20	277,20	0,18	50,17

4.3.4 – Cargas

As cargas consideradas no presente projecto são:

Acções Permanentes

- Peso específico do betão armado:

$$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$$

- Características da laje

A laje em causa a reforçar é uma laje fungiforme aligeirada com blocos de aligeiramento em betão leve, com uma espessura de 30cm e o betão utilizado é o C20/25. A largura entre nervuras é de 90cm, e entre pilares existe bandas maciças em betão armado. A posição dos blocos de aligeiramento e das bandas são indicados no anexo 3.

- Peso próprio das paredes interiores

Foi considerada uma parede de 2,70m de altura, constituída por um pano de 15cm com tijolo furado de 11cm de largura e revestida com argamassa de reboco:

$$P_{\text{paredes interiores}} = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

- Revestimentos

Foi adoptado um revestimento de:

$$REV = 1,50 \text{ kN/m}^2$$

Acções Variáveis

- Sobrecarga

A sobrecarga destinada a funções de habitação ou quartos de hotel é a categoria A. Segundo o EC1, define que:

$$Q = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

Os respectivos coeficientes para as dadas combinações de acções são:

$$\varphi_0 = 0,7$$

$$\varphi_1 = 0,5$$

$$\varphi_2 = 0,3$$

4.3.6 – Modelo Numérico

O modelo estrutural considerado foi calculado através do programa de elementos finitos SAP2000 V14, o qual é apresentado na figura 4.5.

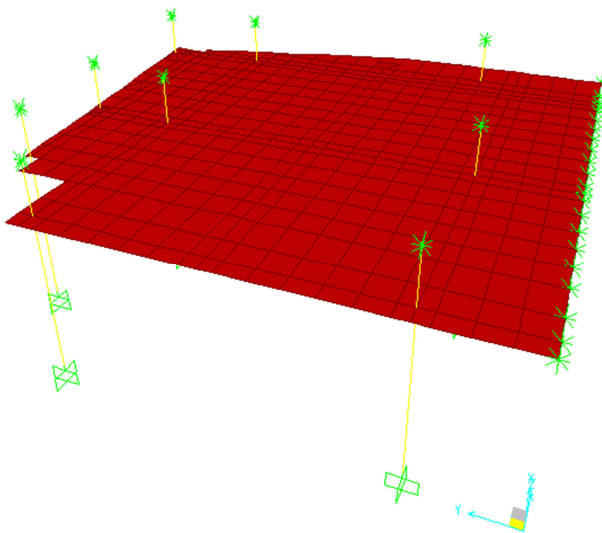


Figura 4.5 – Modelo numérico.

Considerações:

- Os pilares são constituídos em betão armado C20/25 e têm de secção transversal 1,00mx0,30m. Foram utilizados elementos finitos do tipo barra para simular os pilares no programa de cálculo automático.
- A espessura da laje é de 0,30m. As características mecânicas foram calculadas de acordo com as características referidas no ponto anterior relativamente à laje. O elemento finito utilizado foi do tipo thick (Elemento finito de área tipo shell). A atribuição de características dos elementos finitos seguiu o projecto constante no anexo 3, de forma a diferenciar a zona maciça da aligeirada.
- A base dos pilares são encastrados e o topo dos mesmos são apoiados em apoios simples deslizantes, segundo Z.
- O corte na laje é feito segundo o pressuposto que a mesma encontra-se a meio vão, sendo assim possível, utilizar as condições de simetria da estrutura. Utilizaram-se encastramentos deslizantes segundo Z para simular essa particularidade da estrutura.
- Na laje foi considerado betão C20/25 e aço A400NR.

4.3.7 – Combinação de Acções

A combinação de acções considerada foi a combinação quase permanente, de acordo com o EC0, de modo avaliar as deformações elásticas da estrutura.

- Estado Limite de Utilização,

$$\sum_{j>1} G_{k,j} + "P" + \sum_{i>1} \varphi_{2,i} Q_{k,i} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde,

$G_{k,j}$ – Valor característico da acção permanente.

P – Valor representativo de uma acção de pré-esforço.

$Q_{k,i}$ – Valor característico da acção variável.

4.3.8 – Resultados

Na tabela 4.4 apresentam-se as flechas máximas teóricas obtidas através de uma análise elástica aos vários traçados analisados e a situação da maior diferença entre as deformadas.

Na coluna Situação Inicial é indicada a deformada elástica máxima em condições normais de serviço ou nas condições em que a referida estrutura se encontra actualmente. Nas colunas Traçado1 a Traçado4 é avaliada a recuperação de deformada elástica, de acordo com os traçados descritos anteriormente.

Na coluna Elevação é apresentada a subtracção da deformada elástica do sistema indicado com a Situação Inicial, deste modo é possível avaliar a recuperação de flecha da estrutura.

Tabela 4.4 – Resultados de flechas elásticas.

Situação inicial (mm)	Traçado1	Traçado2	Traçado3	Traçado4	Elevação (mm)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
8,3					-
	3,5				4,8
		3,5			4,8
			4,1		4,2
				5,7	2,5
8,2					-
	3,4				4,8
		3,4			4,9
			4		4,3
				5,6	2,6

4.3.9 – Conclusão

Segundo os resultados obtidos, verifica-se que os traçados mais eficientes são o traçado 1 e 2. O traçado 3 pode ser utilizado dadas as circunstâncias em obra, devido aos obstáculos a contornar. Os traçados 1 a 3 são materializados por monocordões de aço de elevada resistência. Verificou-se que o traçado 4, o qual corresponde ao pré-esforço exterior com fibras de carbono, não é o mais eficiente para solucionar o problema apresentado, visto que a flecha recuperada é menor que a dos outros traçados. Tal resultado deve-se ao facto das fibras serem aplicados junto à face inferior da laje, o que resulta uma pequena excentricidade, e conseqüente um momento flector que é aplicado na extremidade do vão condicionante da laje. Logo, é de esperar que esta solução, para elementos de grande dimensão, tenha pouco efeito.

Os desenhos relativamente a esta etapa do projecto são apresentados no anexo 3.

4.4 – Inspeção Integral

A inspeção teve como objectivo principal observar as condicionantes que se encontravam por detrás dos tectos falsos, para posteriormente analisar a viabilidade de aplicação dos cabos. Devido às trajectórias dos cabos poderem colidir com os respectivos elementos que se encontram por debaixo da estrutura a reforçar. Segue no anexo 4, os dados obtidos.

Nesta fase foi efectuado o levantamento topográfico das tubagens instaladas por debaixo da laje pelo encarregado do empreiteiro geral, o qual foi prontamente fornecido.

4.5 – Projecto de Reforço Estrutural

4.5.1 – Descrição Geral

O projecto de reforço baseia-se nos dados apurados no ante-projecto, apresentados no sub-capítulo anterior, onde se conclui que o traçado 2, é aquele que proporciona a maior recuperação de deformada teórica.

Com base nos dados da inspeção integral realizada à estrutura, é elaborado o levantamento dos elementos que se encontram sob a laje, de modo a analisar se o traçado determinado no ante-projecto tem viabilidade.

Em seguimento da anterior análise, são decididos os traçados a adoptar, como a criação de variantes dos traçados anteriormente estudados. Neste ponto também são apresentados os cálculos das forças devidas ao pré-esforço para cada cabo. Cada cabo encontra-se numerado de acordo com o traçado e comprimento.

A determinação das forças de pré-esforço devidas aos novos traçados são objecto de outra análise numérica, onde são elaborados os cálculos das deformadas na situação actual e da situação pós reforço, onde estima-se a recuperação de flecha. É verificada a segurança face aos estados limites últimos na estrutura, sendo apresentados os diagramas de momentos flectores.

4.5.2 – Pré-esforço Exterior em Cabos

A força de pré-esforço a longo prazo é de 110 kN/cordão, o que corresponde a 50% da força última prevista pela EC2. Havendo a possibilidade de eventuais retensionamentos dos cordões ao longo do tempo de vida útil da estrutura. Na figura 4.2 é apresentado o traçado dos cabos indicados na tabela 4.5, onde se encontram as forças devidas ao pré-esforço calculadas.

Tabela 4.5 – Forças devidas ao pré-esforço.

Cabo	Le (m)	Li (m)	α (rad)	$\text{tg}\alpha$	P.tg α (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
Cd.2.4/2.5/3.1/3.4	3,60	2,45	0,0833	0,0835	9,25	110,70	16,61
Cd. 1.1/1.2/1.3 e Cd.2.1/2.7/2.8/2.9	2,80	4,05	0,1071	0,1076	11,91	110,70	16,61

A variante de traçado com uma sela de desvio é um caso genérico para traçados triangulares. Face à assimetria do traçado surgem os ângulos β e α , que têm em conta a variação angular de cada segmento do traçado.

Na figura 4.6 é apresentado o traçado mencionado. Na tabela 4.6 são determinadas as forças devidas ao pré-esforço correspondentes com a figura anteriormente referida.

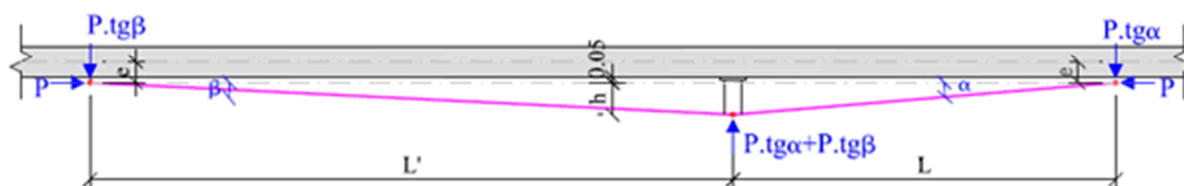


Figura 4.6 – Esquema da variante de traçado com uma sela de desvio.

Tabela 4.6 – Forças devidas ao pré-esforço dos cabos 3.3 e 2.6

Cabo	L(m)	L'(m)	tgα	tgβ	P.(tgβ+tgα) (kN)	P.tgα (kN)	P.tgβ (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
Cd.3.3 e Cd.2.6	3,60	6,05	0,0835	0,0496	14,74	9,25	5,49	110,70	16,61

Na tabela 4.7 são indicadas as forças devidas ao pré-esforço para os cabos indicados na mesma, sendo que o traçado correspondente encontra-se ilustrado na figura 4.3. Este traçado é uma situação especial do traçado anterior. A sela de desvio ao ser aplicada a meio vão, a distribuição de cargas é repartida de igual quantidade para as ancoragens.

Tabela 4.7 – Forças devidas ao pré-esforço para os cabos indicados.

Cabo	L (m)	tgα	2.P.tgα (kN)	P.tgα (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
Cd.2.2/2.3 e Cd.3.2	4,83	0,0622	13,77	6,88	110,70	16,61

Nos cabos referidos na tabela 4.8 foram adoptados traçados particulares, de modo a ajustarem-se às condicionantes existentes sob a laje. O princípio de cálculo é semelhante ao traçado mencionado nos casos trapezoidais. No entanto, a diferença principal consiste na distância dos vãos serem diferentes em todos eles. Na figura 4.7 é apresentado o traçado com as respectivas variáveis. Na tabela 4.8 são apresentadas as forças devidas ao pré-esforço.

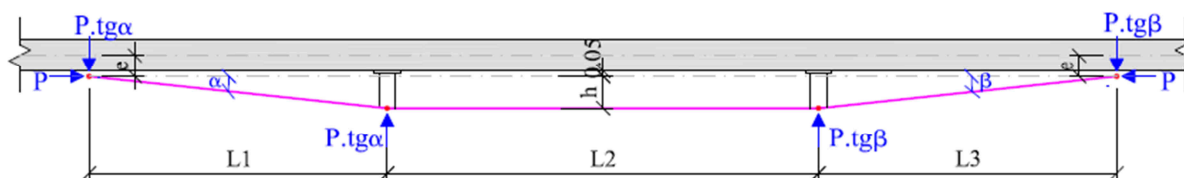


Figura 4.7 – Esquema de variante com duas selas de desvio.

Tabela 4.8 – Forças devidas ao pré-esforço para os cabos indicados.

Cabo	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	tgα	tgβ	P. Tgα (kN)	P. Tgβ (kN)	P (kN)	P.e (kN.m)
Cd.2.10 / Cd.4.1	2,80	3,25	3,60	0,1076	0,0835	11,90	9,25	110,70	16,61
Cd.4.2 / 4.3	2,20	3,25	2,10	0,1372	0,1438	15,19	15,92	110,70	16,61

4.5.3 – Verificação dos Estados Limites

4.5.3.1 – Estado Limite de Utilização

Posteriormente ao cálculo das forças devidas ao pré-esforço para os vários traçados adoptados, realizou-se uma nova análise elástica, para estimar a deformada pós reforço e compará-la com a deformada antes do reforço, e posteriormente com a obtida em obra. A referida análise foi executada no programa de cálculo automático (SAP2000). A combinação de acção utilizada foi a combinação quase permanente de acordo com os critérios expostos pelo EC0.

Verificou-se que na primeira metade da laje, a meio vão, é estimada uma flecha máxima de 8,3mm. Após implementado o pré-esforço exterior, é possível estimar uma recuperação cerca de 4,5mm da maior flecha instalada. Estes dados estão evidenciados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Deformada antes e pós reforço.

Di	Df	Elevação
(mm)	(mm)	(mm)
8,3	3,8	4,5

em que,

Di – Estimativa da deformada antes do reforço.

Df – Estimativa da deformada pós reforço.

Dada a alteração de alguns traçados, face à proposta no ante-projecto, é normal que a flecha recuperada seja inferior. Contudo, após a implementação dos traçados finais de pré-esforço exterior foi possível estimar uma recuperação de flecha muito próxima da inicialmente prevista no ante-projecto.

4.5.3.2 – Estado Limite Último

A verificação ao estado limite último consiste na avaliação do estado de tensão instalado na laje face as cargas transitórias ou persistentes. Tais cargas são avaliadas segundo a combinação fundamental de variável de base sobrecarga.

Após a determinação dos momentos nas direcções x e y, verificou-se que a aplicação desta técnica não introduz cargas adicionais à estrutura, visto ser um sistema isostático. Contudo, foi possível

verificar que também existe uma redução de momentos flectores positivos devido a uma redistribuição de esforços.

A existência de selas de desvio muito solicitadas a meio vão poderia inverter o diagrama de momentos flectores, o qual não é aceitável dada a concepção inicial da estrutura de resistir a esforços de momentos positivos. No entanto, devido às baixas cargas de pré-esforço instaladas na estrutura, não existe agravamento dos diagramas de momentos flector, como é possível verificar nas figuras 4.8 a 4.11. Ao não existir um agravamento dos momentos flectores, é verificado desta forma, o estado limite último.

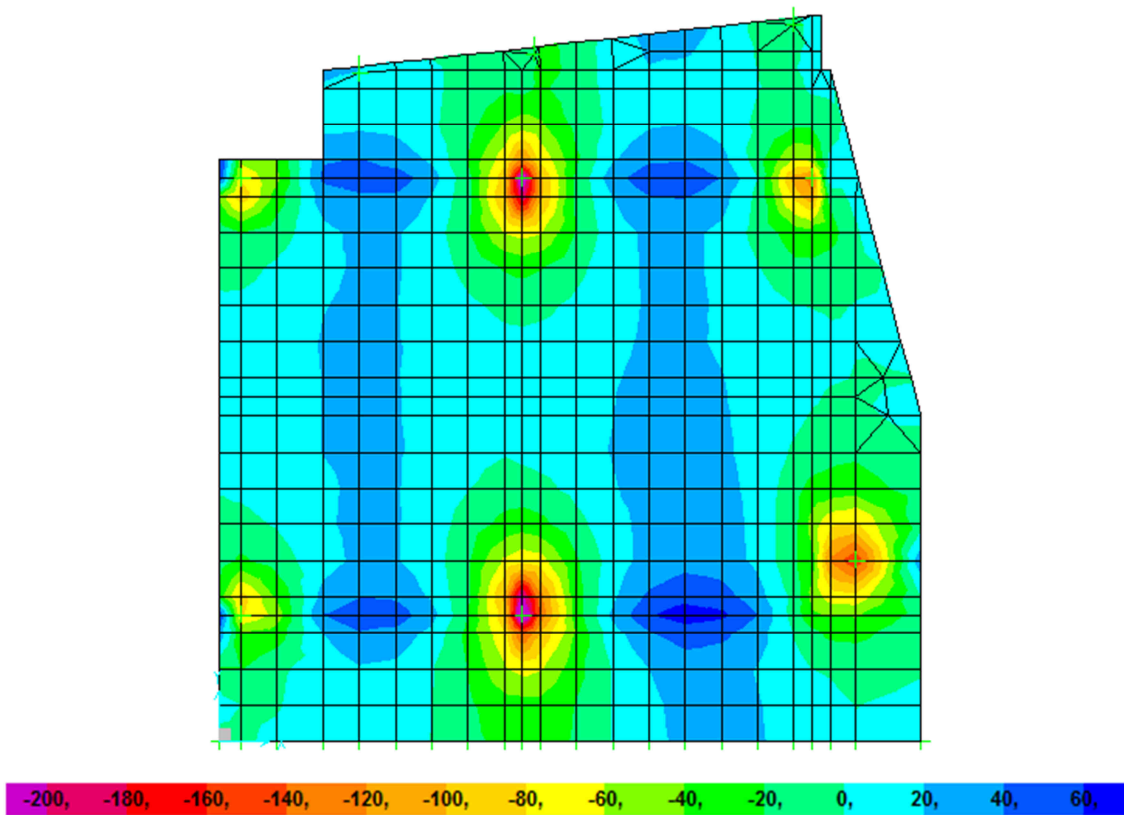


Figura 4.8 – Momentos segundo x antes do reforço (kN.m)

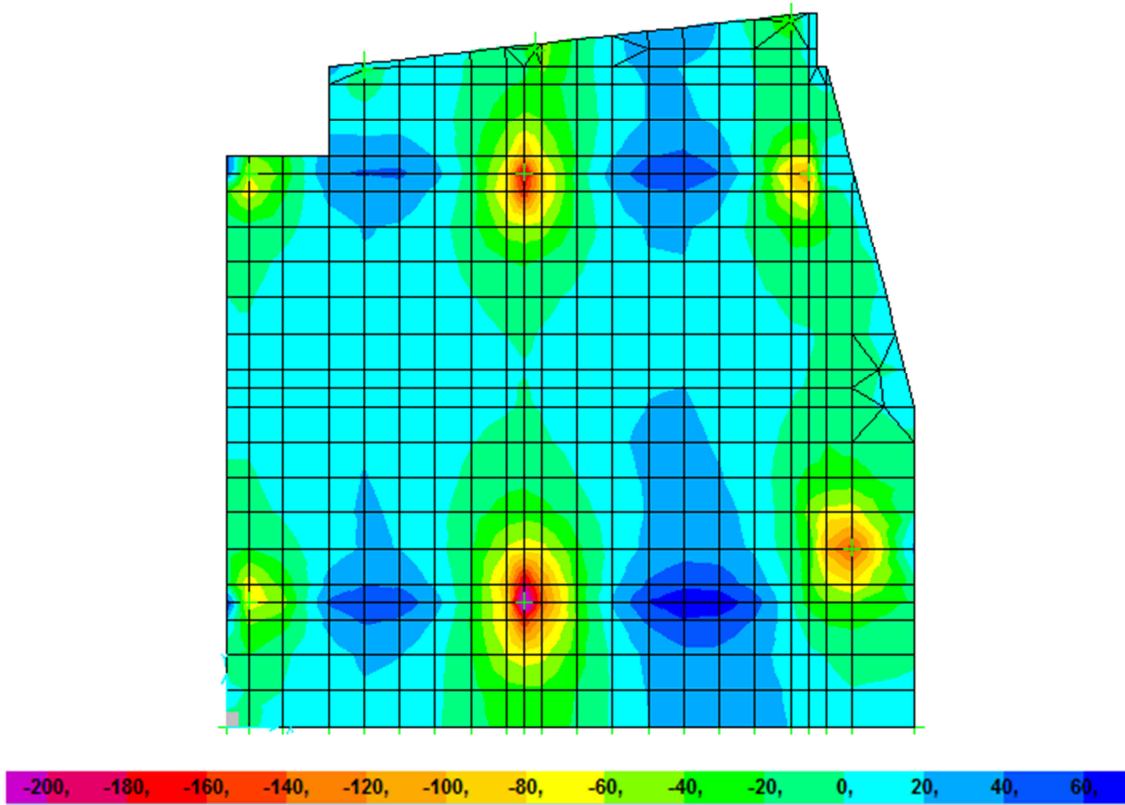


Figura 4.9 – Momentos segundo x pós reforço (kN.m).

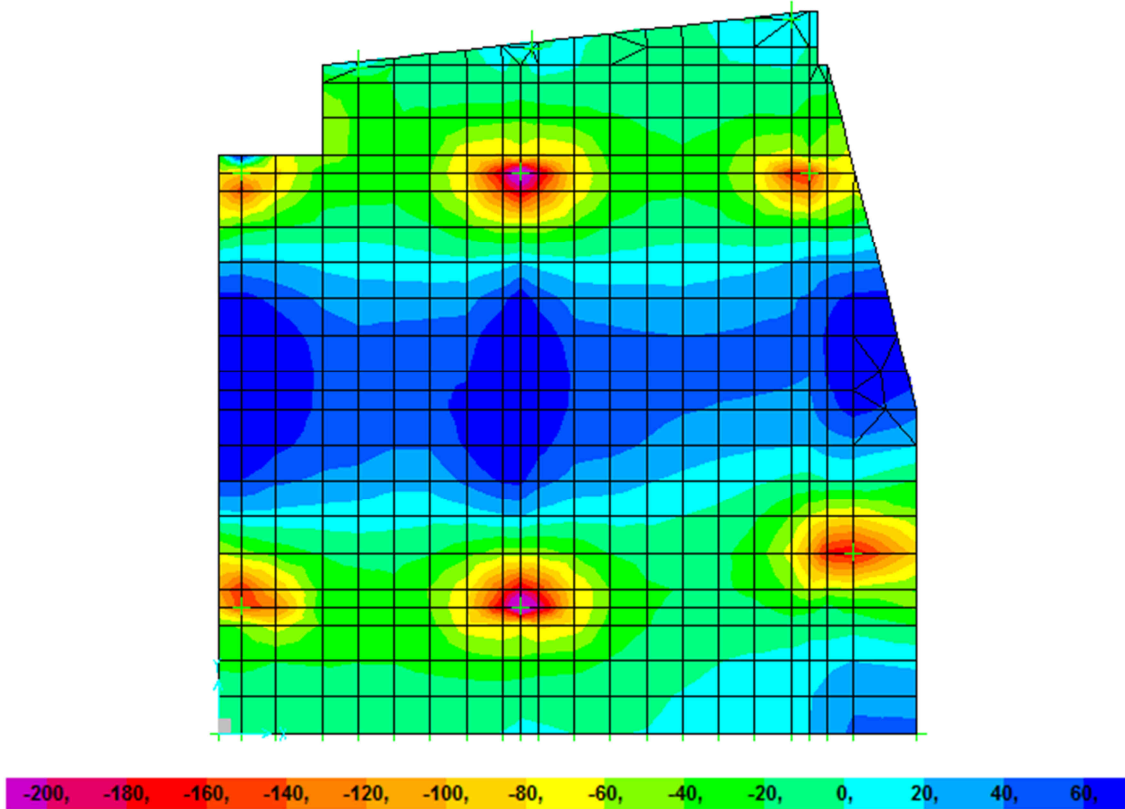


Figura 4.10 – Momentos segundo y antes do reforço (kN.m).

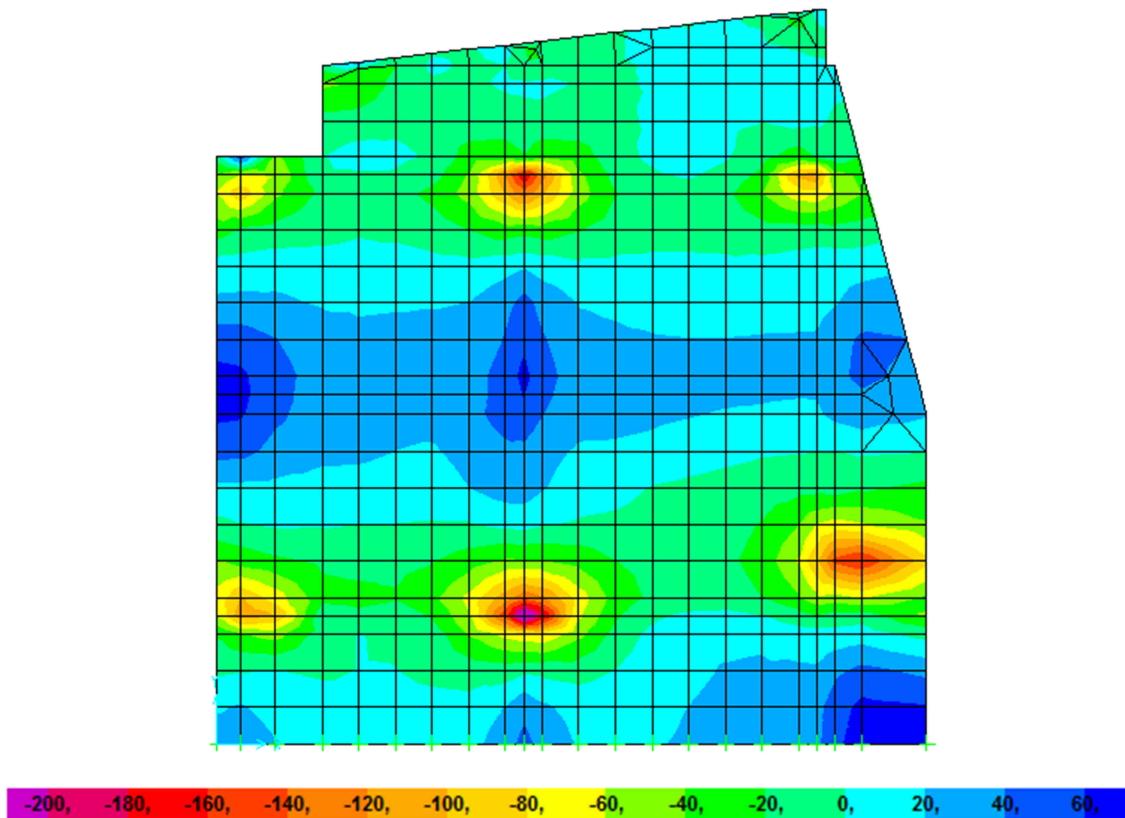


Figura 4.11 – Momentos segundo y pós reforço (kN.m).

4.6 – Projecto de Aplicação

4.6.1 – Descrição Geral

No presente capítulo são apresentados os cálculos justificativos e as especificações para a realização da obra. Os cálculos justificativos compreendem a verificação de segurança de todas as peças a utilizar em obra segundo os regulamentos específicos. Nas especificações são descritos todos os materiais a adoptar, como as suas características, e o processo construtivo a seguir em obra.

4.6.2 – Materiais

O aço de pré-esforço a empregar é de acordo com a especificação LNEC E453-2002/prEN10138-3, em cordões Y 1860 S 7 15.7, auto-embainhados, tem as seguintes características:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| • Diâmetro nominal | 15.7 mm |
| • Secção nominal | 150 mm ² |
| • Módulo de Elasticidade | 195 GPa |

• Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.1%	1600 MPa
• Tensão de rotura	1860 MPa
• Relaxação às 1000 h a 0,70 da Tr	2,5 %
• Alongamento mínimo após rotura	3,5 %

O aço a empregar nas chapas das ancoragens e nas selas de desvio é da classe S235. Os capots são de PEAD.

4.6.3 – Processo Construtivo

O processo construtivo compreende os seguintes passos. (ETA-08/0061 2009)

Montagem da ancoragem passiva e da sela de desvio:

1. Perfuração

A perfuração é executada com recurso a berbequim com broca Ø18mm, e de acordo com o comprimento do varão roscado indicado no projecto,

2. Limpeza do furo, com recurso a ar comprimido

Introduzir a pistola de ar comprimido até ao fundo do furo. Aplicar ar comprimido a 6Bar, até que o ar expelido fique limpo. Repetir esta operação 4 vezes. Introduzir escova dentro do furo. Repetir esta operação 2 vezes. Aplicar ar comprimido a 6Bar, até que o ar expelido saia limpo. Repetir esta operação 4 vezes.

3. Injecção

Inserir a ponteira da pistola no fundo do furo e preencher com resina.

4. Aplicação de varões

Antes de aplicar os varões roscados, limpar os mesmos, até que estejam completamente secos e livres de qualquer sujidade.

Nota: Os varões devem ser cortados antes de se preparar as resinas para injecção, devido ao tempo de manuseamento da resina (Pot-life). Cortar os varões roscados de acordo com o projecto. Inserir o varão no furo preenchido com resina e aplicar cunhas na extremidade do furo, para segurar o varão.

Ultrapassado o tempo de cura, é aplicada a ancoragem passiva ou a sela de desvio com um momento torsor máximo de 60 N.m para varões M16.

Na montagem de cada cabo, considera-se a seguinte sequência de operações:

1. Preparação dos cordões auto-embainhados incluindo o corte e desembainhamento das extremidades.
2. Montagem dos monocordões nas ancoragens passivas e conexão dos mesmos na ancoragem activa.
3. Tensionamento dos cabos à força prevista segundo o plano de tensionamento.
4. Injecção dos capots com cera fóssil.

4.6.4 – Descrição dos Cabos e Ancoragens

Foram adoptados monocordões de 0,6” auto-embainhados (LNEC E453-2002 / prEN 10138-3), os quais foram designados da seguinte forma, Cd.1.1 a 1.3 de Cd.2.1 a 2.10, de Cd.3.1 a Cd.3.4 e de Cd.4.1 a Cd.4.3. A diversificação de todos os cabos, devem-se aos diversos traçados adoptados de modo ajustar-se aos condicionalismos existentes na estrutura a reforçar.

Todos os cabos encontram-se sob a laje em causa, onde são ancorados às bandas entre pilares, apoiados nas respectivas selas de desvio no cruzamento de nervuradas da laje.

Os cabos possuem nas suas extremidades ancoragens passivas, sendo essas fabricadas em chapas de aço S235. No vão da laje são colocadas as selas de desvio fabricadas em chapas e perfis de aço S235, aplicadas de acordo com o projecto de reforço. A meio vão da laje será colocado um conector tipo “STRONGHOLD TYPE SD 0,6” e posteriormente tensionado.

Os monocordões junto às ancoragens passivas são inseridos dentro de uma manga termo-retrátil, que encontram-se ancorados através do efeito das cunhas no prato de ancoragem do tipo “VSL E6-1”.

Os conectores são envolvidos por mangas termo-retractíveis que posteriormente ficam aderentes às bainhas individuais dos cabos.

A ancoragem passiva e a sela de desvio são ancoradas por meio de buchas químicas do tipo "FISCHER FIT VT 380". (ETA-08/0061 2009)

Em cada cabo, as ancoragens serão protegidas com capots em PEAD que posteriormente são injectados com cera fósfil. Todas as peças metálicas têm protecção anti-corrosiva adequada.

4.6.5 – Força de Pré-esforço Aplicar

A força de puxe a aplicar em cada monocórdão é de 140 kN, o que corresponde a 50.0 % da força de rotura.

4.6.6 – Plano Genérico de Puxe

Relativamente ao puxe dos cabos, o plano estabelecido para a aplicação da força de pré-esforço é o indicado nas peças desenhadas do presente projecto.

4.6.7 – Cálculo das Perdas de Pré-esforço

São apresentados os cálculos das forças instaladas nos cabos após perdas imediatas devidas ao atrito, e reentrada de cunhas e as perdas diferidas devido à relaxação do aço da armadura activa. O modelo de cálculo das perdas de pré-esforço é o exposto no Capítulo VI do *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*.

4.6.7.1 - Perdas Instantâneas

4.6.7.1.1 - Perdas por Atrito

A força instalada num cabo de pré-esforço após perdas por atrito ao longo do cabo é dada pela expressão (REBAP),

$$P_x = P_0 \times e^{-(\mu\alpha_1 + kx)} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde,

x - representa a distância da secção considerada à extremidade em que é aplicado o pré-esforço.

P_0' - representa o valor da força de pré-esforço aplicada (força de puxe).

μ - representa o coeficiente de atrito em curva entre o cabo de pré-esforço e a bainha, sendo adoptado o valor de $\mu = 0.06 \text{ rad}^{-1}$.

α_1 - representa a soma dos valores absolutos, em radianos, dos ângulos de desvio do traçado do cabo ao longo da distância x .

k - representa o coeficiente de atrito em recta (produto do desvio angular parasita pelo coeficiente de atrito em curva), sendo adoptado o valor de $k = 0.0005 \text{ rad}^{-1}$.

Determinação do ângulo de desvio

(i) Perfil Longitudinal

α_2 - ângulo de desvio entre duas secções consecutivas, em perfil longitudinal é determinado pela seguinte expressão,

$$\alpha_2 = \arctg \frac{2f}{L} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

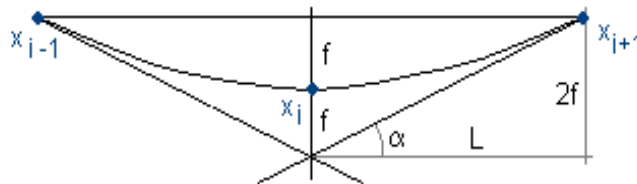


Figura 4.12 – Determinação de ângulos de desvio.

(ii) Planta

O ângulo de desvio em planta entre duas secções consecutivas é determinado pela expressão,

$$\alpha_3 = \frac{x_{i+1} - x_i}{R} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

onde,

$x_{i+1} - x_i$ representa a distância entre dois pontos consecutivos

R representa o raio de curvatura dos cabos em planta

O ângulo de desvio total entre duas secções consecutivas obtém-se através de:

$$\alpha_4 = \sqrt{\left(\arctg \frac{2f}{L}\right)^2 + \left(\frac{x_2 - x_1}{R}\right)^2} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

4.6.7.1.2 - Perdas por Reentrada dos Fixadores

No caso do pré-esforço exterior as perdas por reentrada dos fixadores é dado pela seguinte formula,

$$\Delta P = \frac{\Delta L \times A_p \times E_p}{L}$$

onde,

ΔL - representa o comprimento de reentrada dos cordões (0,006m)

E_p - Módulo de elasticidade do aço de pré-esforço.

A_p - Área transversal da armadura de pré-esforço.

L - Comprimento do cabo de pré-esforço exterior.

No caso do pré-esforço interior, durante a fixação dos cordões de pré-esforço à ancoragem, as cunhas reentram 0,006 m, dando origem a uma perda de tensão que é máxima na extremidade de puxe do cabo e decresce, devido ao atrito para o interior do elemento, podendo mesmo anular-se a partir de uma determinada distância da extremidade, conforme ilustra a figura seguinte:

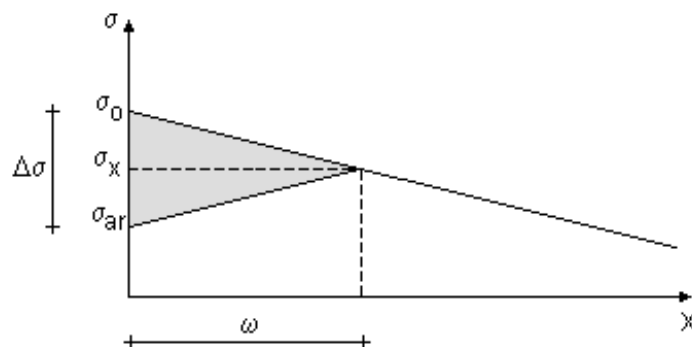


Figura 4.13 – Esquema de reentrada de cunhas.

A distância da extremidade (ω) a partir da qual as perdas por reentrada de cabos se anulam pode obter-se pela expressão:

$$\omega = \sqrt{\frac{\Delta L \times A_p \times E_p}{p}} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

em que,

p - representa a perda de força por atrito por metro dada por $p = \frac{P_0' - P_x}{x}$.

ΔL - representa o comprimento de reentrada dos cordões.

A perda de força na ancoragem é dada por $\Delta P = 2p\omega$.

E_p - Módulo de elasticidade do aço de pré-esforço.

A_p - Área transversal da armadura de pré-esforço.

4.6.7.2 - Perdas Diferidas Resultantes da Relaxação das Armaduras

4.6.7.2.1 – Relaxação

A relaxação origina perdas de tensão proporcionais ao nível de tensão instalado nas armaduras de pré-esforço. (B.P.E.L.91 1993) (ETA-06/0006 2011). A perda de tensão devido à relaxação do aço pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta\sigma_p = \frac{6}{100} \times \rho 1000 \times \left(\frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}} - \mu_0 \right) \times \sigma_{pi}(x) \quad (\text{Eq.4.10})$$

onde,

$\rho 1000 = 2.5\%$ - e representa a relaxação após 1000 h a 20 °C e a 70% da rotura.

$\sigma_{pi}(x)$ - representa a tensão após perdas imediatas, na secção x .

μ_0 - representa o coeficiente que, para aço de baixa relaxação, toma o valor 0.43.

4.6.7.3 - Determinação do Alongamento Teórico dos Cabos

O alongamento teórico de um cabo de pré-esforço determina-se tendo por base o diagrama de tensões do mesmo após perdas por atrito que se indica esquematicamente,

$$\Delta L_{puxe} = \int_0^L \varepsilon_p dx = \int_0^L \frac{\sigma}{E} dx \quad (\text{Eq. 4.11})$$

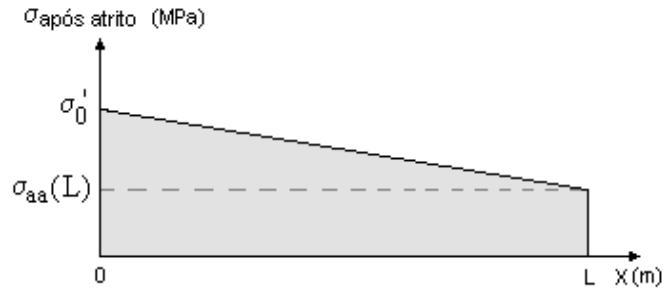


Figura 4.14 – Esquema para o cálculo do alongamento teórico.

Logo, o alongamento teórico é dado por,

$$\Delta L_{puxe} \approx \frac{(\sigma'_0 + \sigma_{após\ atrito}(L))/2}{E_p} \times L \quad (\text{Eq.4.12})$$

onde,

σ'_0 - Tensão no aço de pré-esforço devido à força de puxe.

$\sigma_{após\ atrito}$ - Tensão no aço de pré-esforço após perdas de atrito no comprimento L.

E_p - Módulo de elasticidade do aço de pré-esforço.

L- Comprimento do cabo de pré-esforço.

4.6.7.4 - Resultados

A determinação da força de puxe e os alongamentos teóricos foram calculados através de uma folha de cálculo automático segundo os princípios anteriormente expostos, são os seguintes:

Tabela 4.10 – Resultados do cálculo automático

Cabo	Nº de cabos	Nº de cordões por cabo	F. Puxe (kN)	P _∞ por cabo (kN)		ΔL_{puxe} ± Tol. (m)	Δ entre C. auto e Proj. (%)	% F _{pk}
				C.Auto.	Proj.			
Cd.1.1 / 1.2 / 1.3	1	1	139,5	117,1	110,0	0,042 ± 0,004	6,5%	50,0%
Cd.2.1 / 2.7 / 2.8 / 2.9	1	1	139,5	118,3	110,0	0,044 ± 0,004	7,6%	50,0%
Cd.2.2 / 2.3	1	1	139,5	120,1	110,0	0,045 ± 0,004	9,2%	50,0%
Cd.2.4 / 2.5	1	1	139,5	118,9	110,0	0,044 ± 0,004	8,1%	50,0%
Cd.3.1 / 3.4	1	1	139,5	117,6	110,0	0,042 ± 0,004	6,9%	50,0%
Cd.3.2	1	1	139,5	118,9	110,0	0,042 ± 0,004	8,1%	50,0%
Cd.3.3	1	1	139,5	118,7	110,0	0,042 ± 0,004	7,9%	50,0%
Cd.2.6	1	1	139,5	119,5	110,0	0,045 ± 0,004	8,6%	50,0%
Cd.2.10	1	1	139,5	117,9	110,0	0,044 ± 0,004	7,2%	50,0%
Cd.4.1	1	1	139,5	118,0	110,0	0,043 ± 0,004	7,2%	50,0%
Cd.4.2 / 4.3	1	1	139,5	114,2	110,0	0,036 ± 0,004	3,8%	50,0%

Verificou-se através dos cálculos anteriormente apresentados, que o pré-esforço tem baixas perdas de pré-esforço, visto que o atrito produzido pelo cabo nos vários tramos do traçado é inferior aos tradicionais sistemas de pré-esforço. A relaxação do aço é baixa, dado que este fenómeno só tem significado quando o aço está a ser tensionado acima dos 50% da tensão de rotura.

4.6.8 – Verificações de Segurança Locais

4.6.8.1 – Ancoragem Passiva

As ancoragens passivas são compostas por chapas metálicas soldadas entre si. Um conjunto de três chapas é utilizado para produzir o perfil em forma de U e outra chapa, quadrada, é soldada à face inclinada do perfil em U. A meio vão da chapa quadrada é feito um furo para passagem do cordão.

Os esforços de dimensionamento para o cálculo do perfil são a força de puxe, a componente vertical da força de puxe e o momento flector devido à excentricidade do cabo na zona da ancoragem face ao centro de gravidade da laje.

O dimensionamento da chapa de ancoragem resulta de uma distribuição de esforços estáticos de 70% das cargas para os banzos do perfil U, e 30% das cargas para a alma do perfil U. A adopção desta distribuição deveu-se às condições de fronteiras adoptadas. Para os banzos do perfil U considerou-se encastrado-encastrado, e na direcção perpendicular encastrado-livre. A carga considerada foi a força última do cordão, aplicada a meio vão.

Os cálculos foram efectuados de acordo com os seguintes regulamentos específicos, (EN1993-1-1 2006), (EN1993-1-5 2006), (EN1993-1-8 2006).

4.6.8.2 – Sela de Desvio

A sela de desvio é composta pelos seguintes elementos metálicos, chapa de apoio, perfil IPE 140 e desviador. A chapa de apoio como o próprio nome indica, serve de apoio à sela de desvio na face inferior da laje de betão armado. O perfil IPE é o elemento que vence a dimensão proposta no projecto. O desviador é o elemento metálico que promove a rotação dos monocordões segundo o traçado proposto.

O dimensionamento dos vários elementos metálicos baseia-se na determinação dos esforços resultantes da carga aplicada no desviador, que posteriormente irá ser transmitida ao perfil IPE140 e à chapa de apoio, o qual é ancorada por intermédio de buchas químicas.

Os cálculos foram efectuados de acordo com os seguintes regulamentos específicos, (EN1993-1-1 2006), (EN1993-1-5 2006), (EN1993-1-8 2006).

4.6.8.3 – Chumbadouros

O critério de escolha do tipo de bucha química, deve-se essencialmente ao espaço necessário para assegurar o bom funcionamento dos varões roscados e à capacidade resistente dos mesmos. Primeiramente deve-se ao facto da distribuição de tensões ao longo da bucha química por eventualmente em causa a dimensão da ancoragem. Ou seja, no caso da bucha química, a distribuição é uniforme, enquanto numa bucha mecânica existe uma concentração elevada de tensões na ponteira da mesma. Logo, constata-se que é necessário um afastamento maior entre

buchas mecânicas do que em buchas químicas. Dada a limitação da chapa de ancoragem foi necessário ter em atenção esse pormenor.

Os esforços obtidos para o dimensionamento dos chumbadouros na ancoragem passiva são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Esforços de dimensionamento.

F_{puxe}	279	kN
FS	1,10	
F_{v,Ed}	153	kN
F_{t,Ed}	33	kN
M_{Ed}	13	kN.m

Onde,

F_{v,Ed} – Valor de cálculo do esforço transversal actuante [kN]

F_{t,Ed} – Valor de cálculo do esforço normal actuante [kN]

M_{Ed} – Valor de cálculo do momento flector actuante em relação a um eixo principal de uma secção transversal [kN.m]

FS – factor de segurança devido à incerteza face ao esmagamento localizado do betão nos chumbadouros aquando do tensionamento dos cabos.

Os esforços obtidos para o dimensionamento dos chumbadouros na sela de desvio são expostos na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Esforços de dimensionamento.

F_{puxe}	279	kN
FS	1,1	
F_{t,Ed}	50	kN

em que,

F_{t,Ed} – Valor de cálculo do esforço normal actuante [kN]

As verificações de segurança dos chumbadouros foram elaboradas num programa de cálculo automático, de acordo com a (TR029 2007) e o tipo de fabricante.

4.6.9 – Pormenorizações

Os desenhos do projecto de reforço e de aplicação são apresentados no anexo 5.

4.7 – Acompanhamento de obra

4.7.1 – Descrição Geral

O acompanhamento da obra realizado foi ao encontro do faseamento da obra, dado que quando se iniciava ou terminava tarefas importantes, foram retirados elementos de apoio para a validação e comprovação do projecto.

No presente capítulo pretende-se apresentar as fases mais importantes do processo construtivo e mostrar o aspecto final do pré-esforço exterior aplicado à laje.

4.7.2 – Marcação dos Dispositivos

A tarefa de marcação dos furos consistiu inicialmente em marcar os alinhamentos das nervuras e das bandas, de modo a aplicar o projecto. Posteriormente foi executado um gabarito em chapa metálica de acordo com os elementos metálicos estabelecidos no projecto, de forma a facilitar as furações da laje. Na figura 4.15 é ilustrado o gabarito em chapa metálica com os respectivos furos. Na figura 4.16 é visível a furação da laje com recurso a berbequim sob os furos do gabarito. Dada a existência de muita armadura na laje foi utilizado o “ferroscan” para avaliar a posição das armaduras, de forma a evitar o corte delas. Nalguns casos foi inevitável a abertura de furos inclinados com o plano da laje, devido à posição das armaduras ordinárias. Para tal, a solução baseou-se na inclinação ligeira dos furos. Para garantir a segurança desses elementos, por cada varão inclinado foi adoptado mais um varão roscado.



Figura 4.15 – Gabarito.



Figura 4.16 – Furação.

Depois de abertos todos os furos são inseridos os varões roscados e fixados com resina epoxídica. A inserção destes elementos cumpriram o procedimento de execução definido pelo fabricante e projectista. Para o auxílio destas operações foram executados gabaritos em madeira, para quando os varões fossem colocados ficassem na posição correcta, para futuramente receberem as respectivas

peças metálicas. Na figura 4.17 é ilustrado a colocação de um varão roscado sob o gabarito de madeira.



Figura 4.17 – Colocação dos varões roscados.

4.7.3 – Aplicação dos Dispositivos

Após a colocação de todos os varões roscados são retirados os gabaritos de madeira e aplicadas as ancoragens e selas de desvio. Para promover o contacto entre os referidos dispositivos e a face da laje foi utilizado uma fina camada de argamassa de cimento. Nas figuras 4.18 e 4.19 são apresentadas as ancoragens passivas aplicadas na laje.



Figura 4.18 – Ancoragens passivas.



Figura 4.19 – Vista das ancoragens passivas.

A figura 4.20 é apresentada uma vista das ancoragens passivas aplicadas na laje. Também são visíveis os gabaritos de madeira com os varões roscados.



Figura 4.20 – Vista das ancoragens passivas.

São apresentadas na figura 4.21 as selas de desvio a utilizar em obra. Na figura 4.22 é possível observar que entre a chapa de apoio da sela de desvio e a face da laje é colocada uma fina camada de argamassa.



Figura 4.21 – Selas de desvio.



Figura 4.22 – Selas de desvio aplicadas.

4.7.4 – Colocação dos Cabos

Depois de instaladas todas as selas de desvio e as ancoragens passivas, procedeu-se à colocação dos cabos de pré-esforço. Inicialmente foram amarados às ancoragens passivas por intermédio de cunhas e de pratos de ancoragem. Essa informação é apresentada na figura 4.23.



Figura 4.23 – Ancoragem dos cabos.



Figura 4.24 – Cabo aplicado na sela de desvio.

A figura 4.24 ilustra a passagem do cabo de pré-esforço pela sela de desvio. Dada a dimensão do cabo, aplicaram-se mangas em PEAD sobre o mesmo, de forma a ajustar à ranhura do desviador, para evitar a oscilação do cabo. De seguida, foram aplicadas as ancoragens activas, que unem os segmentos dos cabos de pré-esforço. Essa informação é apresentada na figura 4.25. Note-se que um dos cabos termina e outro passa pela ancoragem e é prolongado um determinado comprimento. Esse comprimento serve para o macaco hidráulico segurar o cordão e posteriormente tensioná-lo.

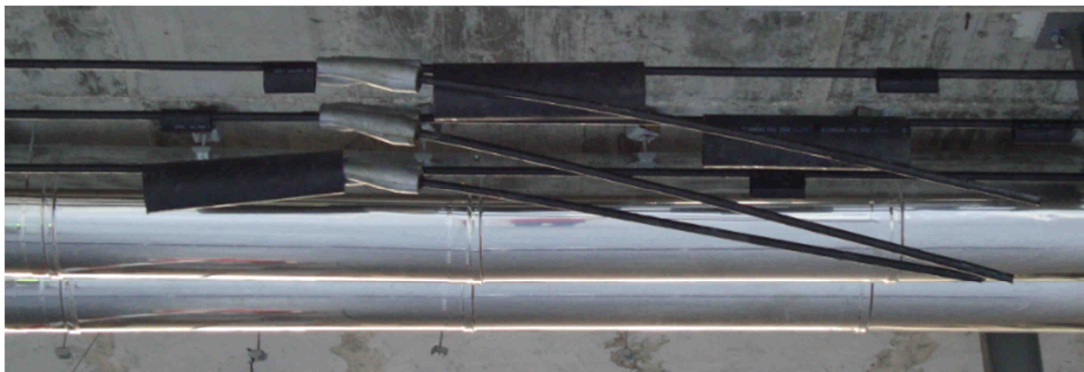


Figura 4.25 – Ancoragens activas.

Nas figuras 4.26 e 4.27 são apresentados planos gerais dos traçados após montagem dos cabos.



Figura 4.26 – Traçado dos cabos em obra.



Figura 4.27 – Traçado dos cabos entre obstáculos.

4.7.5 – Tensionamento

Nesta fase procedeu-se ao tensionamento dos cordões de acordo com o plano estipulado no projecto. A figura 4.28 apresenta o macaco hidráulico. Na figura 4.29 é visível a forma como são tensionados os cordões.



Figura 4.28 – Macaco hidráulico.

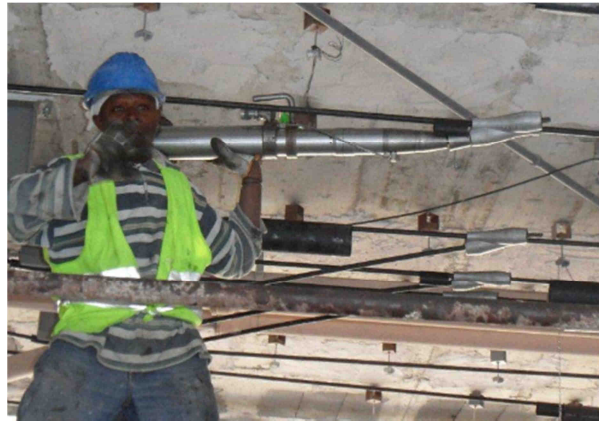


Figura 4.29 - Tensionamento dos cordões.

Antes e após o tensionamento dos cabos foi determinada a cota a meio da banda central da laje através de um medidor laser, de forma a verificar se a estrutura respondeu às acções impostas. Verificou-se que a laje após o tensionamento teve uma recuperação de deformada inferior à estimada. Verificou-se também que o medidor a laser não é o mais indicado para medir a grandeza de valores provenientes deste tipo de operações.

Para explicar a redução de recuperação de deformada obtida em obra, verificou-se que as fissuras das paredes divisórias do andar superior da laje foram reparadas anteriormente ao tensionamento dos cabos, dessa forma, ao aplicar-se cargas ascendentes na laje, está-se a comprimir a laje em causa, as paredes divisórias, como os restantes elementos resistentes dos andares superiores. Ou seja, existe um aumento de rigidez da estrutura que não foi tido em conta no modelo numérico.

No entanto, para comprovar os resultados teóricos efectuados, devia ter sido monitorizada a laje nos pontos críticos. Mas dada a urgência da realização da obra e das condicionantes do local foi impossível realizar essa tarefa.

Contudo, é de salientar que esta acção de reforço também tem como objectivo a estabilização da deformada da laje. Para tal, esta laje será avaliada durante o tempo de vida da estrutura com inspecções visuais regulares. No caso da deformação da laje persistir, é possível a qualquer momento re-tensionar os cabos para um novo ponto de equilíbrio.

4.7.6 – Trabalhos Finais

Após a conclusão dos trabalhos referidos no ponto anterior, procedeu-se à selagem do sistema de pré-esforço exterior. Na figura 4.30 é visível a selagem das ancoragens activas por intermédio de mangas termo-retrácteis. Ao aplicar calor nas mangas termo-retrácteis, elas encolhem até se ajustarem ao elemento contido pela mesma. A figura 4.31 apresenta o aspecto final da ancoragem activa selada com manga termo-retráctil.



Figura 4.30 – Aplicação de calor na manga termo-retráctil. Figura 4.31 – Selagem das ancoragens activas.

Nas ancoragens passivas também foi necessário colocar mangas térmicas para garantir o bom funcionamento do sistema de pré-esforço. Para tal, utilizaram-se mangas termo-retrácteis para ligar a bainha do monocordão à ancoragem passiva. A figura 4.32 ilustra o aspecto final dessa ligação.

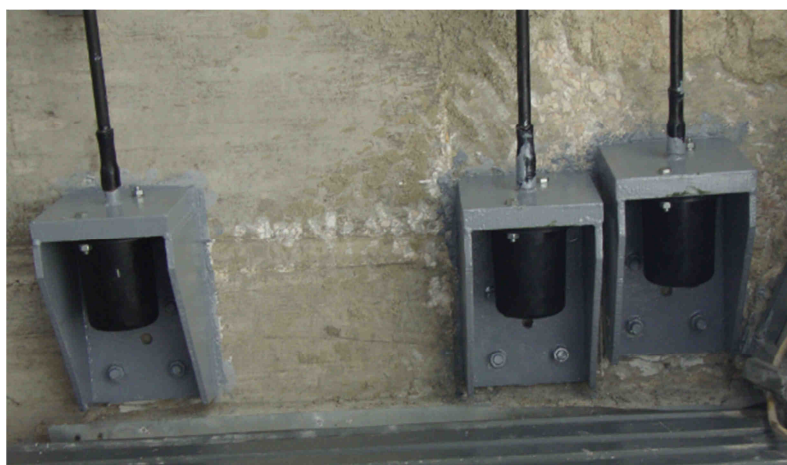


Figura 4.32 – Ligação bainha à ancoragem passiva.

Durante a selagem das peças referidas anteriormente, desenvolveu-se outra actividade, a pintura das peças metálicas. Essa pintura deve-se ao facto de reforçar a camada de protecção contra a corrosão.

4.7.7 – Aspecto Final

Cumprindo todo o processo construtivo, são apresentadas algumas figuras de forma a mostrar o aspecto final do pré-esforço exterior. Na figura 4.33 é apresentada uma vista geral da laje pós reforçada. Nas figuras 4.34 e 4.35 são ilustrados os traçados finais do pré-esforço exterior com as respectivas ancoragens e selas de desvio.

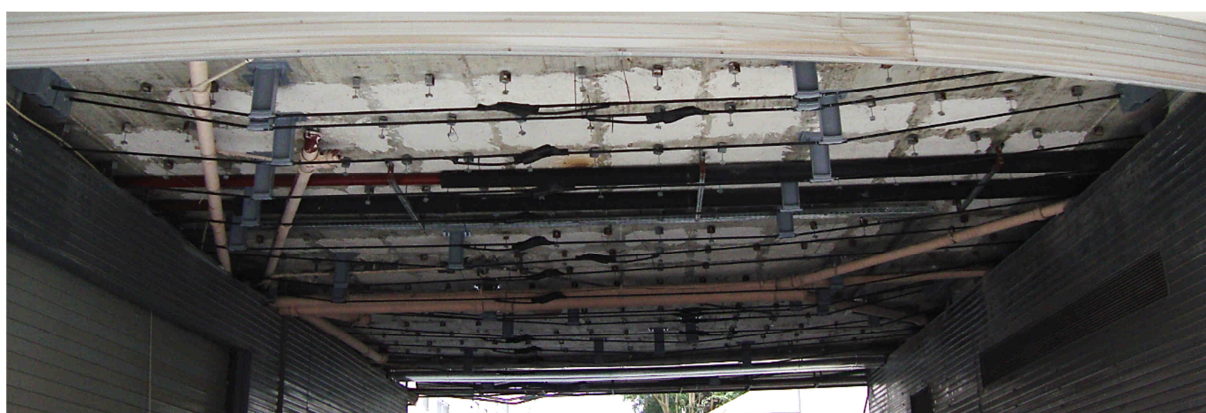


Figura 4.33 – Vista geral da laje com o pré-esforço exterior aplicado.



Figura 4.34 – Ancoragens activas protegidas.

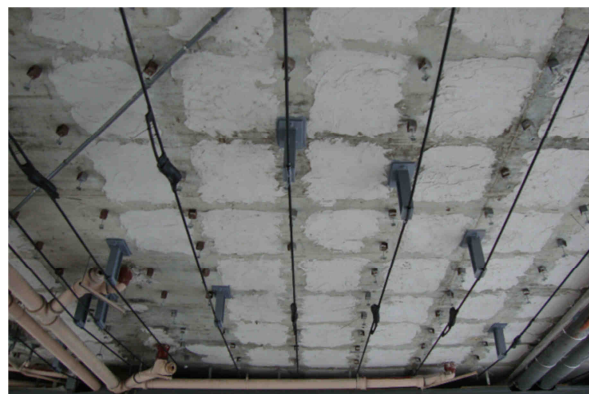


Figura 4.35 – Cabos de pré-esforço exterior.

Nas figuras 4.36 e 4.37 são apresentados duas vistas dos pormenores dos traçados dos cabos junto às ancoragens passivas.



Figura 4.36 – Vista frontal esquerda.



Figura 4.37 – Vista frontal direita.

Na figura 4.38 é apresentado a colocação do tecto falso e na figura 4.39 é apresentado o aspecto final da obra.



Figura 4.38 - Colocação do tecto falso.



Figura 4.39 – Aspecto final da obra

Capítulo 5

5 – Conclusões

5.1 – Introdução

Neste capítulo são sintetizados todos os resultados das várias análises efectuadas neste trabalho, tais como a comparação de traçados e materiais adoptados, a avaliação ao estado limite último de flexão e ao estado limite de deformação. Também é apresentada a descrição do acompanhamento da obra.

5.2 – Traçado dos Cabos

Verificou-se que o traçado dos cabos tem grande importância no resultado final deste trabalho. Efectuada a análise elástica ao primeiro modelo numérico, constatou-se que o traçado mais indicado é o trapezoidal, designadamente o traçado 2, exposto no ponto 4.3.8 do presente trabalho. O qual, é estimado uma recuperação de flecha elástica de cerca de 4,9mm. A eficiência do pré-esforço exterior depende exclusivamente da posição, da excentricidade das selas de desvio, e da força de puxe.

A respeito do traçado dos cabos verificou-se que o traçado trapezoidal é o mais eficiente, designadamente os traçados que variavam entre $L/3$ e $L/4$, sendo L o comprimento efectivo da laje. A altura da sela de desvio, foi admitida uma dimensão que compreende a limitação do espaço onde o pré-esforço exterior é aplicado.

A consideração de 50% da força última do cordão, deve-se à eventualidade de retensionamento dos cabos no futuro, permanecendo assim, metade da capacidade resistente nos cordões para essa eventualidade.

Desta primeira análise, também se comprovou que os cordões são mais eficientes que as fibras de carbono, devido à necessidade das fibras serem coladas na face inferior da laje e a posição das ancoragens.

Foi necessário reajustar o modelo numérico com os novos traçados de forma a estimar uma nova recuperação da deformada elástica. A recuperação de deformada elástica estimada é de 4,5mm. Estes dados são apresentados no ponto 4.5.3.1.

Dada a alteração dos traçados é normal que a recuperação de flecha seja menor. No entanto, a redução desse valor não foi significativo.

5.3 – Estado Limite Último de Flexão

Verificou-se que ao nível do estado limite último de flexão na laje, existe uma redistribuição de esforços para um novo estado de equilíbrio, o que promove a distribuição de parte das cargas actuantes para os novos pontos de apoio, ou seja, para as selas de desvio. Dessa forma, reduz-se a distância aos apoios da laje, e assim, o vão efectivo, o que promove a diminuição dos momentos flectores na laje. Os esforços resultantes são inferiores aos projectados inicialmente, logo, é assim verificada a segurança face ao estado limite último de flexão (Figura 5.1 e Figura 5.2). Estas conclusões são apresentadas no ponto 4.5.3.2.

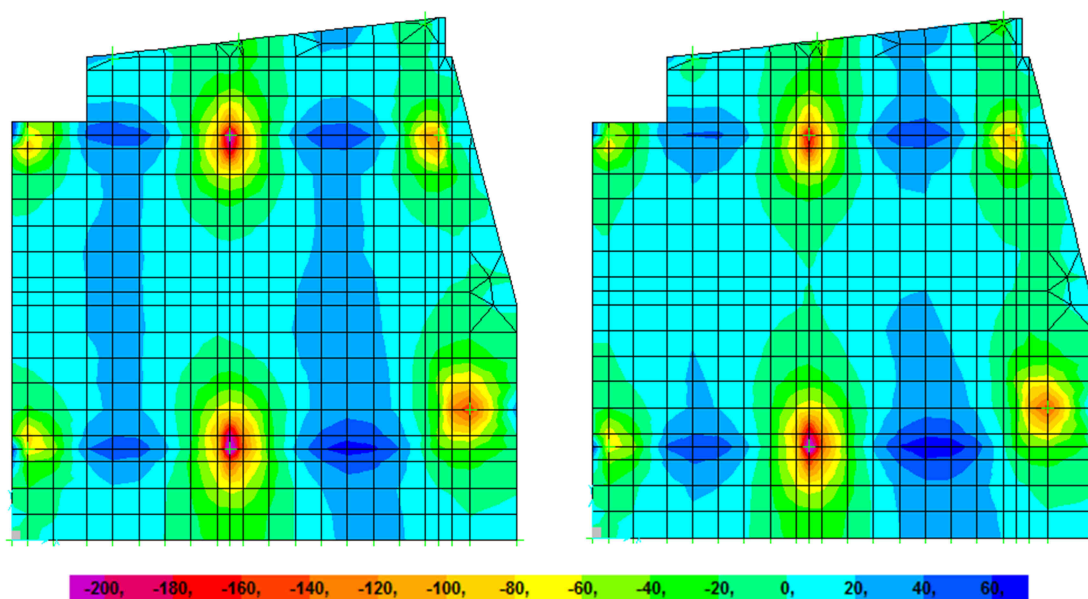


Figura 5.1 – Momentos flectores segundo x, antes e após reforço (kN.m).

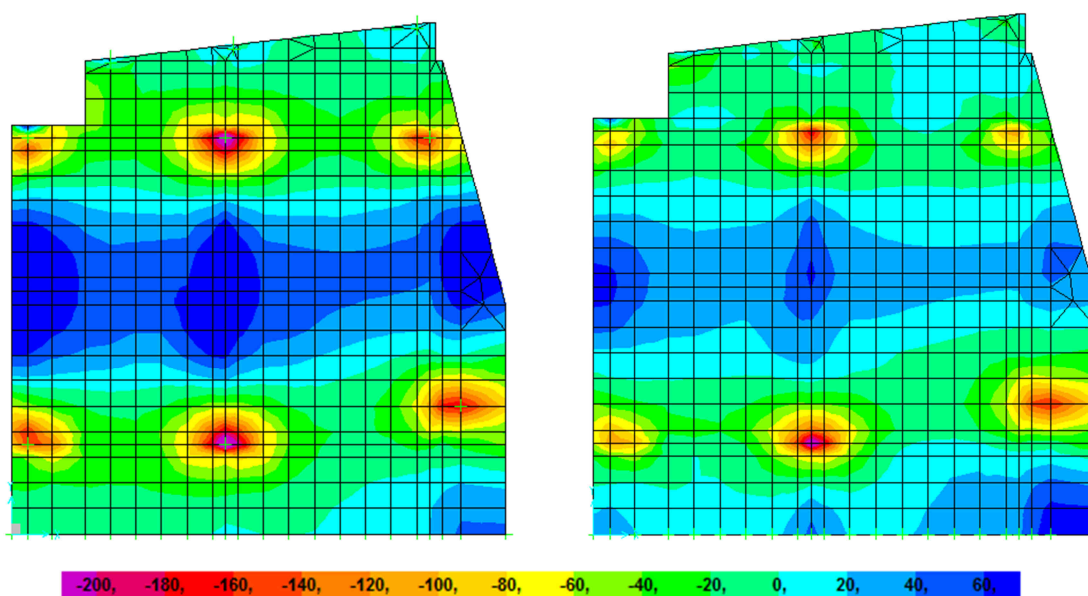


Figura 5.2 – Momentos flectores segundo y, antes e após reforço (kN.m).

5.4 – Estado Limite de Deformação

A análise teórica efectuada à estrutura baseou-se na teoria elástica linear, e determinou-se que a estrutura nessas condições teria uma elevação máxima de cerca de 4,5mm. Contudo, veio-se a confirmar na prática, que não foi possível alcançar esse resultado devido a variados factores, tais como os moradores dos pisos superiores ao fecharem as fissuras devido à excessiva deformação da laje, aumentaram a rigidez do edifício, o qual não foi tido em conta no modelo numérico. Ou seja, a força de pré-esforço está a comprimir todos os elementos superiores à laje em causa, dessa forma os deslocamentos para a mesma grandeza de força de pré-esforço são inferiores. Verificou-se também que o medidor a laser não é o mais indicado para medir a grandeza de valores provenientes deste tipo de operações.

Outro objectivo da implementação do pré-esforço exterior é garantir que a laje não irá voltar a deformar excessivamente no futuro. Tal efeito só poderá ser verificado ao longo do tempo com inspecções regulares, de medição da deformada da laje e visualização das alvenarias e de forma a encontrar indícios de deformação excessiva.

A falta de monitorização específica na laje deveu-se à rapidez de execução dos trabalhos e da dissimulação dos trabalhos realizados na estrutura.

5.5 – Observações Finais

O sistema adoptado de pré-esforço exterior é bastante articulado às variadas situações que um edifício passa ao longo do seu tempo de vida.

Se na eventualidade da laje voltar a deformar excessivamente, o sistema de pré-esforço exterior adoptado permite o retensionamento dos cordões. Para que as forças de pré-esforço instaladas sejam corrigidas de acordo com a nova situação do edifício.

O sistema também permite a substituição de cordões, na eventualidade de rotura, ou em condições que ponham em causa o bom funcionamento do sistema.

O pré-esforço exterior é uma técnica que necessita de um acompanhamento muito especializado, devido à necessidade de compreender as exigências da estrutura e dos condicionalismos da mesma. Na maioria das vezes é necessário recorrer a novos componentes para materializar o sistema de pré-esforço exterior.

Verificou-se através dos cálculos apresentados no ponto 4.6.7.4 que o pré-esforço tem baixas perdas, visto que o atrito produzido pelo cabo nos vários tramos do traçado é inferior aos tradicionais sistemas de pré-esforço. A relaxação do aço é baixa, dado que este fenómeno só tem significado, quando o aço está a ser muito tensionado.

A escolha de buchas químicas deve-se essencialmente à distância entre as mesmas, de forma a obter ancoragens passivas com menores dimensões. Esse facto deve-se especialmente ao estado de tensões desenvolvido nas buchas. No caso das buchas referidas, ao terem uma distribuição uniforme de tensões ao longo da bucha permite que as mesmas estejam próximas entre si. Enquanto que, nas buchas mecânicas tal não é possível, visto que elas têm uma concentração elevada de tensões na ponteira das mesmas, dado que é nessa zona que as buchas mecânicas encontram-se em contacto com o betão.

Em suma, os objectivos inicialmente apresentados foram cumpridos.

Bibliografia

- Alkhrdaji, Tarek, e Jay Thomas. "Structural Strengthening Using External Post Tensioning Systems." *Structure Magazine*, 2009.
- Andra, Hans Peter, e Markus Maier. "Post Strengthening With Externally Bonded Prestressed CFRP Strip." *16Th Congress of IABSE*. Lucerne, 2000.
- ATEP, Asociación Técnica Española del Pretensado -. "Proyecto y Construcción de Puentes y Estructuras con Pretensado Exterior ." *Recomendaciones y Manuales Técnicos*, 1996.
- B.P.E.L.91, Règles. *Règles B.P.E.L. 91: Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint, suivant la méthode des états limites*. French: Eyrolles, 1993.
- Barchas, Karen j. *Repair and Retrofit Using External Post Tensioning*. Technical Report, San Rafael: The Aberdeen Group, 1991.
- Benmokrane, B., B. Zhang, e A. Chennouf. "Tensile Properties and Pullout Behaviour of AFRP and CFRP Rods Grouted Anchor Applications." *Construction and Building Materials*, 2000: 157-170.
- Burdet, Olivier, e Marc Badoux. "Comparison of internal and external prestressing for typical highway bridges." *16TH Congress of IABSE* . Lucerne, 2000.
- Corven, John, e Alan Moreton. *Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual*. Technical Report, U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2004.
- Coutinho, Joana de Sousa. *Materiais de Construção 1*. FEUP, 2005.
- DYWIDAG-Systems. *DYWIDAG Prestressing Systems using Bars*. DSI, 2009.
- EN1992-1-1, NP. *Projecto de Estruturas de Betão – Parte 1-1, Regras Gerais e Regras para Edifícios*. 2010.
- EN1993-1-1. "Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings." 2006.

- EN1993-1-5. "Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements." 2006.
- EN1993-1-8. "Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints." 2006.
- ETA-05/0122. "Post-Tensioning kit for prestressing structures with bars, internal bonded and unbonded and external." *VSL International Ltd.* EOTA, 2010.
- ETA-06/0006. "Post-tensioning kits for prestressing of structures." *VSL International Ltd.* EOTA, 2011.
- ETA-08/0061. *Bonded anchor in size of M8 to M30 for use in non cracked concrete.* Technical Report, EOTA, 2009.
- FERCANORTE.* s.d. <http://www.fercanorte.com.pt> (acedido em 2011 de 09 de 28).
- Fernando. *corsaa.* 4 de Agosto de 2011. <http://www.corsaa.com/t4331-programa-do-2-encontro-nacional-corsa-a-figueira-da-foz> (acedido em 2011 de Dezembro de 10).
- Ghallab, Ahmed, e A.W. Beeby. "Cement & Concrete Composites." *Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams*, 27 de July de 2005: 945–957.
- IST, Grupo de betão armado e pré-esforçado -. "Peso de revestimentos e coberturas." s.d.
- Janberg's, Nicolas. *Structurae.* 10 de 1998. www.structurae.de (acedido em 19 de 11 de 2011).
- Khaleghi, Bijan. *External Post-Tensioning for Strengthening of Load Deficient.* s.d.
- Matta, Fabio, Antonio Nanni, Ahmad Abdelrazaq, Doug Gremel, e Ryan Koch. "Externally post-tensioned carbon FRP bar system for deflection control." *Construction and Building Materials*, 20 de 09 de 2007: 1628–1639.
- Matta, Fabio, Christian Aquino, Antonio Nanni, e James Giancaspro. "Unbonded CFRP Bar System for External Post-Tensioning." *Composites Research Journal*, 2008: 52-59.
- Motavalli, Masoud, e Christoph Czaderski. "FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State of the Art Review." *COMPOSITES & POLYCON 2007*, 2007.

Nordin, Hakan. "Strengthening structures with externally prestressed tendons." Technical Report, Lulea University of Technology, 2005.

Picard, M. A., B. Massicotte, e J. Bastien. "Relative Efficiency of External Prestressing." *Journal of Structural Engineering*, Vol 121, No. 12, 1995.

prEN10138-3. "Prestressing steels - Part 3: Strand." 2006.

prEN10138-4. "Prestressing steels - Part 4: Bars." 2006.

REBAP. "Regulamento de Estruturas e Betão armado e Pré-Esforçado." s.d.

Rombach, Ing. G. *New Concepts For Prestressed Concrete Bridges - Segmental Box Girder Bridges With External Prestressing*. Hamburg-Harburg, Germany: Technical University, 1997.

RSA. "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes." 1983.

S&P. *S&P - Clever Reinforcement Company*. s.d. <http://www.reinforcement.ch> (acedido em 28 de 09 de 2011).

SIKA. "Prestressing Systems for Structural Strengthening with Sika CarboDur CFRP Plates." Technical Report, s.d.

SIKA. "Sikadur-30: Argamassa de epoxi para colagem de reforços estruturais." Ficha técnica, 2009.

SIKA. "Using Post Tensioning With the Sika CarboStress System to Allow the Removal Walls." Technical Report, 2006.

Suntharavadivel, Thuraichamy Gugesan. "Behaviour of Shear Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened With External Post Tensioning and clamping." Doctor thesis, University of southern queensland, University of Southern Queensland, 2008.

TR029. *Design of Bonded Anchors*. Technical report, EOTA, 2007.

VSL international. "Boulonnais Viaducts - France." Technical Report, s.d.

VSL International. "External Post – Tensioning, Design Considerations VSL External Tendons Examples From Practice." VSL Series Report 1, 1992.

VSL International Ltd. "External Post-Tensioning, Field Manual." 2007.

VSL International Ltd. "VSL External PT Tendons with Monostrands." Technical Report n° 498, 2005.

VSL International Ltd. "VSL Post - Tensioning Solutions." 2010.

VSL International. "VSL Construction Systems ." s.d.

Weiher, Hermann, e Konrad Zilch. "Unbonded Post-Tensioning – Concepts and Applications in Germany." *CBC*, 2008.

Anexos

Anexo 1 – Protocolo de Tensionamento

PROCESSO Nº.: _____ OBRA: _____ FASE: _____ DATA: ___ / ___ / _____

Autorização de tensionamento concedida **Sim** **Se a autorização for verbal indicar origem**

Fiscalização: _____

Empreiteiro Geral: _____

CABO Tipo _____ **CABO Nº** _____ **PUXE Nº** _____

P. Principal \Rightarrow **Força de Puxe (KN / bar)** _____ / _____ **Alongamento teórico (mm)** _____

Reaperto \Rightarrow **Força de Puxe (KN / bar)** _____ / _____ **Alongamento teórico (mm)** _____

Características do Aço	
Diâm. / Secção:	Nº do rolo:
Fornecedor:	

Características do Equipamento			
Macaco	Nº	Modelo:	Área (cm2)
Manómetro	Nº		

OPERAÇÃO DE TENSIONAMENTO

Puxe		Patamares Pressão (bar)		Leitura (mm)	Al. Cabo (mm)	L. Anc. P. (mm)	Reaperto (mm)	Al. Total (mm)	Observações
%	KN	Calc.	Lidas						
									(3): Al. Total medido = (1) - (2)
									(4): Reaperto
									(5): Al. Interno do macaco
									Al. Total Real = (3) + (4) - (5)

RELATÓRIO

Módulo de elasticidade Teórico (1)	_____	Alongamento teórico Total (4)	_____	VARIÇÃO % _____
Módulo de elasticidade Real (2)	_____	Alongamento teórico Total Corrigido (5)=(3)x(4)	_____	
Coefficiente de correcção (3)=(1)/(2)	_____			

VSL SISTEMAS PORTUGAL

EMPREITEIRO

FISCALIZAÇÃO

(Assinatura)

(Assinatura / Data)

(Assinatura / Data)

Anexo 2 – Inspeção Preliminar

Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4



Foto 5

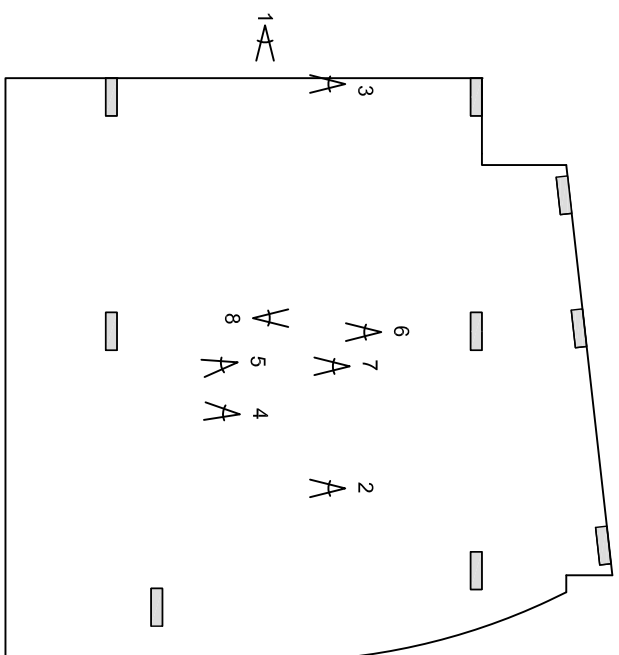


Foto 6



Foto 7

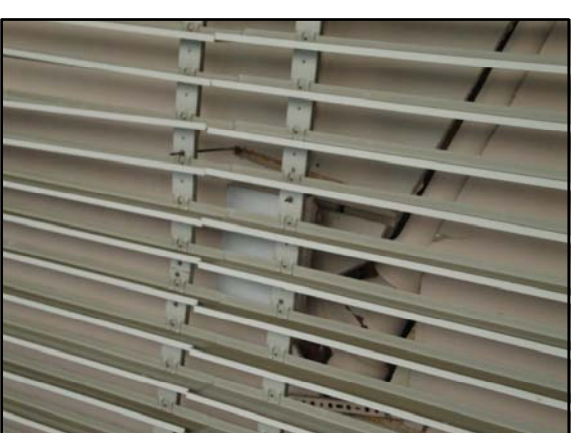

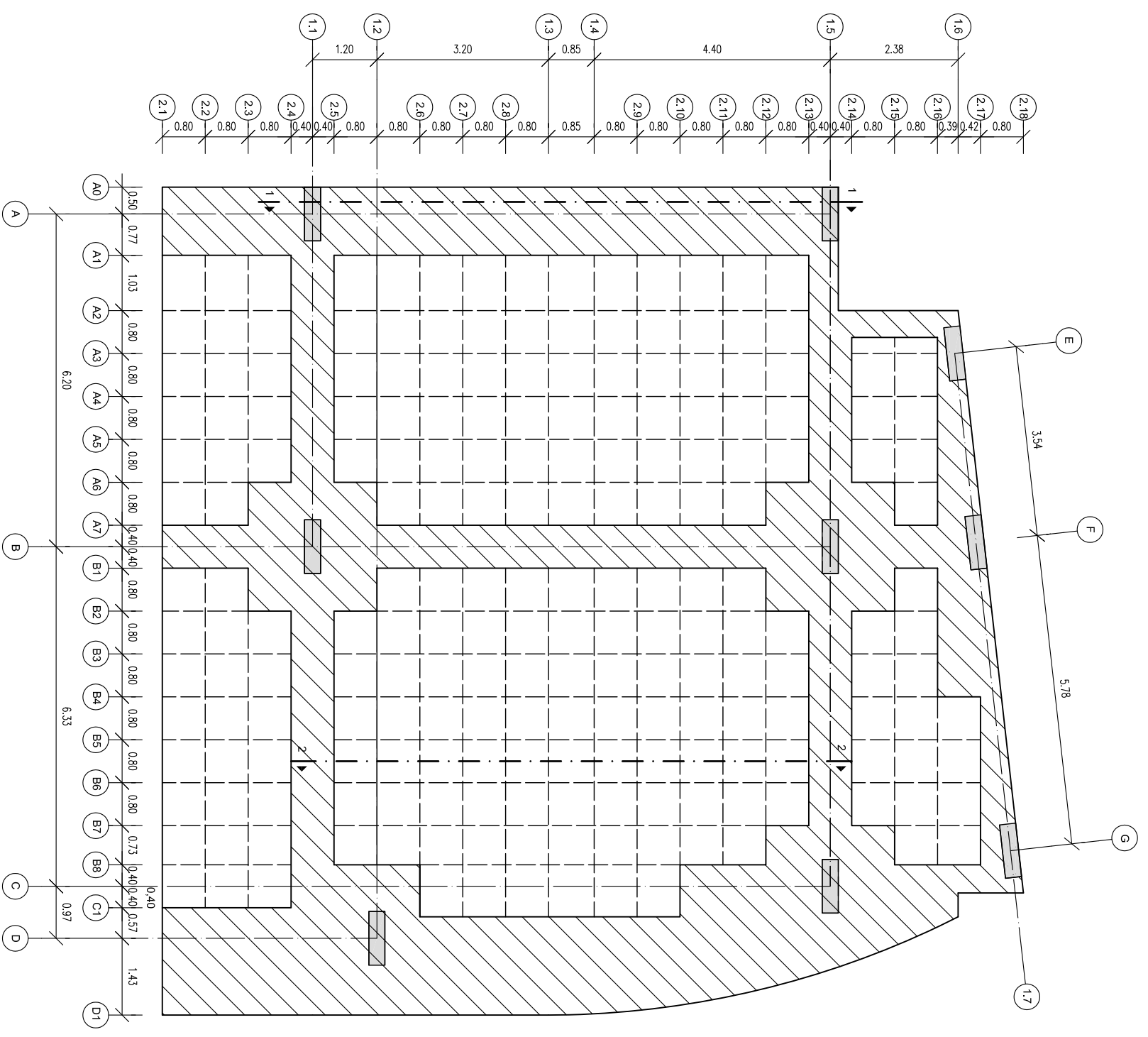


Foto 8



Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142		 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.
Local: -		
Designação: Inspeção Preliminar		Curso: MEC/EG 01 Dissertação de Mestrado
Escala: S/ Escala		
Designação: Fotos da estrutura Planta		Data: 01/11/2011 Desenho n.º



Anexo 3 – Desenhos – Ante-Projecto




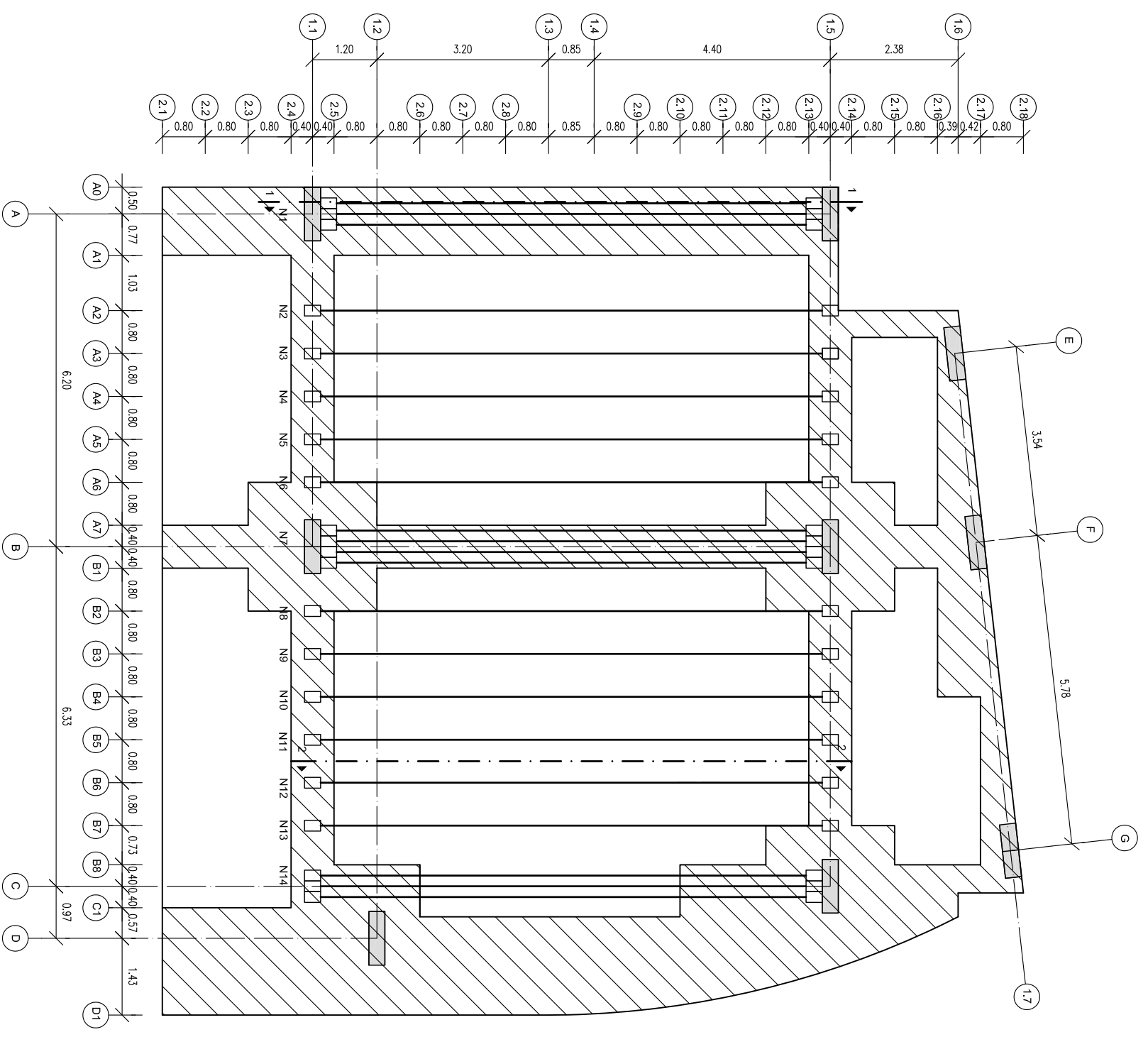
Dimensões em metros [m]

LEGENDA:

Definição zonal da laje:

-  - Laje maciça
-  - Laje aligeirada


Colaboração de:		Samuel Neves - Nº 31142	
Local:		-	
Ante-Projecto		Reforço de laje com pré-esforço exterior	
Desenho Geral Planta			
Escala:		1/100	
 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.		Desenho n.º <h1>01</h1>	
Curso: MEC/EG		Data: 01/12/2011	
Dissertação de Mestrado			




Dimensões em metros [m]

LEGENDA:

Definição zonal da laje:

 - Laje maciça

 - Laje alligeirada

Numero de cabos pré-estorçados por nervura ou banda:

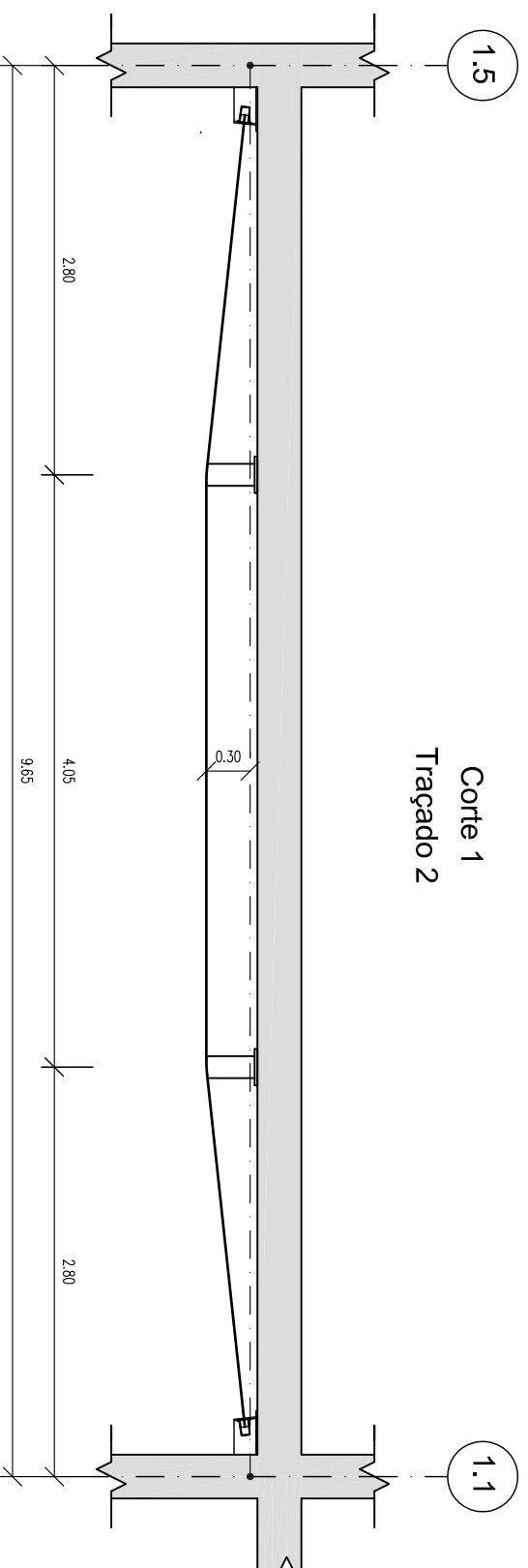
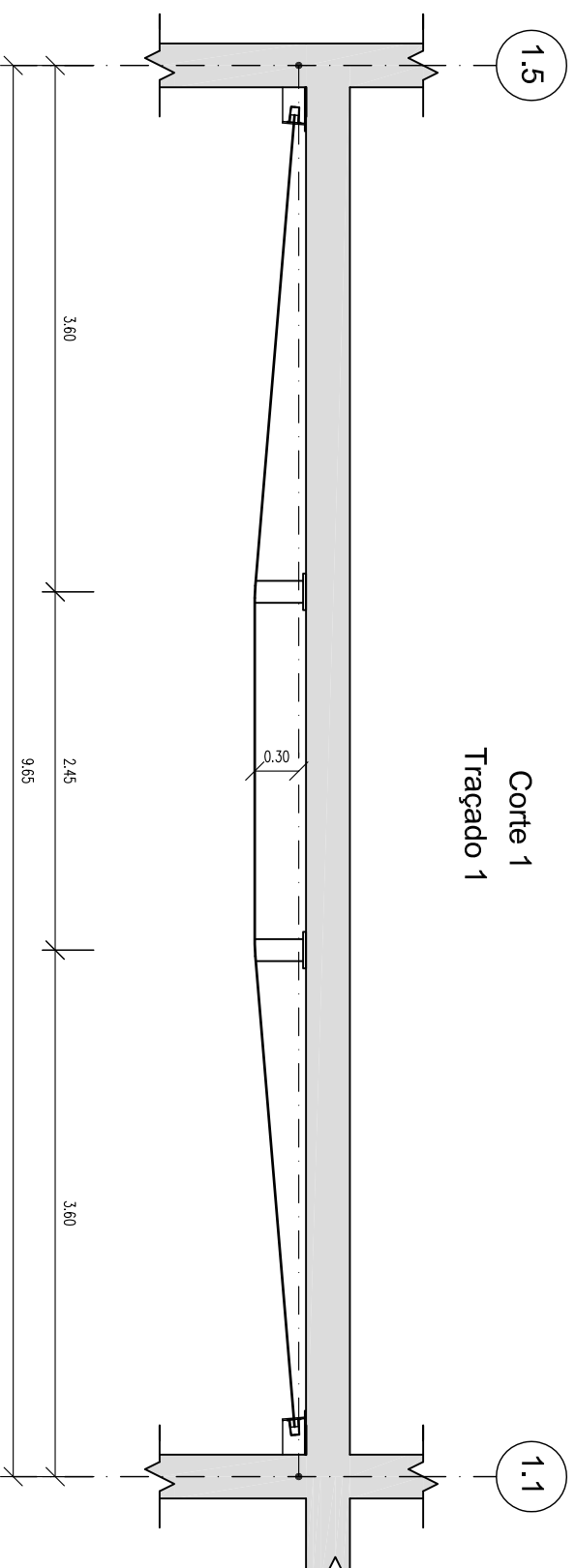
N1 - 3 Monocórdões
 N2 - 1 Monocórdão
 N3 - 1 Monocórdão
 N4 - 1 Monocórdão
 N5 - 1 Monocórdão
 N6 - 1 Monocórdão
 N7 - 4 Monocórdões
 N8 - 1 Monocórdão
 N9 - 1 Monocórdão
 N10 - 1 Monocórdão
 N11 - 1 Monocórdão
 N12 - 1 Monocórdão
 N13 - 1 Monocórdão
 N14 - 3 Monocórdões

MATERIAIS:

Armadura de Pré-Estorno
 LNEC E453 - 2002 /prEN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²

Apo: Perfis e Chapas
 S235

Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142	VSL VSL Sistemas Portugal Pré-Estorno, Equipamento e Montagens, S.A. Data: 01/12/2011 Desenho n.º
Local: -	
Ante-Projecto	02 Curso: MEC/EG Dissertação de Mestrado
Tragado dos cabos em planta	
Escala: 1/100	



Dimensões em metros [m]

Elaboração/edição de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

-

Reforço de laje com
pré-esforço exterior

Ante-Projecto

Hipóteses de traçado



VSL Sistemas Portugal

Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

03

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

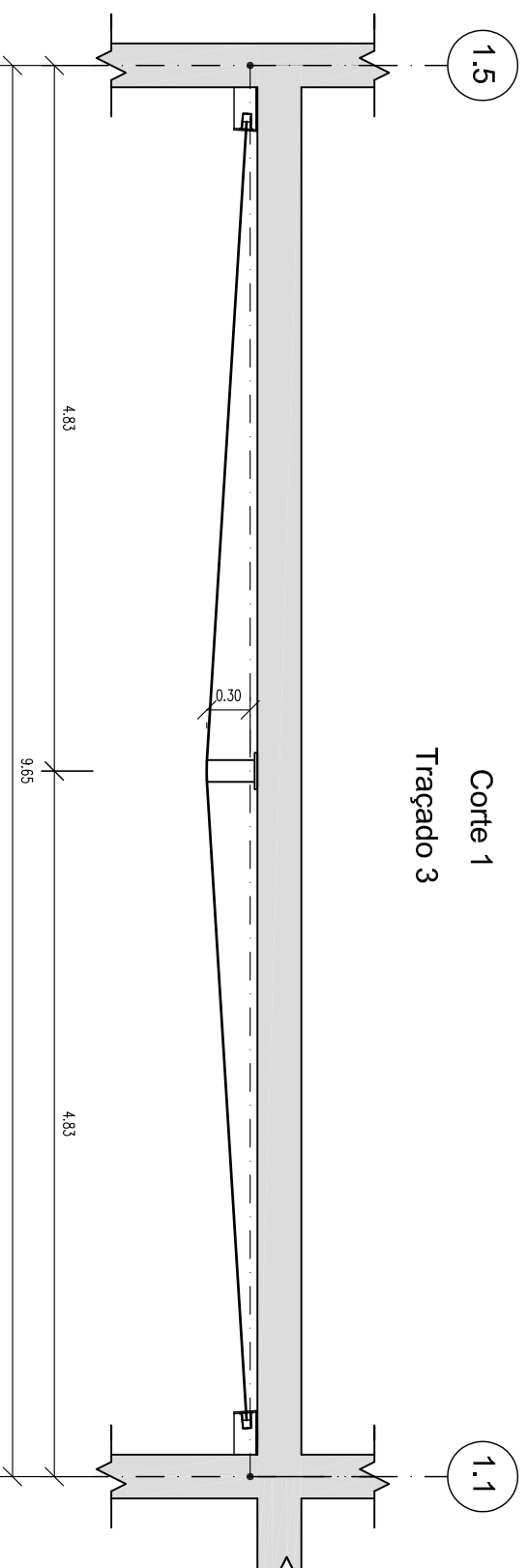
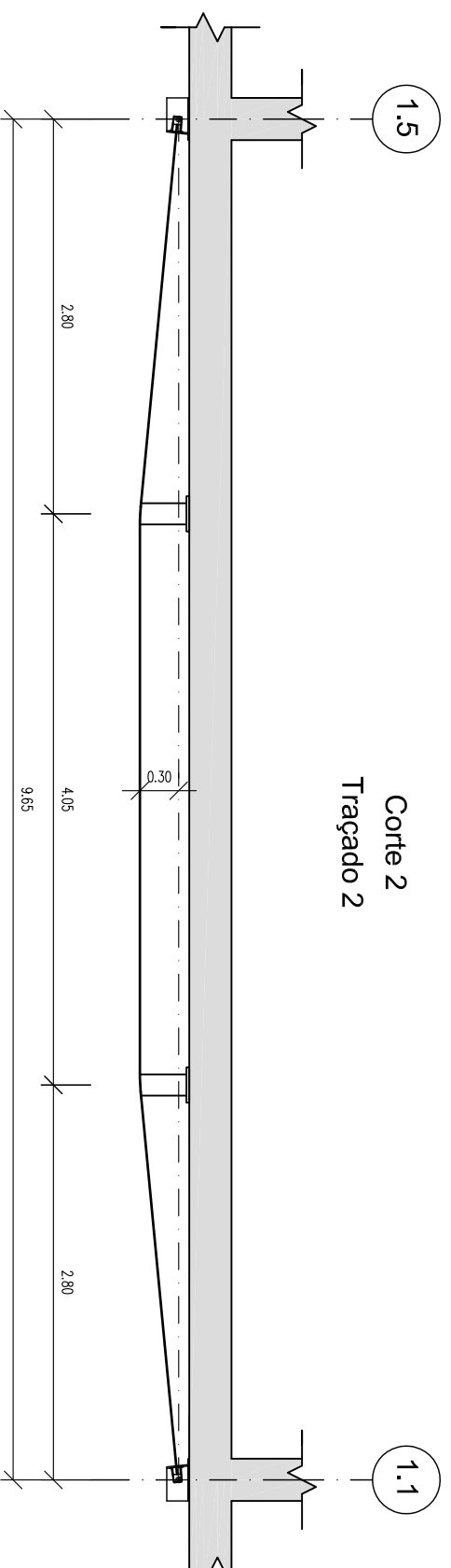
MATERIAIS:

Armadura de Pré-Esforço
LNEC E453 - 2002 /prEN 10138-3
Secção nominal: 1,50 cm²

Aço: Perfis e Chapas
S235

Escala:

1/50



Dimensões em metros [m]

MATERIAIS:

Armadura de Pré-Estorno
 LNEC E453 - 2002 /pr/EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Elaboração/edição de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

-

Escala:

1/50

**Reforço de laje com
 pré-esforço exterior**

Ante-Projecto

Hipóteses de traçado



VSL Sistemas Portugal

Pré-Estorno, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

04

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

Anexo 4 – Inspeção Integral

Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 6

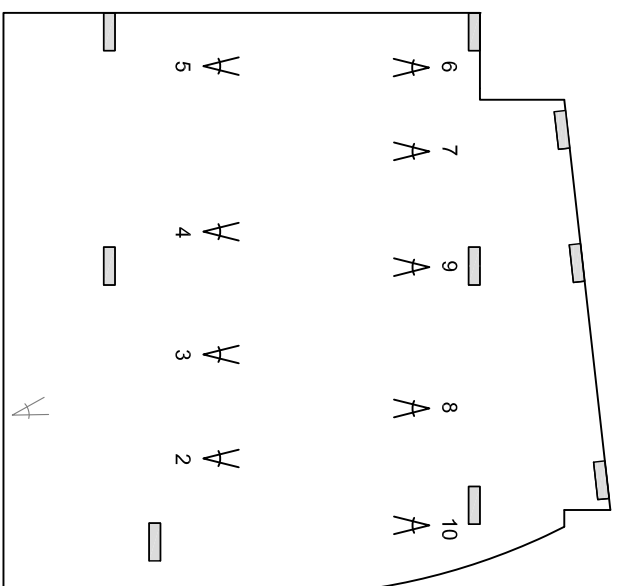


Foto 4

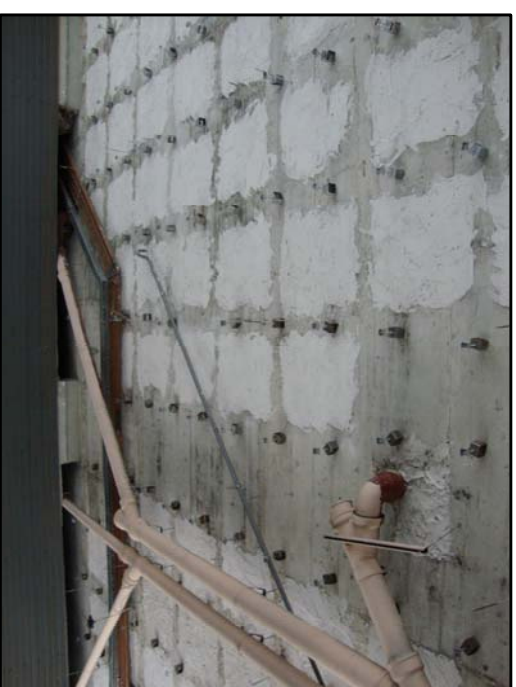


Foto 5



Foto 7



Foto 8



Foto 9



Foto 10



Colaboração de:
Samuel Neves - Nº 31142

Local:
-

Designação:
Inspeção Integral

VSL
VSL Sistemas Portugal
Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/11/2011
Desenho n.º

Escala:

S/ Escala

Designação:
Fotos da estrutura
Planta

01

Curso: MEC/EG
Dissertação de Mestrado

Foto 11



Foto 12



Foto 13

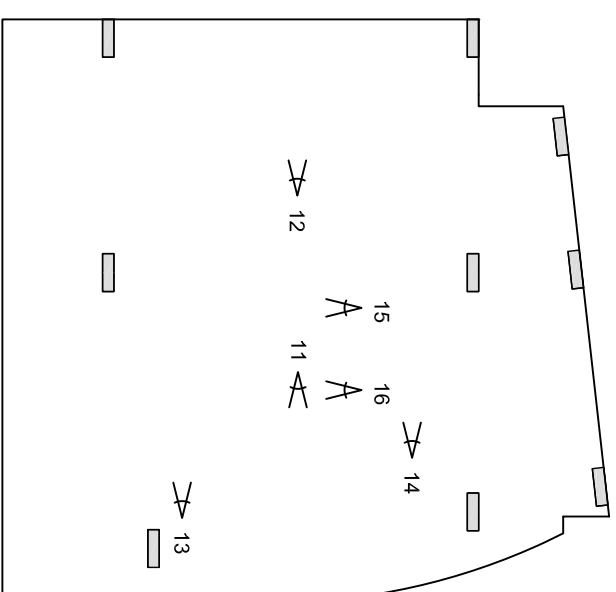


Foto 14




Foto 15

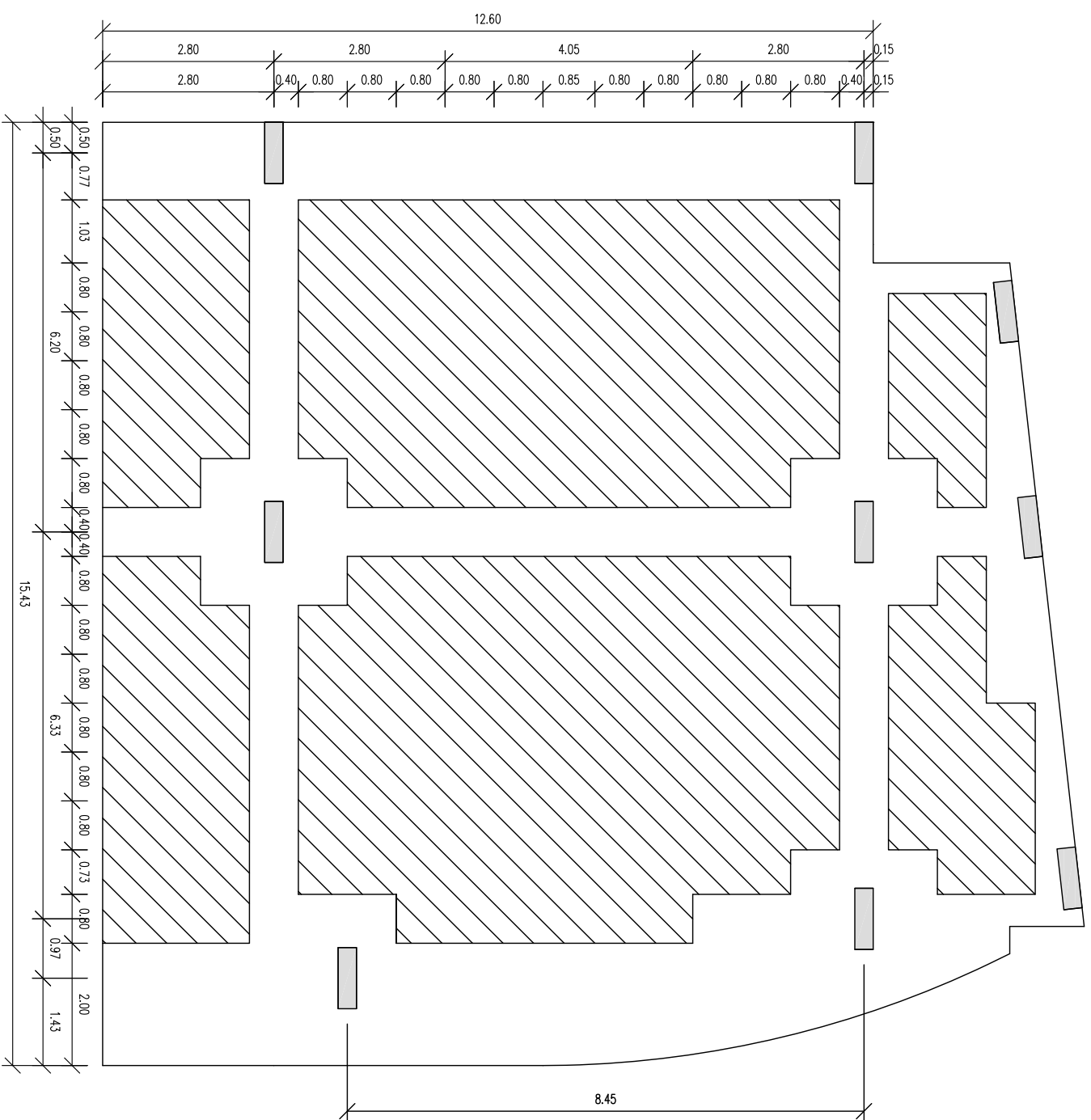


Foto 16



Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142		Inspeção Integral	 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.
Local: -			
Escala: S/ Escala		Designação: Fotos da estrutura Planta	Curso: MEC/EG 02 Dissertação de Mestrado

Anexo 5 – Desenhos – Projecto de Reforço



Legenda

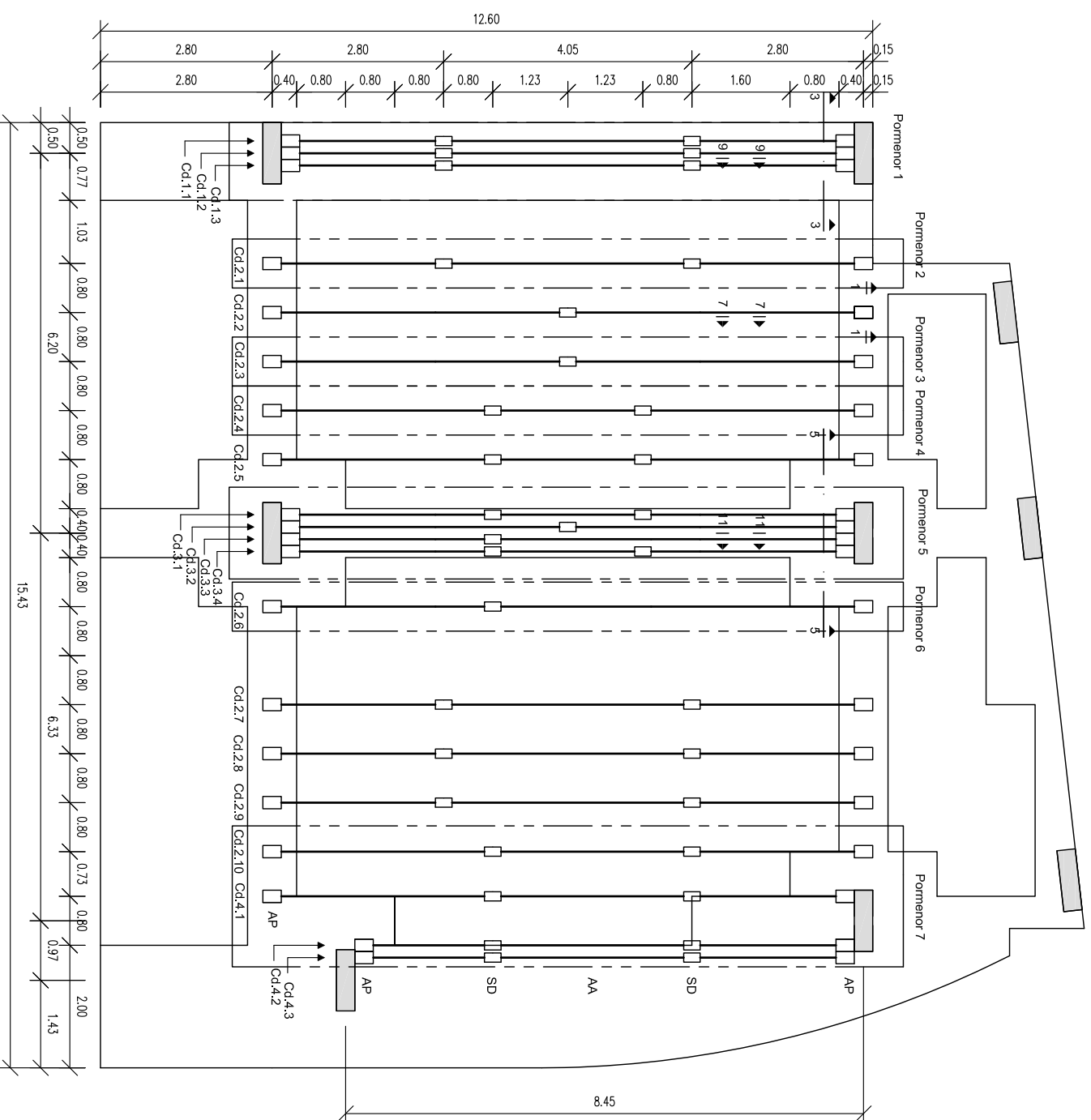
□ Laje maciça

▨ Laje aligeirada

Dimensões em metros [m]

Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142		Reforço de laje com pré-esforço exterior	VSL VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.
Local: -			
Projecto de execução		Planta Geral	01
Escala: 1/100			
		Dissertação de Mestrado	

VSL
VSL Sistemas Portugal
Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.
Data: 01/12/2011
Desenho n.º



Dimensões em metros [m]

Plano de Puxo

1º - Cd.3.2 11º - Cd.1.1
 2º - Cd.3.3 12º - Cd.1.3
 3º - Cd.1.2 13º - Cd.4.2
 4º - Cd.4.3 14º - Cd.4.1
 5º - Cd.2.10 15º - Cd.4.1
 6º - Cd.2.7 16º - Cd.2.9
 7º - Cd.2.4 17º - Cd.2.8
 8º - Cd.2.2 18º - Cd.2.5
 9º - Cd.3.1 19º - Cd.2.3
 10º - Cd.3.4 20º - Cd.2.1

MATERIAIS

Armadura de Pré-Esforço
 LNEC EA53 - 2002 / p/EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Força de puxo

Fpuxo = 140 kN/cordão*
 * - Poderá ocorrer a necessidade de retensionar os cordões.

Legenda

AA - Ancoragem Activa
 AP - Ancoragem Passiva
 SD - Sala de Desvão

Colaboração de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

-

**Reforço de laje com
 pré-esforço exterior**

Projecto de execução

Tragados dos cabos em planta



VSL Sistemas Portugal

Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

02

Curso: MEC/EG

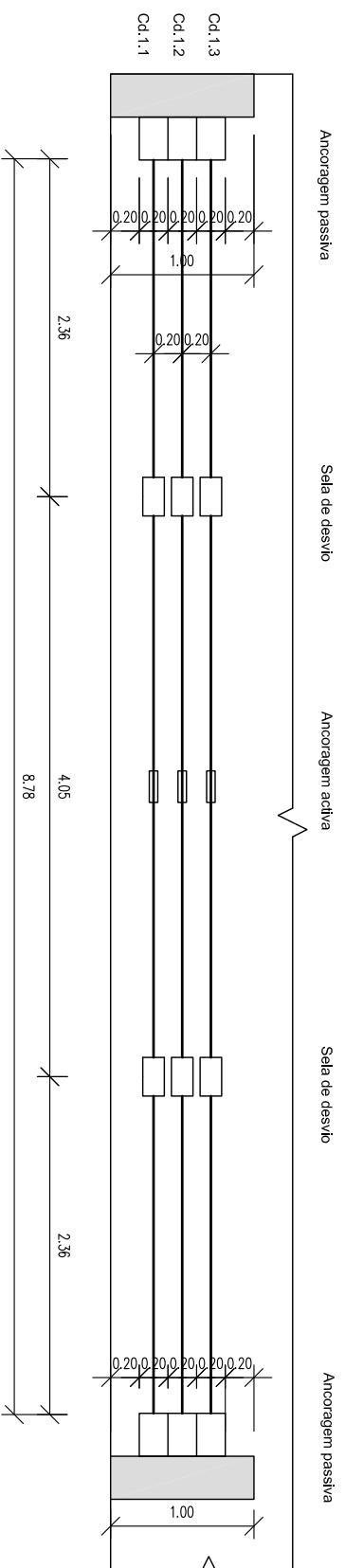
Dissertação de Mestrado

Escala:

1/100

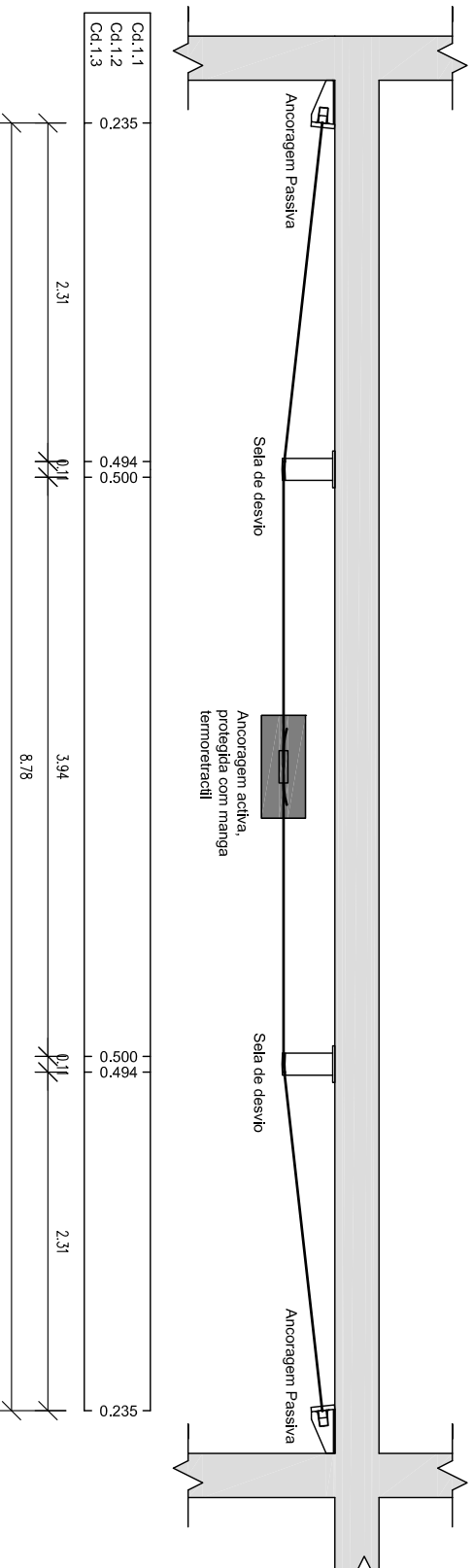
PORMENOR 1

(Cabo - Cd.1.1 / Cd.1.2 / Cd.1.3)



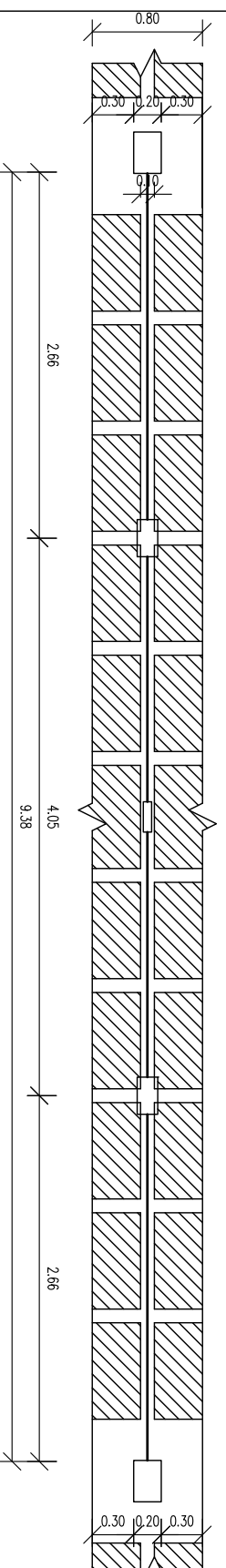
Corte longitudinal do PORMENOR 1

(Cabo - Cd.1.1 / Cd.1.2 / Cd.1.3)



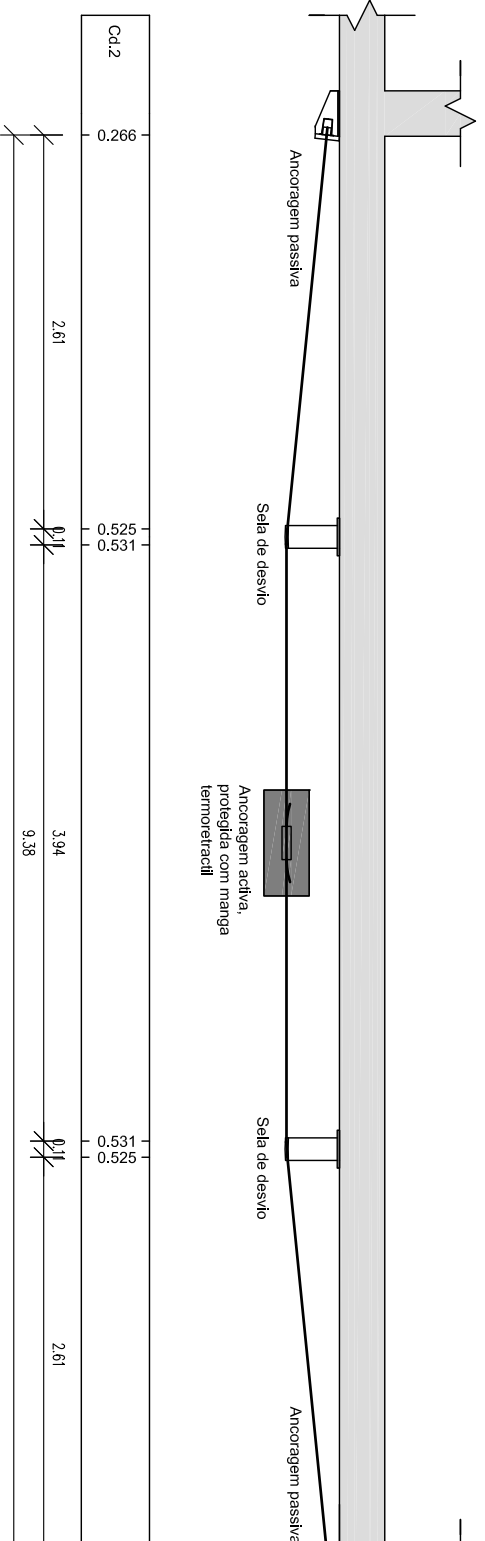
PORMENOR 2

(Cabo - Cd.2.1 / Cd. 2.7 / Cd. 2.8 / Cd. 2.9)



Corte Longitudinal do PORMENOR 2

(Cabo - Cd.2.1 / Cd. 2.7 / Cd. 2.8 / Cd. 2.9)



Dimensões em metros [m]

MATERIAIS:

Amadura de Pré-Esforço
 LNEC EA453 - 2002 / prEN 10139-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Colaboração de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

Reforço de laje com
 pré-esforço exterior



VSL Sistemas Portugal

Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

Escala:

1/50

Projecto de execução
 Traçados
 Pormenor 1 e 2
 Cortes longitudinais

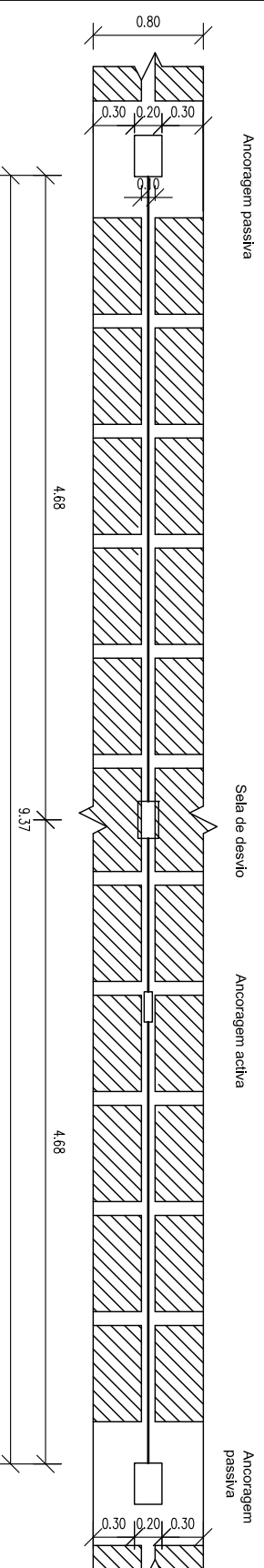
03

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

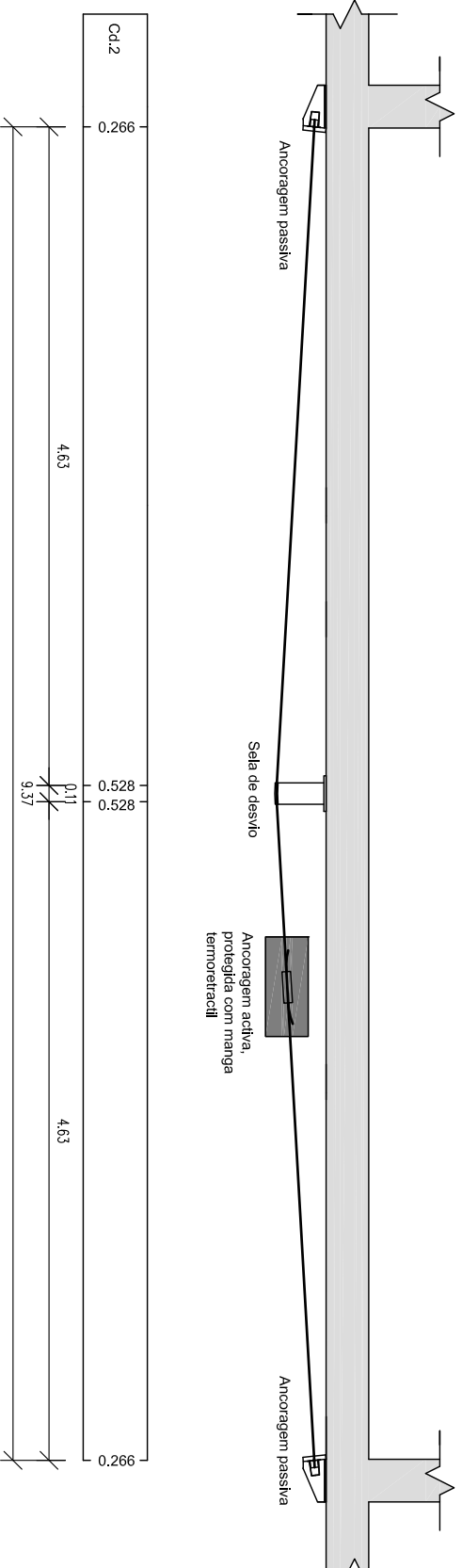
PORMENOR 3

(Cabo - Cd.2.2 / Cd.2.3)



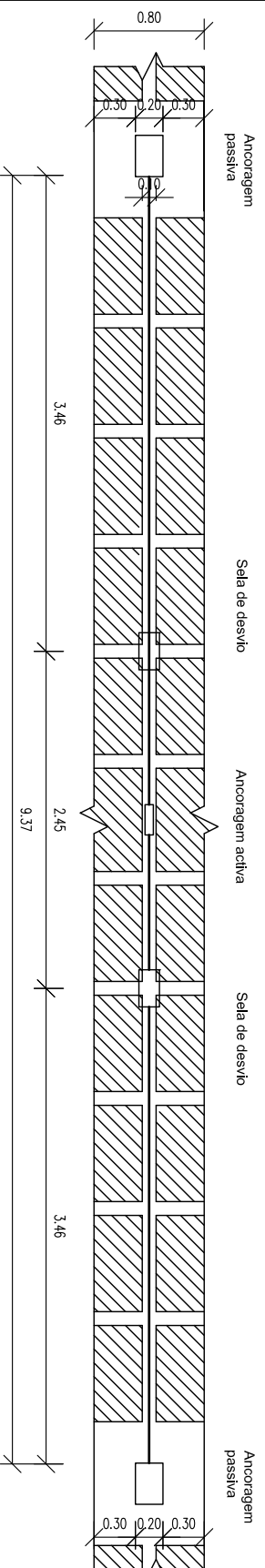
Corte Longitudinal do PORMENOR 3

(Cabo - Cd.2.2 / Cd.2.3)



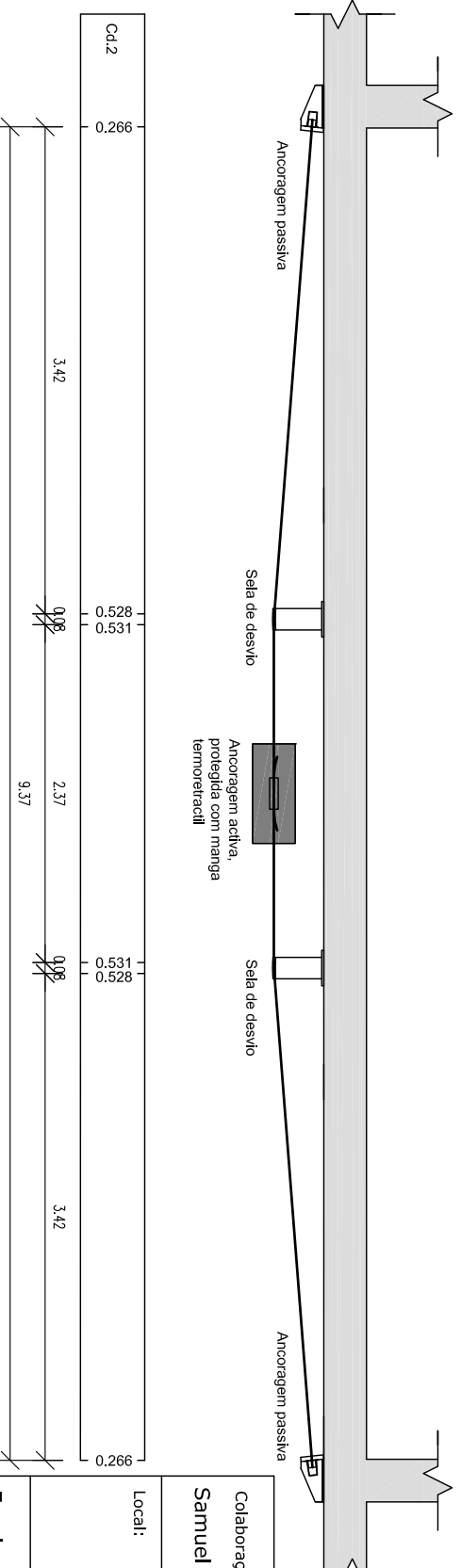
PORMENOR 4

(Cabo - Cd.2.4 / Cd.2.5)



Corte Longitudinal do PORMENOR 4

(Cabo - Cd.2.4 / Cd.2.5)



Dimensões em metros [m]

MATERIAIS:

Amadura de Pré-Esforço
 UNEC EA453 - 2002 / p/EN 10139-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Colaboração de:
 Samuel Neves - Nº 31142

Local:

Reforço de laje com
 pré-esforço exterior

VSL
VSL Sistemas Portugal
 Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

Escala:

1/50

Projecto de execução
 Traçados
 Pormenor 3 e 4
 Cortes longitudinais

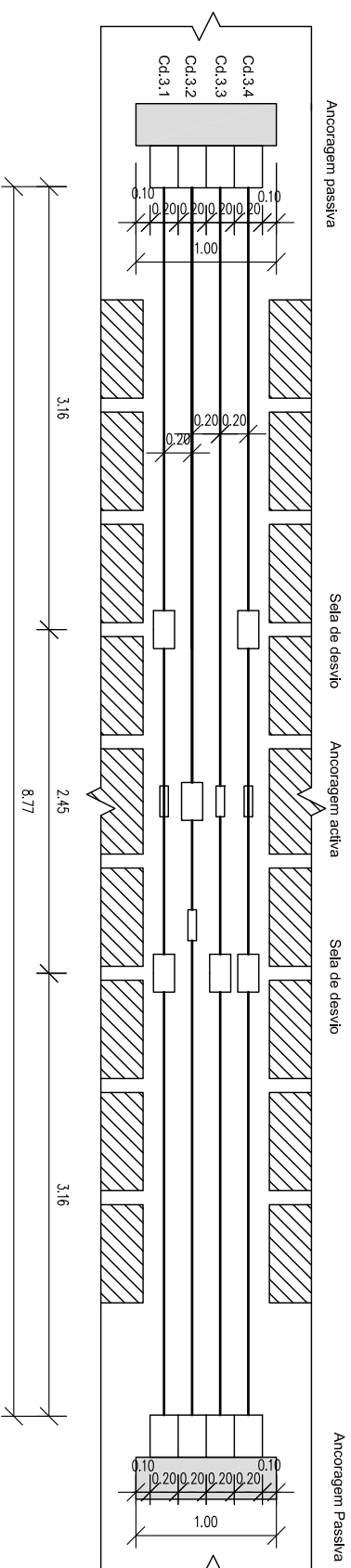
04

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

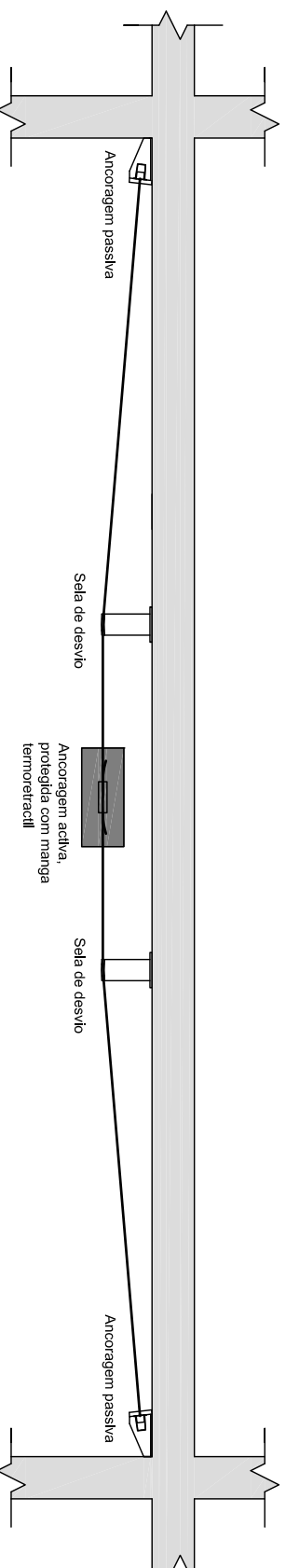
PORMENOR 5

(Cabo - Cd.3.1 / Cd.3.2 / Cd.3.3 / Cd.3.4)



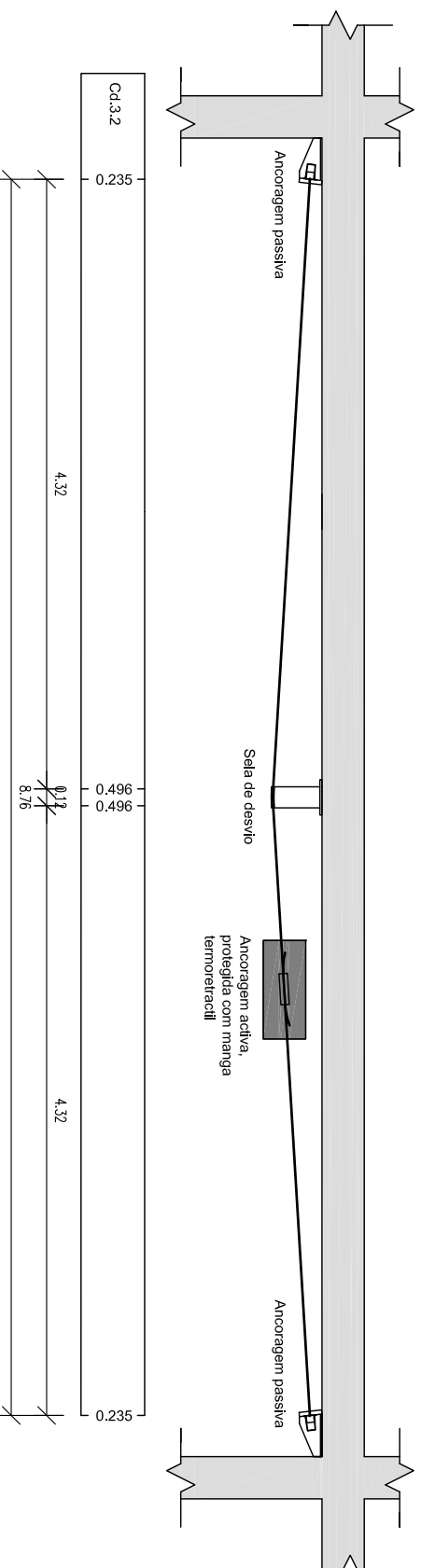
Corte longitudinal do PORMENOR 5

(Cabo - Cd.3.1 / Cd.3.4)



Corte longitudinal do PORMENOR 5

(Cabo - Cd.3.2)



MATERIAIS:

Amadura de Pré-Esforço
 LNEC EA453 - 2002 / p/EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Dimensões em metros [m]

Colaboração de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

-

Reforço de laje com
 pré-esforço exterior



VSL Sistemas Portugal
 Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

Projecto de execução
 Traçados
 Pormenor 5
 Cortes longitudinais

Escala:

1/50

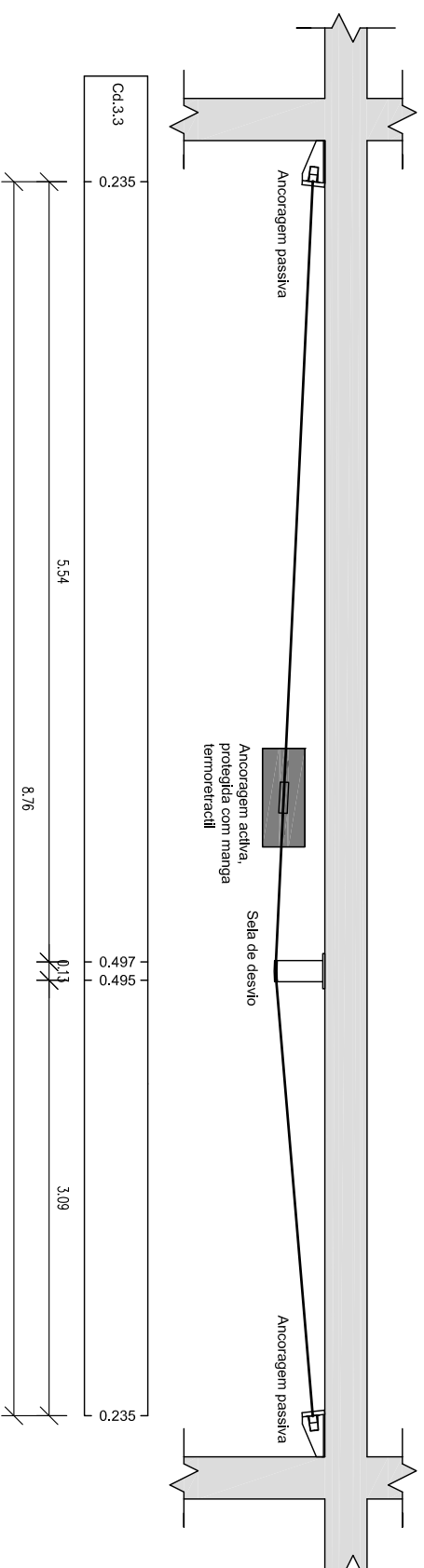
05

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

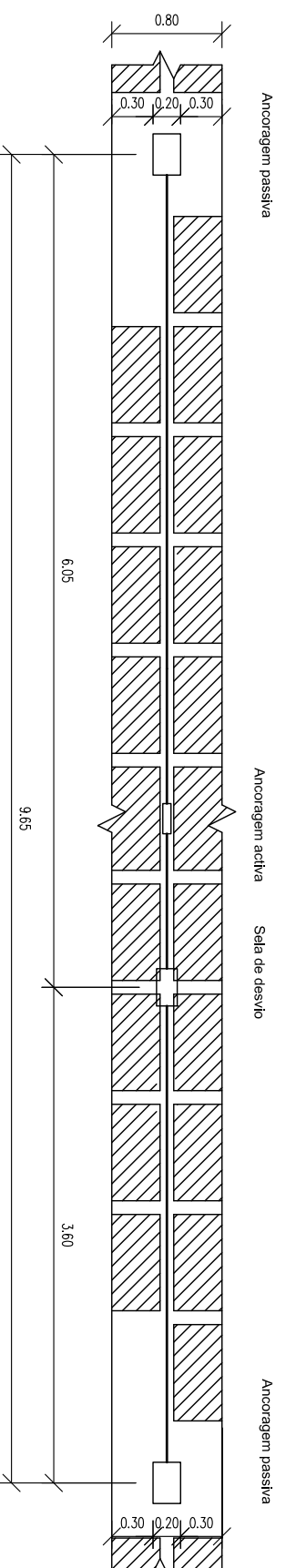
Corte longitudinal do PORMENOR 5

(Cabo - Cd.3.3)



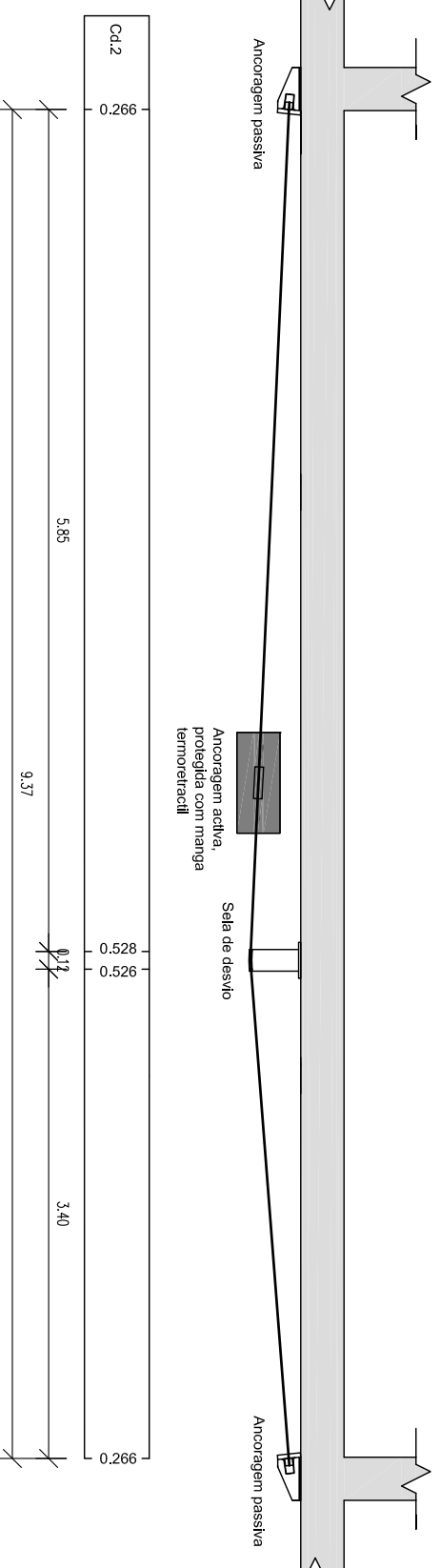
PORMENOR 6

(Cabo - Cd.2.6)



Corte Longitudinal do PORMENOR 6


(Cabo - Cd.2.6)



MATERIAIS:

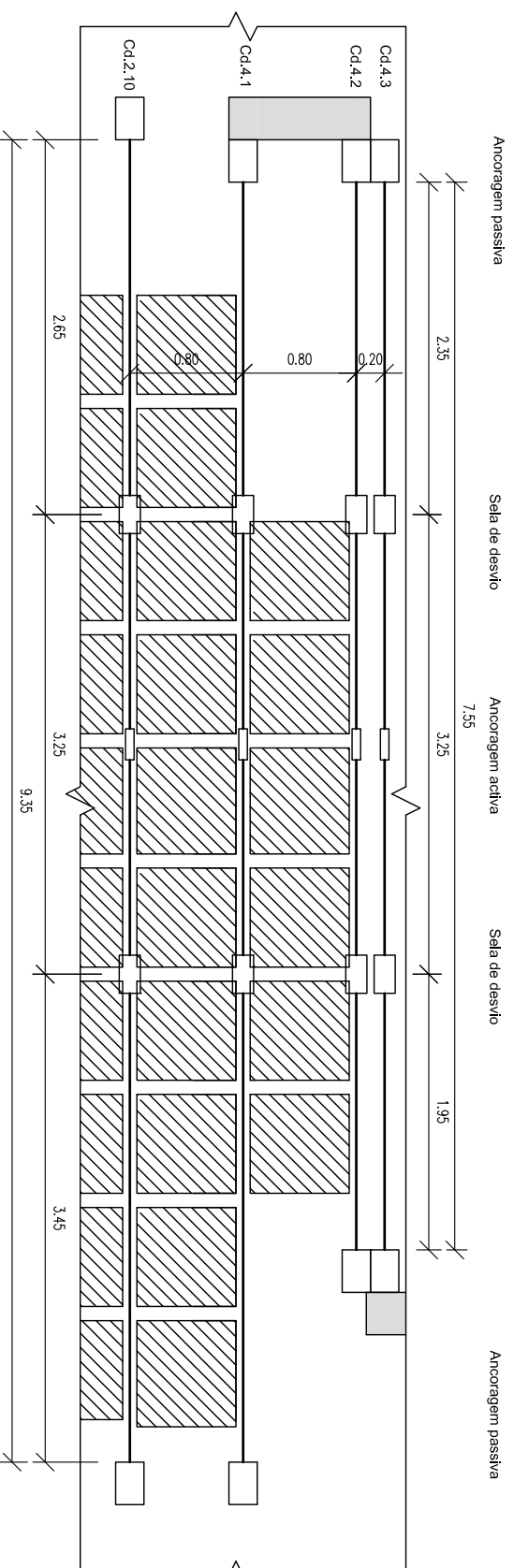
Armadura de Pré-Esforço
 UNEC EA53 - 2002 /p/EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Dimensões em metros [m]

Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142	Reforço de laje com pré-esforço exterior	 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A. Data: 01/12/2011 Desenho n.º
Local: -		
Projecto de execução Traçados Pormenor 5 Cortes longitudinais	06	Curso: MEC/EG Dissertação de Mestrado
Escala: 1/50		

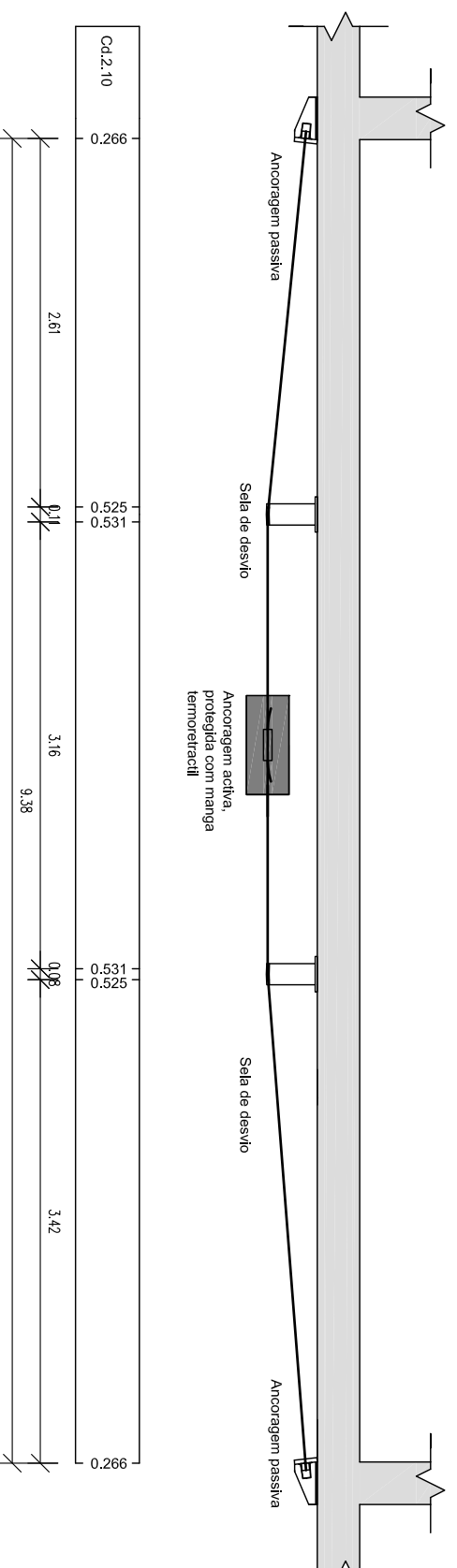
PORMENOR 7

(Cabo - Cd.2.10 / Cd.4.1 / Cd.4.2 / Cd.4.3)



Corte Longitudinal do PORMENOR 7

(Cabo - Cd.2.10)



MATERIAIS:

Armadura de Pré-Esforço
 LNEC E453 - 2002 / p/EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

Dimensões em metros [m]

Colaboração de:		Samuel Neves - Nº 31142	
Local:		-	
Projecto de execução		Traçados Pormenor 7	
Cortes longitudinais		Cortes longitudinais	
Reforço de laje com pré-esforço exterior		VSL Sistemas Portugal	
Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.		Data: 01/12/2011	
Desenho n.º		07	
Curso: MEC/EG		Dissertação de Mestrado	

Escala:

1/50



VSL Sistemas Portugal

Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

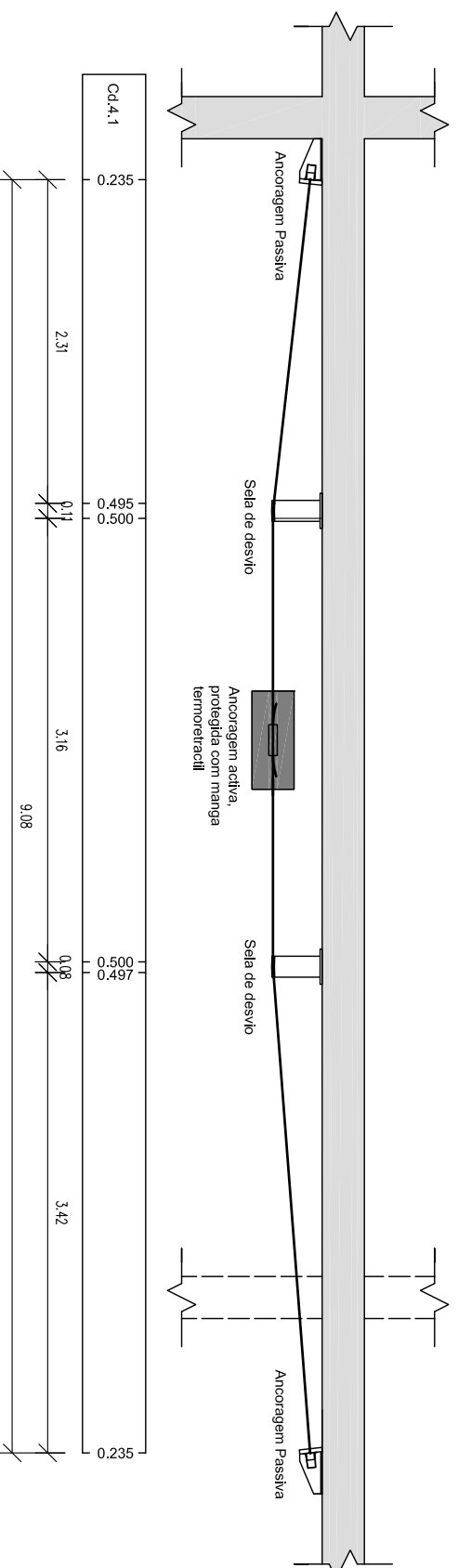
07

Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

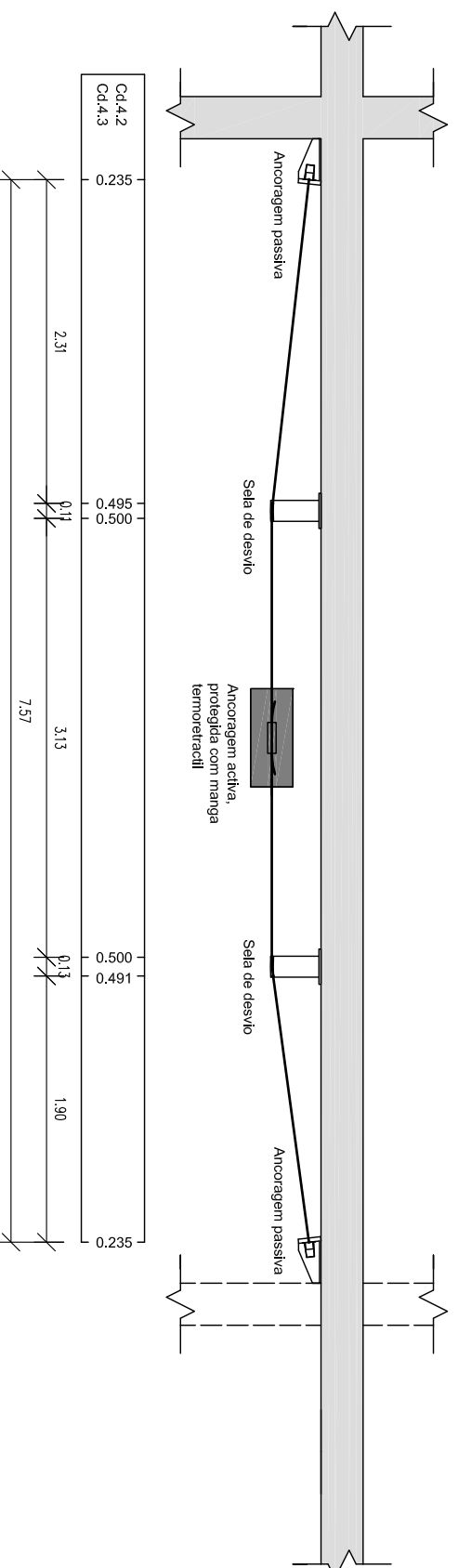
Corte Longitudinal do PORMENOR 7

(Cabo - Cd.4.1)



Corte Longitudinal do PORMENOR 7

(Cabo - Cd.4.2 / Cd.4.3)

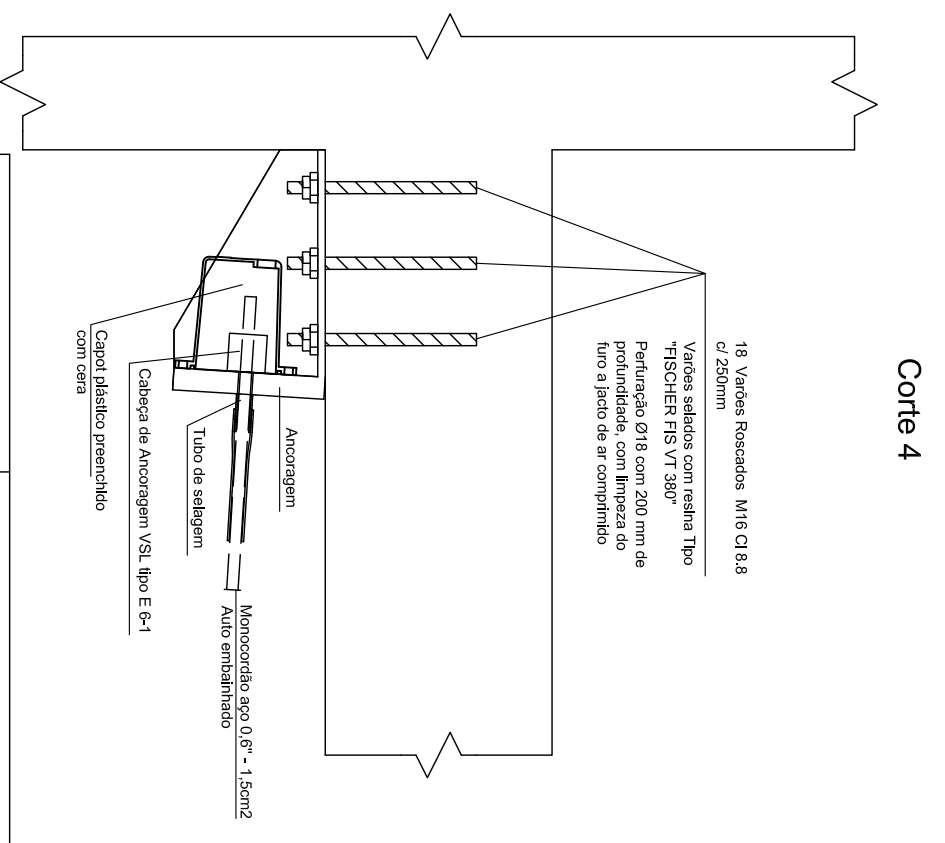
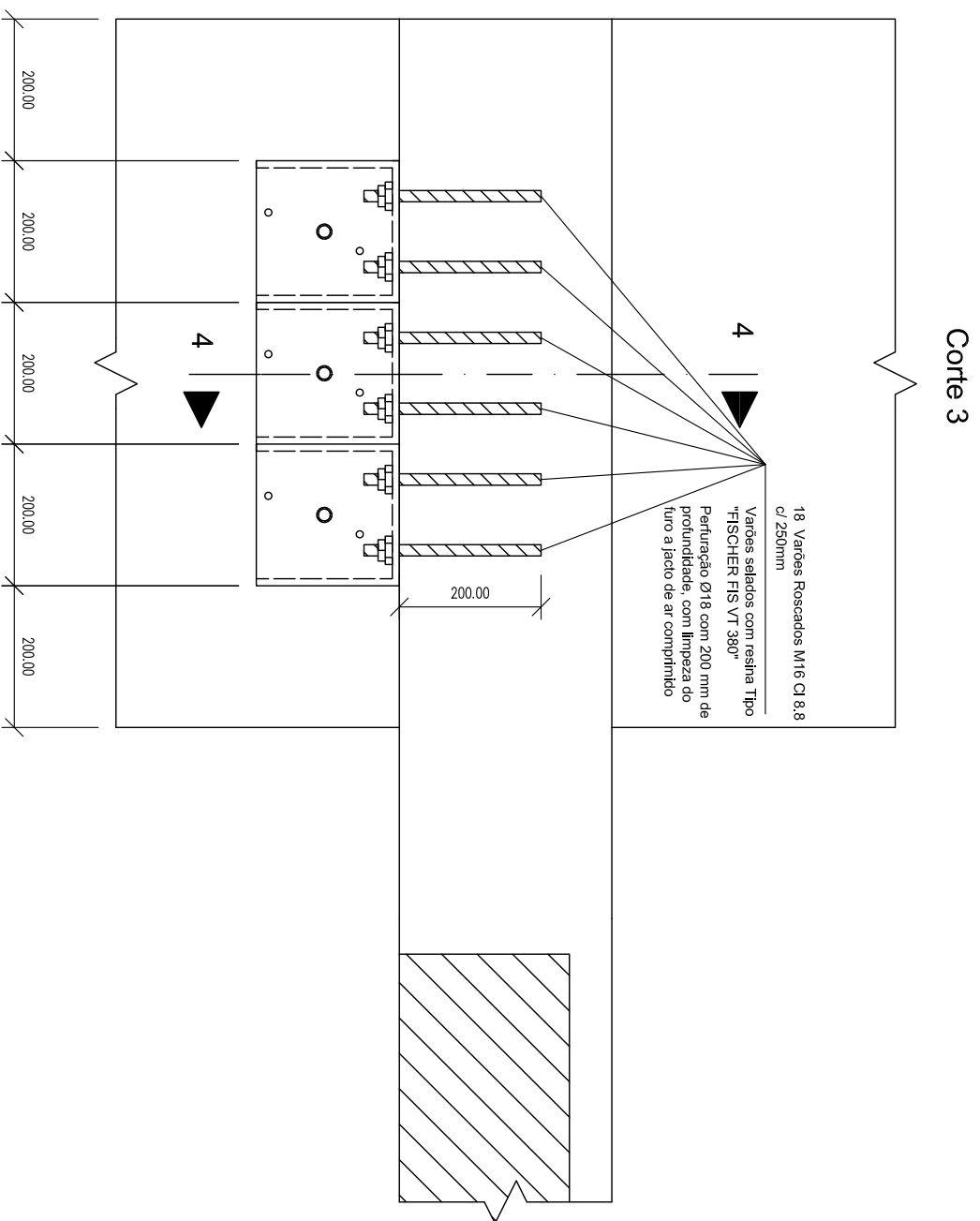
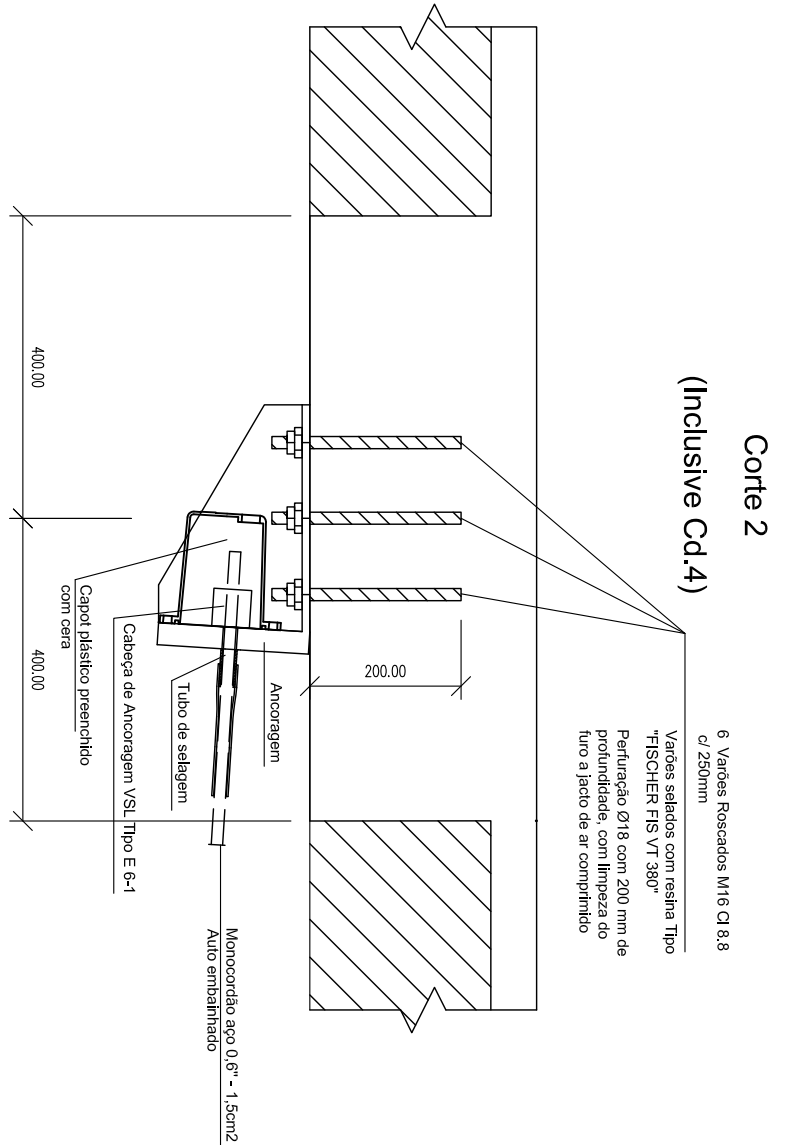
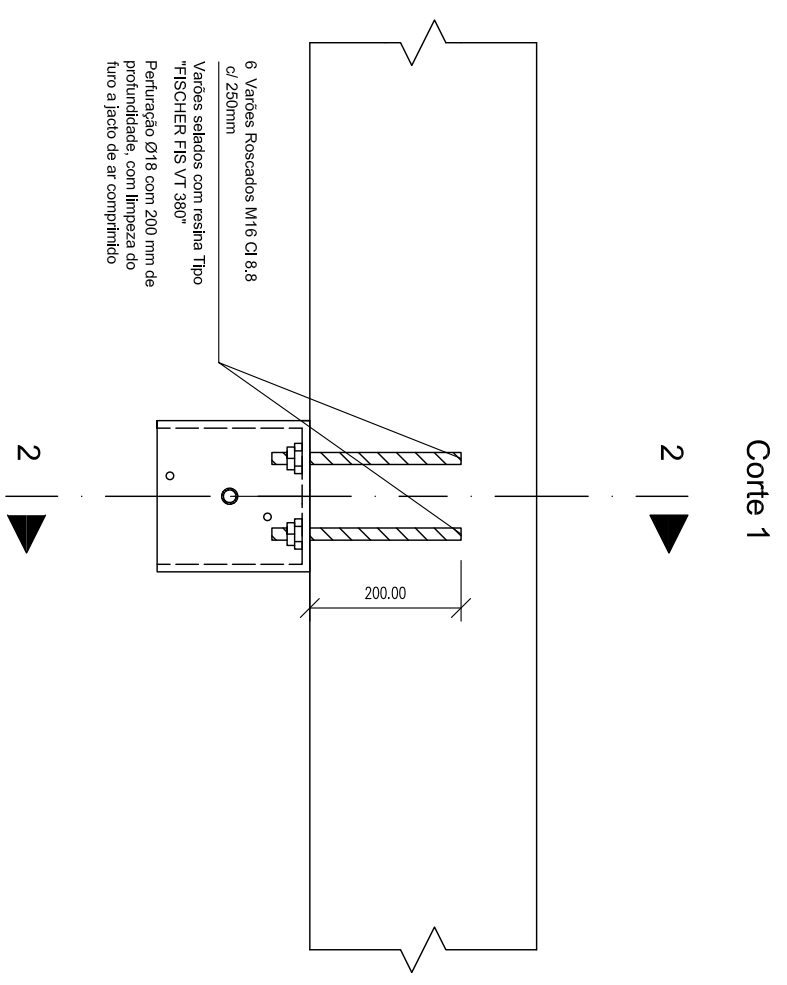


MATERIAIS:


Amadura de Pré-Esforço
 UNEC E453 - 2002 / EN 10138-3
 Secção nominal: 1,50 cm²
 Aço: Perfis e Chapas
 S235

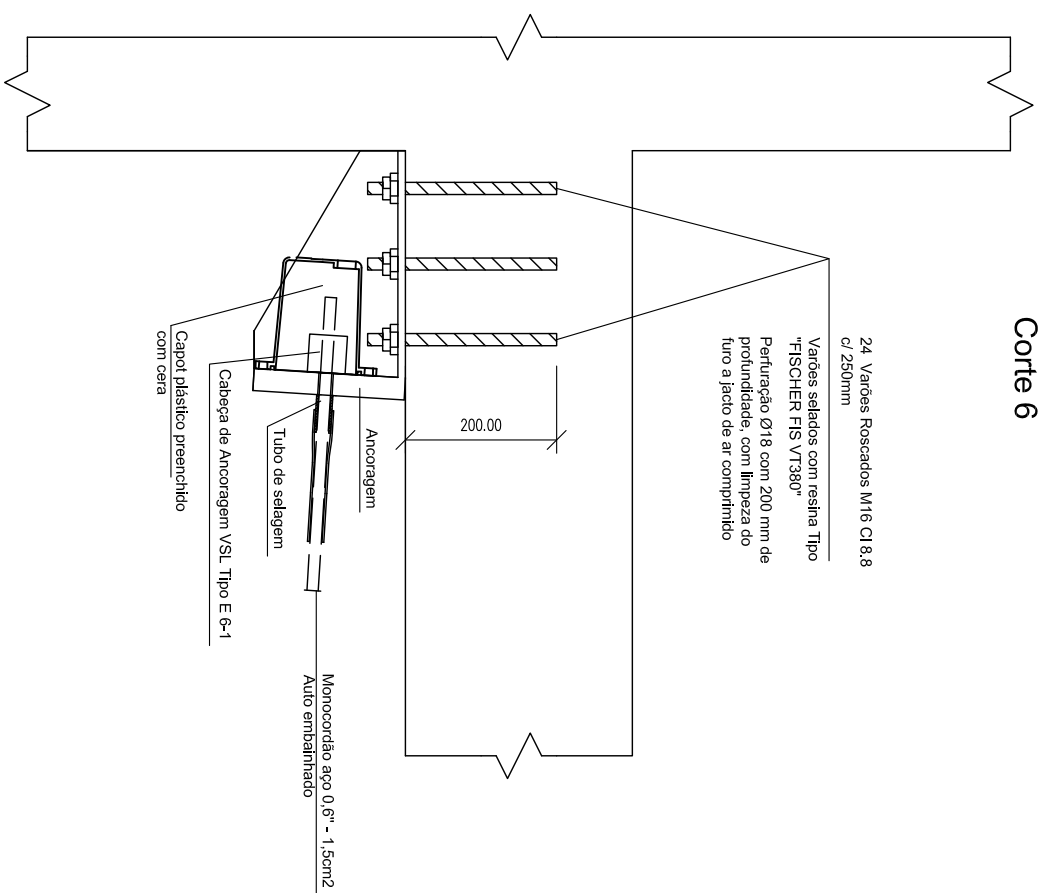
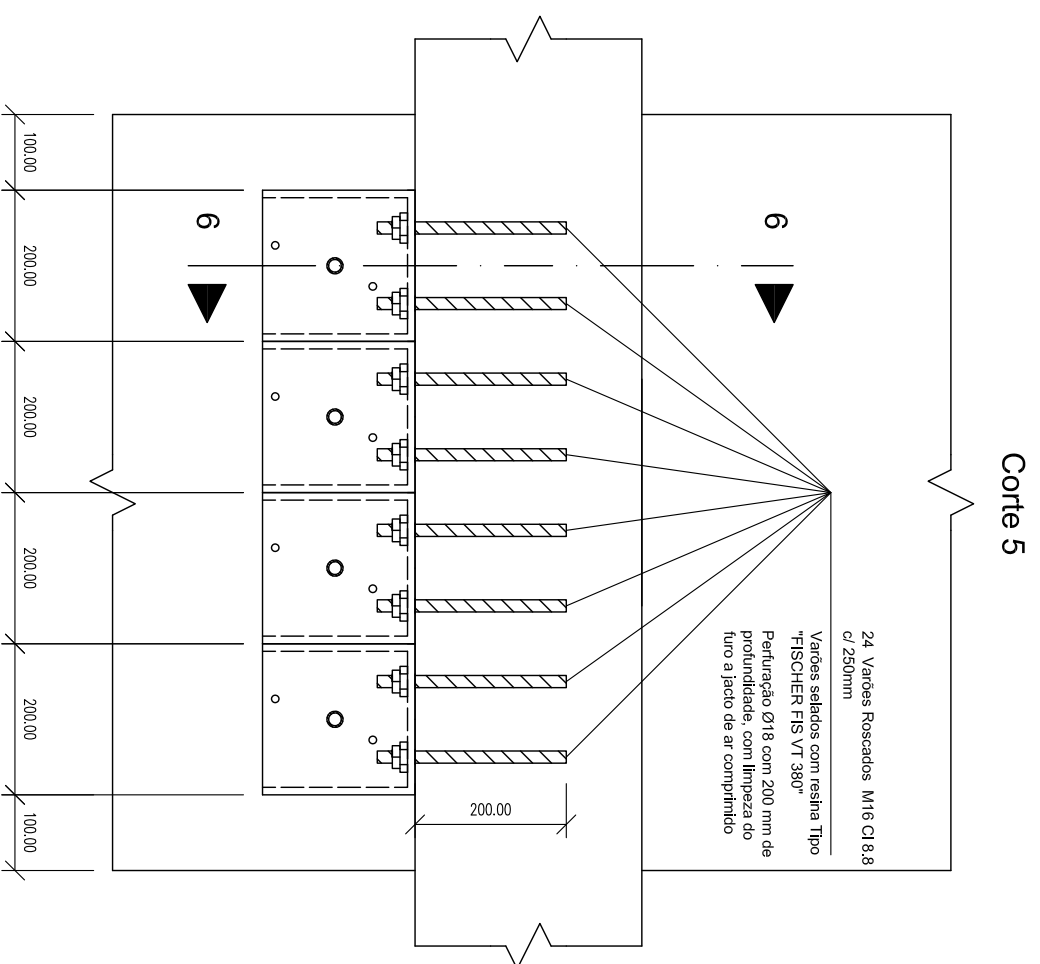
Dimensões em metros [m]

Colaboração de:		Samuel Neves - Nº 31142	
Local:		-	
Projecto de execução		Reforço de laje com pré-esforço exterior	
Traçados Pormenor 7		Cortes longitudinais	
Escala:		1/50	
Curso: MEC/EG		08	
Dissertação de Mestrado		VSL Sistemas Portugal	
		Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.	
		Data: 01/12/2011	
		Desenho n.º	




Dimensões em metros [mm]

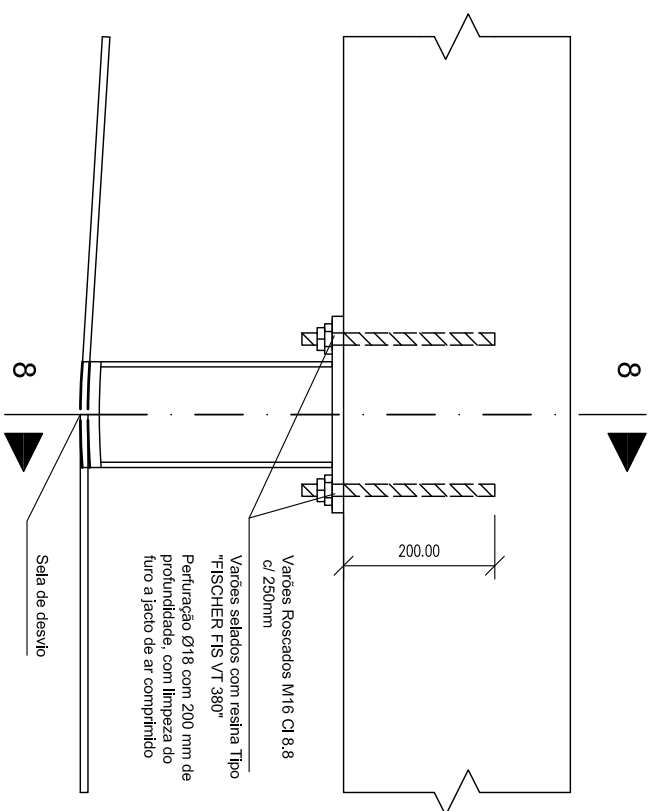
Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142	Reforço de laje com pré-esforço exterior	 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A. Data: 01/12/2011 Desenho n.º
Local: -		
Escala: 1/10	Projecto de execução Desenho de montagem Ancoragem passiva Pormenores	09 Curso: MEC/EG Dissertação de Mestrado



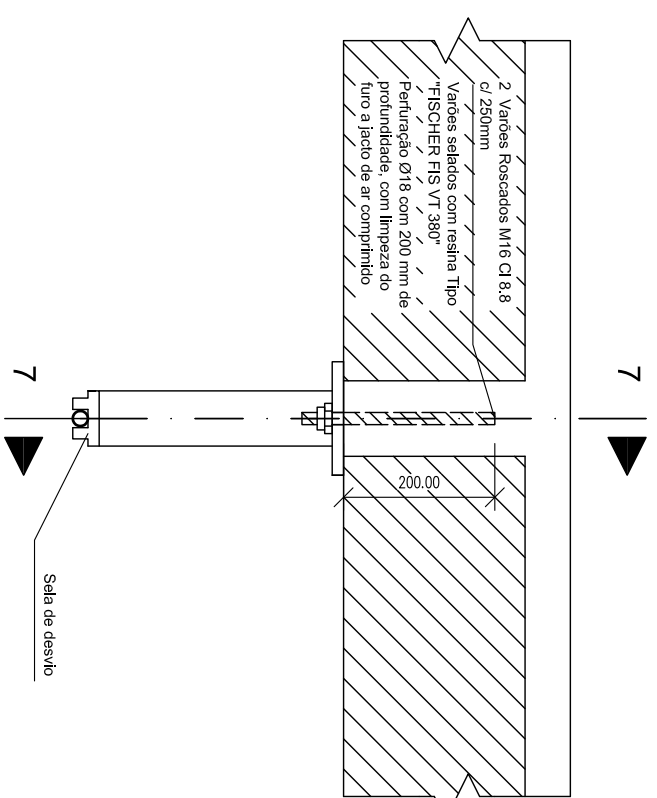
Dimensões em metros [mm]

Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142	Reforço de laje com pré-esforço exterior	 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A. Data: 01/12/2011 Desenho n.º 10
Local: -		
Projecto de execução Desenho de montagem Ancoragem passiva Pormenores		
Escala: 1/10		Curso: MEC/EG Dissertação de Mestrado

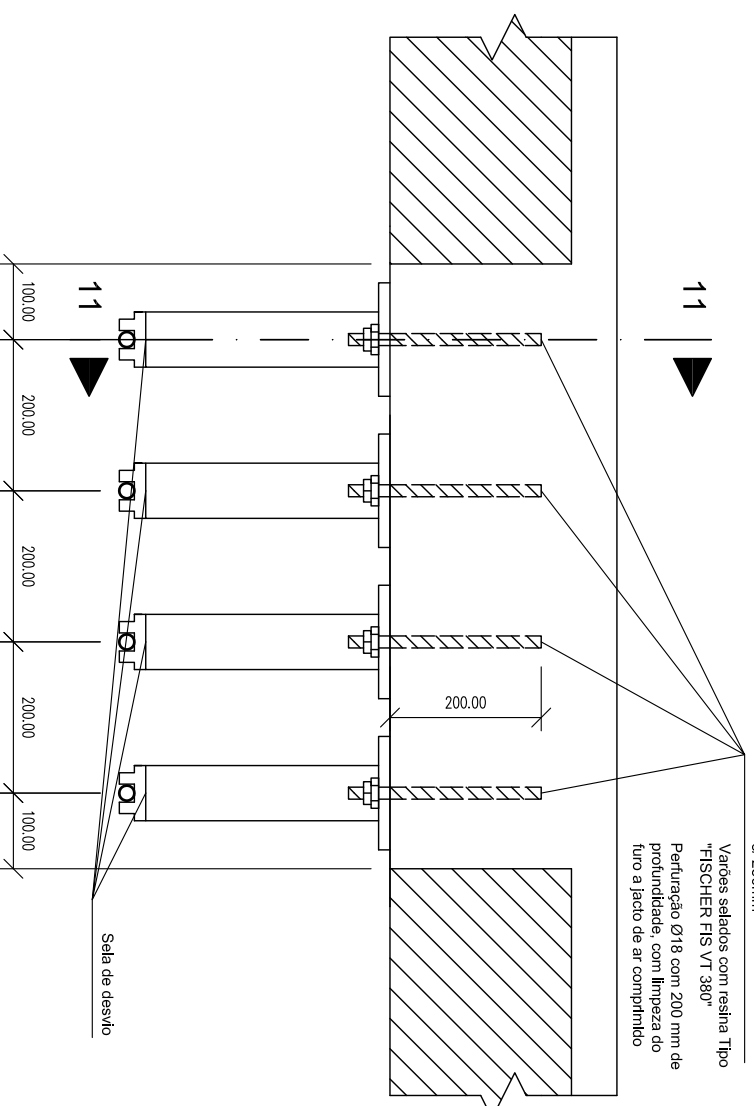
Corte 7, 9, 11



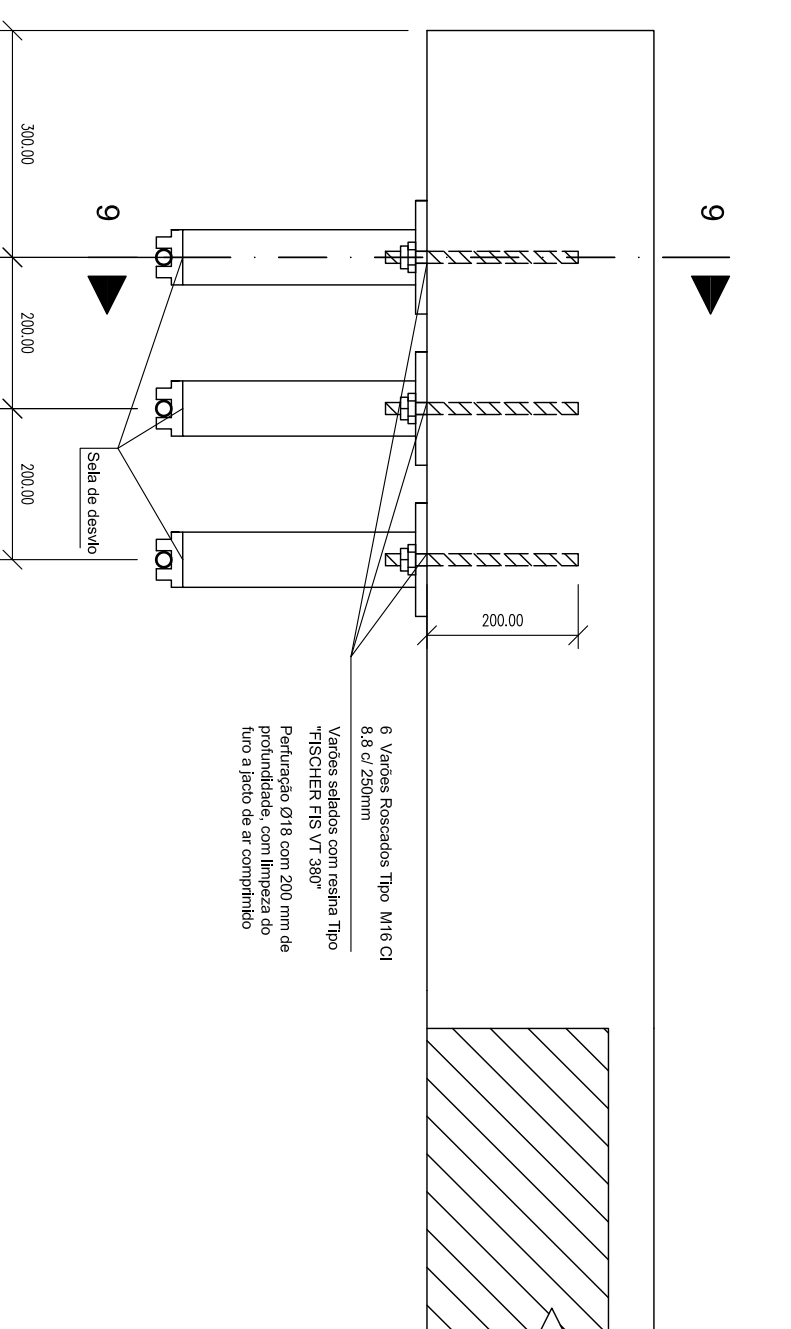
Corte 8



Corte 12



Corte 10



Dimensões em metros [mm]

Colaboração de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

Reforço de laje com pré-esforço exterior

VSL
VSL Sistemas Portugal
Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.
Data: 01/12/2011
Desenho n.º

Projecto de execução

Desenho de montagem

Sela de desvio
Pormenores

Escala:

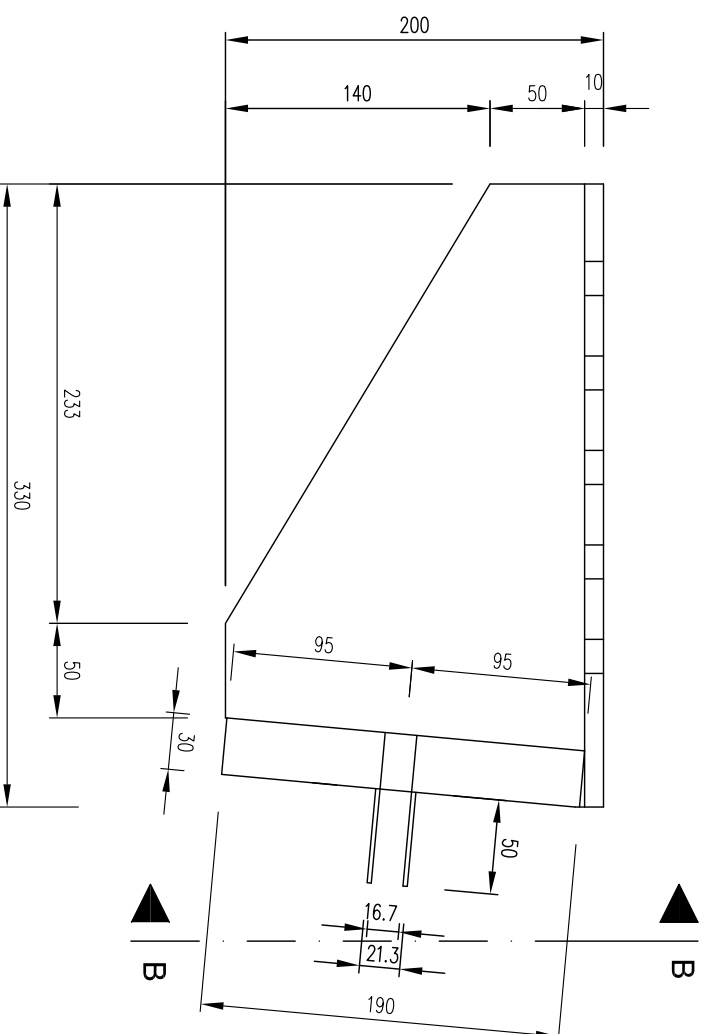
1/10

11

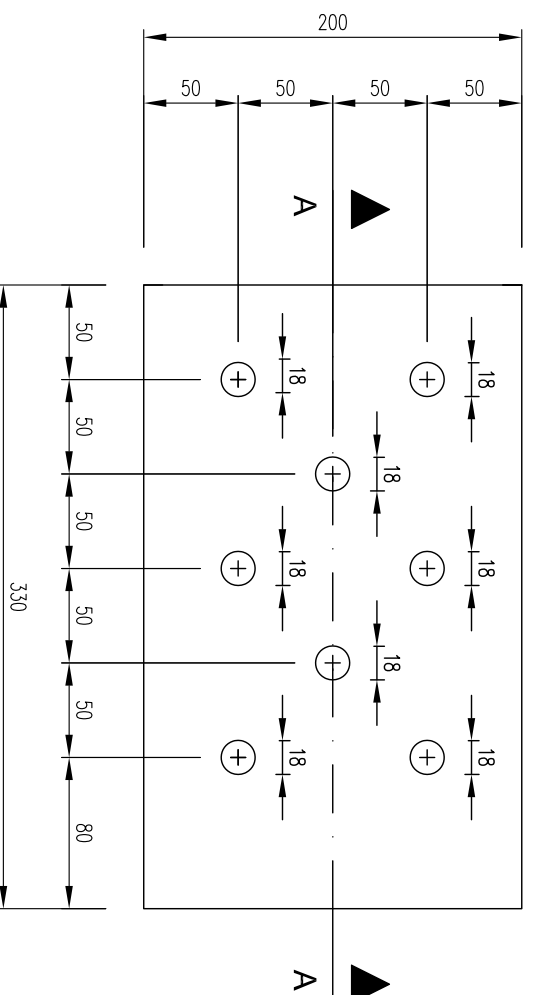
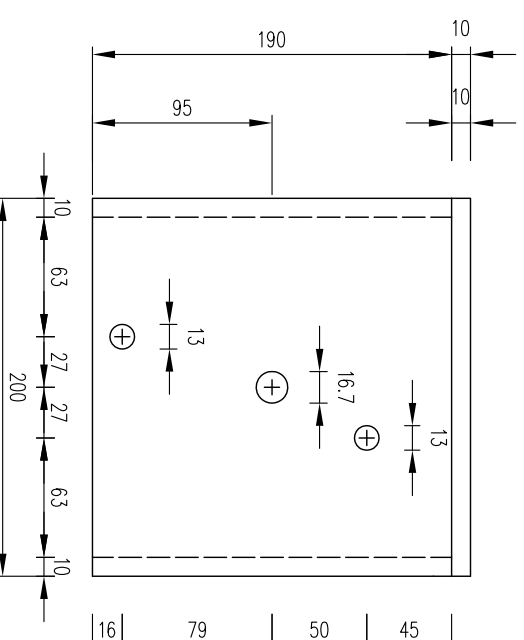
Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

Corte A



Corte B



Dimensões em metros [mm]

Notas:

- 1 - Dimensões em milímetros (mm)
- 2 - As arestas vivas devem ser adocadas.
- 3 - O cordão de soldadura deve ter uma espessura de 0,7 da menor dimensão a soldar.

MATERIAIS:

Perfis e Chapas: Aço S235
Parafusos M16 classe 8.8

Colaboração de:

Samuel Neves - Nº 31142

Local:

-

**Reforço de laje com
pré-esforço exterior**

Projecto de execução

Pormenores de fabrico
Ancoragem passiva
Cortes A, B, C



VSL Sistemas Portugal

Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A.

Data: 01/12/2011

Desenho n.º

12

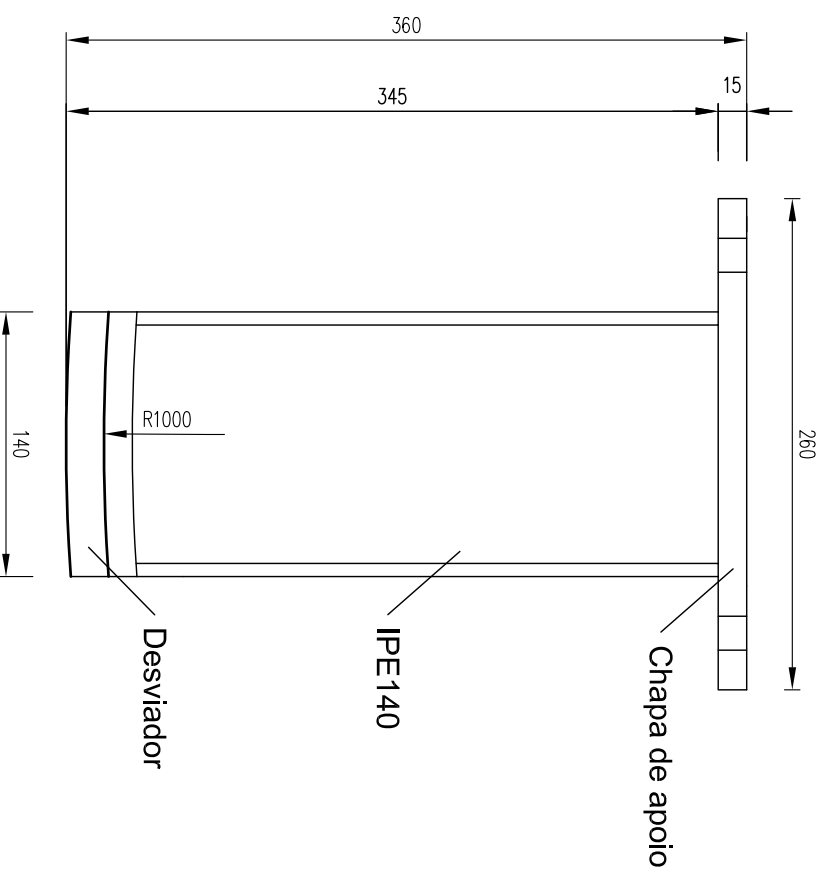
Curso: MEC/EG

Dissertação de Mestrado

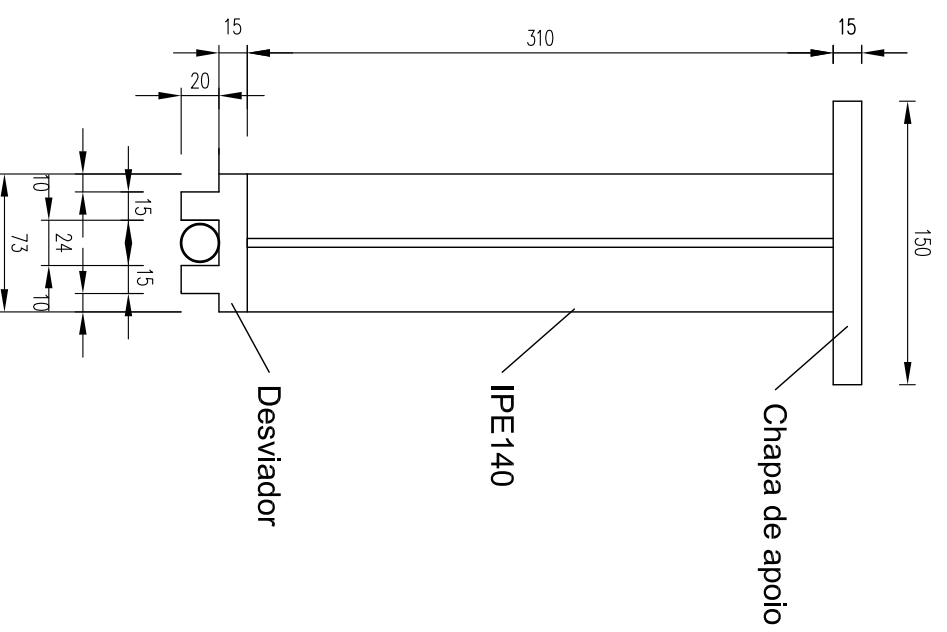
Escala:

1/4

Corte A



Corte B



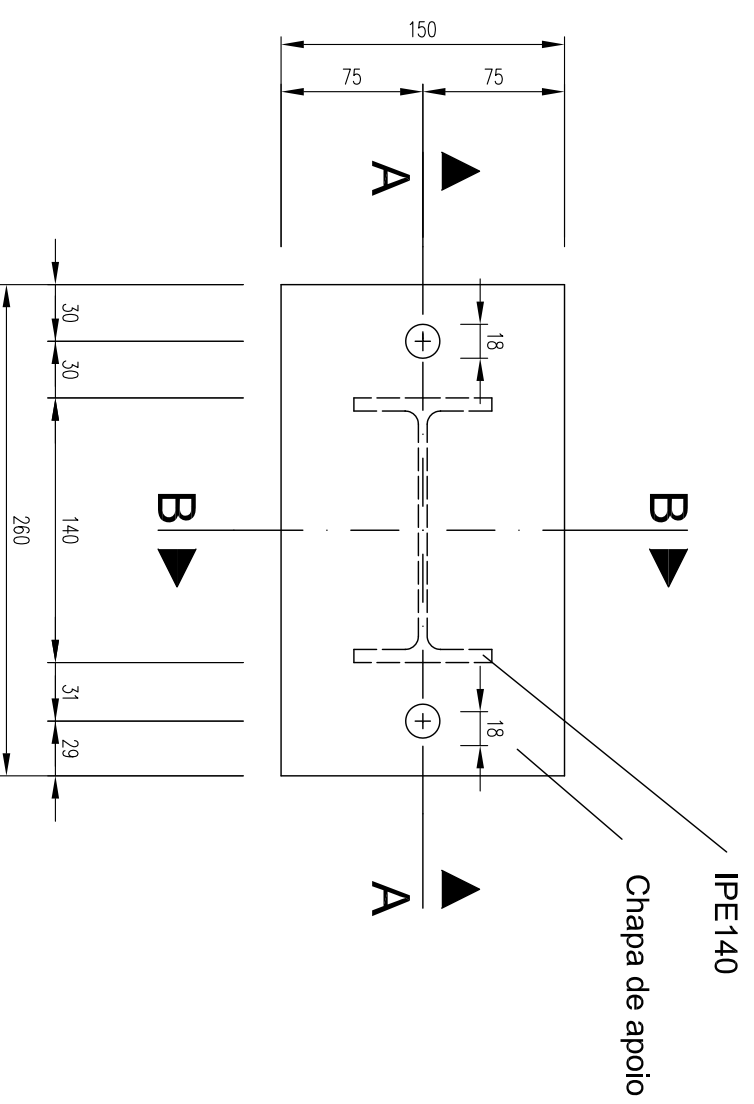
Notas:


- 1 - Dimensões em milímetros (mm)
- 2 - As arestas vivas devem ser adocadas.
- 3 - O cordão de soldadura deve ter uma espessura de 0,7 da menor dimensão a soldar.

MATERIAIS:

Perfis e Chapas: Aço S235
Parafusos M16 classe 8.8

Dimensões em metros [mm]



Colaboração de: Samuel Neves - Nº 31142	Reforço de laje com pré-esforço exterior	 VSL Sistemas Portugal Pré-Esforço, Equipamento e Montagens, S.A. Data: 01/12/2011 Desenho n.º
Local: -		
Escala: 1/4	Projecto de execução Pormenores de fabrico Sela de desvio Cortes A, B, C	13 Curso: MEC/EG Dissertação de Mestrado