

Desenvolvimento de uma rotina em Excel para Cálculo de Perdas de Pré-Esforço de acordo com EC2

Mestrando: Henrique Manuel Pacheco Moreira

Nº:1090148

Desenvolvimento de uma rotina em Excel para Cálculo de Perdas de Pré-Esforço de acordo com EC2

Relatório de estágio

Mestrado em Engenharia Civil Ramo-Estruturas

Orientador: Eng^o. Rodrigo Falcão Moreira

Co-orientador: Eng^o. Ricardo Pereira Santos

Supervisor: Eng^o. Rodrigo Falcão Moreira

Mestrando: Henrique Manuel Pacheco Moreira

Nº:1090148

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil — Ramo de Estruturas

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	i
Resumo.....	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice de Texto	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Quadros	xvii
1 Introdução.....	1
2 Enquadramento no Atual Estado de Desenvolvimento.....	4
3 Elaboração da folha de cálculo	28
4 Casos práticos de aplicação	52
5 Validação dos resultados	64
6 Considerações finais	81
Referências Bibliográficas	84

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma folha de cálculo em MS-Excel para cálculo de perdas de pré-esforço, utilizando rotinas programadas em Visual Basic. Neste relatório, após o capítulo introdutório onde são descritos os conceitos teóricos que sustentam o trabalho, descreve-se a aplicação desenvolvida e apresentam-se alguns exemplos de validação da mesma.

A aplicação executa o cálculo das perdas de pré-esforço por pós-tensão e calcula a geometria do cabo, disponibilizando no final a representação gráfica das perdas para o cabo em estudo.

Para além dos exemplos de validação referidos, são ainda apresentados os resultados obtidos por aplicação da folha de cálculo desenvolvida a uma situação real de projeto que surgiu durante a realização do estágio.

A parte final do relatório é dedicada à apresentação das conclusões assim como a algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Palavras – chave: Pré-esforço, Perdas, MS-Excel, Visual Basic, rotina

ABSTRACT

The present work aims to develop a spreadsheet using MS-Excel to calculate losses of prestressing using Visual Basic routines. In this report, after the introductory chapter where theoretical concepts are presented, the developed application is described and some examples are identified to validate the application.

The application performs the calculation of losses of prestressing by post-tensioning and calculates the cable geometry, providing at the end the graphic representation of the losses for the cable in study.

In addition to the mentioned examples, are presented the results obtained by applying the spreadsheet developed to a real situation project that arose during the internship.

The final part of the report is dedicated to the presentation of the conclusions as well as some suggestions for future developments.

Keywords: Prestressed Concrete, Losses, MS-Excel, Visual Basic, routine

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rodrigo Falcão Moreira por toda a disponibilidade, apoio e motivação transmitida

Ao Professor Ricardo Pereira Santos pela transmissão de conhecimentos sobre Visual Basic e pelo apoio e motivação dada.

À empresa SOPSEC pela oportunidade de realização de estágio em ambiente empresarial.

Aos colaboradores da SOPSEC pela disponibilidade e simpatia demonstradas para esclarecimento de dúvidas durante o estágio.

Aos meus pais e irmão, pela paciência, apoio e carinho ao longo de toda a minha vida.

À Laura pela presença, compreensão e carinho.

Aos meus amigos e colegas que marcaram presença ao longo da minha vida acadêmica.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do trabalho	1
1.2	Empresa do Estágio.....	2
2	Enquadramento no Atual Estado de Desenvolvimento.....	4
2.1	Armaduras de pré-esforço.....	6
2.2	Perdas de pré-esforço.....	9
2.2.1	Perdas por Atrito	10
2.2.2	Reentrada das cunhas	11
2.2.3	Deformação elástica do betão.....	12
2.2.4	Perdas diferidas	13
2.3	Traçado dos cabos	15
2.3.1	Parábola de 2º Grau	15
2.3.2	Desvio angular	19
2.4	Alongamento do cabo.....	19
2.5	Bases DE dimensionamento	20
2.5.1	Esmagamento do betão	21
2.5.2	Armaduras	21
2.5.3	REBAP	22
2.5.4	Eurocódigo 1992-1	23
2.5.5	Model Code 2010	24

2.5.6	Armaduras de ancoragem	26
3	Elaboração da folha de cálculo.....	28
3.1	Introdução.....	28
3.2	Definição DO traçado	31
3.2.1	Tipo de Ponto.....	32
3.2.2	Tipo de Função.....	33
3.3	Funcionamento da rotina.....	33
3.4	Apresentação de resultados	35
3.5	Dados cabo.....	36
3.6	Rotina perdas de atrito	37
3.7	Cálculo integral	38
3.8	Perdas reentrada.....	41
3.9	Perdas por deformação elástica	43
3.10	Aspeto gráfico	44
3.11	Apresentação intermédia de resultados	46
3.12	Perdas diferidas.....	47
3.13	2ª Fase de puxe	49
3.14	Perdas de atrito (reajuste)	50
3.15	Perdas por reentrada 2ª fase	50
3.16	Quadro perdas.....	50
4	Casos práticos de aplicação.....	52
4.1	Introdução.....	52
4.2	Metodologia.....	52
4.3	Estudo das vigas.....	53
5	Validação dos resultados.....	64
5.1	Validação dos dados com recurso a <i>software</i> comercial	64

5.2	Comparação dos resultados da folha de cálculo com exercício académico.....	72
5.2.1	Apresentação do exercício académico.....	72
5.2.2	Resultados.....	77
6	Considerações finais.....	81
6.1	Conclusões.....	81
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	82
	Referências Bibliográficas.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Vigota Pré-esforçada	6
Figura 2 - Ancoragem ativa e componentes	7
Figura 3 - Ancoragem passiva e disposições geométricas	8
Figura 4 - Acoplador	8
Figura 5 - Sistema de pós-tensão.....	9
Figura 6 - Bainha Metálica	11
Figura 7 - Esquemática de perdas por reentrada de cunhas.....	12
Figura 8 - Pontos para cálculo do parâmetro A.....	17
Figura 9 - Concordância Parábola-Reta.....	17
Figura 10 - Concordância Parábola-Parábola	18
Figura 11 - Concordância Parábola -Reta com derivada diferente de 0	18
Figura 12 - Concordância Parábola -Parábola com derivada diferente de 0.....	19
Figura 13 - Distribuição de cálculo para áreas sujeitas a forças concentradas (Fonte: Adaptação- EN1992-1-1).....	22
Figura 14 - Armadura em Hélice [8].....	25
Figura 15 - Interface Visual Basic com código desenvolvido	28
Figura 16 - Célula de Excel Programada.....	30
Figura 17 - Número de tramos em alçado	31
Figura 18 - Número de tramos em planta.....	31
Figura 19 - Introdução de dados em Alçado	32
Figura 20 - Introdução de dados em Planta	32

Figura 21 - Denominação dos pontos notáveis	32
Figura 22 - Traçado de cabo com função TGAR.....	33
Figura 23 - Dados de tramos.....	35
Figura 24 - Parâmetros das equações do cabo.....	36
Figura 25 - Características das funções associadas ao traçado do cabo	36
Figura 26 - Formulário de Características Cabo pré-esforço.....	37
Figura 27 - Apresentação da soma do desvio angular	38
Figura 28 - Valores para cálculo do alongamento do cabo e cotas do cabo	39
Figura 29 - Regra dos trapézios composta	39
Figura 30 - Apresentação da folha de cálculo perdas de atrito.....	40
Figura 31 - Formulário para método de cálculo	41
Figura 32 - Cálculo de perdas por tramo por metro linear	42
Figura 33 - Perdas de atrito e perdas por reentrada de cunhas	42
Figura 34 - Formulário para cálculo de perdas por deformação elástica	43
Figura 35 - Apresentação dos dados auxiliares para cálculo de perdas por deformação elástica	45
Figura 36 - Apresentação da folha perdas por deformação elástica.....	45
Figura 37 - Janela informativa com resultados das folhas de cálculo	47
Figura 38 - Informação auxiliar para cálculo de perdas diferidas.....	48
Figura 39 - Apresentação da folha de perdas diferidas	49
Figura 40 - Apresentação da folha de cálculo Quadro perdas	51
Figura 41 - Perfil tipo das vigas 1 2 3.....	53
Figura 42 - Solução 1 para traçado da viga 1 2.....	54
Figura 43 - Solução 2 para traçado da viga 1 2.....	55
Figura 44 - Traçado original da viga 3	55
Figura 45 - Código para introdução automática do novo traçado no desenho original	56
Figura 46 - Comparação entre solução original e solução proposta	56

Figura 47 - Perdas de atrito da viga 1 e 2.....	57
Figura 48 - Traçado dos cabos da viga 4	57
Figura 49 - Proposta para nova localização de ancoragem passiva em alçado	58
Figura 50 - Proposta para nova localização de ancoragens passiva e ativa	58
Figura 51 - Solução original	59
Figura 52 - Perdas de atrito viga 4	60
Figura 53 - traçado do cabo 4 e 5 na viga 4 obtido automaticamente	60
Figura - 54 Viga 5 e traçado do cabo correspondente 6 e 7	61
Figura 55 - Traçado do cabo 6 e 7.....	62
Figura 56 - Perdas de atrito viga 5	63
Figura 57 - Perdas de atrito viga 1 e 2	65
Figura 58 - Gráfico obtido com recurso ao programa SOFISTIK.....	66
Figura 59 - Comparação Perdas de atrito SOFISTIK Excel da Viga 4.....	68
Figura 60 - Gráfico de perdas atrito da viga 4, SOFISTIK.....	69
Figura 61 - Gráfico de perdas de pré-esforço viga 4, Excel.....	69
Figura 62 - Gráfico de perdas de pré-esforço da viga 5, SOFISTIK	70
Figura 63 - Gráfico de perdas de pré-esforço, Excel.....	70
Figura 64 - Exercício Académico [3].....	73
Figura 65 - Número de tramos em Alçado.....	73
Figura 66 - Número de tramos em Planta.....	74
Figura 67 - Janela de introdução de dados do exercício académico.....	74
Figura 68 - Formulário de dados preenchido com os dados do exercício académico.....	75
Figura 69 - Introdução da distância para cálculo de perdas de pré-esforço por reentrada de cunhas	75
Figura 70 - Método utilizado para cálculo de perdas por reentrada de cunhas	76
Figura 71 - Dados das funções que definem o cabo.....	76
Figura 72 - Parâmetros das equações.....	76

Figura 73 - Características dos tramos de equação que definem o traçado do cabo.....	76
Figura 74 - Método de cálculo da distância para perdas por reentrada de cunhas [3]	78
Figura 75 - Valor da distância por reentrada de cabos obtido pela folha de cálculo.....	78
Figura 76 - Valor e fórmula de cálculo do alongamento do cabo	79
Figura 77 - Valor do alongamento do cabo obtido pela folha de cálculo.....	80

ÍNDICE DE QUADROS

Tabela 1 - Perdas de Pré-esforço por Pós-tensão	10
Tabela 2 Perda de Pré-esforço por pré-tensão	10
Tabela 3 - Fórmulas para cálculo de perdas por reentrada de cunhas	12
Tabela 4 - Perdas pré-esforço Viga 1 e 2 SOFISTIK	67
Tabela 5 - Perdas de pré-esforço viga 1 e 2 Excel	67
Tabela 6 - Perdas de pré-esforço da viga 5	71
Tabela 7 - Perdas de pré-esforço viga 5, Excel	71
Tabela 8 Valores perdas de atrito [3].....	77
Tabela - 9 Valores de perdas de atrito obtidas com recurso à folha de cálculo.....	77
Tabela - 10 Perdas de atrito e reentrada de cabos [3]	78
Tabela 11 - Perdas por reentrada de cabos com recurso à folha de cálculo.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

O estágio decorreu na empresa SOPSEC S.A. em Vila Nova de Gaia, de 3 de Março de 2015 a 31 de Julho de 2015 (duração aproximada de 5 meses).

A ideia de desenvolver uma folha de cálculo em EXCEL dedicada ao cálculo automático de perdas de pré-esforço surge, no contexto da empresa acolhedora do estágio, com o objetivo de automatizar um processo que se pode tornar moroso e demasiado repetitivo em obras com alguma dimensão, aumentando desta forma o tempo necessário para o desenvolvimento dos projetos e os respetivos custos envolvidos.

Durante o estágio curricular foi necessária a aplicação de conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso contribuindo assim não só para a aquisição mas também para o desenvolvimento de competências profissionais no contacto com a realidade empresarial.

Este trabalho está dividido em cinco partes principais sendo a primeira a introdução teórica, a segunda parte o desenvolvimento da folha de cálculo, a terceira parte é formada pelos casos práticos e a quarta parte contém a validação de resultados. Por último são apresentadas as conclusões assim como sugestões para desenvolvimentos futuros.

A primeira parte aborda a teoria envolvida no cálculo das perdas de pré-esforço assim como a teoria que compõe o cálculo de armaduras passivas na zona das ancoragens.

Seguidamente aborda-se o desenvolvimento da folha de cálculo com recurso à linguagem *Visual Basic*. Este desenvolvimento teve o propósito de tornar o mais

automatizado possível este cálculo, reduzindo o tempo de elaboração do projeto de aplicação de pré-esforço e tornando o estudo do traçado do cabo mais fácil.

Na terceira parte deste relatório apresenta-se o caso prático que foi possível realizar durante o estágio. Trata-se de um projeto de aplicação de pré-esforço no qual foi possível aplicar a folha de cálculo desenvolvida previamente.

A quarta parte teve como o objetivo a validação de resultados obtidos pela folha de cálculo. Esta validação socorreu-se da comparação direta com resultados obtidos com um *software* comercial e em conjunto realizou-se uma comparação com um exercício académico de modo a validar a folha, com a obtenção de resultados iguais para os mesmos modelos de cálculo.

Por último são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido assim como sugestões de desenvolvimentos futuros que poderão integrar a folha de cálculo desenvolvida neste presente trabalho.

1.2 EMPRESA DO ESTÁGIO

A SOPSEC, Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil, S.A. foi fundada em 25 de Março de 1988 por José Amorim Faria, Hipólito de Sousa e Rui Calejo.

A sociedade tem por objeto a prestação de serviços no domínio da consultoria, elaboração de projetos e gestão de obras, de forma exclusiva e independente direta ou indiretamente.

A SOPSEC implementou, a partir de Agosto de 2001, o Sistema de Gestão da Qualidade, de acordo com o referencial ISO 9001, sendo certificada desde 22 de Outubro de 2002. O presente âmbito da certificação é: “Consultoria, Coordenação e Elaboração de Projectos de Engenharia. Gestão, Fiscalização, Coordenação de Segurança e Gestão Ambiental em Empreendimentos. Avaliação dos Aspetos Ambientais em fase de Projecto” e aplica-se à Sede da SOPSEC, extensão da Sede e à Delegação Lisboa.

A SOPSEC é, desde Outubro de 2003, certificada pela Comissão da Marca de Qualidade do LNEC como Gestor Geral da Qualidade para os seguintes tipos de obras: Edifícios e Património Construído; Vias de Comunicação, Obras de Urbanização e Outras Infra-estruturas; Obras Hidráulicas. A SOPSEC possui diversos colaboradores reconhecidos pela Associação Portuguesa de Gestão de Projectos/ International Project Management Association.

A SOPSEC é, desde 1993, membro efectivo da APPC, Associação Portuguesa de Projectistas e Consultores. Consultora em Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) registada pela Agência Portuguesa de ambiente. Tem no seu quadro de colaboradores peritos qualificados - RCCTE no âmbito do Sistema de Certificação Energética. É qualificada no âmbito do Sistema de Qualificação de fornecedores de serviços de “Estudos e Projectos de Edifícios, de Estudos e Projectos de Estradas, Caminhos e Acessos, incluindo Túneis e de Fiscalização de Empreitadas e Fornecimentos”. É uma empresa qualificada no âmbito do Sistema de Qualificação de “Fiscalização de Empreitadas e Fornecimentos”.

2 ENQUADRAMENTO NO ATUAL ESTADO DE DESENVOLVIMENTO

Atualmente com o mercado da construção cada vez mais competitivo, tornam-se fundamentais ferramentas de cálculo mais eficientes. Por este facto o desenvolvimento de uma folha de cálculo torna-se fulcral para uma rápida análise para a escolha de uma solução em detrimento de outra.

O desenvolvimento tecnológico do pré-esforço deve-se fundamentalmente às exigências cada vez maiores da engenharia, tais como vencer maiores vãos, obter maiores esbeltezas ou diminuir o peso próprio das peças em betão armado.

Assim o pré-esforço baseia-se na alteração do estado de tensão interno da peça, com a finalidade de melhorar a resistência ou mesmo o comportamento da mesma. Podemos encontrar um claro exemplo da aplicação de pré-esforço nos barris de madeira [2], onde os aros metálicos que irão envolver o barril, mediante pré aquecimento com maçaricos, irão dilatar com a finalidade de facilitar a colocação do aro a envolver o barril. Com o posterior arrefecimento o aro irá recuperar da dilatação térmica que sofreu, porém devido à restrição que a madeira apresenta ao aro este último vai induzir um estado de compressão ao barril garantindo a estanquidade do mesmo.

Os primeiros trabalhos desenvolvidos na utilização de pré-esforço remontam a finais do século XIX, porém devido aos efeitos de retração e fluência do betão e a utilização conjunta de aços macios, a tensão na armadura de pré-esforço desvanecia-se. Este efeito devia-se fundamentalmente ao desconhecimento dos fenómenos de retração e fluência do betão e relaxação das armaduras. Assim só com a posterior aplicação de aços de elevada resistência por Freyssinet em 1928 [2] foi possível aplicar com sucesso o pré-

esforço. Apesar dos fenómenos de retração e fluência afetarem na mesma o sistema de pré-esforço, o aço passou a atingir tensões muito mais elevadas sendo assim possível ultrapassar as perdas de pré-esforço que ocorriam por estes fenómenos a longo prazo.

Assim desenvolveram-se dois métodos de aplicação de pré-esforço: por pré-tensão e pós-tensão.

A pré-tensão baseia-se na aplicação prévia de tensão na armadura ativa em relação à betonagem tendo como principal finalidade a pré-fabricação. Neste sistema a transferência da força é realizada por aderência do betão.

Por sua vez a metodologia de pós-tensão baseia-se no tensionamento após a betonagem da peça, sendo necessário garantir que o betão possui a resistência necessária para suportar a aplicação de pré-esforço. A transferência do esforço neste método é realizada nas ancoragens dos cabos de pré-esforço que estão localizadas nas extremidades do cabo. Este sistema garante uma maior variabilidade de traçados e por esse facto devem ter-se em atenção fatores como os raios de curvatura em alçado e planta garantindo que não existe concentração de esforços que a peça não poderá suportar.

Na metodologia de pós-tensão existem ainda dois casos no modo de aplicação: pré-esforço aderente e não aderente. O pré-esforço não aderente aplica-se principalmente em monocordões, e apresenta desvantagens na sua aplicação pois em caso de incêndio o cordão fica totalmente desativado, perdendo-se desta maneira o efeito de pré-esforço. Também se torna desvantajoso em estado limite último, pois devido à não solidariedade do cabo com o betão não é possível mobilizar a tensão última do cabo. Assim todos os cabos aplicados nos casos de estudo são cabos aderentes. O pré-esforço aderente, ao contrário do pré-esforço não aderente, não é afetado em caso de incêndio, isto acontece devido à transmissão de esforço para a peça através da calda de cimento que envolve o cabo. Outro ponto que diferencia o pré-esforço aderente é a capacidade de utilizar a tensão última que o cabo suporta, isto deve-se à solidariedade do cabo com o betão.

2.1 ARMADURAS DE PRÉ-ESFORÇO

As armaduras de pré-esforço podem ser constituídas por fios, cordões e barras. Os cordões são constituídos por associação de vários fios. Estas armaduras devido ao seu tensionamento são definidas como armaduras ativas.

Com o fio, devido à sua reduzida dimensão, a utilização fica limitada maioritariamente a sistemas de pré-fabricação, podendo-se encontrar este sistema por exemplo em vigotas pré-fabricadas, lajes alveolares entre muitas outras peças pré-fabricadas. Na figura 1 pode-se observar uma vigota pré-esforçada com 4 fios pré-esforçados por pré-tensão.



Figura 1 - Vigota Pré-esforçada

Uma vantagem da aplicação de pós-tensão é a facilidade em definir traçados para o cabo de modo a suprimir as necessidades locais de tensão, isto devido à facilidade em alterar a posição do cabo ao longo da peça. Obtém-se, deste modo um maior dinamismo e flexibilidade devido às soluções que poderão ser criadas com recurso a este método.

Podemos realçar as peças de maior importância como sendo as ancoragens, as bainhas e cordões de aço.

As ancoragens podem-se subdividir em ancoragens ativas e passivas, podendo a ancoragem ativa também servir como ancoragem passiva, sendo esta solução muito comum em pontes e viadutos devido ao seu faseamento construtivo e à necessidade de garantir força de pré-esforço nos tramos betonados ou mesmo possibilitar ajustes na tensão presente no cabo. As ancoragens ativas são peças semelhantes à que se pode encontrar na figura 2.



Figura 2 - Ancoragem ativa e componentes

Na figura da ancoragem ativa pode-se observar uma espiral a envolver o trompete da ancoragem. Este dispositivo tem a finalidade de confinar o betão à volta da ancoragem de modo a garantir uma maior resistência ao esmagamento do betão quando aplicado o pré-esforço. Esta metodologia de melhoramento das características físicas do material com a utilização da espiral é controversa, isto devido a não ser aceite consensualmente que a utilização da armadura em hélice melhora o comportamento do betão, por isso mesmo surgem diferentes metodologias de dimensionamento nos diferentes códigos normativos de dimensionamento de peças de betão pré-esforçado.

Apesar das ancoragens ativas poderem ser utilizadas como ancoragens passivas, em determinados casos poderão ser utilizados bolbos de ancoragem passiva. Este sistema, ao contrário da ancoragem ativa, não se localiza à face da peça, encontrando-se envolvido no próprio betão onde adere ao mesmo transmitindo os esforços diretamente no interior da peça. Na figura 3 podem observar-se os bolbos utilizados pelo sistema da marca Dywidag, tal como a disposição em planta e frontal dos bolbos dos cabos de pré-esforço.

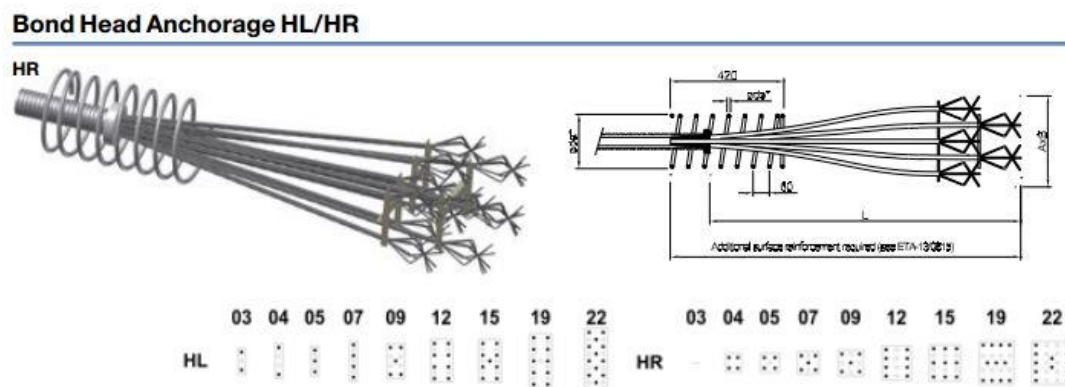


Figura 3 - Ancoragem passiva e disposições geométricas

Além das ancoragens passivas e ativas o sistema possui também acopladores entre diferentes cabos. Este dispositivo serve para obter ligação entre dois cabos diferentes e pode ter uma grande utilidade em peças muito congestionadas com armaduras. Porém é de realçar que apenas 50% da armadura pré-esforçada poderá ser acoplada, segundo o Eurocódigo 2 (EC2). Na figura 4 podemos ver uma possível configuração do acoplador associado a uma ancoragem ativa.

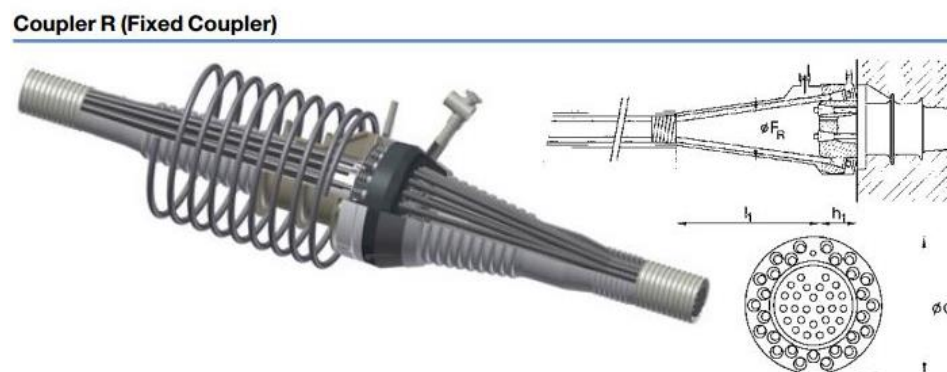


Figura 4 - Acoplador

O sistema de pós-tensão não engloba apenas ancoragens e cabos de pré-esforço. Na figura 5 pode-se observar o sistema completo de pré-esforço por pós-tensão onde se pode analisar um possível esquema de aplicação de pré-esforço por pós-tensão.

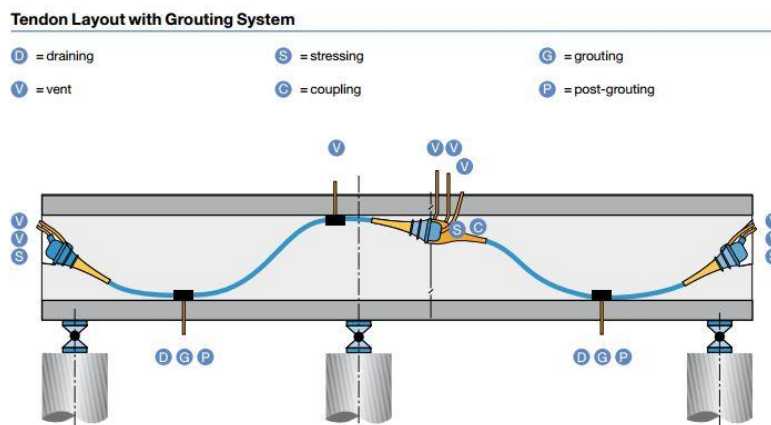


Figura 5 - Sistema de pós-tensão

2.2 PERDAS DE PRÉ-ESFORÇO

As perdas de pré-esforço são fenómenos que originam perdas de tensão nos cabos de pré-esforço. Estes fenómenos ocorrem em dois momentos, primeiro na aplicação do pré-esforço e posteriormente associado a fenómenos de longo prazo.

Assim as perdas de pré-esforço por pós-tensão associadas a fenómenos de perdas instantâneas são, as perdas de atrito, deformação elástica do betão e reentrada de cabos nas ancoragens.

Por outro lado as perdas diferidas de pré-esforço são perdas principalmente associadas a fenómenos que ocorrem com deformação do material tanto no betão como no aço, ocorrendo de forma semelhante nos sistemas de pré-tensão e pós-tensão.

Nos quadros seguintes são apresentadas em detalhe quais as perdas associadas a cada um dos fenómenos, sendo que nos próximos pontos irão ser abordados em pormenor todos os fenómenos de perdas de pré-esforço por pós-tensão.

As perdas de pré-esforço em sistemas de pós-tensão podem-se dividir em duas fases tal como apresentado na tabela 1:

Tabela 1 - Perdas de Pré-esforço por Pós-tensão

Perdas Instantâneas	Perdas Diferidas
Perdas por atrito	Perdas por retração do betão
Perdas por reentrada de cabos	Perdas por fluência do betão
Perdas por deformação instantânea do Betão	Perdas por relaxação da armadura

Na tabela 2 são apresentadas as perdas associadas ao sistema de pré-esforço por pré-tensão:

Tabela 2 Perda de Pré-esforço por pré-tensão

Perdas Instantâneas	Perdas Diferidas
Perdas por deformação instantânea do Betão	Perdas por retração do betão
	Perdas por fluência do betão
	Perdas por relaxação da armadura

2.2.1 Perdas por Atrito

As perdas por atrito devem-se principalmente ao traçado do cabo. Assim, quanto maior o número de concordâncias e menor o raio, maior ser as perdas devidas a este efeito. Deve-se procurar um equilíbrio entre estes dois fatores para evitar perdas significativas e por consequência falta de pré-esforço na extremidade do cabo. Além das perdas devidas ao atrito, deve-se contabilizar para o cálculo das perdas por atrito o desvio angular parasita, dependendo este coeficiente da distância entre apoios das armaduras, do tipo de bainha e do grau de vibração na betonagem. Um valor usual para este coeficiente está compreendido entre 0.004 m^{-1} e 0.01 m^{-1} . Este valor está diretamente

relacionado com a execução em obra. [1] Na figura 6 podemos observar uma bainha metálica



Figura 6 - Bainha Metálica

A fórmula seguinte é utilizada para o cálculo das perdas de atrito. Para o cálculo das perdas de atrito é necessário saber qual a soma dos ângulos de desvio que o cabo tem, o desvio angular parasita e por último a força inicial de tensionamento do cabo de pré-esforço.

$$P_0(x) = P'_0 e^{-\mu(\beta+kx)}$$

μ - coeficiente de atrito

β - soma dos ângulos de desvio

k - desvio angular parasita

x - distância desde a cabeça de ancoragem ativa até ao ponto em estudo

P_0 - valor da força de pré-esforço na zona em estudo

P'_0 - valor da força de pré-esforço na cabeça de ancoragem

2.2.2 Reentrada das cunhas

As perdas por reentrada das cunhas surgem no momento de libertação dos cabos e ocorrem devido ao escorregamento dos cabos na cabeça de ancoragem. Estas podem ser quantificadas previamente com recurso a aprovação técnica europeia [4], sendo que estas contêm os valores de referência para a reentrada das cunhas do sistema utilizado

em obra. Desta forma devido ao escorregamento é provocada uma perda do alongamento do cabo e por conseguinte uma perda de tensão no cabo. Em relação à obtenção da distância até onde as perdas se fazem sentir, podemos utilizar a fórmula 3 presente na tabela 2.

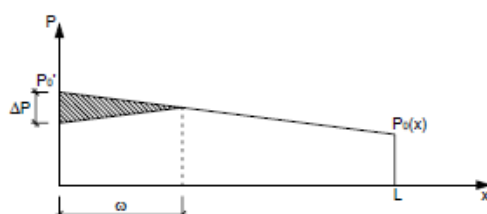


Figura 7 - Esquematização de perdas por reentrada de cunhas

Tabela 3 - Fórmulas para cálculo de perdas por reentrada de cunhas

1	Perda média de atrito por metro na distância considerada (kN/m)	$p = \frac{\text{força inicial (kN)} - \text{força (kN)}_{x=\text{distância}}}{\text{Distância considerada (m)}}$
2	Perda de pré-esforço na ancoragem (kN)	$\Delta P = 2 p \omega$
3	Comprimento até onde o efeito por reentrada dos cabos se faz sentir (m)	$\omega = \sqrt{\frac{\Delta L \times E_p \times A_p}{p}}$

ΔL Valor para a reentrada de cunhas

E_p Módulo de elasticidade do aço

A_p Área de aço pré – esforçado

2.2.3 Deformação elástica do betão

Esta perda é calculada após as perdas de atrito e reentrada das cunhas já se terem estabelecido no cabo, devendo-se esta à deformação que o betão sofre devido à força de compressão introduzida no betão devido ao pré-esforço, sendo calculadas segundo o Eurocódigo 2 através da seguinte expressão:

$$\Delta P_{ei} = A_p \times E_p \times \sum \left[\frac{j \times \Delta \sigma_c(t)}{E_{cm}(t)} \right]$$

$E_{cm}(t)$ Representa o módulo de elasticidade do betão quando aplicado o pré-esforço;

$J = (n-1)/2n$, sendo n o nº de cabos de pré-esforço tensionados sucessivamente. Como aproximação, poderá ser utilizado o valor 1/2

Ou

$J=1$ - para estruturas pré-tensionadas.

$\Delta \sigma_c(t)$ Tensão de compressão no betão ao nível dos cabos de pré-esforço.

Quando J igual a 1 significa que apenas um cabo está tensionado, porém a perda por deformação elástica do betão já foi verificada antes de ser libertado devido à compressão do betão pelo macaco hidráulico.

2.2.4 Perdas diferidas

As perdas diferidas devem-se a fenómenos de encurtamento do betão e relaxação da armadura de pré-esforço. Estes fenómenos ocorrem a tempo diferido e têm um grande impacto na perda de tensão dos cabos de pré-esforço. Sendo as perdas diferidas diluídas no tempo e influenciadas pelos materiais e condições de aplicação do pré-esforço devem-se ter em conta todos os fatores que influenciam a perda de tensão, tal como a aplicação precoce do pré-esforço, o tipo de betão, o cimento utilizado e a classe de armadura de pré-esforço.

2.2.4.1 Retração do betão

As perdas por retração do betão surgem devido ao betão diminuir o seu volume a longo prazo. Assim esta variação irá ter influência na tensão da armadura de pré-esforço instalada na peça. Este fenómeno deve-se principalmente a dois fatores: evaporação da água da amassadura do betão e reações de hidratação do cimento [1].

Podemos calcular as perdas por retração do betão através da seguinte expressão:

$$\Delta \sigma = \varepsilon_{cs} \times \Delta P \times E_p$$

ε_{cs} = Extensão de retração do betão

2.2.4.2 Perdas por fluência

As perdas por fluência do betão devem-se ao aumento gradual da deformação do betão quando submetido a uma determinada carga permanente. Este fenómeno é semelhante à deformação elástica do betão, mas ao contrário desta que ocorre de forma instantânea, a perda por fluência ocorre progressivamente ao longo do tempo.

O EC2 para realizar uma análise linear do coeficiente de fluência do betão, limita as forças de compressão a $0.45 f_{ck}(t_0)$, idade do betão à data do primeiro carregamento; caso contrário o coeficiente de fluência deixa de ser linear e deverá utilizar-se a fórmula 3.7 do EC2-1992-1-1 2010 fórmula para o cálculo do coeficiente de não-linearidade de fluência do betão.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c \times \varphi_c}{E_{cm}}$$

$$\Delta P = - \frac{E_p \times A_p \times \sigma_c \times \varphi_c}{E_{cm}}$$

σ_c - Tensão ao nível dos cabos de pré-esforço, devido ao peso próprio e ao pré-esforço inicial e, sempre que for relevante, a outras ações quase-permanentes. O valor de $\sigma_{c,QP}$ poderá resultar de parte do peso próprio e do pré-esforço inicial ou da combinação de ações quase-permanente considerada na sua totalidade ($\sigma_c((G + P_{m0} + \Psi_2 Q))$), consoante a fase de construção considerada;

2.2.4.3 Relaxação de armadura

As perdas por relaxação da armadura consistem na perda de tensão devido à armadura sofrer uma reorganização atómica na sua estrutura de forma a acomodar os esforços de tração a que está sujeita. Segundo o EC2 existem 3 classes, porém só a 1ª e 2ª classes correspondem a aço em cordões ou fio, correspondendo a Classe 1 a um aço com relaxação normal e a Classe 2 a um aço com baixa relaxação. [4]

A perda de tensão pode ser calculada através das expressões seguintes:

$$\text{Classe 1- } \Delta \sigma_{pr} = 0.8 \times 5.39 \rho_{1000} e^{6.7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \sigma_{pi} \times 10^{-5}$$

$$\text{Classe 2- } \Delta \sigma_{pr} = 0.8 \times 0.66 \rho_{1000} e^{9.1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75(1-\mu)} \sigma_{pi} \times 10^{-5}$$

$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}$ – Relação entre tensão instalada nas armaduras de pré-esforço após perdas

imediatas e tensão máxima de tensionamento do cabo

$\Delta \sigma_{pr}$ Representa as perdas por relaxação da armadura

σ_{pi} Representa a tensão instalada nas armaduras de pré-esforço após perdas imediatas

2.3 TRAÇADO DOS CABOS

A definição do traçado dos cabos é um ponto fulcral para um traçado eficiente de modo a obter o mínimo de perdas de tensão devido às concordâncias do traçado. Deste modo o traçado deverá ser constituído por troços retos ou parábolas do 2º grau, mantendo sempre em vista a utilização de raios elevados e concordâncias, sempre que possível, com desenvolvimentos semelhantes. Assim sendo o cumprimento destas regras encaminha o traçado do cabo para uma solução ótima pois possuem um traçado homogéneo em termos de perda de tensão por metro linear e evita-se a concentração de esforços em determinados pontos do traçado, evitando por exemplo o reajuste de tensão na ancoragem passiva, no caso de ser utilizada uma cabeça de ancoragem ativa em ambas as extremidades.

2.3.1 Parábola de 2º Grau

Para definirmos uma parábola completa esta deve ter no mínimo 3 pontos, vértice e pontos de inflexão, porém como o traçado do cabo pode variar muito rapidamente num curto espaço adota-se uma definição por ramos. Com esta definição de parábola por ramos necessitamos apenas do ponto de inflexão e do vértice da parábola para definir qualquer ramo da parábola. A fórmula geral para uma parábola de 2º grau é apresentada na fórmula seguinte:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

- Cálculo do parâmetro A

$$A = \frac{\text{Abs}(y_2 - x_{\text{vértice}})}{(x_2 - Y_{\text{vértice}})^2}$$

* Aplicada apenas com os pontos do vértice e um segundo ponto da parábola

- Cálculo do parâmetro B

$$B = -2 \times A \times x_{\text{vértice}}$$

- Cálculo do parâmetro C

$$C = A \times x_{\text{vértice}} + Y_{\text{vértice}}$$

$$x_{\text{vértice}} = \text{desenvolvimento do vértice da parábola}$$

$$x_2 = \text{desenvolvimento do segundo ponto da parábola}$$

$$y_2 = \text{cota ponto } x_2$$

$$Y_{\text{vértice}} = \text{cota do vértice da parábola}$$

De salientar que devido ao método de introdução de dados aplicado conseguimos garantir que o parâmetro A é calculado sempre com o vértice da parábola. Assim podendo aplicar a fórmula anteriormente apresentada para o cálculo do parâmetro A.

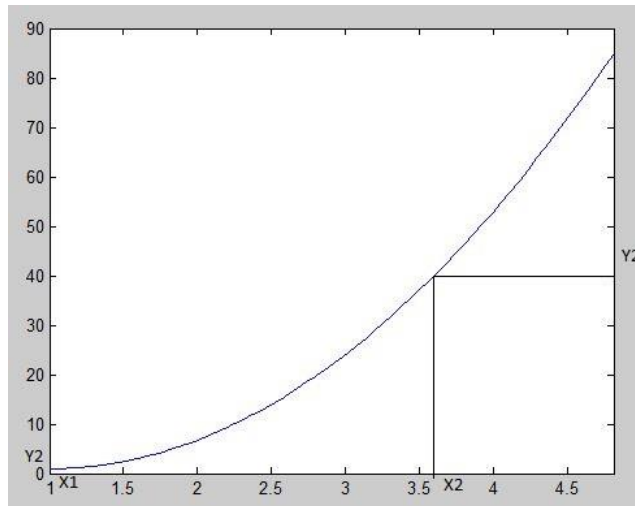


Figura 8 - Pontos para cálculo do parâmetro A

Com as fórmulas anteriores pode-se definir qualquer traçado do cabo porém como se pretende assegurar a continuidade do cabo sem qualquer variação brusca no traçado deve-se garantir que a derivada nos pontos fronteira entre diferentes parábolas é igual, evitando assim vincos no cabo, situação que é altamente prejudicial para o funcionamento correto da armadura de pré-esforço. Assim com as seguintes fórmulas garante-se a continuidade das parábolas no ponto de inflexão.

- Concordância Parábola- Reta com derivada no vértice igual a 0

$$f = e * \frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2}$$

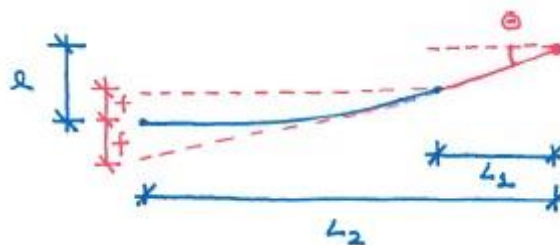


Figura 9 - Concordância Parábola-Reta

- Concordância Parábola-Parábola com derivada no vértice igual a 0

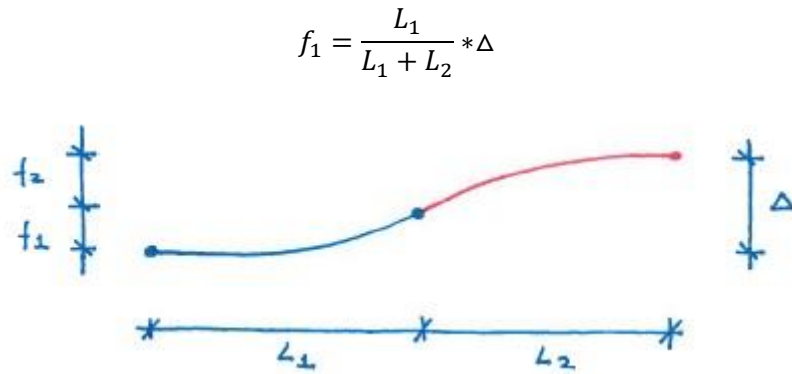


Figura 10 - Concordância Parábola-Parábola

- Concordância Parábola-Reta vértice com derivada diferente de 0

$$f' = e' * \frac{L_3 - L_1}{L_1 + L_3} + y'_1(0) * \frac{L_3 - L_1}{L_1 + L_3} * L_1$$

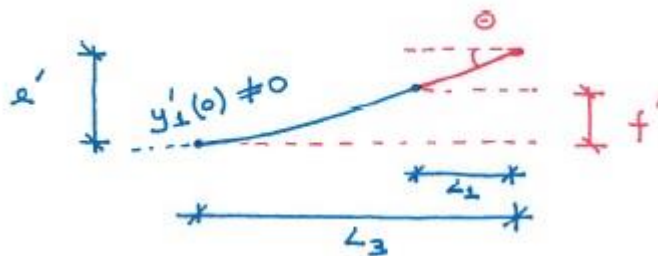


Figura 11 - Concordância Parábola -Reta com derivada diferente de 0

- Concordância parábola-parábola vértice com derivada diferente de 0

$$f_2 = \frac{L_2}{L_2 + L_3} * (\Delta' - \frac{1}{2} * y'_1(0) * L_3)$$

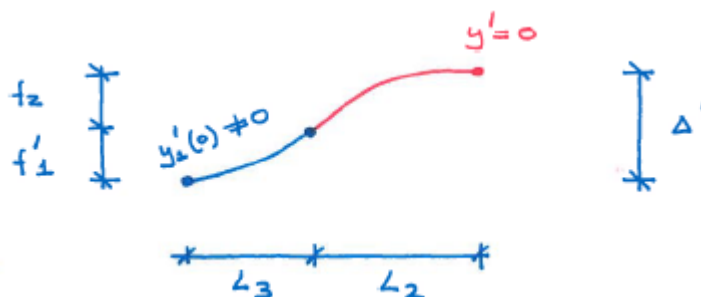


Figura 12 - Concordância Parábola -Parábola com derivada diferente de 0

2.3.2 Desvio angular

O desvio angular é o parâmetro que permite calcular qual a variação do ângulo do cabo no desenvolvimento da função em estudo. Com este parâmetro calculado pode-se obter qual a perda exata por atrito em qualquer ponto do traçado da função, tal como já foi referido anteriormente. Apesar de α ser o valor do desvio angular de uma determinada função deve-se ter em atenção que no cálculo da perda para um traçado composto por mais de uma parábola se deve ter o somatório de todos os desvios angulares até ao ponto em estudo, assim β é a letra que representa o valor do somatório de todos os ângulos de desvio do cabo em estudo.

$$\alpha = 2 * A * (x_2 - x_1)$$

$$\beta = \sum a_1 + a_2 \dots a_n$$

2.4 ALONGAMENTO DO CABO

Saber qual o alongamento do cabo de pré-esforço é extremamente importante, não para o dimensionamento do pré-esforço, mas para a execução em obra. Esta constatação deve-se ao facto de ser um modo simples de confirmar que o cabo possui a tensão dimensionada em projeto, assim qualquer variação significativa deste valor pode indicar duas situações, aplicação defeituosa do cabo ou erro no cálculo do alongamento teórico.

O momento de cálculo do alongamento teórico do cabo é imediato ao momento do puxe do cabo, quando apenas as perdas de atrito estão instaladas no cabo. Então o primeiro passo para proceder à determinação do alongamento do cabo é o cálculo do integral que as perdas por atrito formam. Para este cálculo podemos utilizar um método tão simples como a regra dos trapézios para cálculo expedito da área do gráfico.

Embora já tenha sido devidamente calculado o alongamento teórico do cabo, o alongamento real que é medido em obra é superior, isto deve-se ao facto do macaco hidráulico ter o cabo sob tensão na extensão aproximada de 1 m na extremidade do cabo, assim devemos adicionar ao valor da área do integral anteriormente calculado um valor igual à força de puxe do cabo.

$$\Delta L = \int_0^L \varepsilon \, dz = \int_0^L \frac{P}{A_p E_p} \, dz = \frac{1}{A_p E_p} \int_0^L P \, dz$$

$$\Delta L \cong \frac{P_0' + P_{\text{após atrito}}(L)}{2 A_p E_p} \times L$$

2.5 BASES DE DIMENSIONAMENTO

Ao longo do tempo, o estudo sobre os fenómenos ligados à utilização de pré-esforço foram aprofundados, e hoje em dia há regulamentos que preveem os diversos fenómenos associados ao pré-esforço. Neste ponto irá ser feita a comparação das diferentes abordagens dos regulamentos Eurocódigo 2, Model Code 2010 da Fédération Internationale du Béton e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP).

Para as diferentes regulamentações de origem europeia, (REBAP, EC2, MC2010), a metodologia empregue é muito semelhante, sendo de realçar que do conjunto anterior

o MC 2010 é o mais evoluído e apresenta metodologias de cálculo mais avançadas, tal como o domínio de fenómenos que os outros dois não contemplam.

2.5.1 Esmagamento do betão

No momento de aplicação do pré-esforço o betão deverá ter resistência mínima para absorver os esforços de compressão que irá sofrer. Assim, o EC2 determina que a área de verificação do betão ao esmagamento localizado abranja um cone com área igual a A_{c1} sendo esta uma área homotética e centrada com o centro de gravidade de A_{c0} , onde A_{c0} é a área de contacto da ancoragem com o betão e A_{c1} a maior área de distribuição de cálculo homotética de A_{c0} . [4] Deverá ter-se em conta que no caso de existir mais que uma força aplicada as áreas da distribuição não se deverão sobrepor. Depois de definida a área de controlo devemos proceder ao cálculo do esmagamento do betão, normalmente considera-se o contributo da espiral que envolve a ancoragem, esta armadura especial vai beneficiar o confinamento do betão o que garante uma maior resistência a forças de compressão. Podemos nos socorrer do CEB Model Code 2010 para se obter uma resistência superior do betão devido à presença da armadura em hélice que vulgarmente acompanha a ancoragem, ponto 7.2.3.1.6 do MC 2010.

2.5.2 Armaduras

A zona vizinha às ancoragens é um foco de concentração de elevados esforços nas peças de betão armado. Devido a este fenómeno devem-se fazer duas verificações; esmagamento local do betão e necessidade de armadura de tração para tirantes que se criem na peça.

A armadura necessária deverá ser dimensionada para uma tensão até 300 MPa. Esta medida visa garantir o controlo da fendilhação. [4]

O modelo a aplicar para cálculo das armaduras deverá ser de escoras e tirantes, sendo que a armadura deverá ser dimensionada para cobrir os esforços desenvolvidos pelos tirantes. De salientar que um bom dimensionamento baseia-se num modelo que possua mais escoras que tirantes, esta afirmação baseia-se no facto de se garantir um melhor encaminhamento das cargas e redução de esforços de tração na peça.

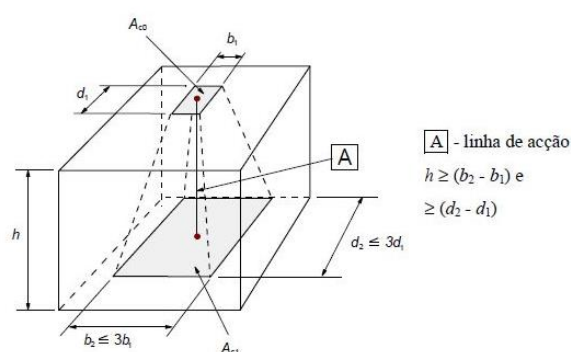


Figura 13 - Distribuição de cálculo para áreas sujeitas a forças concentradas (Fonte: Adaptação- EN1992-1-1)

2.5.3 REBAP

Sendo o regulamento português ainda em vigor, o mesmo propõe para a verificação do esmagamento do betão, considerando a zona da ancoragem como uma força concentrada no betão.

Para verificar a resistência do betão devemos ter em conta o seguinte artigo do REBAP:

Artigo 139.º- Verificação da pressão local do betão

$$F_{Sd} \leq p_c R_d A_0$$

Em que

F_{Sd} - Valor de cálculo da força concentrada ;

$p_c R_d$ – Valor de cálculo da pressão local a que o betão pode resistir;

A_0 – Área sobre a qual se exerce diretamente a força.

O valor de $p_c R_d$ é dado pela seguinte expressão:

$$p_c R_d = f_{cd} \sqrt{\frac{A_1}{A_0}}$$

Em que:

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

A_1 -Maior área delimitada por um contorno fictício contido no contorno da peça e com o mesmo centro de gravidade de A_0 ; no caso de várias forças, as respetivas áreas A_1 não devem sobrepor-se.

Em qualquer caso, não se poderá considerar-se um valor de $p_c R_d$ superior a $3,3 f_{cd}$.

2.5.4 Eurocódigo 1992-1

O Eurocódigo em comparação ao REBAP mantém a mesma metodologia porém a tensão máxima de compressão do betão a que o betão poderá ser sujeito passa de $3,3 f_{cd}$ para $3,0 f_{cd}$.

No caso de uma distribuição uniforme das forças numa área A_{c0} , o valor limite da força concentrada poderá ser determinado pela expressão:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \times f_{cd} \times \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 \times f_{cd} \times A_{c0}$$

A_{c0} Área carregada;

A_{c1} maior área carregada de distribuição de cálculo homotética de A_{c0} .

O valor de cálculo da área de distribuição A_{c1} necessária ao valor resistente da força concentrada F_{Rdu} deverá satisfazer as condições seguintes:

-A altura da difusão da força, na direção desta obtém-se de acordo com a figura 13;

-O centro da área de distribuição de cálculo A_{c1} deverá estar na linha de ação que passa pelo centro da área carregada A_{c0} ; se na secção de betão actuar mais do que uma força de compressão, as áreas de distribuição de cálculo não se deverão sobrepor.

O valor de F_{Rdu} deverá ser reduzido se a força não estiver uniformemente distribuída na área A_{c0} ou se existirem esforços transversos elevados. [4]

2.5.5 Model Code 2010

O MC 2010 apesar de ter a mesma base de cálculo do EC2 possui um fator que diferencia em muito dos outros dois códigos, este permite beneficiar do efeito de confinamento da armadura espiral que acompanha a ancoragem. Este efeito torna-se altamente benéfico pois permite aumentar a tensão de compressão do betão obtendo-se assim um ganho devido à sua presença.

Este aumento da pressão local poderá criar efeitos não desejados como o efeito de cunha da ancoragem no betão. Este efeito trata-se do deslizamento da ancoragem no interior da espiral. Assim o MC 2010 prevê a verificação do seguinte para limitação da força de compressão no betão.

$$\frac{f_{cc}^*}{f_{cc}} = 12.5\sqrt{(40/f_{cc})}$$

Assim com este contributo do confinamento do betão obtido pela presença da armadura espiral é possível controlar o esmagamento do betão na zona da ancoragem.

Para secções circulares o MC 2010 propõe a seguinte metodologia para calcular a tensão de confinamento considerando a secção de confinamento circular e com armadura espiral.

$$\sigma_2 = \omega_c f_{cd} \left(1 - \frac{s_c}{d_c}\right)$$

Em que

$$\omega_c = \frac{A_{sc} f_{yd}}{s_c d_c f_{cd}}$$

Tendo como resultado final o cálculo da tensão de compressão resistente.

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1 + \frac{5\sigma_2}{f_{ck}}\right), \text{ para } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck}$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,125 + \frac{2,5\sigma_2}{f_{ck}}\right), \text{ para } \sigma_2 > 0,05 f_{ck}$$

De salientar que devemos transformar f_{ck} em valor de cálculo, obtendo-se assim f_{cd} .

Na figura 14 podemos observar a armadura em hélice que o MC 2010 permite calcular.

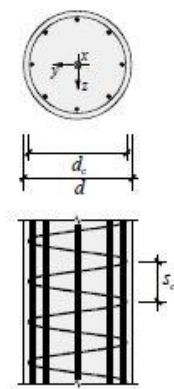


Figura 14 - Armadura em Hélice [8]

2.5.6 Armaduras de ancoragem

2.5.6.1 Armaduras transversais

Aplicando o modelo de escoras e tirantes na análise do esforço de pré-esforço na zona da ancoragem, surge a necessidade de dimensionar armaduras transversais à ancoragem; esta necessidade deve-se à criação de trações paralelas à ação de compressão criada pela armadura de pré-esforço. Esta armadura deverá ser dimensionada não só para o instante em que a peça irá entrar em funcionamento mas para cobrir todos os esforços que possam advir do processo de tensionamento dos cabos. É de salientar que a localização da armadura de pré-esforço fora do núcleo central da peça induz esforços de tração, sendo então aconselhável a localização das ancoragens no núcleo central da peça.

Devido à armadura de pré-esforço ser um elemento de elevada importância, temos que garantir que esta possui a mesma durabilidade que os demais elementos que constituem a estrutura. Assim sendo o EC2 permite realizar uma análise sem verificação da fendilhação na condição do cálculo da armadura para esforços transversais para uma tensão máxima de 300 MPa. Esta condição permite que seja criada uma margem de segurança de modo a que a armadura não entre em patamar de cedência devido aos esforços a que poderá estar sujeita, garantindo assim que o betão não fendilha devido a esforços de tração que ocorrem perpendicularmente à força de compressão dos cabos de pré-esforço.

2.5.6.2 Uma só força concentrada no núcleo central da seção

As armaduras no caso de ser aplicada uma força concentrada deverão ficar contidas num prisma de aresta a_1 e serem repartidas em profundidade entre as cotas $0.1 a_1$ e a_1 , de modo que a resultante, $F_{tr,sd}$, se situe aproximadamente a $0.4 a_1$.

$$Ft1, sd = Fed * \left(1 - \frac{a_0}{a_1}\right)$$

2.5.6.3 Forças localizadas fora do núcleo central da seção

Quando a ancoragem se encontra fora do núcleo central da secção, além das armaduras referentes às tensões de tração relativas a cada prisma elementar, deve dispor-se uma armadura junto à superfície do elemento, destinada a absorver na direção em causa uma força de tração.

$$Ft0, sd = Fed * \left(\frac{e}{d_2} - \frac{1}{6}\right)$$

e= Excentricidade em m

d₂= dimensão do elemento na direção considerada

2.5.6.4 Retroancoragem

Caso seja aplicada uma ancoragem interior passiva, vão ser originadas trações longitudinais devido à armadura ativa assim deverá ser colocada armadura longitudinal a cobrir os esforços criados numa distância 1.5 d₂ antes e depois da armadura, sendo que esta deverá ser dimensionada para cobrir 0.25 Fed.

$$Ft0, sd = 2 * 0.125 * Fed$$

3 ELABORAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o esquema de funcionamento de cada módulo assim como a interface gráfica do programa, detalhando em pormenor os pontos essenciais de cada sub-rotina que integra a folha de cálculo de perdas de tensão.

No esquema seguinte podemos analisar o modo de funcionamento da folha e quais as rotinas associada.

O programa contém quinze sub-rotinas que são parte integrante dos módulos, onde são realizados todos os cálculos e nove folhas de cálculo no Excel onde são apresentados todos os resultados intermédios para uma rápida interpretação dos dados por parte do utilizador.

```
Option Explicit
Sub diferidas()
diferidas.Show

Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(44, 17) = areabet
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(45, 17) = inerzia

Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(50, 17) = Y0

Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(42, 17) = elasticidade / Worksheets("Perdas Deformacao Elastica").Cells(10, 13)
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(47, 17) = (aaco * 10 ^ -4) / areabet
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(48, 17) = areabet / inerzia

For i = 1 To UBound(poss)
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 2) = Worksheets("Perdas Azirito").Cells(7 + i, 2)
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 3) = Worksheets("Quadro Perdas").Cells(19 + i, 6) / tensao

If classe = 1 Then
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 6) = 5.39 * zel * Exp(6.7 * Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 3))
ElseIf classe = 2 Then
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 4) = 0.66 * zel * Exp(9.1 * Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 3))
End If
Next

If oco = "Simplificado" Then
ll = InputBox("Tensão Média ao Nível dos Cabos -CC(Mpa)", "Perdas Diferidas")
For i = 1 To UBound(poss)
Worksheets("Perdas Diferidas EC2").Cells(7 + i, 5) = ll
Next

ElseIf oco = "Tranco" Then
```

Figura 15 - Interface Visual Basic com código desenvolvido

A principal razão para uma partição em quinze módulos do programa prende-se com o facto de se obter uma melhor organização do mesmo, tornando uma posterior manutenção muito mais simples de ser realizada devido à sua divisão em pequenos módulos. Outra razão deve-se ao facto de cada módulo possuir limite de memória para ser executado, sendo esta uma limitação do programa Visual Basic.

No desenvolvimento das rotinas teve-se em conta os casos particulares que merecem ser tratados com o devido cuidado para se evitar que o *output* de dados seja incoerente com os dados introduzidos. Assim ao longo do desenvolvimento do programa foram tidos em atenção todos os pormenores e possíveis variações que poderão existir no cálculo das perdas de pré-esforço.

A evolução do desenvolvimento do programa partiu inicialmente de uma folha de cálculo com células programadas e interligadas entre si. Este primeiro desenvolvimento permitiu estudar a mecânica das rotinas que teriam que ser desenvolvidas e as ligações que teriam que existir para tornar a folha totalmente automatizada na fase de programação da rotina. Porém, mesmo com a possibilidade de cálculo de perdas já na primeira versão da folha, verificou-se que esta tinha limitações ao nível do cálculo, não permitindo calcular os pontos de inflexão de modo automático nem garantir a continuidade da derivada da função do cabo. Assim criou-se a necessidade de não só garantir o cálculo das perdas mas também realizar o estudo do traçado do cabo por intermédio do programa e por esta mesma razão recorreu-se à formulação da rotina em ambiente Visual Basic de uma sub-rotina que permitisse o cálculo do traçado do cabo. Na figura seguinte podemos observar o código desenvolvido e integrado numa célula de Excel para a obtenção da variação angular do cabo num determinado passo intermédio.

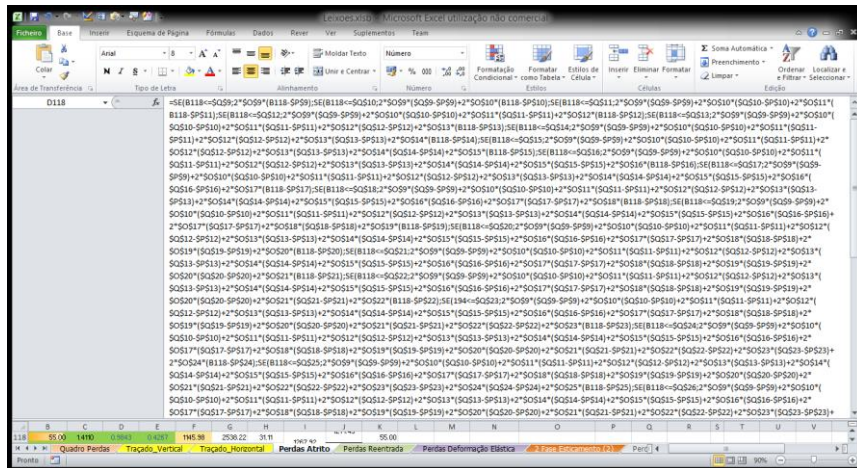


Figura 16 - Célula de Excel Programada

O primeiro objetivo durante o desenvolvimento do programa foi criar as rotinas e validar a sua funcionalidade em todos os casos possíveis. Este processo foi relativamente moroso devido à necessidade de garantir que as rotinas estavam a executar o cálculo corretamente. Assim nesta fase a consulta de projetos de aplicação de pré-esforço já existentes foi extremamente importante de modo a validar o cálculo das rotinas do programa e garantir a fiabilidade do mesmo.

Posteriormente ao desenvolvimento de todos os módulos foi importante a reformulação da apresentação gráfica do programa. Este processo teve sempre em vista o objetivo de uma fácil interpretação das janelas de introdução de dados com o fim de executar um rápido cálculo das perdas de atrito.

Durante o desenvolvimento desta tarefa surgiu também a ideia de criar determinados avisos para erros ou valores de interesse para o utilizador e outra razão será a visualização intermédia de cálculos. Isto acontece devido ao programa ser um processo contínuo de cálculo ou seja se o utilizador errar num parâmetro terá que reiniciar o cálculo. Assim para agilizar o processo em caso de erro intermédio o programa cria o aviso e o utilizador apenas terá que suspender o cálculo e reiniciar o processo novamente.

3.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇADO

O primeiro ponto que o programa aborda é a definição do traçado. Assim o primeiro dado a ser introduzido é o número de tramos que o cabo irá ter ao longo do seu desenvolvimento. Esta informação é introduzida tanto em planta como em alçado. A definição do número de tramos permite à rotina ter um limite do contador para o número de tramos, sabendo assim quando parar quando for pedida a introdução dos pontos notáveis. Nas figuras 17 e 18 podemos ver a janela para introdução do número de tramos em alçado e planta.

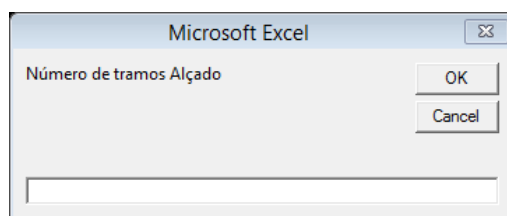


Figura 17 - Número de tramos em alçado

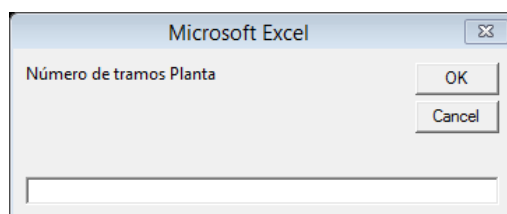


Figura 18 - Número de tramos em planta

Depois de introduzir o número de tramos o programa inicia a sub-rotina de introdução dos pontos notáveis. Esta sub-rotina vai repetir-se até completar o número de ciclos definidos pelo número de tramos do cabo.

Figura 19 - Introdução de dados em Alçado

Figura 20 - Introdução de dados em Planta

Nesta janela o utilizador terá que definir o tipo de função a ser utilizada tal como o tipo de ponto, distância à origem e cota do cabo.

3.2.1 Tipo de Ponto

Para a definição do traçado devemos escolher o tipo de ponto que as funções irão ter. Podemos assim ter cinco tipos de pontos: Início; Fim; Inflexão; Máximo; Mínimo. Na figura 22 podemos ver um esquema da denominação de cada tipo de ponto.

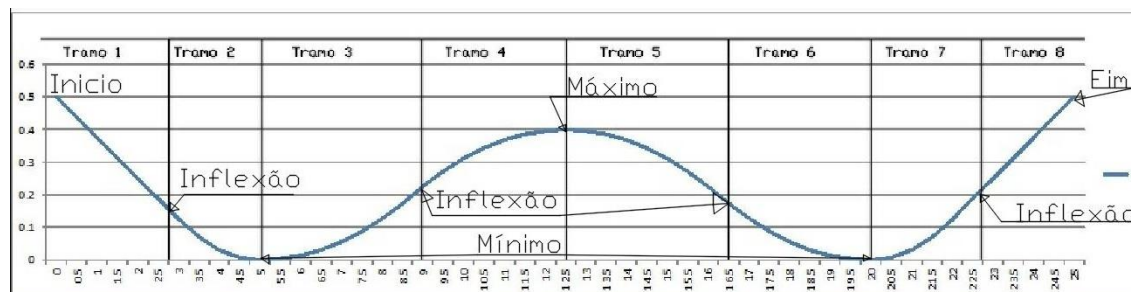


Figura 21 - Denominação dos pontos notáveis

3.2.2 Tipo de Função

Para a definição do traçado o utilizador deverá introduzir também o tipo de função que deseja que o cabo assuma em cada tramo, tendo a possibilidade de escolher funções de 1º grau (Retas) e de 2º grau (Parábolas). Apesar de ter apenas disponíveis dois tipos de funções o programa abrange variações do tipo de parábolas, tal como parábolas com tangente diferente de zero no vértice. Esta variação é particularmente útil quando é necessário garantir que o cabo atinja uma determinada cota, devido por exemplo a variações da geometria da peça no seu desenvolvimento. Assim estão integrados os seguintes tipos de funções com tangente diferente de zero: Parábola-Reta, Parábola-Parábola representadas no programa por TGAR e TGA respetivamente. Na figura 22 podemos observar um caso onde este método é utilizado. A função imediatamente a seguir ao tramo reto devido a não possuir nenhum ponto no seu desenvolvimento com derivada igual a zero teve que ser denominada de TGAR. Assim este traçado cumpre na mesma a derivada igual nos pontos de transição.

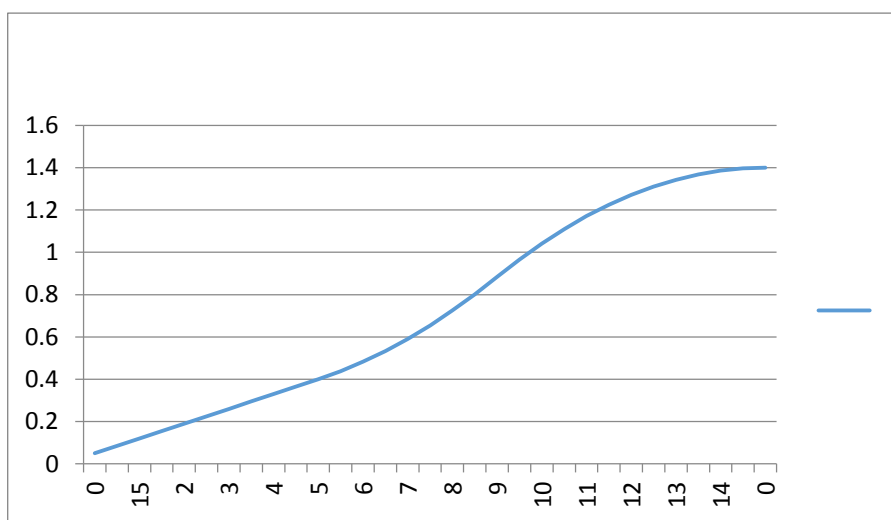


Figura 22 - Traçado de cabo com função TGAR

3.3 FUNCIONAMENTO DA ROTINA

A rotina desenvolvida para a definição do cabo vai ser descrita neste ponto abordando os conceitos em que assenta e as limitações que o código possui.

Devido a condicionalismos geométricos em relação à ancoragem ativa, o traçado do cabo no primeiro metro de desenvolvimento é reto, por isso a rotina possui a definição de ponto de *início*. Esta denominação só poderá estar associada a uma função do 1º grau, o mesmo sucede com o ponto final do cabo que por norma é um tramo reto e por isso o ponto *fim* encontra-se associado também a uma função do 1º grau. Porém se o utilizador necessitar de forçar o início ou o fim numa parábola o utilizador apenas terá que denominar o primeiro ou o último ponto, consoante o caso desejado, como ponto de inflexão atribuindo o valor da cota no respetivo ponto.

Ao longo do desenvolvimento da rotina surgiu a questão de garantir a continuidade do valor da derivada no ponto de transição entre tramos, esta condição serve para garantir que o cabo não possui pontos de variação brusca de inclinação, caso não fosse tomada em conta esta condição haveria uma elevada perda de pré-esforço e uma grande concentração de esforços no local de transição de tramos. Assim, para garantir a não ocorrência destas situações, a rotina deixa que o utilizador insira as características de todos os tramos (cota, distância à origem, tipo de ponto, tipo de função) e depois de finalizado o processo de introdução uma sub-rotina irá analisar os dados introduzidos e verificar mediante as características das funções se estas cumprem os requisitos para um traçado exequível.

A sub-rotina em caso de incoerência da cota dos pontos de inflexão irá realizar a substituição e proceder à criação de um aviso da alteração de cota, tal como um aviso do seu novo valor. Este processo poderia ter sido englobado de modo a que o utilizador não necessitasse de inserir os pontos de inflexão na primeira fase. Porém parte-se do princípio que a folha de cálculo é utilizada já com um estudo prévio realizado de um possível traçado para o cabo em estudo. Assim o programa permite ao utilizador ter controlo sobre os dados que o programa dá como saída.

A sub-rotina que analisa e corrige as cotas dos pontos também faz a verificação da coerência dos dados introduzidos. Caso o utilizador por algum motivo coloque a cota do vértice incoerente com a função, irá surgir um aviso de erro no traçado. Este aviso surge depois de calculados os parâmetros das funções onde as cotas dos pontos notáveis são

novamente calculadas por substituição nos parâmetros das equações e em caso de erro no tipo de função irá surgir o aviso.

Posteriormente à análise dos dados a sub-rotina passa a calcular as características associadas, tais como: raio, ângulo de desvio e soma dos ângulos de desvio.

3.4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para evitar que o programa se transformasse numa caixa negra em que o utilizador não tivesse acesso a qualquer tipo de dados intermédios para controlar o cálculo efetuado, foram introduzidas várias folhas de cálculo. As folhas são totalmente preenchidas de modo automático consoante o correr do programa.

Na apresentação de dados do traçado do cabo, em alçado e planta, o objetivo foi manter a facilidade de leitura dos dados, e por isso foi criada de modo a apresentar os dados por tramos.

Como podemos ver na figura abaixo a amarelo são apresentados os dados introduzidos pelo utilizador. A introdução destes dados obriga o utilizador a ter um estudo prévio do traçado pois necessita de definir o desenvolvimento das funções tal como as cotas e o tipo de função a ser utilizada em cada um dos tramos.

Origem	Final	Função	Y1 (m)	Y2 (m)	Pontos X1	Pontos X2
0	8	P+	0.38	0.15	inflexao	min
8	16	P+	0.15	0.55	min	inflexao
16	20	P-	0.55	0.75	inflexao	max
20	21	P-	0.75	0.7366667	max	inflexao
21	25	R	0.7366667	0.63	inflexao	fim

Figura 23 - Dados de tramos

Depois de introduzidos os dados, a rotina poderá corrigir os pontos de inflexão, situação que já foi anteriormente abordada e explicada, os pontos de inflexão são também corrigidos nos dados introduzidos pelo utilizador.

Definição das Equações		
Viga 1	Cabo 1.1	
a/m	b	c
0.003594	-0.057499997	0.38
0.006250	-0.099999999	0.55
-0.012500	0.499999995	-4.24999995
-0.013333	0.533333355	-4.58333355
0.000000	-0.026666668	1.29666669

Figura 24 - Parâmetros das equações do cabo

Depois da introdução de dados a sub-rotina inicia o cálculo dos parâmetros das equações que definem o traçado do cabo. Todos os dados calculados pela rotina são apresentados na cor verde de modo a ser fácil ao utilizador interpretar os dados. De salientar que todos os dados que tenham valor igual a zero são apresentados a branco. Esta formatação surgiu no decorrer do desenvolvimento da folha devido a haver necessidade de identificação deste valor na tabela de dados.

Seguidamente a sub-rotina inicia o cálculo das características do cabo. As cotas de controlo são calculadas pelos parâmetros das equações.

A disponibilização da soma dos ângulos desvio permite ao utilizador de um modo rápido verificar se a solução que foi tomada é realmente a melhor em detrimento de um caso de estudo feito anteriormente.

Ângulo desvio	Controlo Y1	Controlo Y2	β	Raio (m)
0.0575	0.38	0.15000001	0.0575	139.1304413
0.1	0.15	0.55	0.1575	80.00000079
0.1	0.55	0.74999993	0.2575	-40.0000004
0.02667	0.7500003	0.73666695	0.284167	-37.49999851
0	0.7366667	0.63000006	0.284167	∞

Figura 25 - Características das funções associadas ao traçado do cabo

3.5 DADOS CABO

Depois de definida a geometria do cabo irá ser solicitado ao utilizador a introdução dos dados relativos ao cabo tal como, a tensão de cedência, percentagem de

tensionamento, módulo de elasticidade, área de aço, coeficiente de atrito, ancoragem passiva com reentrada, desvio angular parasita, relaxação do aço às 1000h e valor da reentrada de cunhas. Poderemos ver na figura seguinte a janela de introdução de dados.

The image shows a software window titled "Dados Adicionais" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there is a section labeled "Cabo" containing the following fields:

- Valor máximo da força de tensionamento (%): A dropdown menu.
- Tensão de cedência f_{puk} (Mpa): A text input field.
- Módulo Elasticidade (Gpa): A text input field.
- Área Aço (cm^2): A text input field.
- Coeficiente de atrito: A text input field.
- Ancoragem Passiva com reentrada (mm): A text input field.
- Desvio angular parasita (m^{-1}): A text input field.
- Relaxação aço às 1000 h (%): A text input field.
- Reentrada cunhas (mm): A text input field.

At the bottom of the window, there are two buttons: "Submeter" and "Cancelar".

Figura 26 - Formulário de Características Cabo pré-esforço

O único ponto que poderá levantar alguma questão será a ancoragem passiva com reentrada. Este dado atribui um reajuste no valor do alongamento medido caso o processo de aplicação de pré-esforço não preveja um prévio ajuste dos cabos na ancoragem passiva antes da aplicação do pré-esforço. Assim, deste modo o valor do alongamento medido será o mais aproximado possível ao que irá ser medido em obra. Todos os valores introduzidos nesta janela deverão ser consultados em documentação técnica europeia (ETA) do sistema a ser utilizado em obra.

3.6 ROTINA PERDAS DE ATRITO

O primeiro passo que a sub-rotina de perdas de atrito executa é a definição do intervalo dos dados, este foi predefinido para ser de 0,5 m, mediante esta condição a sub-rotina interpreta qual o valor máximo da extensão do cabo e faz um intervalo de valores entre zero e o valor máximo com um intervalo de 0,5 m entre eles. Este intervalo é exportado para todas as folhas que necessitem do mesmo para serem executadas.

7	Distância	θ_{TOTAL} (rad)
8	0.000	0.0000
9	0.5	0.0000
10	1.000	0.0000
11	1.5	0.0221
12	2.000	0.1329
13	2.50	0.2436
14	3.00	0.3543
15	3.50	0.4648
16	4.00	0.4980
17	4.50	0.4980
18	5.00	0.4980
19	5.50	0.4980
20	6.00	0.4980
21	6.50	0.4980
22	7.00	0.4980
23	7.50	0.4980
24	7.95	0.4980

Figura 27 - Apresentação da soma do desvio angular

Depois de executado o intervalo de valores, a sub-rotina calcula os valores intermédios dos ângulos de desvio assim como a soma dos valores em alçado e planta obtendo desta forma a soma do ângulo de desvio total. Após obter a soma dos ângulos de desvio do alçado e planta a sub-rotina inicia o cálculo da perda de atrito no intervalo definido.

Assim após o cálculo das perdas de atrito a rotina subtrai o valor à força de puxe dos cabos obtendo assim o valor da força de pré-esforço no cabo após as perdas de atrito.

3.7 CÁLCULO INTEGRAL

Depois de obter qual a força após as perdas de atrito, a sub-rotina inicia o cálculo da área para obtenção do valor do alongamento do cabo.

Área Diagrama	Cotas (m)	
	Planta	Alçado
1453.94	2908.57	1.000
		0.700
	1453.25	1.000
		0.645
1452.56		1.000
		0.590
	1450.80	1.000
		0.536
1447.97		1.000
		0.483
	1445.14	1.000
		0.434
1442.32		1.000
		0.389
	1439.51	1.000
		0.348
1436.70		1.000
		0.310
	1433.89	1.000
		0.277
1431.10		1.000
		0.248
	1428.30	1.000
		0.222
1425.52		1.000
		0.200
	1422.73	1.000
		0.182
1419.96		1.000
		0.168
	1417.19	1.000
		0.158
1414.42		1.000
		0.152
	1410.34	1.000
		0.150
1404.85		1.000
		0.154
	1399.26	1.000
		0.167

Figura 28 - Valores para cálculo do alongamento do cabo e cotas do cabo

O método utilizado, tal como já foi referido, é o método dos trapézios (composta). Tal como o nome indica o método dos trapézios (composta) é uma aproximação para o cálculo da área. A divisão em sub-intervalos, na folha de cálculo desenvolvida, de 0,5 m permite obter N trapézios seguindo-se o cálculo da área. Na figura 28 podemos observar a divisão da área em trapézios.

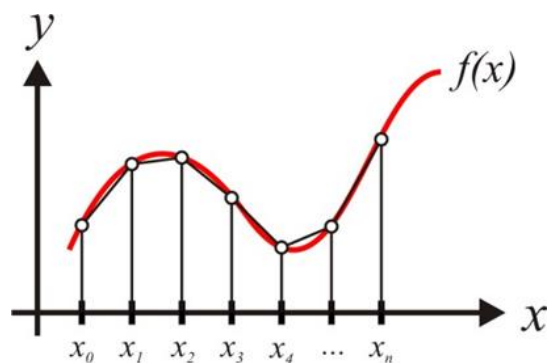


Figura 29 - Regra dos trapézios composta

Estando o programa já na posse de dados para calcular o alongamento do cabo, este procede à soma dos valores parcelares do integral dividindo no final pelo módulo de elasticidade e área do cabo.

A rotina é executada até ao valor máximo do contador que foi criado anteriormente. Assim garante-se que apenas são executados dados que pertencem ao cabo.

Após o cálculo do alongamento do cabo o programa executa uma janela de aviso em que apresenta o valor do alongamento do cabo em milímetros. Esta janela é apresentada ao utilizador antes de finalizar o processo na totalidade, pois durante a execução da rotina o utilizador não possui qualquer acesso a dados que são calculados, permitindo deste modo que o utilizador obtenha um valor de controlo.

Paralelamente o programa apresenta na folha de perdas de atrito as cotas do cabo. Esta informação é extremamente útil para a formulação de gráficos do traçado e mais à frente para as perdas diferidas.

O aspeto gráfico é apresentado na figura seguinte onde podemos constatar que a rotina é executada e preenchida de modo a manter o foco na facilidade de interpretação dos dados. Podemos verificar que o valor do alongamento é apresentado na parte superior da folha.

PERDAS IMEDIATAS PERDAS POR ATRITO					Alongamento (m) 0.0998776			Cotas (m)		
Distância	θ_{TOTAL} (rad)			Perdas Atrito (kN)	P(após atrito) (kN)	% Perdas	Área Diagrama	Planta	Alçado	
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	2908.57	0.00	1453.94	2908.57	1.000	0.700
0.5	0.0000	0.0000	0.0000	1.38	2907.19	0.05	1453.25	1453.25	1.000	0.645
1.000	0.0000	0.0000	0.0000	2.76	2905.81	0.09	1452.56	1452.56	1.000	0.590
1.5	0.0000	0.0000	0.0000	4.14	2904.43	0.14	1450.80	1450.80	1.000	0.536
2.000	0.0078	0.0078	0.0000	9.81	2898.77	0.34	1447.97	1447.97	1.000	0.483
2.50	0.0156	0.0156	0.0000	15.47	2893.11	0.53	1445.14	1445.14	1.000	0.434
3.00	0.0233	0.0233	0.0000	21.11	2887.46	0.73	1442.32	1442.32	1.000	0.389
3.50	0.0311	0.0311	0.0000	26.75	2881.83	0.92	1439.51	1439.51	1.000	0.348
4.00	0.0389	0.0389	0.0000	32.37	2876.20	1.11	1436.70	1436.70	1.000	0.310
4.50	0.0467	0.0467	0.0000	37.99	2870.59	1.31	1433.89	1433.89	1.000	0.277
5.00	0.0545	0.0545	0.0000	43.59	2864.99	1.50	1431.10	1431.10	1.000	0.248
5.50	0.0623	0.0623	0.0000	49.18	2859.40	1.69	1428.30	1428.30	1.000	0.222
6.00	0.0700	0.0700	0.0000	54.76	2853.82	1.88	1425.52	1425.52	1.000	0.200
6.50	0.0778	0.0778	0.0000	60.33	2848.25	2.07	1422.73	1422.73	1.000	0.182
7.00	0.0856	0.0856	0.0000	65.89	2842.69	2.27	1419.96	1419.96	1.000	0.168
7.50	0.0934	0.0934	0.0000	71.43	2837.14	2.46	1417.19	1417.19	1.000	0.158
8.00	0.1012	0.1012	0.0000	76.97	2831.60	2.65	1414.42	1414.42	1.000	0.152
8.50	0.1089	0.1089	0.0000	82.50	2826.08	2.84	1410.34	1410.34	1.000	0.150

Figura 30 - Apresentação da folha de cálculo perdas de atrito

3.8 PERDAS REENTRADA

Logo após finalizar o cálculo das perdas de atrito o programa inicia o cálculo das perdas por reentrada de cunhas. Este processo possui duas sub-rotinas. A primeira realiza o processo iterativo de cálculo da distância até onde se fazem sentir as perdas de atrito, onde o utilizador insere a distância e o programa calcula qual a distância a que corresponde a perda. O método utilizado já foi descrito na teoria, estando o processo totalmente automatizado. Este também calcula qual a perda de força de pré-esforço no início do cabo.

Depois de calculada a distância, irá ser executada uma janela onde o utilizador poderá escolher entre dois métodos, o método simplificado ou o método por tramos, esta pergunta refere-se ao método pelo qual o utilizador deseja realizar o cálculo.

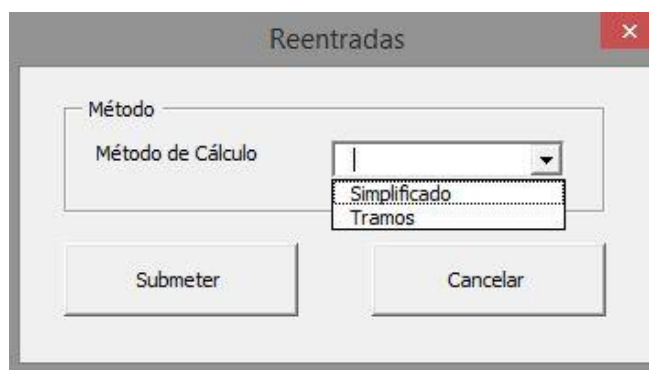


Figura 31 - Formulário para método de cálculo

O método simplificado calcula a perda de força como uma média entre o ponto inicial e o valor da força até onde se fazem sentir as perdas. Este método tem limitações pois em caso de variações bruscas de perdas por metro, o gráfico que é apresentado deixa de ser simétrico o que leva à obtenção de resultados de forças no cabo que são irreais para o caso em estudo, por esta razão este método apenas é aconselhável em traçados onde a variação da perda de força por metro linear se mantém relativamente constante.

O método por tramos efetua uma abordagem diferente. Para conseguir abordar as perdas por reentrada de cunhas o mais realisticamente possível a sub-rotina realiza o cálculo de várias perdas por metro para os diferentes tramos. Deste modo quando

realizamos o cálculo por tramos, a força que irá ser aplicada no tramo será a perda de atrito por metro linear que se encontra de facto naquele ponto do tramo. A aplicação deste método permite a simetria entre o gráfico após perdas de atrito e do gráfico da após perdas por reentrada de cunhas.

Tramo	X1	X2	Perda X1	Perda X2	P'0 1	P'0 2	P kN/m
	0	1.5	0	4.141767	2908.575	2904.433	2.761178
	1.5	8.54	4.141767	82.49719	2904.433	2826.078	11.13003
	8.54	13.29	82.49719	187.9025	2826.078	2720.672	22.19058

Figura 32 - Cálculo de perdas por tramo por metro linear

De salientar que certas bibliografias indicam que se poderá utilizar um coeficiente de atrito superior para as perdas por reentradas dos cabos em relação às perdas por atrito, porém por precaução e por diminutas diferenças no coeficiente de atrito considera-se que este se mantém inalterado.

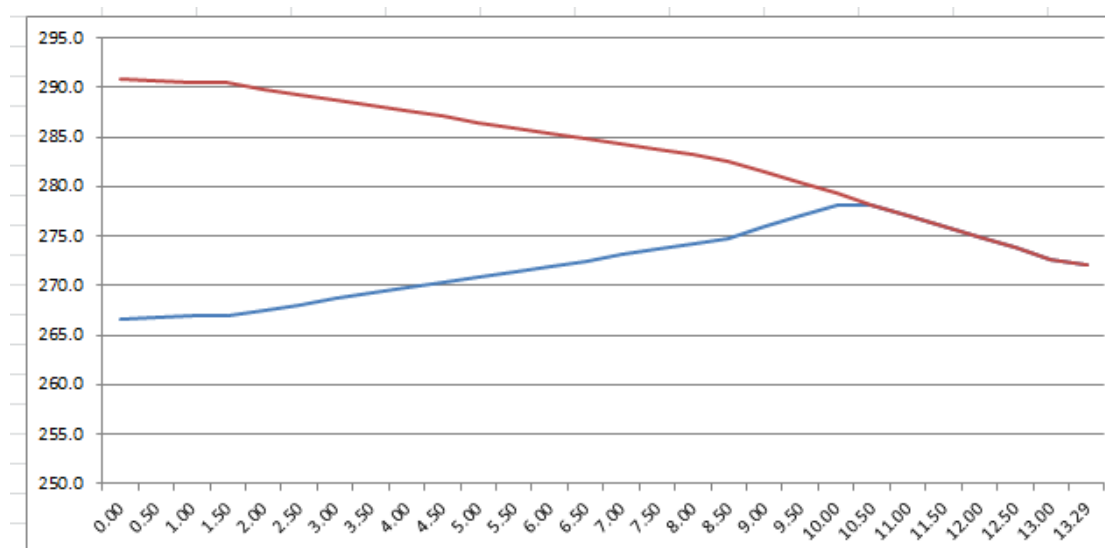


Figura 33 - Perdas de atrito e perdas por reentrada de cunhas

A segunda sub-rotina executa o cálculo do valor da força no cabo após a reentrada de cunhas. Assim sendo este processo volta a utilizar o intervalo anteriormente definido do comprimento do cabo e executa o cálculo, determinando primeiramente o valor das perdas por reentrada de cabos e de seguida subtraindo este valor ao valor da força

correspondente após perdas de atrito. Por último calcula ainda uma percentagem do valor das perdas.

3.9 PERDAS POR DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

Para a determinação das perdas por deformação elástica do betão o programa necessita de informação adicional tal como, a idade de aplicação do pré-esforço, o tipo de cimento utilizado no betão, a classe de resistência do betão, o número de cordões semelhantes sucessivamente tensionados e o método de cálculo. O programa possui um formulário para que sejam introduzidos estes dados tal como mostra a figura seguinte.

O formulário, intitulado "Deformação Elástica", está dividido em duas secções principais:

- Dados Betão:**
 - Resistência Betão: C30/37
 - Cimento: CEM 52.5 R (Classe R)
 - Data aplicação Pré-esforço: 14
- Dados Aplicação:**
 - Número de Armaduras Idênticas sucessivamente tracionadas: 2
 - Método de Cálculo: Tramos

Na base do formulário, há dois botões: "Submeter" e "Cancelar".

Figura 34 - Formulário para cálculo de perdas por deformação elástica

A sub-rotina de cálculo inicia o processo após possuir os dados da janela guardados em variáveis definidas para o efeito. O primeiro passo que a sub-rotina dá é calcular qual o módulo de elasticidade do betão à data de aplicação do pré-esforço. De salientar um aspeto muito importante, a verificação ao esmagamento da ancoragem terá que ser calculada previamente de modo a garantir que não existem problemas de esmagamento e fendilhação no momento de aplicação do pré-esforço. Neste caso, para o cálculo das perdas por deformação elástica o módulo de elasticidade interessa pois quanto menor

for este módulo, maior será a perda devido ao betão ainda não ter atingido a sua resistência máxima.

A rotina tem ainda integrada para o cálculo dos diversos parâmetros auxiliares ao cálculo das perdas, todas as fórmulas que constam no EC2. Por exemplo, no cálculo do módulo de elasticidade à data de aplicação do pré-esforço, a rotina executa a substituição dos valores inseridos nas fórmulas previamente formuladas devolvendo o valor do módulo de elasticidade e guardando esse valor numa variável para utilizar no cálculo.

Tal como na perda por reentrada de cunhas, a perda por deformação elástica possui os mesmos métodos de cálculo de perdas. Passando a exemplificar o modo de aplicação por tramos, este, baseia-se na introdução da tensão de compressão ao nível dos cabos por cada tramo que o cabo possua. Este método é uma aproximação de cálculo devido à elaboração do projeto de aplicação de pré-esforço ser realizado por vezes sem o acesso a notas de cálculo do projeto, assim sendo, cabe a quem executa o projeto de aplicação de pré-esforço fazer uma aproximação do valor de tensão de compressão ao nível dos cabos. Por sua vez o método simplificado assume simplesmente uma força constante de compressão ao longo do traçado do cabo. Este método torna-se útil quando o utilizador deseja realizar um estudo rápido das perdas de um cabo.

De salientar que as perdas por deformação elástica não criam impacto significativo na perda de pré-esforço no cabo, podendo-se assumir determinadas simplificações que no cálculo das perdas de atrito, reentrada dos cabos e perdas diferidas não é possível devido ao seu maior impacto na perda global de pré-esforço.

3.10 ASPETO GRÁFICO

O aspeto gráfico da folha Perdas Deformação Elástica divide-se em duas partes, o cálculo de perdas e a informação sobre os materiais e data de aplicação do pré-esforço, encontrando-se este último no canto superior direito tal como podemos ver na figura seguinte.

	Cimento	CEM 42.5 N (Classe N)
	Betão	C35/45
EC 2		0.25
		28
		1.000
Ecm (t) (GPa)		34
Ecm (GPa)		34
n		2
i		0.250

Figura 35 - Apresentação dos dados auxiliares para cálculo de perdas por deformação elástica

O resto da apresentação gráfica mantém a estrutura anteriormente apresentada na folha de perdas por reentrada de cunhas.

x (m)	Δσ (MPa)	ΔP (kN)	%Perdas
0.00	5.00	14.95	2650.36
0.50	5.00	14.95	2652.34
1.00	5.00	14.95	2653.72
1.50	5.00	14.95	2655.10
2.00	5.00	14.95	2660.56
2.50	5.00	14.95	2666.04
3.00	5.00	14.95	2671.52
3.50	5.00	14.95	2677.02
4.00	5.00	14.95	2682.52
4.50	5.00	14.95	2688.04
5.00	5.00	14.95	2693.57
5.50	5.00	14.95	2699.11
6.00	5.00	14.95	2704.66
6.50	5.00	14.95	2710.22
7.00	5.00	14.95	2715.79
7.50	5.00	14.95	2721.37
8.00	5.00	14.95	2726.96
8.50	5.00	14.95	2732.57
9.00	5.00	14.95	2743.98
9.50	5.00	14.95	2754.97
10.00	5.00	14.95	2766.01
10.50	5.00	14.95	2766.30
11.00	5.00	14.95	2755.83
11.50	5.00	14.95	2744.91

Figura 36 - Apresentação da folha perdas por deformação elástica

3.11 APRESENTAÇÃO INTERMÉDIA DE RESULTADOS

A folha de cálculo tem integrado um módulo intermédio onde é disponibilizada toda a informação sobre perdas e cotas do cabo antes de finalizado o cálculo. Este módulo tem a função de facilitar a decisão do puxe na ancoragem passiva, isto porque facilmente o utilizador consegue verificar qual a força na extremidade do cabo e tomar a decisão rapidamente evitando assim a repetição do processo de introdução de dados. A razão para a introdução deste módulo deve-se ao facto que em cabos muito longos as perdas poderão ser de tal ordem que na extremidade oposta já não se faz sentir o pré-esforço definido.

Este processo recolhe todas as informações já calculadas pelo programa apresentando de seguida graficamente e em tabela os dados calculados.

A janela apresenta dois caminhos diferentes, um com a passagem direta para o cálculo das perdas diferidas com a introdução das características geométricas da peça, dois o processo de recálculo do ganho de força no cabo com o puxe e respetivas perdas por reentrada de cabos na fase oposta. Na figura 37 é apresentado o aspeto gráfico dos dados e os gráficos correspondentes às perdas imediatas. Neste ponto o utilizador define se o pré-esforço cumpre os requisitos e caso não cumpra o programa permite aplicar uma segunda fase de aplicação de pré-esforço na cabeça de ancoragem oposta.

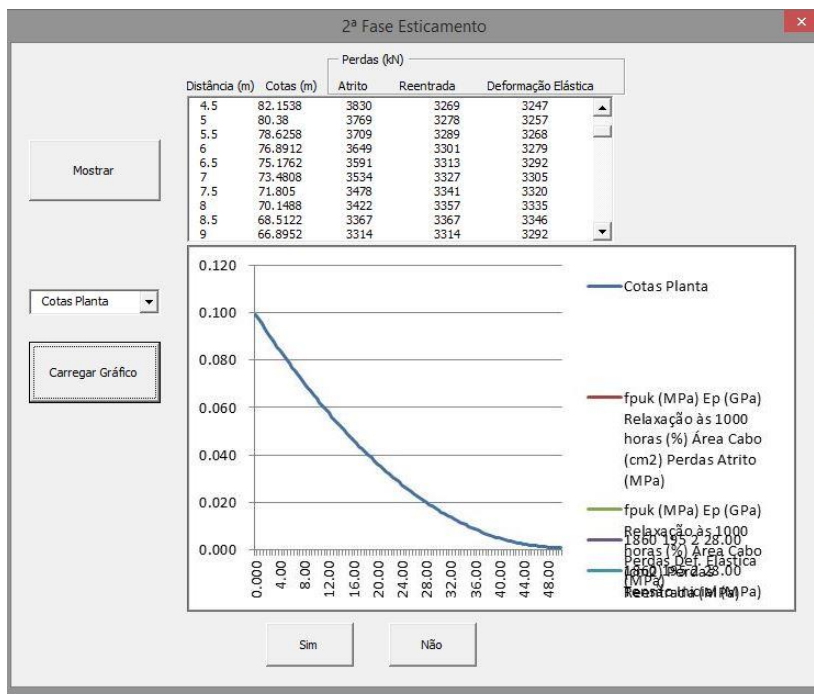


Figura 37 - Janela informativa com resultados das folhas de cálculo

3.12 PERDAS DIFERIDAS

O módulo para o cálculo de perdas diferidas tal como as outras perdas, necessita de dados extra. Tais dados como o centro de gravidade da peça, inércia, área da secção, classe do aço, método de introdução da tensão de compressão ao nível dos cabos, classe de relaxação do aço, extensão da retração e coeficiente de fluência. De todos os elementos anteriormente referidos apenas a extensão da retração e coeficiente de fluência necessitam de um cálculo externo para a obtenção dos valores.

EC2 5.10.6 (2)	
$\Delta \sigma_{p,relax}$	$\frac{(\epsilon_{cs}(t,t_0) \cdot E_p + \alpha \cdot \phi_C(t,t_0) \cdot (\sigma_c, g + \sigma_c, po)) + 0,8 \cdot \Delta \sigma_{p,t-t_0,r}}{1 + \alpha \cdot A_p/A_c \cdot [(1 + (A_c/l_c) \cdot z_{cp}^2)] [1 + 0,8 \cdot \phi_C(t,t_0)]}$
α	5.74
A_c (m ²)	1.08
l_c (m ⁴)	0.1296
A_p/A_c	0.00193
A_c/l_c	8.33333
γ_g	0.600

Figura 38 - Informação auxiliar para cálculo de perdas diferidas

A sub-rotina de cálculo só calcula perdas por relaxação do aço para os tipos 1 e 2, o tipo 3 foi deixado de fora da folha devido a não se enquadrar na finalidade da mesma, esta exclusão deve-se ao facto de a classe 3 estar destinada a barras pré-esforçadas.

O utilizador volta novamente a ter a possibilidade de escolher qual o método de introdução da tensão de compressão ao nível dos cabos por tramo ou no traçado completo.

Com o cálculo das cotas do cabo previamente definidas podemos facilmente obter qual a distância ao centro de gravidade da peça realizando apenas a diferença entre o centro de gravidade da peça e o valor da cota do cabo, tornando este valor absoluto no final da operação. Este valor irá ser utilizado mais tarde no cálculo das perdas diferidas como sendo o z_{cp} .

Após estar na posse de todos os dados guardados em variáveis, a sub-rotina inicia o cálculo das perdas diferidas calculando primeiro o valor das perdas em Quilo Newtons (kN) e calculando logo de seguida o valor em Mega Pascal (MPa).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
6				Classe Aço	2				
7		x (m)	μ	$\Delta\sigma_p$ (MPa)	$\sigma_{c,cap}$ (MPa)	Cotas	z_{cp} (m)	ΔP_{c1k} (KN)	$\Delta\sigma_{p,c1k}$ (MPa)
8		0.00	0.68	46.11	5.00	0.700	0.100	297.02	142.46
9		0.50	0.68	46.21	5.00	0.645	0.045	297.81	142.83
10		1.00	0.68	46.31	5.00	0.590	0.010	298.12	142.98
11		1.50	0.68	46.41	5.00	0.536	0.064	297.96	142.91
12		2.00	0.69	46.79	5.00	0.483	0.117	297.82	142.84
13		2.50	0.69	47.18	5.00	0.434	0.166	297.35	142.61
14		3.00	0.69	47.58	5.00	0.389	0.211	296.64	142.27
15		3.50	0.69	47.98	5.00	0.348	0.252	295.78	141.86
16		4.00	0.69	48.38	5.00	0.310	0.290	294.85	141.41
17		4.50	0.69	48.79	5.00	0.277	0.323	293.92	140.97
18		5.00	0.69	49.20	5.00	0.248	0.352	293.04	140.55
19		5.50	0.70	49.61	5.00	0.222	0.378	292.27	140.18
20		6.00	0.70	50.03	5.00	0.200	0.400	291.65	139.88
21		6.50	0.70	50.45	5.00	0.182	0.418	291.22	139.67
22		7.00	0.70	50.88	5.00	0.168	0.432	290.99	139.57
23		7.50	0.70	51.31	5.00	0.158	0.442	291.01	139.57
24		8.00	0.70	51.75	5.00	0.152	0.448	291.27	139.70
25		8.50	0.70	52.19	5.00	0.150	0.450	291.79	139.95
26		9.00	0.71	53.09	5.00	0.154	0.446	293.44	140.74
27		9.50	0.71	53.98	5.00	0.167	0.433	295.67	141.81
28		10.00	0.71	54.89	5.00	0.189	0.411	298.50	143.16
29		10.50	0.71	54.96	5.00	0.221	0.379	300.53	144.14
30		11.00	0.71	54.05	5.00	0.262	0.338	301.40	144.55
31		11.50	0.71	53.16	5.00	0.312	0.288	302.47	145.07
32		12.00	0.70	52.29	5.00	0.371	0.229	303.53	145.58
33		12.50	0.70	51.43	5.00	0.440	0.160	304.31	145.95
34		13.00	0.70	50.59	5.00	0.517	0.083	304.49	146.04
35		13.29	0.70	50.11	5.00	0.567	0.033	304.18	145.89

Figura 39 - Apresentação da folha de perdas diferidas

3.13 2ª FASE DE PUXE

Não tendo sido abordado na parte teórica, o reajuste aplica-se quando as perdas na ancoragem passiva são de tal ordem que não cumprem o pré-esforço definido pelo projetista. Assim além de se aplicar obrigatoriamente duas cabeças de ancoragem ativas terá que se aplicar pré-esforço em ambas as extremidades do cabo. Este processo permite o ganho de força de pré-esforço na peça otimizando assim o cabo. Esta situação ocorre principalmente em traçados muito longos como por exemplo, os traçados que poderão ocorrer em pontes e viadutos.

3.14 PERDAS DE ATRITO (REAJUSTE)

Quando aplicado o reajuste das armaduras ativas na ancoragem passiva o valor da força de puxe deve ser igual à força de tensionamento inicial. Assim para calcular a força de reajuste, devemos subtrair à força de tensionamento do cabo o valor da força no final do primeiro puxe, obtendo assim o valor da força de tensionamento do cabo na ancoragem onde se dá o reajuste. Isto é, o valor de reajuste está diretamente relacionado com o valor das perdas sentidas na extremidade oposta onde se dá o primeiro puxe. É de salientar que não se deve omitir que para a obtenção do valor de puxe deverá também ser adicionado o valor das perdas por deformação elástica, pois estas perdas já se encontram instaladas quando se aplica o reajuste.

O programa depois de ter o *input* para calcular o reajuste, inicia o cálculo do valor da força de tensionamento na ancoragem passiva. Assim mediante o valor da força a rotina vai calcular as perdas de atrito como se fosse um efeito isolado. Posteriormente a este cálculo a rotina irá comparar qual dos valores é superior comparando o valor das perdas após o reajuste e o valor já existente do puxe escolhendo no final o valor superior para o novo gráfico de perdas de atrito e para a nova lista de valores da folha da 2ª fase.

3.15 PERDAS POR REENTRADA 2ª FASE

O valor da reentrada de cabos da 2ª fase assume o mesmo valor de reentrada de cabos da 1ª fase. Assim o utilizador apenas terá que optar pelo método que deseja para o cálculo das perdas por reentrada e realizar o processo iterativo onde define até que distância as perdas por reentrada de cabos se fazem sentir. Este processo é necessário pois em caso do cabo não ser simétrico as perdas por reentrada de cabos são diferentes, o que leva a um gráfico diferente comparativamente às perdas por reentrada de cabos da 1ª fase.

3.16 QUADRO PERDAS

A folha Quadro perdas foi elaborada de modo a ser criado um relatório para efeito de memória de cálculo, sendo que o seu preenchimento é realizado de forma totalmente

automática. A folha contém todas as características do cabo e parâmetros relevantes que foram sendo introduzidos ao longo do processo de cálculo são também apresentadas as perdas das fases de tensionamento do cabo. No final é apresentado um gráfico com todos os dados do valor daas perdas para uma mais fácil interpretação dos mesmos.

A rotina da folha do quadro perdas apenas realiza a conversão do valor das perdas em Mega Pascal, isto acontece porque ao longo do processo de cálculo todos os valores necessários vão sendo armazenados em variáveis próprias para mais tarde serem utilizadas. Na figura 40 podemos observar o aspeto final da folha com as perdas de pré-esforço.

x (m)	Perdas Atrito (MPa)	Perdas Reentrada (MPa)	Perdas Def. Elástica (MPa)	Tensão Inicial (MPa)	Força Inicial (kN)	Perdas Oneridas (MPa)	Tensão Final (MPa)	Força Final (kN)
0.0	0.0	256.6	28.7	1202.7	1170.2	130.4	1072.2	1043.3
0.5	0.7	256.6	28.7	1203.0	1170.5	134.1	1068.9	1040.0
1.0	1.4	256.6	28.7	1203.3	1170.8	135.4	1067.0	1038.0
1.5	2.1	256.7	28.7	1241.3	1207.8	137.9	1034.4	1023.6
2.0	2.8	256.7	28.7	1254.8	1220.9	136.7	1003.1	1007.9
2.5	3.5	193.7	28.7	1253.9	1214.7	136.1	1032.9	1002.3
3.0	4.2	35.7	28.7	1222.9	1287.1	116.6	1011.1	1049.2
3.5	4.9	0.0	28.7	1229.0	1293.1	143.6	1055.5	1053.5
4.0	5.6	0.0	28.7	1319.9	1384.2	144.6	1075.3	1043.6
4.5	6.3	0.0	28.7	1319.2	1383.6	146.2	1073.0	1041.3
5.0	7.0	0.0	28.7	1318.6	1383.0	147.4	1071.2	1039.6
5.5	7.7	0.0	28.7	1317.9	1382.4	147.9	1070.0	1038.4
6.0	8.4	0.0	28.7	1317.3	1381.7	147.9	1068.4	1037.0

Figura 40 - Apresentação da folha de cálculo Quadro perdas

4 CASOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Na fase final do estágio surgiu a oportunidade de integrar a equipa num projeto de aplicação de pré-esforço. Esta, serviu para aplicar a folha de cálculo desenvolvida para este fim, sendo o projeto em causa parte integrante da Cidade do Futebol que está neste momento a ser executado. Este projeto consistiu em definir o sistema de pré-esforço e armaduras de 5 vigas, que totalizaram o traçado de 7 cabos, tendo sido requerido pelo empreiteiro que ganhou o concurso da obra, sendo o próprio a definir o sistema a utilizar e quais os cordões a utilizar.

4.2 METODOLOGIA

O primeiro passo deste projeto começou pela necessidade de analisar os desenhos das vigas recebidos por parte do empreiteiro onde teria que ser aplicado pré-esforço.

Nesta primeira fase foram analisados os traçados que o projetista da estrutura tinha definido, verificando-se em 3 vigas que o traçado pré-definido não poderia ser cumprido devido a raios de curvatura dos cabos demasiado curtos. Assim, procedeu-se ao estudo de possíveis soluções para o traçado dos cabos. Este estudo teve como suporte a ferramenta de cálculo desenvolvida no âmbito do estágio curricular, baseando-se na realização de algumas iterações para verificar qual a melhor solução para o traçado do cabo sempre com o objetivo da solução não apresentar perdas demasiado elevadas e cumprir as cotas definidas pelo projetista, de modo a garantir a excentricidade. De salientar que este estudo também teve em conta a distância da bainha à extremidade da peça, ou seja, garantindo o recobrimento mínimo da bainha.

Depois de finalizado o estudo dos traçados das vigas a seguinte fase do projeto centrou-se no estudo da viabilidade das soluções adotadas, garantindo que a força de pré-esforço definida pelo projetista para as vigas era cumprida. Primeiramente realizou-se um estudo de tensionamento dos cabos a 75% da tensão máxima dos cabos, depois de estudadas as vigas com a condição anteriormente definida verificou-se que em três delas este valor teria que subir para 80% da força máxima de tensionamento, isto devido às perdas na extremidade serem demasiado elevadas.

Depois de analisados todos os pormenores anteriormente referidos, procedeu-se ao cálculo final com recurso novamente à folha de cálculo para a elaboração da nota de cálculo das perdas de pré-esforço.

Nos pontos seguintes irão ser detalhados os pormenores do cálculo e a utilidade da ferramenta desenvolvida no âmbito do estágio curricular, no cálculo das perdas.

4.3 ESTUDO DAS VIGAS

A aplicação prática consistiu na elaboração do projeto de aplicação de pré-esforço de 5 vigas tal como anteriormente referido.

As vigas 1, 2 e 3 foram o primeiro grupo de vigas estudado, tratando-se de vigas de reduzidas dimensões comparativamente ao usual quando aplicado pré-esforço. Esta solução é inteiramente justificada devido à sua função estrutural na estrutura da bancada.

Na figura seguinte podemos ver a configuração do alçado tipo das vigas 1, 2 e 3, sendo que a única diferença entre as vigas é a cota a ser atingida pelo cabo e a geometria da peça, salientando que os cabos são muito semelhantes na sua configuração.



Figura 41 - Perfil tipo das vigas 1 2 3

Assim, para um estudo mais aprofundado do traçado recorreu-se ao programa Matlab para desenhar o traçado do cabo, função que a folha de cálculo realiza mas que devido à reduzida dimensão das peças os sub-intervalos utilizados são demasiado espaçados para se obter um desenho fidedigno da realidade. Nas imagens seguintes são apresentados os traçados estudados durante o desenvolvimento do projeto para as vigas 1 2 e 3. Na figura 41 é apresentado o traçado original e como se pode verificar pela figura o cabo possui concordâncias de raio diminuto na ordem de 1 m. Devido à necessidade de aumentar o raio das concordâncias optou-se por suprimir o tramo central reto do cabo obtendo-se assim um maior desenvolvimento das parábolas o que origina só por si um aumento do raio de curvatura.

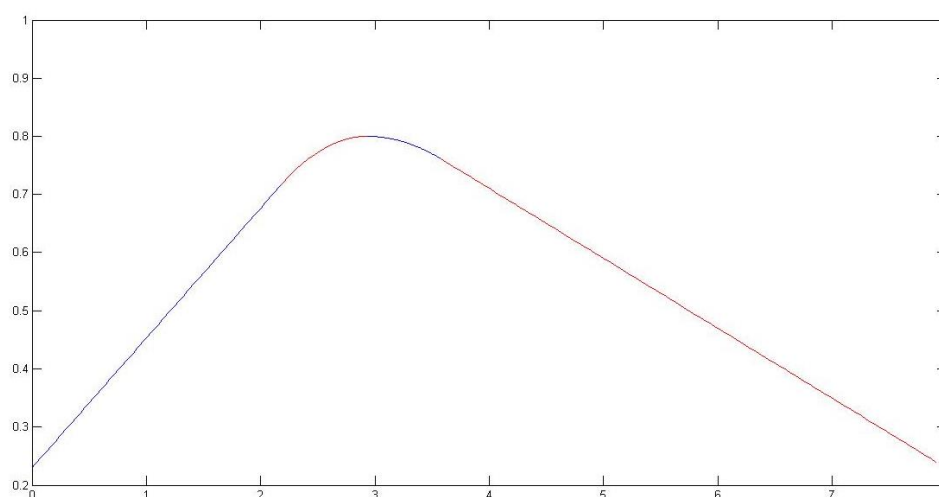


Figura 42 - Solução 1 para traçado da viga 1 2

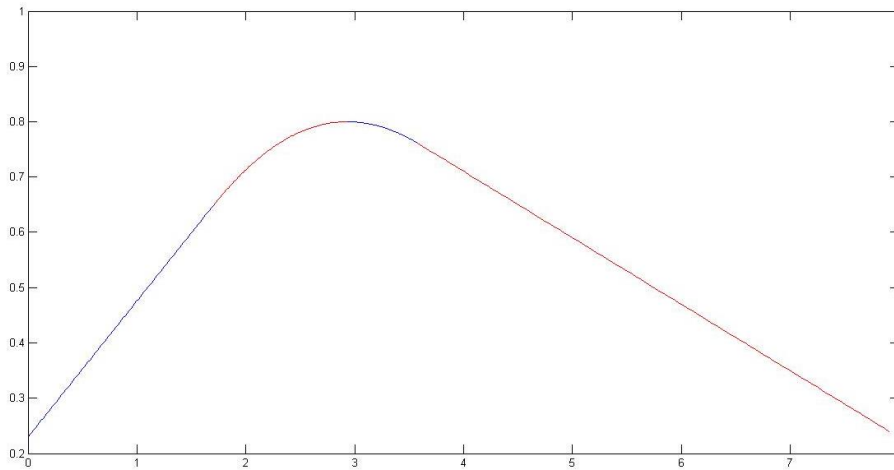


Figura 43 - Solução 2 para traçado da viga 1 2

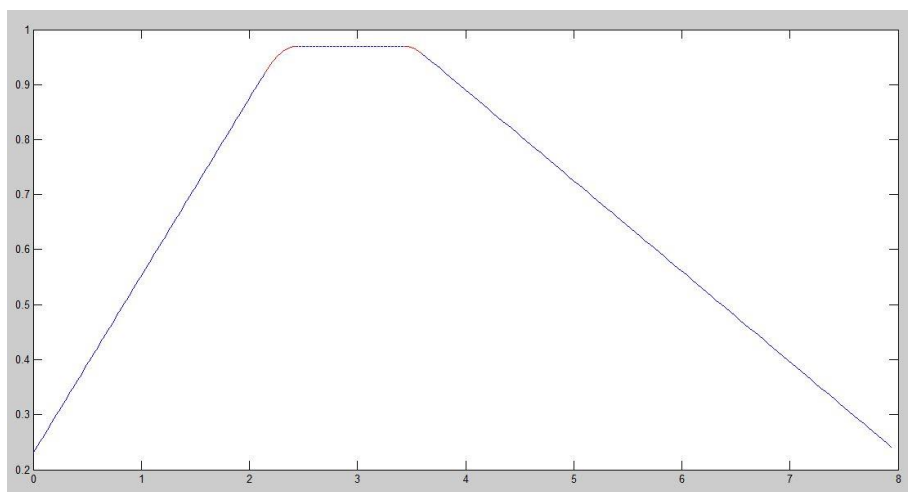


Figura 44 - Traçado original da viga 3

De salientar que as imagens dos traçados das vigas 1, 2 e 3 são definidas por funções e apresentam uma escala distorcida, o que facilita a interpretação mas não são passíveis de serem transpostas para o desenho. Perante este facto e possuindo já as cotas definidas com 500 pontos por função, realizou-se um ficheiro Script (.scr) para se proceder à transposição do traçado proposto para o desenho disponibilizado pelo empreiteiro. Na figura seguinte podemos observar a composição do ficheiro já com a escala utilizada no desenho, 1:10.

```

VigarIF.scr - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda
line
0,230
188.88888888889,276.488199055556
377.77777777778,322.976398111111
566.66666666667,369.464597166667
755.55555555556,415.952796222222
944.44444444444,462.440995277778
1133.33333333333,508.929194333333
1322.22222222222,555.417393388889
1511.11111111111,601.905592444444
1700,648.3937915
1836.88888888889,680.212171300190
1973.77777777778,708.287365067901
2110.66666666667,732.619192603111
2247.55555555556,753.207653905827
2384.44444444444,770.052748976049
2521.33333333333,783.154477813778
2658.22222222222,792.512840419012
2795.11111111111,798.127836791753
2932,799.999466932
3003.44444444444,799.526198928087
3074.88888888889,798.094056625901
3146.33333333333,795.707041097445
3217.77777777778,792.365152342716
3289.22222222222,788.068390361716
3360.66666666667,782.816755154444
3432.11111111111,776.610246720901
3503.55555555556,769.448865061087
3575,761.332610175
4056 55555555556 703 407196551889
    
```

Figura 45 - Código para introdução automática do novo traçado no desenho original

De notar que a proposta do traçado manteve a excentricidade definida para a peça em betão alterando apenas a cota do cabo nas proximidades do ponto mais alto. Esta situação foi aprovada pelo projetista. Na figura 46 podemos observar a comparação entre o traçado original e a proposta efetuada para alteração do traçado.

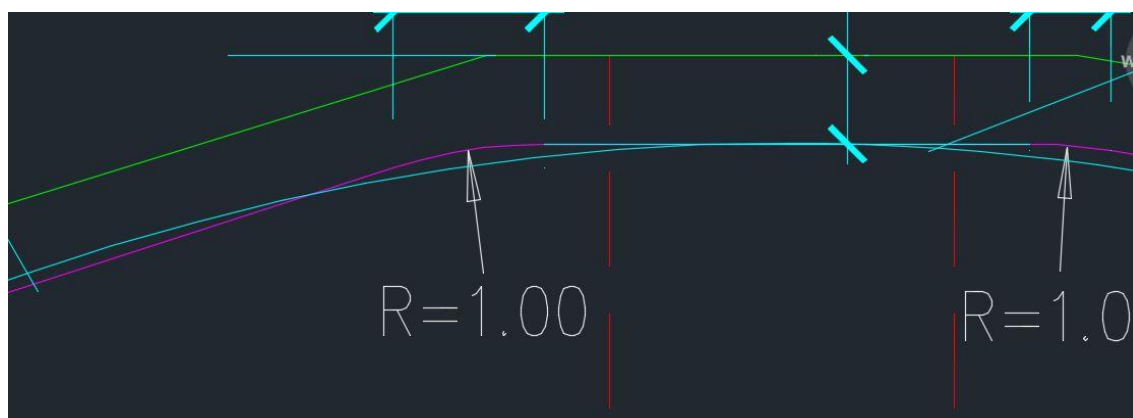


Figura 46 - Comparação entre solução original e solução proposta

Os requisitos definidos pelo projetista consistiram em cabos com 9.8 cm² de área e 1050 kN de força de pré-esforço a tempo infinito. Na figura 47 podemos perceber que devido

à elevada perda de pré-esforço numa zona muito localizada da peça, (decorrente da existência de duas concordâncias de reduzido raio), permite que a recuperação de tensão após as perdas por reentrada de cabos se dê num curto espaço de desenvolvimento do cabo, entre os 1,5 m e os 3,5 m.

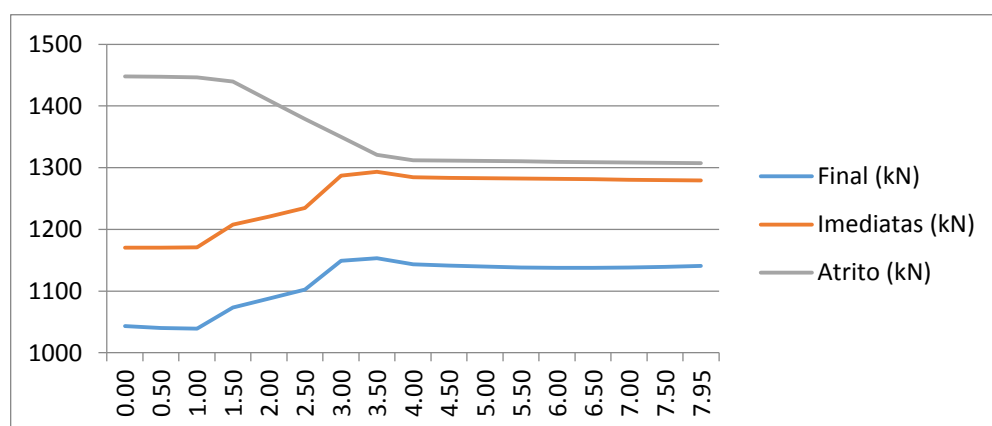


Figura 47 - Perdas de atrito da viga 1 e 2

Após a definição do traçado procedeu-se ao cálculo das armaduras da ancoragem que engloba também as verificações de esmagamento do betão. Assim, assumindo o preconizado no EC2 em complemento com o MC2010 chegamos ao valor da armadura para a zona das ancoragens.

Após o estudo do traçado das vigas 1 2 e 3 procedeu-se à verificação do traçado da viga 4, e como já referido anteriormente a viga 4 é transversal às vigas 1 2 e 3.

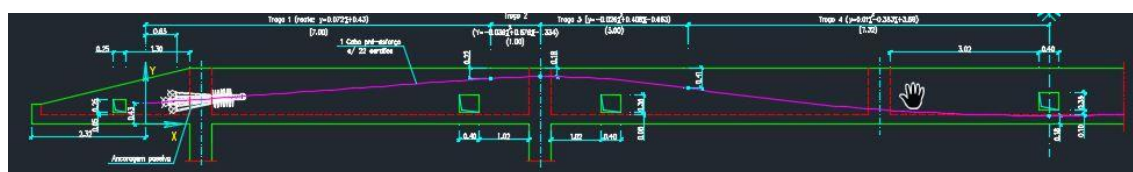


Figura 48 - Traçado dos cabos da viga 4

A viga 4 na solução inicial apresentava dois cabos de pré-esforço com desenvolvimento em planta de 36,64 m com as cabeças de ancoragem ativas de cada cabo em faces

opostas. Apesar dos cabos cumprirem os raios mínimos impostos pela aprovação técnica europeia, um problema de congestionamento de armaduras ativas na zona de ancoragem levou à alteração do traçado. Assim sendo, definiu-se um novo traçado para os cabos onde a ancoragem passiva seria recuada cerca de 2,5 m.

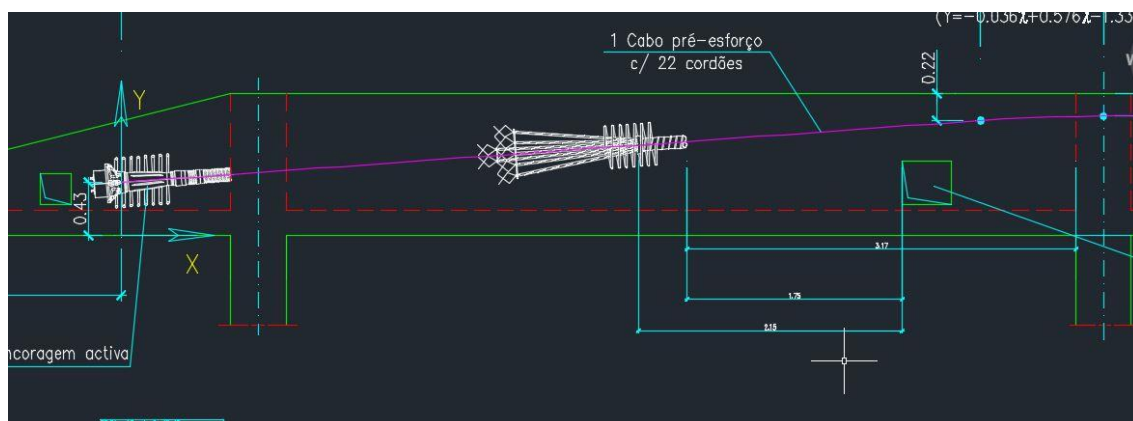


Figura 49 - Proposta para nova localização de ancoragem passiva em alçado

Após este recuo de 2,5 m verificou-se que a viga na zona de ancoragem ativa, devido à sua excentricidade em relação ao centro de gravidade, apresentava trações na face lateral. Por esta razão estudou-se uma solução onde a ancoragem ativa estaria centrada com o centro de gravidade da peça e onde se seguiam duas concordâncias em planta para recuperar a excentricidade a par da ancoragem passiva. Após o estudo global das perdas verificou-se que devido ao reduzido raio em planta das concordâncias estas produziam elevadas perdas de pré-esforço devido a perdas de atrito. Por esta razão, esta solução tornou-se inviável pois a força de pré-esforço definida pelo projetista não era cumprida.

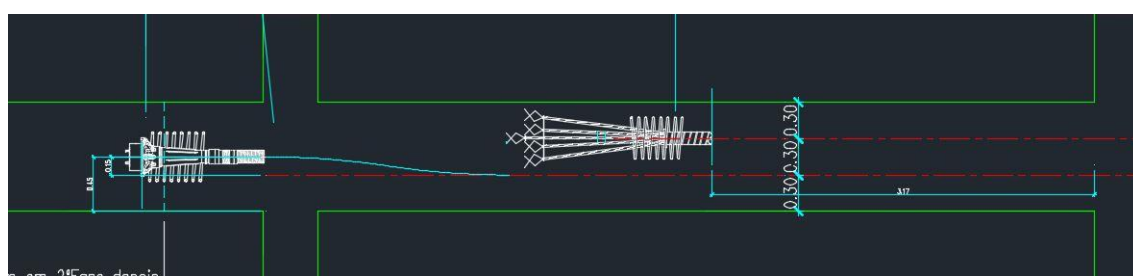


Figura 50 - Proposta para nova localização de ancoragens passiva e ativa

Assim, a solução apresentada ao projetista passou por recuar a ancoragem passiva 2,5 m e manter o cabo com a excentricidade. Para validar esta solução realizou-se uma verificação para se obter qual a tensão de tração a que a peça estaria sujeita caso se mantivesse a excentricidade do cabo na zona da ancoragem, esta alteração revelou tensões de tração diminutas que poderiam ser facilmente cobertas com armadura passiva.

Após envio da solução proposta ao projetista o mesmo recusou a alteração mantendo a solução original defendendo que a solução preconizada inicialmente era exequível por parte do empreiteiro mantendo-se assim a solução original.

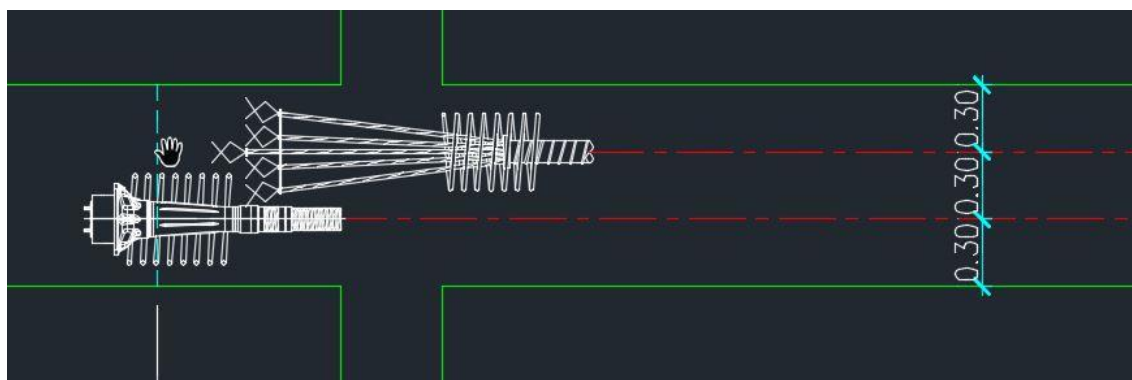


Figura 51 - Solução original

O traçado definido originalmente apresenta perdas que cumprem os pressupostos definidos pelo projetista, área mínima de $51,6 \text{ cm}^2$ e 6600 kN de pré-esforço total a tempo infinito na soma dos dois cabos.

Apesar do gráfico apresentar uma força na ancoragem passiva ligeiramente inferior a 3200 kN o facto de os cabos serem tensionados em lados opostos da peça garante que a soma da força na ancoragem com a força na ancoragem activa, cerca de 3400 kN, cobre o valor de pré-esforço a tempo infinito, 6600 kN.

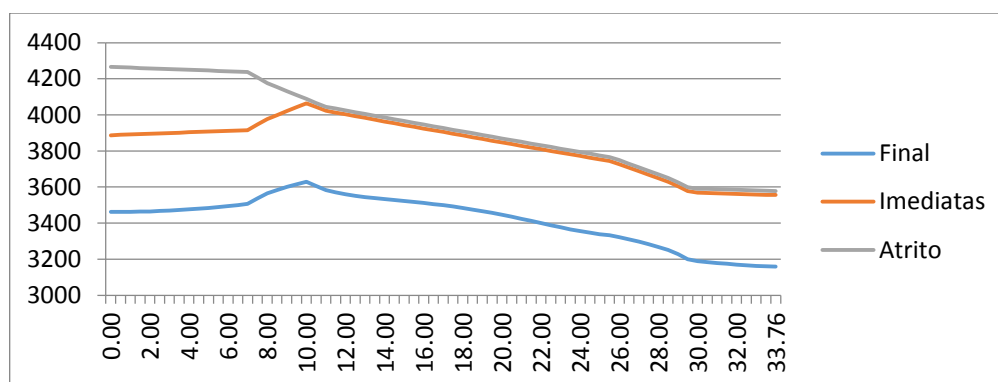


Figura 52 - Perdas de atrito viga 4

As perdas do cabo 4 e 5, sem alteração do traçado em planta, apresentam a configuração que se encontra representada na figura 51. Podemos observar no gráfico o efeito de perdas por reentrada de cabos desde a origem até cerca de 10,50 m evidenciando a recuperação de força de pré-esforço mais acentuada a partir dos 7,5 m à origem, facto que vai em linha de conta com alteração brusca do traçado tal como podemos observar pelo traçado do cabo obtido pela folha de cálculo, fig 52.

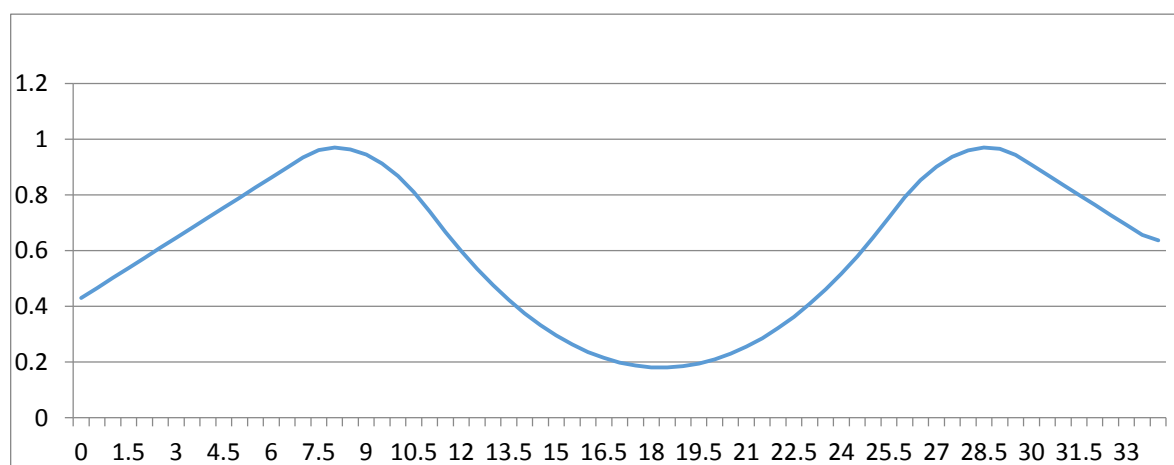


Figura 53 - traçado do cabo 4 e 5 na viga 4 obtido automaticamente

Na figura 52 podemos observar a simetria dos cabos 4 e 5, apresentando na zona dos apoios excentricidade para cobrir os momentos negativos estando mais próximos da face superior e a meio vão, mais próximos da face inferior de modo a cobrir os

momentos positivos. Regra geral, o traçado do cabo apresenta um aspeto muito semelhante ao gráfico de momentos.

A viga 5, a última a ser estudada, trata-se de uma viga com apenas um vão de cerca de 15 m. A particularidade desta viga é o pilar que inicia a meio vão da peça, condicionando a aplicação de pré-esforço. A peça apresenta 2 cabos de pré-esforço de 15 cordões com $1,39 \text{ cm}^2$. A força a tempo infinito definida pelo projetista por cabo foi de 2250 kN no mínimo com 21 cm^2 de área cada cabo.

A pedido do empreiteiro o local das ancoragens ativas foi alterado para a mesma extremidade, isto aconteceu devido ao reduzido espaço existente na extremidade esquerda razão que dificultaria a utilização de macaco hidráulico. Decidiu-se assim que as ancoragens ativas ficavam a par.

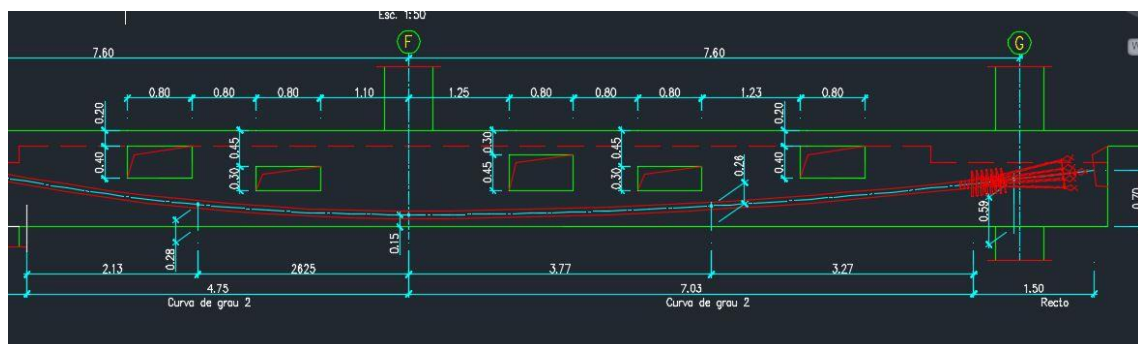


Figura - 54 Viga 5 e traçado do cabo correspondente 6 e 7

O traçado dos cabos consistia em duas concordâncias seguidas de um troço reto de cerca de 1,5 m. Assim, devido ao seu traçado simples as perdas de tensão não são críticas cumprindo os 2250kN de força de pré-esforço que o cabo deverá possuir a tempo infinito como podemos ver nas figuras 54 e 55.

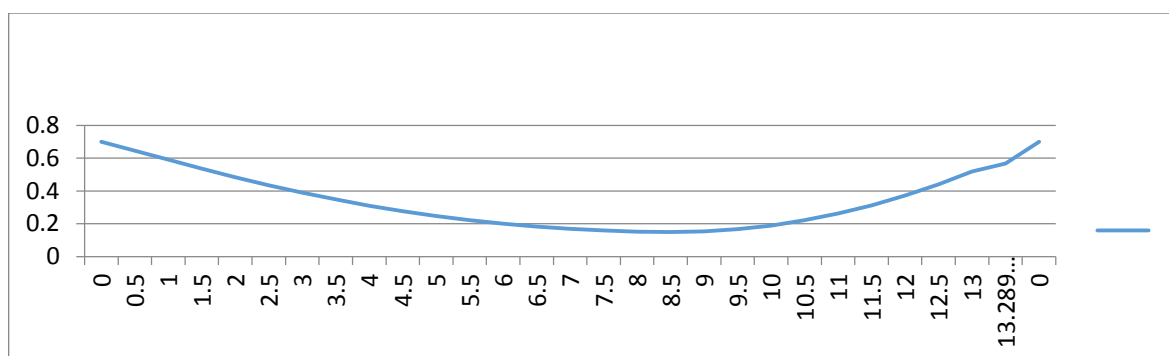


Figura 55 - Traçado do cabo 6 e 7

Como podemos observar no gráfico das perdas de pré-esforço do cabo 6 e 7 as perdas por reentrada fazem-se sentir até aos 10 m. No gráfico da força de pré-esforço podemos relacionar a suave recuperação de tensão após reentrada de cabos com o traçado do cabo, os elevados raios das concordâncias assumem perdas por metro linear baixas o que contribui para o atrasar da recuperação da força de pré-esforço no cabo.

O método utilizado para calcular as perdas por reentrada de cabos baseou-se no método por tramos. Podemos constatar este facto com o grau de simetria que existe no gráfico entre a linha de perdas de atrito e as perdas imediatas (incluem as perdas por deformação elástica).

De assinalar que as perdas diferidas como as imediatas possuem uma percentagem de perda muito semelhante. Este facto leva-nos a ter em conta que o benefício de utilizar aços de elevada resistência garante uma exequibilidade do sistema de pré-esforço tornando-se numa solução eficiente em obras de elevada complexidade ou importância.

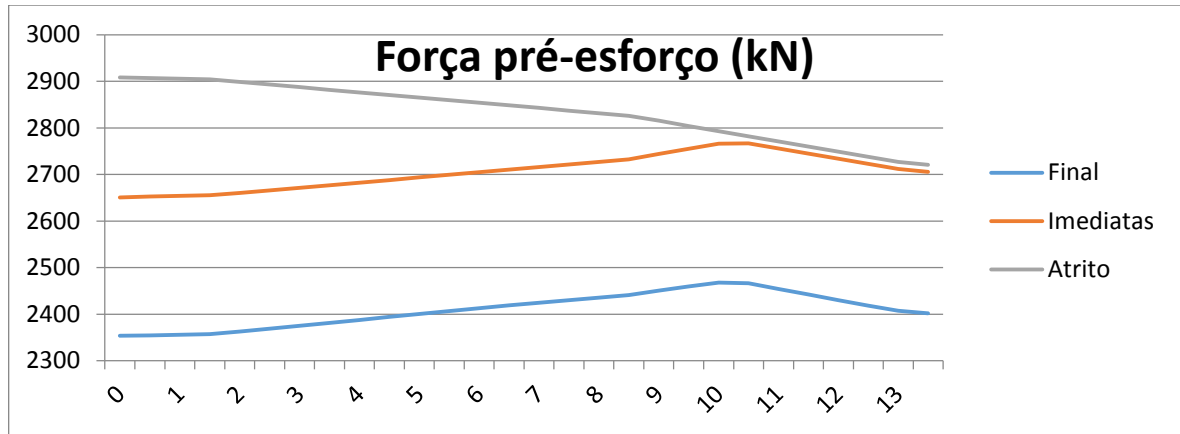


Figura 56 - Perdas de atrito viga 5

5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 VALIDAÇÃO DOS DADOS COM RECURSO A SOFTWARE COMERCIAL

Para a validação dos dados obtidos recorreu-se ao *software* comercial *Sofistik*. Este programa, por ser uma ferramenta de cálculo automático muito versátil, revelou-se a melhor escolha para a comparação com os dados obtidos pela folha.

O *SOFISTIK* é um programa de elementos finitos que tem na sua génese, uma forte componente teórica. A consulta dos manuais para a utilização do programa foi imprescindível devido à sua elevada complexidade e ao contacto nulo com o mesmo. Depois de se verificar o funcionamento do programa constatou-se que é possível obter as perdas de pré-esforço numa peça de betão apenas pela definição da secção, o comprimento da peça, as características dos materiais aplicados e os pontos máximos e mínimos para a definição do cabo de pré-esforço. De salientar que devido ao método gráfico de introdução de dados do programa ser diferente da folha de cálculo, os dados obtidos serão diferentes pelo simples facto da rotina utilizada ser diferente. De qualquer modo os valores obtidos são semelhantes não apresentando valores com grande disparidade.

A comparação dos valores vai ser realizada apenas com as perdas imediatas visto que o programa apenas permite calcular perdas imediatas de modo simplificado. Para um cálculo mais aprofundado seria necessário despende mais tempo no estudo do programa comercial, algo que não foi possível devido ao reduzido tempo.

Na viga 1 2 e 3 o valor das perdas apresenta-se muito semelhante, o que confirma que o cálculo realizado está correto. Assim, podemos ver pela configuração do gráfico que os

dados introduzidos correspondem a uma perda semelhante, assumindo que as diferenças dos valores das perdas imediatas poderão estar relacionados com as fórmulas internas para cálculo de perdas.

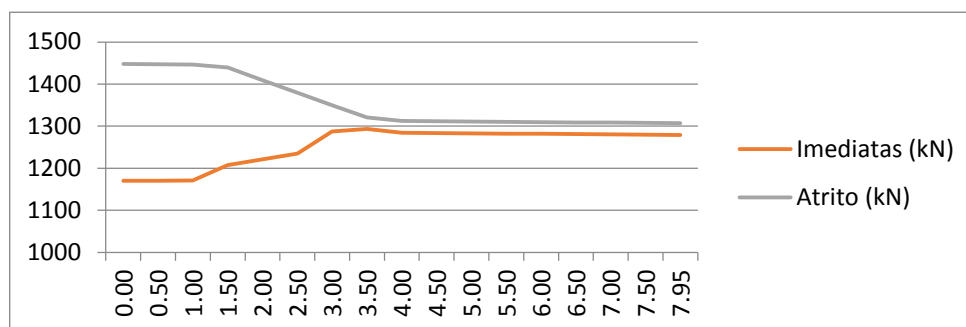


Figura 57 - Perdas de atrito viga 1 e 2

De salientar que os gráficos não poderão ser comparados diretamente visto que o gráfico de perdas da folha de cálculo apresenta os valores em kN enquanto o gráfico obtido pelo *software* comercial apresenta o valor por tensão no cabo. Apesar desta diferença, as duas análises apresentam valores de perda de pré-esforço semelhante a ponto de ser possível de realizar a comparação direta.

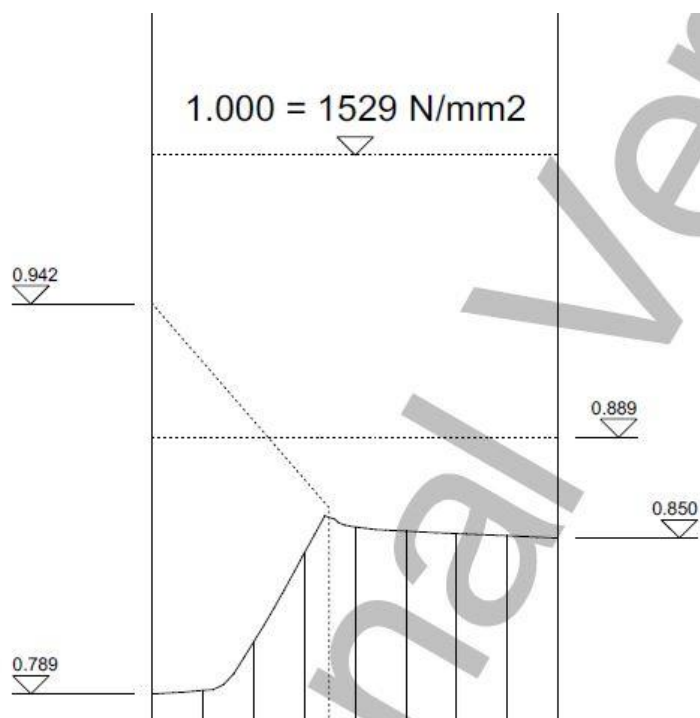


Figura 58 - Gráfico obtido com recurso ao programa SOFISTIK

Tabela 4 - Perdas pré-esforço Viga 1 e 2 SOFISTIK

Station	Beam	x(m)	N(kN)
0.00	10001	0.00	-1110.56
0.99	10001	0.99	-1113.12
0.99	10002	0.00	-1113.12
1.99	10002	0.99	-1178.07
1.99	10003	0.00	-1178.07
2.98	10003	0.99	-1255.96
2.98	10004	0.00	-1255.96
3.97	10004	0.99	-1254.72
3.97	10005	0.00	-1254.72
4.97	10005	0.99	-1253.17
4.97	10006	0.00	-1253.17
5.96	10006	0.99	-1251.93
6.95	10007	0.99	-1250.69
6.95	10008	0.00	-1250.69
7.95	10008	0.99	-1249.19

Tabela 5 - Perdas de pré-esforço viga 1 e 2 Excel

x (m)	P(após atrito) (kN)	P(após reentrada) (kN)	% Perdas
0.00	1447.8	1198.1	17.25
1.00	1446.4	1198.7	17.21
2.00	1409.1	1248.8	13.75
3.00	1349.7	1315.0	9.18
4.00	1312.1	1312.1	9.37
5.00	1310.9	1310.9	9.46
6.00	1309.6	1309.6	9.54
7.00	1308.4	1308.4	9.63
7.95	1307.2	1307.2	9.71

Na viga 4 a comparação entre os valores apresenta apenas um valor diferente na perda por reentrada de cabos porque após a recuperação das perdas por reentrada o valor obtido passa a ser muito semelhante mostrando uma diferença de cerca de 2 kN de força de pré-esforço no final do cabo, valor que representa apenas 0,04% no valor total de puxe. Ao longo do traçado do cabo a força nunca é igual. De salientar que nas imagens seguintes os valores não são diretamente comparáveis devido ao passo que o

programa comercial tem definido ser diferente do valor definido pela folha de cálculo. Porém podemos fazer uma comparação com os valores que se encontram mais próximos o que demonstram um elevado grau de aproximação a nível de valores, o que no final não representa grande diferença devido à elevada força que o cabo continua a possuir.

Station	Beam	x(m)	N(kN)	x (m)	P(após atrito) (kN)	P(após reentrada) (kN)	% Perdas
0.00	10001	0.00	-4012.39	0.00	4265.9	3909.2	8.36
4.22	10001	4.22	-4033.80	0.50	4263.9	3911.2	8.31
4.22	10002	0.00	-4033.80	4.00	4249.7	3925.4	7.98
8.44	10002	4.22	-4151.33	8.00	4176.1	3999.0	6.26
8.44	10003	0.00	-4151.33	12.00	4024.9	4024.9	5.65
12.66	10003	4.22	-4004.29	16.50	3936.7	3936.7	7.72
12.66	10004	0.00	-4004.29	21.00	3850.5	3850.5	9.74
16.88	10004	4.22	-3943.45	25.50	3766.1	3766.1	11.72
16.88	10005	0.00	-3943.45	29.50	3599.6	3599.6	15.62
21.10	10005	4.22	-3857.45	33.76	3578.2	3578.2	16.12
21.10	10006	0.00	-3857.45				
25.32	10007	0.00	-3748.94				
29.54	10007	4.22	-3604.48				
29.54	10008	0.00	-3604.48				
33.76	10008	4.22	-3580.34				

Figura 59 - Comparação Perdas de atrito SOFISTIK Excel da Viga 4

Na comparação dos gráficos de perdas imediatas da viga 5 podemos observar que o programa realiza um método semelhante no cálculo das perdas por reentrada de cabos. Observa-se este facto na alteração do declive do valor da força de pré-esforço após as perdas por reentrada de cunhas. A nível gráfico podemos observar semelhanças o que supõe um aproximar do método de cálculo das perdas de pré-esforço.

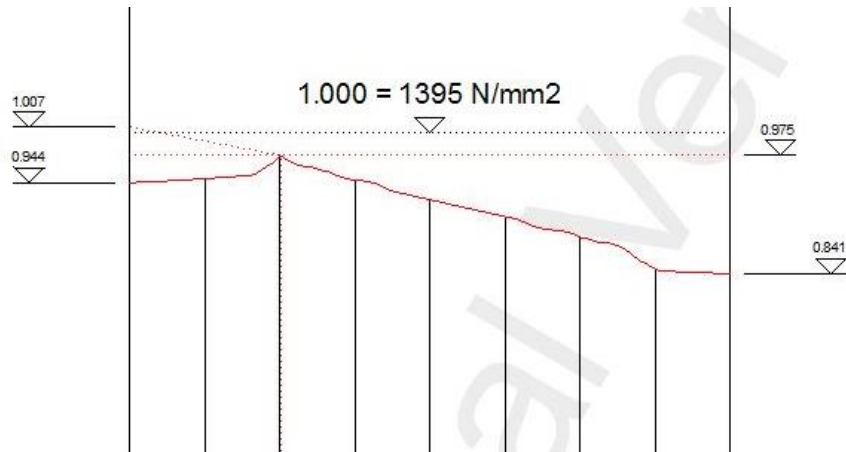


Figura 60 - Gráfico de perdas atrito da viga 4, SOFISTIK

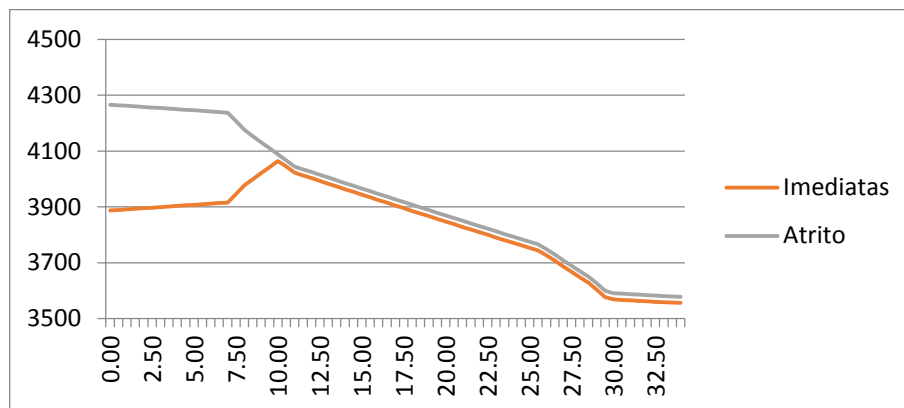


Figura 61 - Gráfico de perdas de pré-esforço viga 4, Excel

Na viga 5 podemos observar que os gráficos de perdas continuam semelhantes o que demonstra novamente que os dois processos de cálculo estão aproximados.

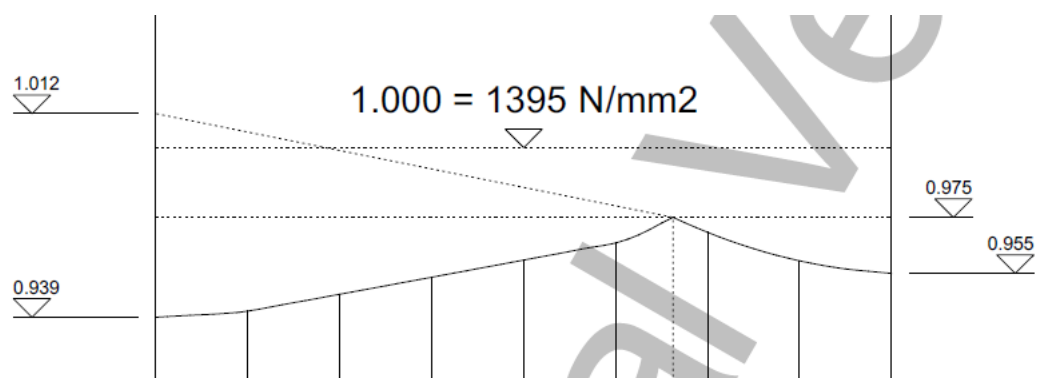


Figura 62 - Gráfico de perdas de pré-esforço da viga 5, SOFISTIK

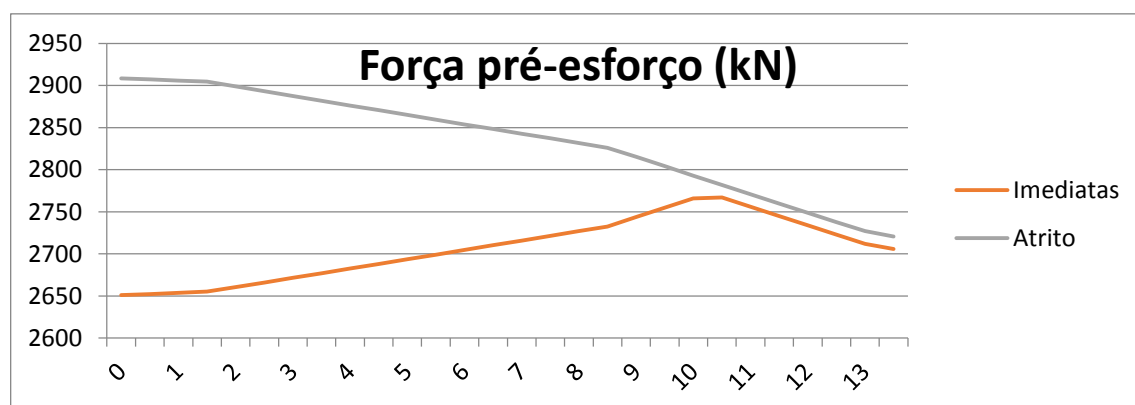


Figura 63 - Gráfico de perdas de pré-esforço, Excel

Tabela 6 - Perdas de pré-esforço da viga 5

Station	Beam	x(m)	N(kN)
0.00	10001	0.00	-2714.21
1.66	10001	1.66	-2721.44
1.66	10002	0.00	-2721.44
3.32	10002	1.66	-2745.69
3.32	10003	0.00	-2745.69
4.98	10003	1.66	-2768.41
4.98	10004	0.00	-2768.41
6.64	10004	1.66	-2789.49
6.64	10005	0.00	-2789.49
8.31	10005	1.66	-2808.57
8.31	10006	0.00	-2808.57
9.97	10006	1.66	-2813.59
11.63	10007	1.66	-2771.48
11.63	10008	0.00	-2771.48
13.29	10008	1.66	-2752.59

Tabela 7 - Perdas de pré-esforço viga 5, Excel

x (m)	P(após atrito) (kN)	P(após reentrada) (kN)	% Perdas
0.00	2908.6	2665.9	8.34
1.50	2904.4	2670.1	8.20
3.50	2881.8	2692.0	7.45
5.00	2865.0	2708.5	6.88
6.50	2848.2	2725.2	6.31
8.50	2826.1	2747.5	5.54
10.00	2792.9	2781.0	4.39
11.50	2759.8	2759.8	5.12
13.29	2720.7	2720.7	6.46

Podemos verificar que o programa comercial poderá ser uma opção de cálculo a ter em conta para obtenção de perdas, porém, como depende sempre da licença global do programa poderá não ser a solução mais económica para obtenção das perdas de pré-esforço, justificando-se assim a elaboração de uma folha de cálculo automático tornando-se mais simples e económico já que permite que o utilizador domine todas as variáveis e todos os processos internos de cálculo alterando a qualquer altura a folha ou

adicionando funcionalidades. Num ponto adiante serão abordadas possíveis evoluções da folha de cálculo para melhoria das funcionalidades da mesma, estas não foram realizadas devido escasso tempo.

5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA FOLHA DE CÁLCULO COM EXERCÍCIO ACADÉMICO

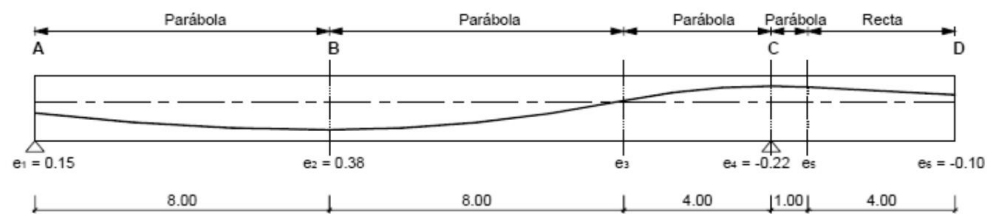
5.2.1 Apresentação do exercício académico

Neste ponto serão apresentadas as comparações dos resultados obtidos pela folha de cálculo e um exercício presente na sebenta de pré-esforço do Instituto Superior Técnico de Júlio Appleton e Carla Marchão.

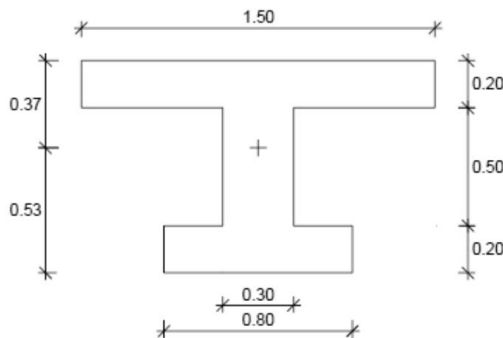
O objetivo desta comparação é demonstrar que a folha de cálculo possui a programação correta e garante resultados fiáveis, algo que na validação do software comercial poderia ser colocada em causa devido às ligeiras diferenças existentes entre os dois métodos. Assim, procedeu-se à execução desta comparação, isto porque a folha de cálculo teve como base as mesmas fórmulas para o cálculo dos diversos parâmetros garantindo deste modo que o cálculo por intermédio desta estaria correto.

O exercício considerado apresenta as características presentes na figura 64.

Considere a viga indicada na figura seguinte.



Secção Transversal da Viga:



Propriedades Geométricas da Secção:

$$A = 0.61 \text{ m}^2$$

$$I = 0.0524 \text{ m}^4$$

Materiais: C30/37

A400NR

A1600/1800 (baixa relaxação)

Figura 64 - Exercício Académico [3]

O primeiro ponto a ser executado foi a definição do número de tramos do cabo. Neste caso vamos ter 5 tramos em alçado, tal como o enunciado refere, e 1 horizontal. Nas figuras 65 e 66 podemos confirmar que o número de tramos introduzidos.

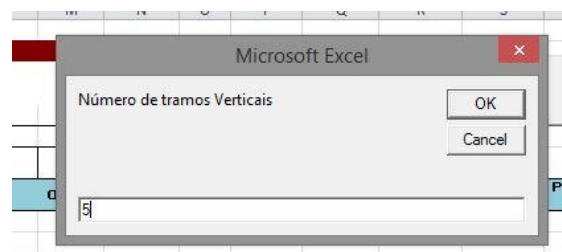


Figura 65 - Número de tramos em Alçado

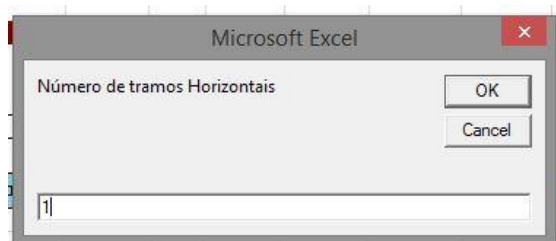
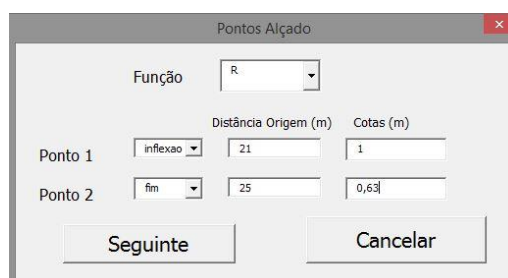


Figura 66 - Número de tramos em Planta

Após introdução do número de tramos procedeu-se à introdução dos dados do exercício, tal como podemos verificar nas imagens seguintes, de referir que no caso dos dados horizontais apenas é considerado 1 tramo do início ao fim do cabo. Nas imagens seguintes são apresentados os valores introduzidos para definição geométrica do cabo. De salientar que os pontos de inflexão foram inicialmente introduzidos como pontos de cota de 1 m, isto para demonstrar que a rotina calcula os pontos de inflexão correctamente para garantir a continuidade do cabo.



	Função	Distância Origem (m)	Cotas (m)
Ponto 1	inflexao	21	1
Ponto 2	fim	25	0,63

Figura 67 - Janela de introdução de dados do exercício académico

A introdução de dados referentes ao cabo está presente na figura 68, confirmando deste modo que todos os dados foram inseridos em conformidade com os dados presentes no enunciado do exercício, à exceção dos pontos de inflexão que são calculados pela rotina de cálculo em função dos dados introduzidos.

Figura 68 - Formulário de dados preenchido com os dados do exercício acadêmico

De seguida o programa passou para o processo iterativo de cálculo da distância até onde se dão as perdas por reentrada de cunhas. Neste caso apenas foi realizado uma iteração devido ao autor do exercício ter determinado a distância de 20 m, procedendo à introdução do valor na janela. Na imagem 69 podemos ver a distância inserida para cálculo das perdas por reentra de cunhas.

Iteração reentrada cunhas

Figura 69 - Introdução da distância para cálculo de perdas de pré-esforço por reentrada de cunhas

Neste caso o processo para cálculo das perdas escolhido foi o método simplificado, isto porque o autor do exercício determina que as perdas sejam calculadas com uma perda média por metro. Este processo permite validar também o método simplificado garantindo assim à folha que os processos de cálculo estão operacionais. Na imagem 70 podemos ver qual o método escolhido para efetuar o cálculo.

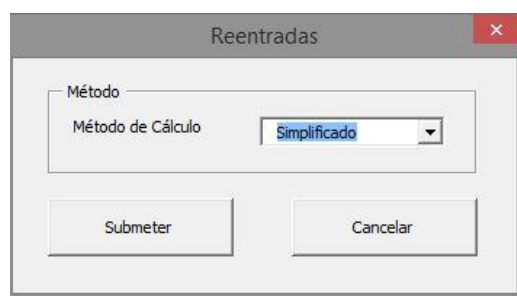


Figura 70 - Método utilizado para cálculo de perdas por reentrada de cunhas

Após a introdução dos dados, estes foram guardados pela rotina assim como as respetivas características geométricas calculadas. De realçar que neste ponto a rotina já calculou a cota dos pontos de inflexão garantindo a continuidade do cabo. Na imagem 71 podemos ver os dados de entrada para cálculo da geometria do cabo.

Origem	Final	Função	Y1 (m)	Y2 (m)	Pontos X1	Pontos X2
0	8	P+	0.38	0.15	inflexao	min
8	16	P+	0.15	0.55	min	inflexao
16	20	P-	0.55	0.75	inflexao	max
20	21	P-	0.75	0.7366667	max	inflexao
21	25	R	0.7366667	0.63	inflexao	fim

Figura 71 - Dados das funções que definem o cabo

Nas imagens 72 e 73 podemos ver os parâmetros das equações e características das funções, calculados após execução da rotina.

a/m	b	c
0.003594	-0.057499997	0.38
0.006250	-0.099999999	0.55
-0.012500	0.499999995	-4.24999995
-0.013333	0.533333355	-4.58333355
0.000000	-0.026666668	1.29666669

Figura 72 - Parâmetros das equações

Ângulo desvio	Controlo Y1	Controlo Y2	β	Raio (m)
0.0575	0.38	0.15000001	0.0575	139.1304413
0.1	0.15	0.55	0.1575	80.00000079
0.1	0.55	0.74999993	0.2575	-40.0000004
0.02667	0.7500003	0.73666695	0.284167	-37.49999851
0	0.7366667	0.63000006	0.284167	∞

Figura 73 - Características dos tramos de equação que definem o traçado do cabo

5.2.2 Resultados

De seguida são apresentados os dados do exercício exemplo e os dados obtidos com recurso à folha de cálculo.

Como podemos verificar pelos dados contidos nas seguintes tabelas confirma-se que a folha de cálculo está a calcular correctamente os valores das perdas e características geométricas do cabo.

Tabela 8 Valores perdas de atrito [3]

Secção	x [m]	β [rad]	P _{após atrito} [kN]	% perdas
1	0	0	3780.0	0
2	8	0.0575	3712.9	1.8
3	16	0.1575	3616.2	4.3
4	20	0.2575	3533.3	6.5
5	21	0.2842	3511.6	7.1
6	25	0.2842	3500.4	7.4

Tabela - 9 Valores de perdas de atrito obtidas com recurso à folha de cálculo

Distância	θ_{TOTAL} (rad)			Perdas Atrito (kN)	P(após atrito) (kN)	% Perdas
0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	3780.00	0.00
8.00	0.0575	0.0575	0.0000	67.06	3712.94	1.77
16.00	0.1575	0.1575	0.0000	163.80	3616.20	4.33
20.00	0.2575	0.2575	0.0000	246.73	3533.27	6.53
21.00	0.2842	0.2842	0.0000	268.33	3511.67	7.10
25.00	0.2842	0.2842	0.0000	279.55	3500.45	7.40

Na figura 74 podemos observar o cálculo presente na resolução do exercício académico e na figura 75 o mesmo valor calculado por intermédio da rotina.

$$x = 20.0\text{m} \Rightarrow p = \frac{3780 - 3533.3}{20} = 12.34 \text{ kN/m (admitindo que a perda por atrito é aproximadamente linear)}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{0.006 \times 195 \times 10^6 \times 20 \times 1.4 \times 10^{-4}}{12.34}} = 16.3 \text{ m}$$

Figura 74 - Método de cálculo da distância para perdas por reentrada de cunhas [3]

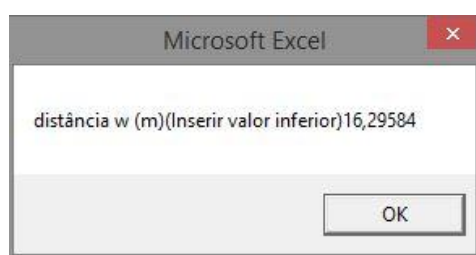


Figura 75 - Valor da distância por reentrada de cabos obtido pela folha de cálculo

Podemos verificar que perante os valores introduzidos na rotina para cálculo da distância até onde se dão as perdas por reentrada de cabos, o valor é igual, significando então que a rotina executa o programado e devolve os valores corretamente. De salientar que este processo envolve um mecanismo de procura do valor da força de pré-esforço nas tabelas de perdas por atrito.

Tabela - 10 Perdas de atrito e reentrada de cabos [3]

Secção	x [m]	P _{após atrito} [kN]	ΔP _{reentrada} [kN]	P _{após reentrada} [kN]	% perdas
1	0	3780.0	402.3	3377.7	10.6
2	8	3712.9	204.9	3508.0	7.2
3	16	3616.2	7.4	3608.8	4.5
4	20	3533.3	0	3533.3	6.5
5	21	3511.6	0	3511.6	7.1
6	25	3500.4	0	3500.4	7.4

Tabela 11 - Perdas por reentrada de cabos com recurso à folha de cálculo

x (m)	P(após atrito) (kN)	ΔP reentrada (kN)	P(após reentrada) (kN)	% Perdas
0.00	3780.0	402.1	3377.9	10.64
8.00	3712.9	204.7	3508.3	7.19
16.00	3616.2	7.3	3608.9	4.53
20.00	3533.3	0.0	3533.3	6.53
21.00	3511.7	0.0	3511.7	7.10
25.00	3500.4	0.0	3500.4	7.40

No cálculo do alongamento do cabo, devido à folha de cálculo possuir o acréscimo de alongamento medido devido à força do macaco hidráulico na distância de 1 m, este foi retirado da rotina para proceder ao cálculo exato do alongamento teórico do cabo. Podemos verificar que o alongamento teórico do cabo obtido pela rotina é igual ao do exercício resolvido. Nas imagens 76 e 77 podemos ver os valores do alongamento do cabo obtidos pelo exercício resolvido e pela rotina.

4. Cálculo do alongamento teórico dos cabos

$$\Delta L = \frac{1}{A_p E_p} \int_0^L P \, dx \cong \frac{1}{28 \times 10^4 \times 195 \times 10^6} \times \frac{3780 + 3500.4}{2} \times 25 = 0.167\text{m}$$

Figura 76 - Valor e fórmula de cálculo do alongamento do cabo

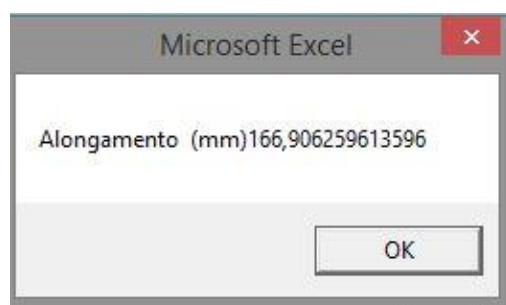


Figura 77 - Valor do alongamento do cabo obtido pela folha de cálculo

Com esta comparação toma-se como garantido que a rotina executa o cálculo das perdas e o processamento geométrico sem qualquer erro. Tornando-se assim numa ferramenta extremamente útil para um cálculo rápido e preciso das perdas de pré-esforço. De salientar que o conhecimento do funcionamento da rotina torna-se fundamental para uma execução do cálculo das perdas de pré-esforço sem qualquer erro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Hoje em dia a aplicação de pré-esforço vai muito além das obras de arte. Podemos encontrar edifícios públicos e privados que incorporam este sistema construtivo. Este facto demonstra que os benefícios que a utilização do pré-esforço traz para a construção são reconhecidos pelos *stakeholders*. Benefícios entre os quais se pode enumerar a economia de recursos, construções mais leves e maior rapidez de construção.

Durante o estágio desenvolvido ao abrigo do acordo entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a SOPSEC S.A., tive a oportunidade de entrar em contacto com o mundo profissional e obter conhecimentos práticos profundos sobre projetos de aplicação de pré-esforço.

O desenvolvimento da ferramenta de cálculo automático permitiu aprofundar a linguagem Visual Basic, sendo esta uma ferramenta extremamente útil para automatização de rotinas. Assim, durante o estágio foi possível constatar a importância de dominar e desenvolver ferramentas de cálculo automático e verificar a sua eficiência depois de desenvolvida.

O processo pelo qual foi evoluindo a rotina permitiu constatar o trabalho moroso que teria que ser desenvolvido para obter os resultados das perdas de pré-esforço. As consequências da não automatização de rotinas são, a baixa eficiência, pois possui muitos cálculos repetitivos que por intermédio da rotina passam a ser totalmente automatizados mediante as condições pré-definidas pelo utilizador e a possibilidade de erro de digitação devido ao trabalho repetitivo e com diversos passos a executar. Assim, com o desenvolvimento da folha de cálculo passou a ser possível efetuar vários estudos

de traçado de um modo rápido e eficiente sem ter dúvida da fiabilidade dos resultados obtidos.

Durante o estágio foi-me privilegiado acesso a documentação de projetos já realizados o que permitiu garantir que a ferramenta desenvolvida ia de encontro ao que a SOPSEC pretendia, esta condição foi fundamental devido ao objetivo de desenvolvimento de uma ferramenta que fosse prática e adequada ao modo de trabalho da equipa de projeto.

A experiência adquirida durante o estágio permitiu aprofundar conhecimentos adquiridos na disciplina de estruturas pré-esforçadas, em particular nos projetos de aplicação de pré-esforço, tema de grande interesse devido ao elevado grau de conhecimento necessário para o executar. De salientar que o estágio permitiu não só formular a folha de cálculo automático de perdas de pré-esforço mas também permitiu a participação no projeto de aplicação de pré-esforço da Cidade do Futebol, participação que permitiu ganhar conhecimento que de outra forma seria impossível apenas pela participação nas aulas de mestrado.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento da folha de cálculo foi possível notar as capacidades que poderiam ser integradas, porém devido ao reduzido tempo disponível, estas ficaram por fazer passando a integrar uma lista de futuros desenvolvimentos da folha. Assim, as principais funções que poderão ser integradas estão relacionadas principalmente com a comunicação com o ambiente exterior à folha de cálculo. Um dos desenvolvimentos futuros a ser realizado poderá ser a integração de uma função que origine um ficheiro de desenho automático para o cabo em planta e alçado, esta função permitiria uma maior eficiência pois o utilizador apenas precisaria de inserir o ficheiro no desenho já existente obtendo o desenho do cabo pretendido.

Outro ponto a ser desenvolvido seria a comunicação entre a folha de cálculo desenvolvida e o programa comercial Autodesk Structural Analysis, isto devido à limitação que o programa comercial possui em relação à introdução de esforços devidos

ao pré-esforço, assim com esta introdução automática dos esforços seria possível analisar o efeito de pré-esforço na peça e o seu efeito na estrutura. Este desenvolvimento sugerido não foi realizado devido à necessidade de estudar a fundo a linguagem de comunicação entre os dois programas algo que iria necessitar algum tempo para aprimorar a comunicação correta entre as duas plataformas. Porém fica a sugestão de desenvolvimento da comunicação entre os dois programas de modo a tornar mais realista a análise do programa automático comercial sem necessidade de recorrer a outros programas comerciais de valor muito mais elevado, criando-se assim uma solução mais barata e de adaptação imediata ao utilizador, isto devido à criação personalizada que seria feita pelo programador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] – APPLETON, Júlio – “Estruturas de Betão” : Volume 2, Lisboa, 1.ª edição, Edições Orion, Julho de 2013.

[2] – FIGUEIRAS, Joaquim – “DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO”, Junho de 1993.

[3] - MARCHÃO, Carla; APPLETON, Júlio. *Betão Armado e Pré-esforçado II- Folhas de apoio às Aulas- Módulo 1- Pré-esforço*, IST, 2004/2005.

[4] – MOREIRA, Falcão, “Apontamentos traçado cabos pré-esforço”.

[5]– SILVA, António, “Programação em VBA” Texto Introdutório- Versão 2,DEI-ISEP, Dezembro de 2009.

[6] – ETA-06/0022 – DYWIDAG Post-Tensioning System for 3 to 37 Strands (140 and 150 mm²), European Organization for Technical Approvals, January 2011.

[7] - Eurocode 2 – “Design of concrete structures” – Part 1-1 - “General rules and rules for buildings” CEN Brussels, 2010.

[8] – Model Code 2010- First complete Draft- Volume 1,Lausanne, International Federation for Structural Concrete (fib), 2010.

[9] – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP), Dec. 349-c/83 de 30/07/1983.

[10]– DYWIDAG-SYSTEMS INTERNATIONAL. [Em linha]. <https://www.dywidag-systems.com>, [Consultado em 7/03/2015]

[11]- SOPSEC –Sociedade de Prestação de Serviços de Engenharia Civil, S.A. [Em linha]. <http://www.SOPSEC.pt>, [Consultado em 1/10/2015]