

PONTES EM VIGA CAIXÃO EM BETÃO ARMADO PRÉ-ESFORÇADO COM VÃOS DE APROXIMADAMENTE 100M

RAQUEL VARELA DA ROCHA E SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor António Adão da Fonseca

FEVEREIRO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À Família, ao Zé e aos amigos,

“ Não faço uma ponte igual à outra porque cada obra é um momento de inovação e de busca de novas soluções mais racionais e económicas.”

Edgar Cardoso

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho nasceu da vontade em aprofundar os meus conhecimentos numa área, dentro do domínio das estruturas especificamente as obras de arte, que muito me cativa e suscita interesse. Este trabalho funcionou como que um fio condutor para um estudo e uma procura de novas informações relativas a este tipo de obras.

Para que fosse possível passar da vontade à realidade, contei com a ajuda de diversas pessoas e / ou entidades às quais não poderia deixar de agradecer uma vez que nada seria possível sem o apoio destas.

É com especial prazer que agradeço:

- Ao Orientador, Prof. Adão da Fonseca, pela disponibilidade para a orientação desta tese e pela colaboração e encorajamento durante a realização da mesma;
- À IPERFORMA pelo apoio, dedicação e incondicional disponibilidade que permitiu a realização deste projecto e também pela permissão para utilização do programa de cálculo Robot Structural Analysis;
- Ao Eng. Tiago Domingues pela partilha de experiências e conhecimentos e pelo contributo essencial à finalização deste trabalho;
- Aos colegas e amigos Frederico Fonseca, Sandro Alves e Tiago Lami pelas suas contribuições;
- Ao Tiago Tavares pela gentileza ao ter colaborado na tradução do resumo;
- À família que seguiu de perto esta experiência e motivou sempre que os momentos se afiguravam mais complicados e mesmo quando não os eram, pela companhia e incentivo;
- Aos amigos que sempre estiveram presentes e foram um apoio muito forte, pela amizade e compreensão.

A todos o meu muito obrigada, fundamentalmente pela força transmitida nos momentos mais difíceis. E se os houve...

RESUMO

O presente trabalho baseia-se numa análise comparativa sobre a construção de pontes em viga caixão em betão armado pré-esforçado com vãos de cerca de 100m segundo dois processos construtivos diferentes: avanços sucessivos e cimbra autolanzável.

Pretende-se avaliar as principais diferenças entre estes dois processos e que implicações têm no dimensionamento das secções, em fase construtiva e em fase de exploração.

Para tal é feita uma análise longitudinal do tabuleiro em que, para além da consideração do peso próprio da estrutura, das sobrecargas construtivas, das sobrecargas rodoviárias e restantes revestimentos, são estudados os efeitos da introdução do pré-esforço.

O trabalho consiste na optimização das soluções para cada um dos processos construtivos através de processos iterativos, reservando-se o final para uma reflexão comparativa dos resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Ponte, Avanços sucessivos, Cimbra autolanzável, Caixão, Pré-esforço orgânico (OPS).

ABSTRACT

This thesis is based on a comparative analysis of two different construction methods of girder box bridges with prestressed concrete with a main span of 100m: the progressive cantilever and the self-launching trusses.

The main objective is to evaluate the differences between these two construction methods and their influence on the dimensioning of the bridge both in the construction and exploration stage.

In order to do so, the deck was analysed longitudinally. Besides taking into account the self-weight of the structure and the constructive, traffic and finishes overloads, the effects of the introduction of the prestress were also studied.

The optimization of the solutions for each one of the constructive processes through an iterative method is the core of this thesis. The obtained results are then compared.

KEYWORDS: Bridge, Cantilever, Launching girder, girder box, Organic prestressing (OPS).

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	3
2. OS PROCESSOS CONSTRUTIVOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS	5
2.2.1. CONSTRUÇÃO SEGMENTAL POR AVANÇOS SUCESSIVOS	5
2.2.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	8
3. ACÇÕES E MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISE	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGA CONSTRUTIVA	13
3.2.1. AVANÇOS SUCESSIVOS	13
3.2.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	15
3.3. PRÉ-ESFORÇO	17
3.3.1. AVANÇOS SUCESSIVOS	17
3.3.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	19
4. ANÁLISE COMPARATIVA	25
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	25
4.2. AVANÇOS SUCESSIVOS	33
4.2.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS CONSTRUTIVAS	33
4.2.1.1. Soluções tipo iniciais – AS1, AS2 e AS3	33
4.2.1.2. Optimização da solução para os avanços sucessivos	38

4.2.2. SOBRECARGAS RODOVIÁRIAS E REVESTIMENTOS	44
4.2.3. PRÉ-ESFORÇO	46
4.3. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	54
4.3.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS CONSTRUTIVAS	54
4.3.1.1. Soluções tipo iniciais – C1, C2 e C3	55
4.3.1.2. Optimização da solução para o cimbra autolanzável.....	58
4.3.2. SOBRECARGAS RODOVIÁRIAS E REVESTIMENTOS	65
4.3.3. PRÉ-ESFORÇO	68
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS	71
 5. CONCLUSÕES	 75
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Ponte de Shibampo, China [1]	1
Fig. 2 – Ponte do Infante D. Henrique, Porto [2]	2
Fig. 3 – Campo de aplicação dos processos construtivos de grandes pontes em betão armado pré-esforçado	5
Fig. 4 – Construção por avanços sucessivos – tramos centrais do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar [5]	6
Fig. 5 – Carro móvel com vigas principais superiores	7
Fig. 6 – Pré-esforço superior a aplicar no tabuleiro na zona do pilar para a construção por avanços sucessivos (cabos rectos)	7
Fig. 7 – Construção com cimbra autolançável inferior – Viaduto de Vila Pouca de Aguiar [5]	8
Fig. 8 – Elementos constituintes de um cimbra autolançável (superior)	9
Fig. 9 – Cimbra superior - cortes	9
Fig. 10 – Cimbra inferior - corte	9
Fig. 11 – Cimbra autolançável com pré-esforço orgânico (OPS) - BERD	10
Fig.12 – Sequência do processo construtivo com cimbra autolançável inferior [6]	12
Fig. 13 – Estabilidade do tabuleiro em fase construtiva para os avanços sucessivos [3]	14
Fig. 14 – Variação das sobrecargas construtivas de acordo com a largura da secção transversal [3]	14
Fig. 15 – Acções permanentes consideradas em fase construtiva para os avanços sucessivos: peso próprio e sobrecarga construtiva	15
Fig. 16 – Esquema de faseamento construtivo com cimbra autolançável	15
Fig. 17 – Diagramas de momentos flectores na fase construtiva e a longo prazo para o cimbra autolançável	16
Fig. 18 – Factores para determinação dos efeitos de fluência [7]	17
Fig. 19 – Esquema de pré-esforço longitudinal	17
Fig. 20 – Localização e traçado dos cabos de consola e cabos de solidarização para a construção com cimbra autolançável [5]	18
Fig. 21 – Traçado parabólico - tipo dos cabos de pré-esforço de continuidade e sua localização na secção transversal para a construção com cimbra autolançável [5]	19
Fig. 22 – Determinação do ponto de inflexão entre dois troços parabólicos	20
Fig. 23 – Acções exercidas sobre o cabo (traçado parabólico)	20
Fig. 24 – Acções exercidas sobre o betão (traçado parabólico)	20
Fig. 25 – Decomposição das forças nas ancoragens	21
Fig. 26 – Parábola e seus elementos definidores	21

Fig. 27 – Método das cargas equivalentes Vs. Método dos coeficientes de influência [9]	23
Fig. 28 – Secção em viga caixão: características geométricas e variáveis	29
Fig. 29 – Perfil longitudinal adoptado	29
Fig. 30 – Soluções-tipo a estudar para ambos os processos construtivos	30
Fig. 31 – Identificação de secções	31
Fig. 32 – Secção transversal da solução AS1 / C1 para H = constante e e = constante (inércia constante)	31
Fig. 33 – Secções consideradas na solução AS1 / C1 para H = constante e e = constante	31
Fig. 34 – Secções transversais da solução AS2 / C2 para H = constante e e = variável	31
Fig. 35 – Secções consideradas na solução AS2 / C2 para H = constante e e = variável	32
Fig. 36 – Secções transversais da solução AS3 / C3 para H = variável e e = constante	32
Fig. 37 – Secções consideradas na solução AS3 / C3 para H = variável e e = constante	33
Fig. 38 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio para as 3 soluções-tipo iniciais (AS1, AS2 e AS3)	34
Fig. 39 – Esquema de carregamento considerado para o carro de avanços em faseamento construtivo	36
Fig. 40 – Diagrama de momentos flectores devido à acção do peso próprio e sobrecargas construtivas aquando da betonagem da aduela 5	36
Fig. 41 – Secções transversais da solução AS3a	38
Fig. 42 – Secções consideradas na solução AS3a	39
Fig. 43 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3a	39
Fig. 44 – Secções transversais da solução AS3b	40
Fig. 45 – Secções consideradas na solução AS3b	41
Fig. 46 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3b	41
Fig. 47 – Secções transversais da solução AS3c	42
Fig. 48 – Secções consideradas na solução AS3c	42
Fig. 49 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3c	43
Fig. 50 – Modelo de cálculo considerado para AS3a, AS3b e AS3c	44
Fig. 51 – Acções consideradas para AS3a, AS3b e AS3c – a. Sobrecarga e carga de faca b. Revestimentos	44
Fig. 52 – Diagramas de momentos flectores devido à sobrecarga, carga de faca e revestimentos a. AS3a b. AS3b c. AS3c	45

Fig. 53 – Esquema de carregamento a aplicar ao tabuleiro para determinação dos esforços devido aos efeitos do pré-esforço inferior (AS3b)	52
Fig. 54 – Diagrama de esforço axial resultante da aplicação do pré-esforço inferior (AS3b)	52
Fig. 55 – Diagrama de momentos flectores resultante da aplicação do pré-esforço inferior (AS3b) ...	52
Fig. 56 – Pré-esforço superior e inferior a aplicar ao tabuleiro (AS3b) – esquematização de um vão tipo de 100m.....	54
Fig. 57 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para as 3 soluções-tipo iniciais (C1, C2 e C3)	55
Fig. 58 – Esquema de cálculo em faseamento construtivo devido à betonagem do tramo seguinte do tabuleiro.....	57
Fig. 59 – Diagramas de momentos flectores devido ao peso próprio da estrutura e construção do tramo seguinte do tabuleiro para cada fase de construção	57
Fig. 60 – Secções transversais da solução C2a	58
Fig. 61 – Secções consideradas na solução C2a	58
Fig. 62 – Diagrama de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C2a.....	59
Fig. 63 – Secções transversais da solução C2b	60
Fig. 64 – Secções transversais da solução C2c	61
Fig. 65 – Secções transversais da solução C2d	62
Fig. 66 – Secções transversais da solução C2e	62
Fig. 67 – Secções transversais da solução C2f	63
Fig. 68 – Diagramas de momentos flectores para as sobrecargas rodoviárias e revestimentos a. C2c b. C2d c. C2e d. C2f	67
Fig. 69 – Traçado dos cabos de pré-esforço adoptado e posição do centro de gravidade das secções	69
Fig. 70 – Diagrama de momentos flectores (método dos coeficientes de influência) para a solução C2f para $P_{\infty} = 50000$ kN e $P_{\infty} = 70000$ kN	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro síntese das verificações de segurança a realizar em fase construtiva e de exploração	29
Tabela 2 – Propriedades das secções para H = constante e e = variável (AS2 / C2).....	32
Tabela 3 – Propriedades das secções para H = variável e e = constante (AS3 / C3).....	33
Tabela 4 – Comparação das tensões devidas ao peso próprio da estrutura para as 3 soluções-tipo iniciais (AS1 a AS3)	34
Tabela 5 – Momentos flectores devido à acção do peso próprio, sobrecargas construtivas e carro móvel e capacidade resistente do betão em fase construtiva, para j dias	37
Tabela 6 – Propriedades das secções para H = variável e e = variável para AS3a.....	38
Tabela 7 – Comparação das tensões para a solução AS3a, na secção junto ao apoio	39
Tabela 8 – Propriedades das secções para H = variável e e = variável para AS3b.....	40
Tabela 9 – Comparação das tensões para a solução AS3b, na secção junto ao apoio	41
Tabela 10 – Propriedades das secções para H = variável e e = variável para AS3c.....	42
Tabela 11 – Comparação das tensões para a solução AS3c, na secção junto ao apoio	43
Tabela 12 – Evolução dos valores das compressões com a variação de H e e para as soluções estudadas para os avanços sucessivos (AS3 a AS3c).....	43
Tabela 13 – Comparação das tensões para os 3 casos em estudo após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias e dos restantes revestimentos.....	46
Tabela 14 – Propriedades geométricas do tabuleiro e esforços devido à aplicação do pré-esforço superior (AS3b)	48
Tabela 15 – Tensões para a solução AS3b após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço superior	49
Tabela 16 – Propriedades geométricas do tabuleiro e esforços devido à aplicação do pré-esforço superior e inferior (AS3b)	51
Tabela 17 – Tensões para a solução AS3b após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço superior e inferior	53
Tabela 18 – Comparação das tensões para as 3 soluções-tipo iniciais para a acção isolada do peso próprio da estrutura (C1 a C3)	55
Tabela 19 – Comparação das tensões em fase construtiva considerando a acção do peso próprio do tabuleiro e as sobrecargas construtivas.....	58
Tabela 20 – Comparação das tensões para a solução C2a, na secção junto ao apoio e a meio vão .	59
Tabela 21 – Comparação das tensões para solução C2b, na secção junto ao apoio e a meio vão....	60
Tabela 22 – Comparação das tensões para a solução C2c, na secção junto ao apoio e a meio vão .	61
Tabela 23 – Comparação das tensões para a solução C2d, na secção junto ao apoio e a meio vão .	62
Tabela 24 – Comparação das tensões para a solução C2e, na secção junto ao apoio e a meio vão .	63

Tabela 25 – Comparação das tensões para a solução C2f, na secção junto ao apoio e a meio vão ..	63
Tabela 26 – Evolução dos valores das compressões com a variação de H e e para as soluções estudadas para o cimbri autolanzável (C2 a C2f)	64
Tabela 27 – Comparação das tensões para os 4 casos em estudo após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias e revestimentos.....	67
Tabela 28 – Propriedades das secções em cada tramo para a solução em estudo C2f.....	69
Tabela 29 – Tensões para a solução C2f após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço.....	71
Tabela 30 – Comparação das tensões para a acção isolada das sobrecargas rodoviárias e revestimentos para as soluções AS3b e C2f.....	72
Tabela 31 – Comparação das tensões após consideração do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço para as soluções AS3b e C2f.....	73
Tabela 32 – Comparação das quantidades de betão armado e aço pré-esforçado para as soluções AS3b e C2f para cada tramo de tabuleiro de 100 m	74

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área total da secção de betão [m^2]

E – módulo de elasticidade [GPa]

e – espessura do banzo inferior da viga caixão [m]

e_{inf} – excentricidade dos cabos de pré-esforço abaixo do eixo de gravidade das secções [m]

e_{sup} – excentricidade dos cabos de pré-esforço acima do eixo de gravidade das secções [m]

$e(x)$ – excentricidade do traçado do pré-esforço em qualquer secção de abcissa x ao longo do elemento [m]

f_{cd} – valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]

f_{ck} – valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]

$f_{ck,j}$ – valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos j dias de idade [MPa]

$f_{cm}(t)$ – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão aos j dias de idade [MPa]

f_{ctk} – valor característico da tensão de rotura do betão à tracção simples [MPa]

H – altura total da viga caixão [m]

I_y – momento de inércia da secção de betão em relação ao eixo horizontal [m^4]

$M_P(x)$ – momento flector total devido à acção do pré-esforço em qualquer secção de abcissa x ao longo do elemento [KN.m]

$\overline{M_P}(x)$ – momento flector total devido à acção do pré-esforço em qualquer secção de abcissa x ao longo do elemento [KN.m]

$\eta \overline{M_{P,i}}(x)$ – momento flector total devido à acção do pré-esforço em qualquer secção de abcissa x ao longo do elemento [KN.m]

$P(x)$ – valor do pré-esforço em qualquer secção de abcissa x ao longo do elemento [KN]

P'_0 – valor do pré-esforço inicial a aplicar na extremidade activa do cabo [KN]

P_∞ – valor do pré-esforço útil após consideração de perdas instantâneas e diferidas [KN]

t – tempo decorrido [dias]

y_{inf} – distância entre o centro de gravidade da secção à fibra inferior [m]

y_{sup} – distância entre o centro de gravidade da secção à fibra superior [m]

γ_c – coeficiente parcial de segurança relativo às propriedades do betão [1,5]

$\beta_{cc}(t)$ – coeficiente de endurecimento do betão para uma idade igual a t dias

ϕ – coeficiente de fluência a tempo infinito

ρ – factor de relaxação

σ^- – valor da tensão de compressão [MPa]

σ^+ – valor da tensão de tracção [MPa]

AS – Avanços Sucessivos

C – Cimbra

Inf – inferior

OPS – Pré-esforço orgânico (Organic Prestressed Concrete)

pp – peso próprio

sup – superior

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Deve-se a Hernembique, Maillart e Freyssinet a grande contribuição para o desenvolvimento das pontes de betão armado. Freyssinet notabilizou-se por ser o pioneiro na introdução do pré-esforço nas pontes de betão armado em 1928. A utilização do betão armado pré-esforçado para vencer vãos cada vez maiores data, portanto, de meados do século XX. É com a técnica construtiva dos avanços sucessivos, já utilizada nas pontes metálicas, que a construção de pontes em betão armado pré-esforçado conhece o seu grande desenvolvimento. A primeira ponte de betão armado pré-esforçado construída por avanços sucessivos foi executada na Alemanha há quase meio século.

A utilização deste tipo de pontes tem sido cada vez mais corrente, incluindo em Portugal, onde Edgar Cardoso foi um dos seus grandes impulsionadores. Os maiores vãos de obras de arte de betão armado pré-esforçado foram realizados por avanços sucessivos sendo o recorde mundial o vão central da ponte de Shibampo (figura 1), China, com 330 m e o recorde nacional o vão central da ponte do Infante D. Henrique (figura 2), no Porto, com 280 m apesar de esta tirar partido do arco para o seu funcionamento estrutural.



Fig. 1 – Ponte de Shibampo, China [1]

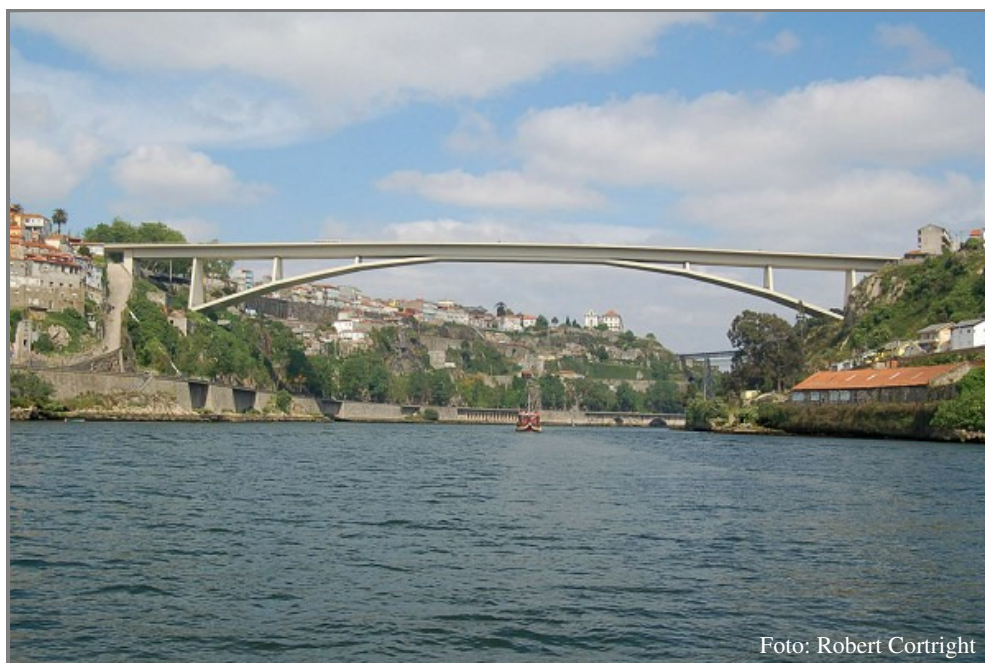


Fig. 2 – Ponte do Infante D. Henrique, Porto [2]

Das obras no domínio da engenharia de estruturas, as de construção de pontes e viadutos correspondem, provavelmente, àquelas em que o processo construtivo mais condiciona a concepção estrutural. Com efeito, é necessário considerar o método preconizado para a construção e prever o modo como serão executadas tanto a infra-estrutura como a super-estrutura desde as primeiras fases do projecto.

Actualmente, dado o carácter evolutivo dos processos construtivos e uma procura de economia e fiabilidade estrutural, a escolha do processo construtivo é de grande importância e condiciona a solução a adoptar. O estudo de estruturas especiais, como o caso das pontes, exige a concepção de modelos eficazes e análises fiáveis surgindo a necessidade de recorrer a programas de cálculo cada vez mais sofisticados.

O dimensionamento de pontes em betão armado pré-esforçado implica a consideração do faseamento construtivo e do comportamento visco-elasto-plástico dos materiais utilizados. A fluência, retracção e maturação do betão, a relaxação do aço de pré-esforço, as alterações do esquema estrutural com o faseamento construtivo, as alterações de geometria, são efeitos que provocam redistribuições e deslocamentos que requerem um estudo cuidadoso apesar de muitas vezes serem difíceis de contabilizar com as ferramentas convencionais.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Para a construção de pontes em betão armado pré-esforçado com vãos de cerca de 100m o método dos avanços sucessivos é o mais frequentemente utilizado. A opção pelo estudo de um vão de 100m prendeu-se com o objectivo de levar o estudo a um vão limite para o caso da construção com recurso ao cimbra autolancável. Este estudo baseia-se num tabuleiro com secção transversal em viga caixão de betão armado, geometricamente definida e que apresenta apenas duas variáveis: altura total da viga (**H**) e espessura do banzo inferior do caixão (**e**).

Deste modo, pretende-se no presente trabalho analisar e comparar a influência do processo construtivo no dimensionamento das secções do tabuleiro e o pré-esforço a aplicar a uma ponte de betão armado pré-esforçado com este tipo de secção transversal e vão central de 100m. O estudo tem por base o princípio da sobreposição dos efeitos em que se analisa a aplicação faseada das acções considerando em primeiro lugar o efeito do peso próprio e das sobrecargas construtivas, em segundo o efeito das sobrecargas rodoviárias e por último do pré-esforço. No final faz-se uma análise comparativa com base nos resultados obtidos para um e outro processo construtivo.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Neste trabalho é possível identificar quatro etapas distintas, a saber:

- Estudo de dois dos métodos construtivos de pontes que se aplicam ao caso em estudo e de que forma influenciam o dimensionamento deste tipo de pontes;
- Estudo dos carregamentos em fase construtiva, das características dos materiais (betão armado e aço pré-esforçado) e da variação da geometria da secção transversal, de modo a compreender os mecanismos que influenciam o seu comportamento;
- Desenvolvimento de modelos de análise de forma a ter em conta as características mecânicas e físicas da estrutura;
- Análise dos modelos desenvolvidos de modo a perceber a influência de alguns parâmetros envolvidos.

Para além da introdução exposta no presente capítulo, no capítulo 2 descrevem-se sumariamente os processos construtivos considerados. Apresenta-se em primeiro lugar os avanços sucessivos e depois o método do cimbra autolancável. Faz-se, também, uma descrição dos materiais utilizados e de que forma estes podem influenciar o dimensionamento do tabuleiro.

No terceiro capítulo faz-se referência às acções consideradas (peso próprio do tabuleiro, sobrecargas construtivas, sobrecargas rodoviárias e pré-esforço) e o modo como são tidas em conta para cada um dos processos construtivos. É feita uma abordagem a métodos simplificados de análise, nomeadamente para o caso específico do cálculo do pré-esforço.

No quarto capítulo, correspondente ao núcleo do trabalho, procede-se à apresentação dos resultados obtidos de forma a ser possível fazer uma análise comparativa dos resultados (esforços e tensões) face ao processo construtivo utilizado e geometria da secção, tendo em conta a possível variação longitudinal das características da secção transversal do tabuleiro. São apresentadas as acções consideradas, como são o caso do peso próprio do tabuleiro, sobrecarga e carga de fca, pré-esforço, e explica-se o desenvolvimento de todo o trabalho. É nesta parte que se apresentam os resultados que permitem retirar algumas conclusões no capítulo seguinte.

No 5º capítulo, reservado às conclusões, tecem-se considerações finais e sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros.

Nos anexos, que se encontram no final do presente trabalho, constam todos os cálculos / estudos efectuados durante a realização do mesmo que por uma questão de simplificação de análise não foram introduzidos no Capítulo 4. O Anexo A contém informação adicional relativa à consideração do faseamento construtivo para o caso do cimbra autolancável. No Anexo B disponibiliza-se informação relacionada com a determinação do pré-esforço através do método dos coeficientes de influência, também aquando da utilização do cimbra autolancável.

2

OS PROCESSOS CONSTRUTIVOS

2.1. INTRODUÇÃO

Actualmente existe um variado conjunto de processos construtivos para a construção da superestrutura de pontes, no entanto, aqueles que se descrevem contam-se entre os mais comumente utilizados, especialmente em Portugal e para o caso em estudo.

Como se pode observar na figura 3 [3], o método dos avanços sucessivos e o método do cimbre autolanzável com OPS, são os que melhor se adaptam aos 100m de vão. O sistema OPS, pré-esforço orgânico, designa-se assim por ser conceptualmente baseado numa estrutura orgânica – o músculo, e ser uma forma de pré-esforço ajustável com características adaptativas. Este sistema confere aos cimbres um significativo aumento de capacidade de carga, reduzindo simultaneamente as flechas de serviço. A consideração do OPS justifica-se apenas pelo próprio comportamento da viga principal do cimbri utilizado neste processo construtivo, que não suportaria os 100m sem a consideração do pré-esforço orgânico. [4]

Os dois métodos descritos aplicam-se quer a tabuleiros betonados “in situ” quer a pré-fabricados, contudo, no âmbito deste trabalho, será feita referência apenas aos primeiros.

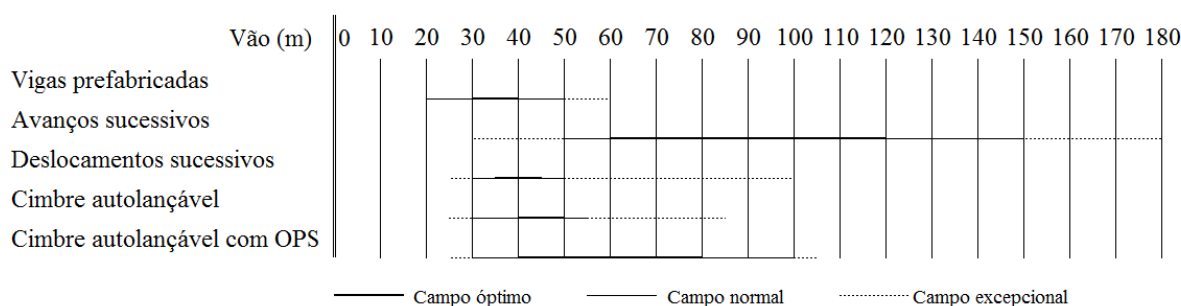


Fig. 3 – Campo de aplicação dos processos construtivos de grandes pontes em betão armado pré-esforçado

2.2. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS

2.2.1. CONSTRUÇÃO SEGMENTAL POR AVANÇOS SUCESSIVOS

O conceito base deste processo construtivo é a produção de segmentos de tabuleiros – designados por aduelas – com comprimentos que podem variar normalmente entre 3,0 e 6,0m, que vão sendo betonadas dos apoios até ao vão, sendo pré-esforçadas à medida que são executadas. O peso próprio de cada

aduela, assim como do equipamento necessário à sua construção, é suportado pelas partes da estrutura já betonadas e pré-esforçadas.

Existem diversas modalidades para a aplicação deste método, como foi demonstrado ao longo dos anos à medida que o processo se apurava:

- Construção simétrica, para um e outro lado de um pilar;
- Construção assimétrica a partir de um tramo já construído;
- Construção assimétrica a partir de um encontro;
- Construção assimétrica a partir de um pilar ou de um encontro mas recorrendo a outros métodos.

No entanto, a construção simétrica a partir de um pilar constitui, actualmente, a modalidade mais usual, recorrendo-se em caso de necessidade a outros métodos construtivos para assegurar a continuidade com outros tramos ou encontros. Na figura 4 pode-se ver uma fase de construção do viaduto de Vila Pouca de Aguiar segundo este processo construtivo.



Fig. 4 – Construção por avanços sucessivos – tramos centrais do Viaduto de Vila Pouca de Aguiar [5]

Em cada fase os troços são betonados com a ajuda de um carro de avanço (ver figura 5) – estrutura metálica que se apoia nos troços de tabuleiro já executados e que permite betonar, na posição correcta, os novos segmentos. Este processo dispensa qualquer tipo de apoio adicional e temporário ao solo. À medida que se vai construindo o tabuleiro, este constitui duas consolas equilibradas sobre o pilar, cujos vãos vão sucessivamente aumentando. Para balançar os momentos negativos da consola que se verificam nos apoios e evitar a fissuração da fibra superior das secções transversais recorre-se ao pré-esforço mediante a utilização de cabos que se prolongam progressivamente até ao final de cada troço recém-betonado. A conjugação destes dois aspectos, um sistema estático de consola e uma disposição que permite tirar grande partido do pré-esforço (o tabuleiro não necessita de pré-esforço nas fibras inferiores até à ocorrência dos fechos, ou seja, quando se restabelece a continuidade da estrutura com

outra consola, por exemplo) faz com que este seja um método adequado para vencer grandes vãos dispensando, em geral, qualquer tipo de apoio ao solo.

Da necessidade de vencer grandes vãos resultam consolas de grande comprimento que provocam momentos flectores elevados na secção na zona do apoio, implicando a adopção de secções com grande inércia junto aos apoios. As soluções óptimas, de inércia variável, resultam assim de uma maior altura nas zonas dos apoios e menor altura a meio vão.

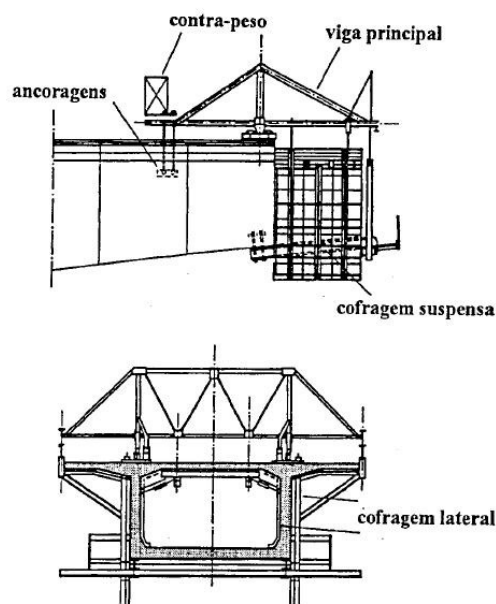


Fig. 5 – Carro móvel com vigas principais superiores

Embora já tenha sido aplicado em tabuleiros com secção em laje vigada, as secções em caixão uni ou multicelular são efectivamente as mais adequadas graças ao banzo de compressão (inferior) que permite absorver mais eficientemente os enormes momentos negativos que derivam da fase construtiva.

Se por um lado este método permite vencer grandes vãos exclusivamente a partir dos pilares, por outro lado, implica grandes quantidades de aço de pré-esforço e de betão pois, embora de forma eficiente, o aço é extensivamente utilizado neste processo visto que a construção de cada aduela requer um conjunto de cabos de pré-esforço. Estes localizam-se essencialmente junto aos apoios na zona onde os esforços são máximos, conforme se pode observar na figura 6.

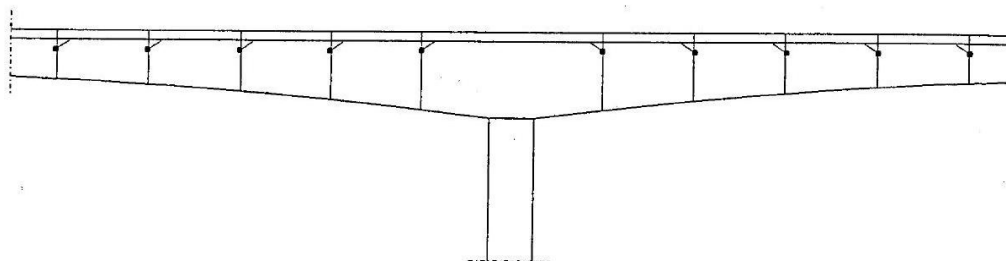


Fig. 6 – Pré-esforço superior a aplicar no tabuleiro na zona do pilar para a construção por avanços sucessivos (cabos rectos)

Disto pode resultar, como muitas vezes referido em bibliografia da especialidade, que a construção por avanços sucessivos esteja associada, muitas vezes, a um custo superior face a outros processos construtivos, nomeadamente o cimbra autolançável. Contudo torna-se compensadora nos casos em que existem condicionamentos no que respeita ao vão a vencer, impedimentos de ocupação do terreno ou imposições de gabarit.

Como se viu, este método construtivo caracteriza-se por uma sucessão de ciclos repetitivos. Depois de construídos os pilares há que construir as primeiras aduelas que implicam uma construção diferente das restantes. Estas podem recorrer a escoramento ao solo ou, no caso de pilares altos, apoio mediante uma estrutura metálica apoiada directamente nos pilares. Seguidamente procede-se à montagem dos equipamentos móveis nas aduelas sobre o pilar e pode ser iniciado o ciclo de construção das restantes:

- Posicionamento correcto das cofragens;
- colocação das armaduras passivas e bainhas de pré-esforço;
- betonagem da aduela, betonagem do banzo inferior seguida do posicionamento da cofragem interior, betonagem das almas e betonagem do banzo superior;
- introdução dos cabos de pré-esforço nas bainhas e seu tensionamento;
- deslocamento do equipamento para a aduela seguinte.

2.2.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

A construção de pontes e viadutos com cimbra autolançável é, talvez, o processo mais difundido e a que mais vezes se recorre na construção de pontes e viadutos. Consiste na utilização de uma estrutura metálica móvel – o cimbra – que inclui cofragem e que, uma vez montado, permite otimizar o ciclo cofragem - betonagem - descofragem de forma a possibilitar a construção de tramos em ciclos com durações a partir de cerca de uma semana. Na figura 7 pode-se ver uma fase de construção do viaduto de Vila Pouca de Aguiar segundo este processo.



Fig. 7 – Construção com cimbra autolançável inferior – Viaduto de Vila Pouca de Aguiar [5]

A estrutura é constituída por vigas longitudinais e inclui dispositivos para cofragem e descofragem do tabuleiro (abertura e/ou fecho do cimbra) e avanço, apoiando-se geralmente nos pilares e nos troços já betonados, até à posição de betonagem do tramo seguinte. Uma vez atingida, voltam a fechar-se estan-

do prontos a receber armaduras e a realizar a betonagem. O posicionamento e elementos constituintes do cimbra estão representados na figura seguinte.

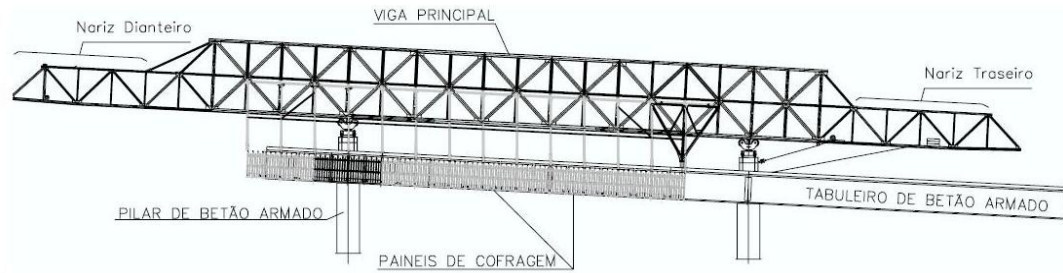


Fig. 8 – Elementos constituintes de um cimbra autolançável (superior)

Os cimbres podem ser de diferentes tipos no que respeita à posição que ocupam relativamente ao tabuleiro da ponte: cimbra superior (figura 9) e cimbra inferior (figura 10). A opção entre estes dois tipos de cimbra depende de diversos factores mas, de uma forma geral, o que influencia a opção por um ou outro tipo é a necessidade ou não de altura livre acima do tabuleiro, facilidade de fixação do cimbra aos pilares e o vão a vencer.

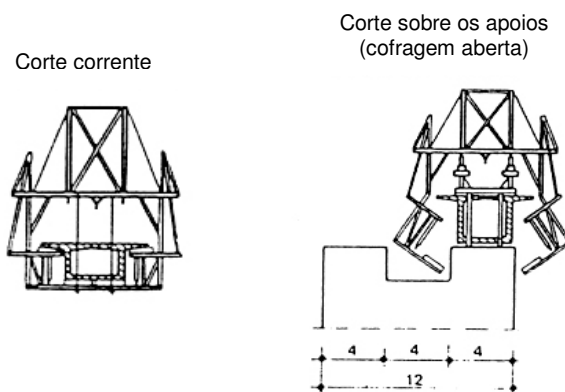


Fig. 9 – Cimbra superior - cortes

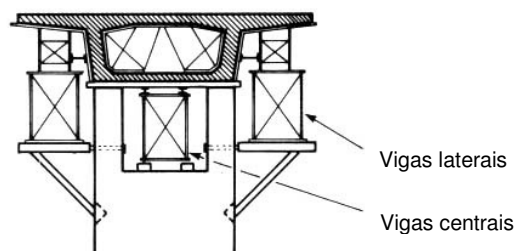


Fig. 10 – Cimbra inferior - corte

Uma das grandes vantagens deste método é a rapidez com que se podem executar os sucessivos tramos. Depois de montado o cimbra, o processo de construção consiste na colocação de armaduras, betonagem, descofragem e, por fim, avanço do cimbra. Após sucessivas iterações este ciclo torna-se muito eficiente e célere. Por outro lado, o recurso ao cimbra minimiza a intervenção a nível do solo,

restringindo-se às zonas dos pilares onde pode ser necessário montar estruturas adicionais para apoiar o cimbra nos pilares.

Este método possibilita a construção de tramos entre 20,0 a 60,0 m. No entanto, hoje em dia, graças aos estudos desenvolvidos pelo Prof. Pedro Pacheco na sua Tese de Doutoramento na FEUP, sob orientação do Prof. António Adão da Fonseca, e estudos desenvolvidos pela empresa BERD podem-se atingir vãos significativamente maiores com o recurso ao sistema OPS (pré-esforço orgânico). Este sistema confere aos cimbres um significativo aumento da capacidade de carga, reduzindo simultaneamente as flechas de serviço permitindo assim, quando aplicados aos cimbres, a sua aplicação a vãos maiores [1]. A solução de um cimbra autolançável com recurso ao pré-esforço orgânico para vãos de 80 m encontra-se actualmente viabilizada tendo sido exaustivamente projectado para estes vãos pela BERD. Na figura 11 está esquematizado um cimbra com OPS.

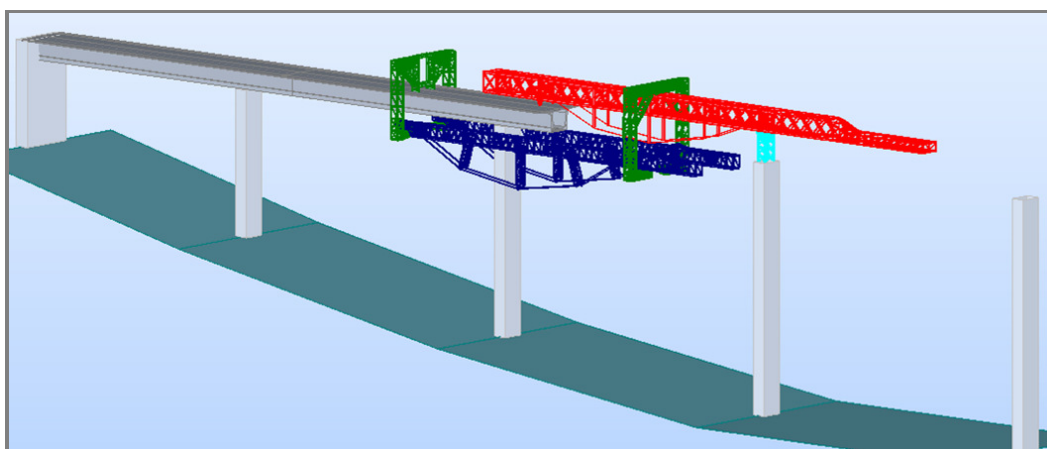


Fig. 11 – Cimbra autolançável com pré-esforço orgânico (OPS) - BERD

A utilização do cimbra é tanto mais eficaz quanto maior o número de tramos a construir, desde que idênticos. Isto porque o processo de montagem e desmontagem do próprio cimbra sobre os pilares é mais demorado do que num cimbra ao solo e, consequentemente, a rentabilização destes equipamentos é feita com os ganhos em tempo de execução do tabuleiro propriamente dito. Por outro lado, os cimbres autolançáveis oferecem a possibilidade de serem reutilizados noutras obras, muito embora a adaptação do sistema implique, por vezes, custos elevados.

Este processo possui a vantagem de se evitar o processo moroso de desmontagem de um sistema de um tramo e montagem no tramo seguinte (como acontece nalguns métodos, por exemplo, cimbra ao solo) bastando fazer avançar o cimbra para o próximo tramo funcionando em consola até atingir o próximo apoio. Adicionalmente, durante a fase de betonagem, a estrutura do cimbra apoia, em geral, no tabuleiro junto à extremidade da consola do tramo anterior, o que o beneficia em termos de deformações e esforços, visto que contraria a acção do seu peso próprio, exercendo a acção de um contrapeso.

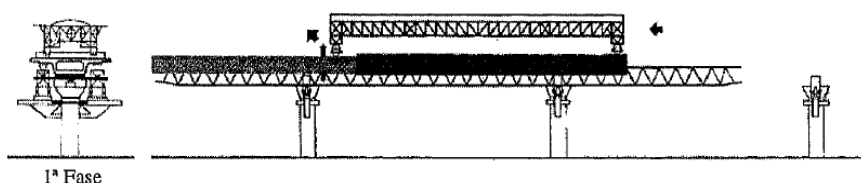
Adopta-se, geralmente, vãos extremos com cerca de 80% do vão dos tramos centrais.

A metodologia de construção é a apresentada em seguida e ilustrada na figura 12:

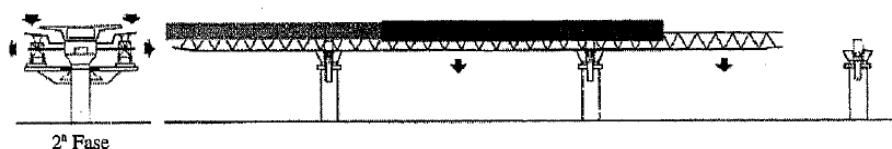
- i) Inicialmente, lança-se o cimbra metálico para betonagem do 1º tramo. Aquele apoia-se no encontro, a partir do qual é lançado, e no primeiro pilar. O cimbra, superior ou inferior, permite a construção do 1º tramo e tem de ter um comprimento que permita executar, de

cada vez, um troço com um comprimento L , sendo L o comprimento do vão central. Se o 1º tramo apresentar um vão de $0,8 \times L$ m significa que, nesta 1ª fase, se constrói o 1º vão e $L/5$ m do vão seguinte que funcionará em consola. É vantajosa a utilização de secções transversais com altura constante ao longo de toda a estrutura uma vez que permite a utilização da mesma cofragem em todos os tramos, o que torna o processo mais rápido e económico.

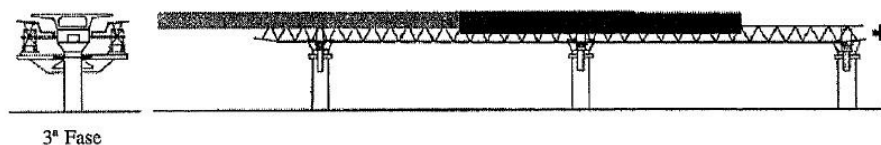
- ii) Em seguida é efectuada a betonagem do tabuleiro em toda a sua largura por bombagem do betão. Esta inicia-se no pilar e avança simultaneamente para os dois lados deste até atingir $L/5$ m. Depois procede-se à betonagem do restante do 1º tramo até ao encontro.
- iii) Antes do processo de betonagem foram deixadas as bainhas com os cabos de pré-esforço que serão tensionados, a partir da extremidade em consola, logo que o betão ganhe presa conveniente. O passo seguinte é a descofragem e avanço do cimbra para o próximo tramo. Este ficará apoiado na consola com $L/5$ m anteriormente betonada e no pilar seguinte. O processo de betonagem e tensionamento dos cabos de pré-esforço será em tudo semelhante ao efectuado para o 1º tramo.
- iv) Os restantes vãos serão construídos adoptando o mesmo método de avanço do cimbra e de betonagem dos tramos já executados, até ser atingido o outro encontro.



1ª Fase - Aplicação do pré-esforço e retirada da estrutura de transporte das armaduras



2ª Fase - Abertura das cofragens



3ª Fase - Avanço do cimbra

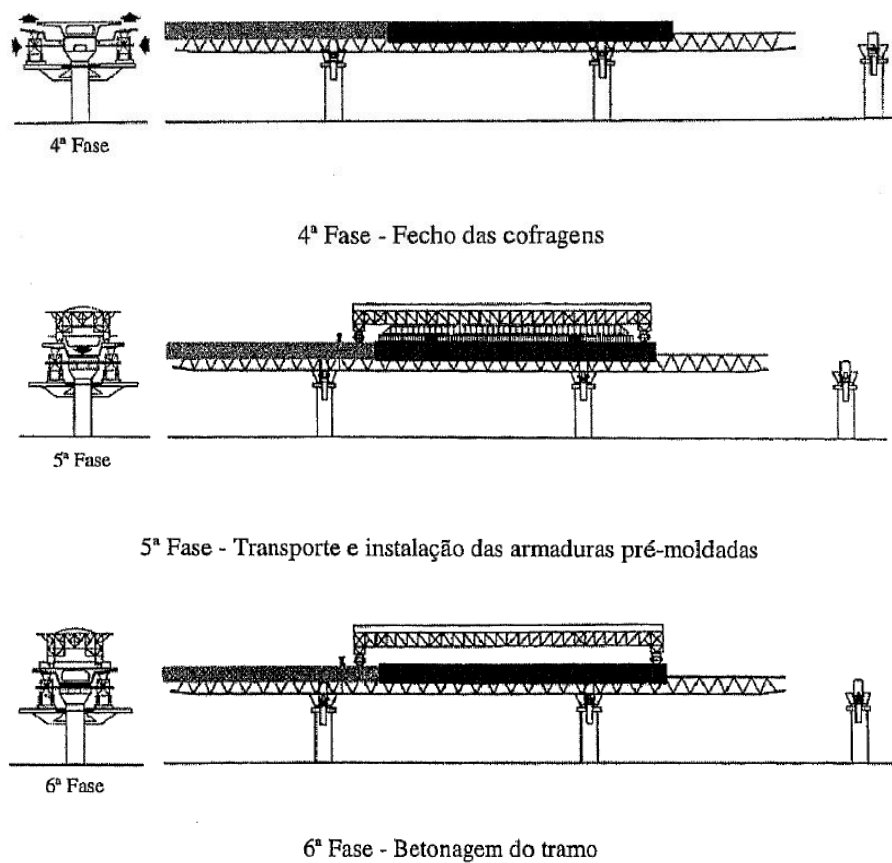


Fig.12 – Sequência do processo construtivo com cimbre autolancável inferior [6]

3

ACÇÕES E MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISE

3.1. INTRODUÇÃO

Em qualquer projecto de pontes e de acordo com os novos Eurocódigos e outros regulamentos, são a considerar os seguintes tipos de acções:

- Acções permanentes;
- Acções variáveis;
- Acções de acidente.

Cada uma destas acções deverá ser considerada em duas fases distintas da obra: fase construtiva e fase de exploração. Neste trabalho dar-se-á mais ênfase à influência do processo construtivo no dimensionamento de uma obra de arte, pelo que será atribuída uma maior importância aos carregamentos em fase construtiva.

De uma forma geral, as acções a considerar durante a fase construtiva são, para além da acção evidente do peso próprio da estrutura e das acções provocadas pela introdução do pré-esforço, as acções variáveis que traduzam os efeitos do peso e das manobras dos equipamentos, dos movimentos previstos para os cimbres e ainda eventuais situações de acidente motivadas por mau controlo dos referidos equipamentos. Já em fase de exploração deve-se considerar o peso dos restantes revestimentos e o efeito das sobrecargas rodoviárias. A longo prazo fazem-se sentir os efeitos da fluência e das deformações impedidas, cuja consideração foi excluída deste trabalho.

3.2. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGA CONSTRUTIVA

3.2.1. AVANÇOS SUCESSIVOS

Nos avanços sucessivos, para além do peso próprio da estrutura, devem ser considerados os efeitos das sobrecargas construtivas, da possibilidade da construção de uma aduela desequilibrada e do vento. No entanto, no caso específico da acção do vento, esta tem maiores implicações no dimensionamento dos pilares e não tanto no dimensionamento do tabuleiro pelo que não foi considerada no presente trabalho.

Relativamente à consideração de aduelas desequilibradas esta análise deve ser feita de forma a ter em conta possíveis desfasamentos na betonagem das aduelas considerando a betonagem destas, alternada. Esta condição é, muitas vezes, severa para o pilar originando o sobredimensionamento deste. Para tal não acontecer, pode ser especificado no projecto a obrigatoriedade de uma betonagem simultânea para

ambos os lados do pilar. [3] Este efeito não foi considerado no presente trabalho uma vez que apenas tem influência no dimensionamento dos pilares e este não se enquadra neste trabalho (figura 13).

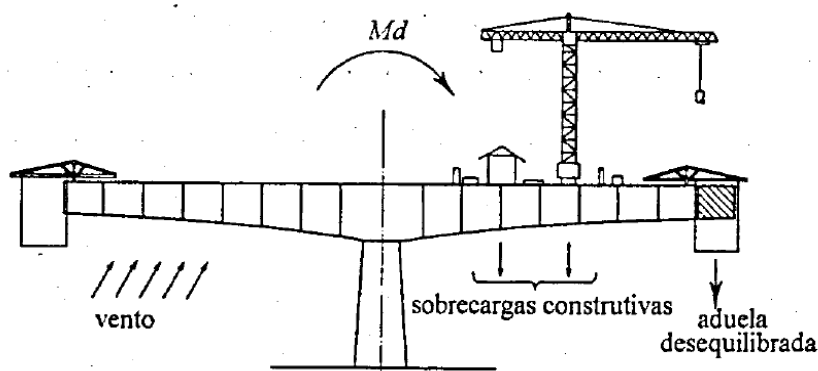


Fig. 13 – Estabilidade do tabuleiro em fase construtiva para os avanços sucessivos [3]

Relativamente ao peso próprio das aduelas é aconselhável a multiplicação do peso de uma consola por 1,03 para obter o momento flector mínimo. Com esta medida pretende-se ter em conta a possibilidade de imperfeições nas dimensões da secção transversal do tabuleiro, bem como, a variação do peso específico do betão armado. [3]

A quantificação da sobrecarga construtiva deve ser efectuada de modo a representar todo o equipamento necessário à construção do tabuleiro. São cargas que para além de poderem variar de intensidade, dependendo do tipo de equipamento a utilizar, podem deslocar-se durante a construção. É importante colocar estas cargas nos locais que conduzam a efeitos mais desfavoráveis sobre a estrutura. Existem dois tipos de sobrecargas construtivas a considerar (ver figura 14): uma carga pontual, correspondente ao peso do carro móvel e que depende, fundamentalmente, do peso máximo das aduelas a suportar e uma carga distribuída em todo o tabuleiro traduzindo o peso do restante equipamento.

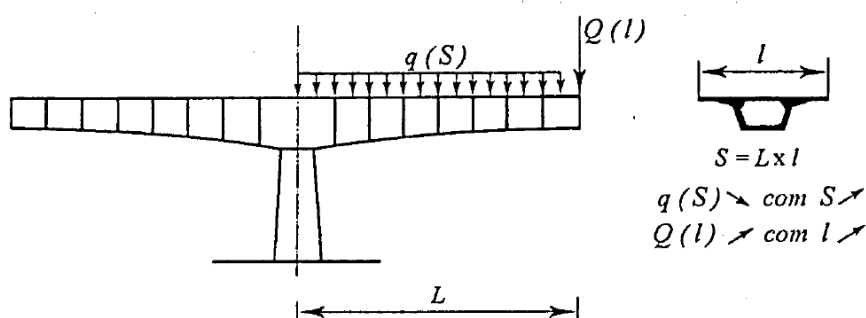


Fig. 14 – Variação das sobrecargas construtivas de acordo com a largura da secção transversal [3]

Em fase construtiva, estas cargas devem ser consideradas como cargas permanentes pois a sua variação ao longo do tempo não é significativa. Neste trabalho considera-se uma carga pontual de 600 kN correspondente ao peso do carro móvel e uma carga distribuída com o valor de 0,5 kN/m² [3], frequentemente utilizado em projectos de pontes com as características da deste trabalho (figura 15).

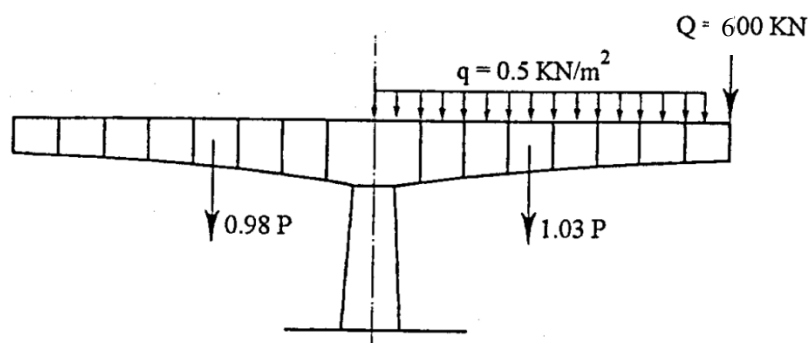


Fig. 15 – Acções permanentes consideradas em fase construtiva para os avanços sucessivos: peso próprio e sobrecarga construtiva

3.2.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

No caso de pontes construídas com o recurso a cimbres, a aplicação das cargas, nomeadamente peso próprio e pré-esforço, é feita faseadamente de acordo com o esquema apresentado na figura 16. Com recurso a programas de cálculo automático são facilmente quantificáveis os esforços para cada fase de construção e consequentemente a obtenção dos valores acumulados dos mesmos, permitindo esboçar os diagramas envoltantes de esforços actuantes finais para todas as sequências construtivas.

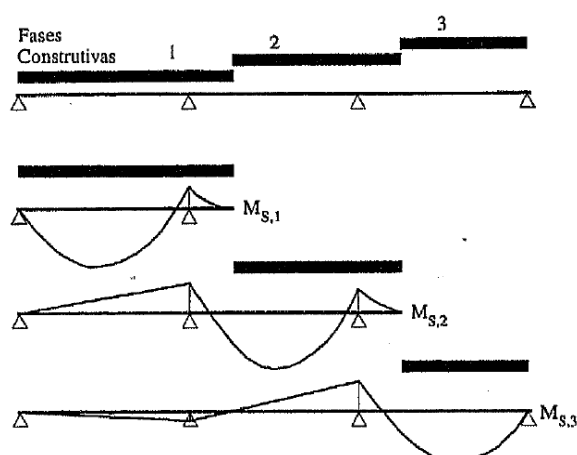


Fig. 16 – Esquema de faseamento construtivo com cimbra autolanzável

As sobrecargas relativas a equipamento necessário em fase construtiva devem ser também consideradas faseadamente. No entanto, todas as sobrecargas aplicadas depois de construído o tabuleiro devem ser estudadas como que aplicadas a uma viga contínua com o comprimento total da ponte e os vãos considerados.

O peso considerado para o cimbra autolanzável com OPS incluindo cofragem foi de cerca de 5 kN/m².

Os efeitos diferidos devem ser avaliados em função das características dos materiais utilizados, das condicionantes de projecto, dos restantes parâmetros regulamentares e ainda dos períodos de tempo estimados para a construção de cada tramo e da obra de arte completa. Apesar deste estudo estar excluído deste trabalho faz-se uma simples abordagem a este assunto apenas neste capítulo para que se compreenda que implicações estes efeitos poderão provocar ao nível das tensões a longo prazo.

Schlaich [7] propõe um método simplificado, dos mais correntemente utilizados, para análise das acções em fase construtiva e considerando os efeitos da fluência na determinação dos esforços. Um problema muitas vezes referido na bibliografia do domínio do betão armado pré-esforçado, é o facto dos efeitos diferidos, como é o caso da fluência, provocarem redistribuições de esforços que são dificilmente analisados com os programas de cálculo convencionais. Segundo este autor, o diagrama de esforços finais pode ser obtido como uma combinação linear dos diagramas obtidos no final de cada fase de construção com os correspondentes à entrada em funcionamento de toda a estrutura em simultâneo, por aplicação da expressão 3.1 e conforme a figura seguinte.

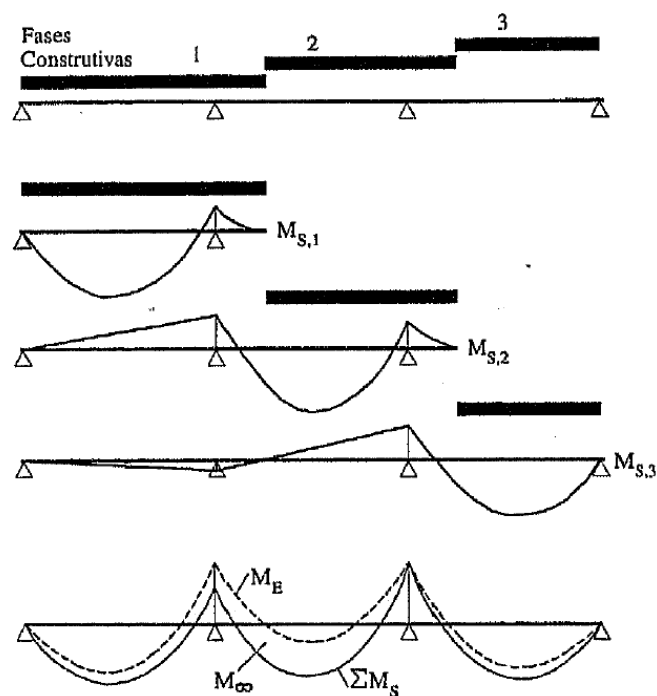


Fig. 17 – Diagramas de momentos flectores na fase construtiva e a longo prazo para o cimbra autolanzável

$$M_{\infty} = \sum M_{S,i} + (M_E - \sum M_{S,i}) \cdot \frac{\varphi_{\infty}}{1 + \rho \cdot \varphi_{\infty}} \quad (3.1)$$

onde,

$M_{S,i}$ – momento flector correspondente à conclusão de cada fase construtiva i

M_E – momento flector a tempo infinito, obtido assumindo que toda a ponte é construída no mesmo instante

φ_{∞} - coeficiente de fluência a tempo infinito

ρ – factor de relaxação obtido a partir da figura 18

Importante referir ainda que, de acordo com o autor, se a idade de aplicação da primeira solicitação, t_0 , for inferior a 10 dias, e se o ritmo de construção de cada tramo, Δt , for inferior a 21 dias, os valores obtidos por aplicação da equação 3.1 não variam mais do que 15% relativamente aos valores exactos. No entanto, se os valores de t_0 e Δt se desviam dos valores supra citados, os valores limites dos

momentos de redistribuição, no instante $t = \infty$, devem ser estimados a partir de outra equação referida também por Schlaich.

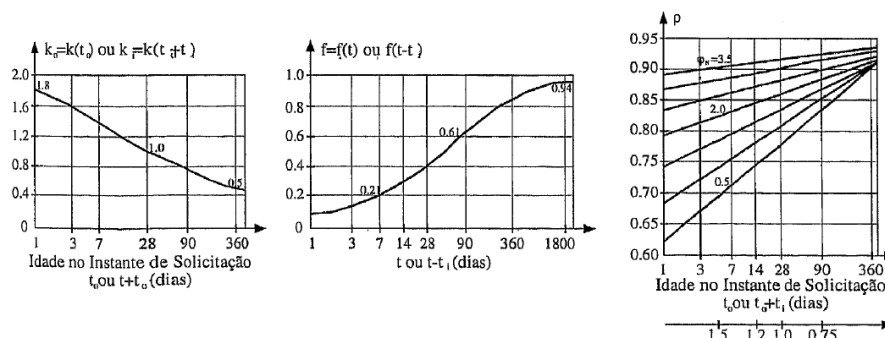


Fig. 18 – Factores para determinação dos efeitos de fluência [7]

3.3. PRÉ-ESFORÇO

O pré-esforço vai sendo aplicado à medida que se vão construindo as aduelas, logo deve ser considerado faseadamente. A estrutura, inicialmente isostática, é alterada com a união das consolas e torna-se hiperestática. Nesta altura há uma série de acções a introduzir na estrutura e que são importantes de quantificar. Trata-se da aplicação do pré-esforço de continuidade, do efeito da remoção do equipamento construtivo e elementos provisórios e da colocação dos acabamentos.

Neste subcapítulo descrevem-se dois métodos a seguir para obtenção dos esforços devido à aplicação do pré-esforço. Um deles é o “Método das cargas equivalentes” e o outro “Método dos coeficientes de influência”. Estes métodos apresentam uma maior importância no caso do cimbra autolanzável dado estarmos perante estruturas hiperestáticas. No caso dos avanços sucessivos, o cálculo dos efeitos do pré-esforço superior é simplificado pelo facto das estruturas serem isostáticas antes da união das consolas. Apenas se tem de recorrer a um dos métodos supra citados para a quantificação do pré-esforço de continuidade aplicado aquando do fecho das consolas.

3.3.1. AVANÇOS SUCESSIVOS

O pré-esforço longitudinal de uma ponte construída por este método é constituído por duas famílias de cabos (figuras 19 e 20): cabos de consola e cabos de continuidade ou solidarização.

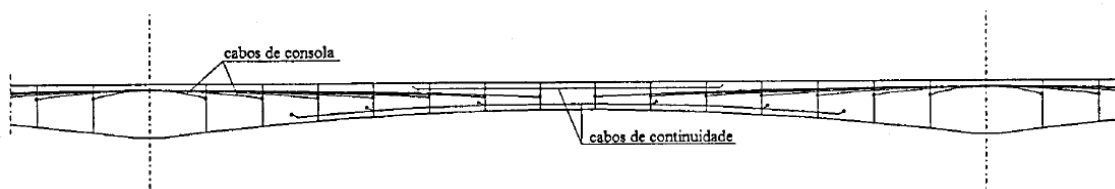


Fig. 19 – Esquema de pré-esforço longitudinal

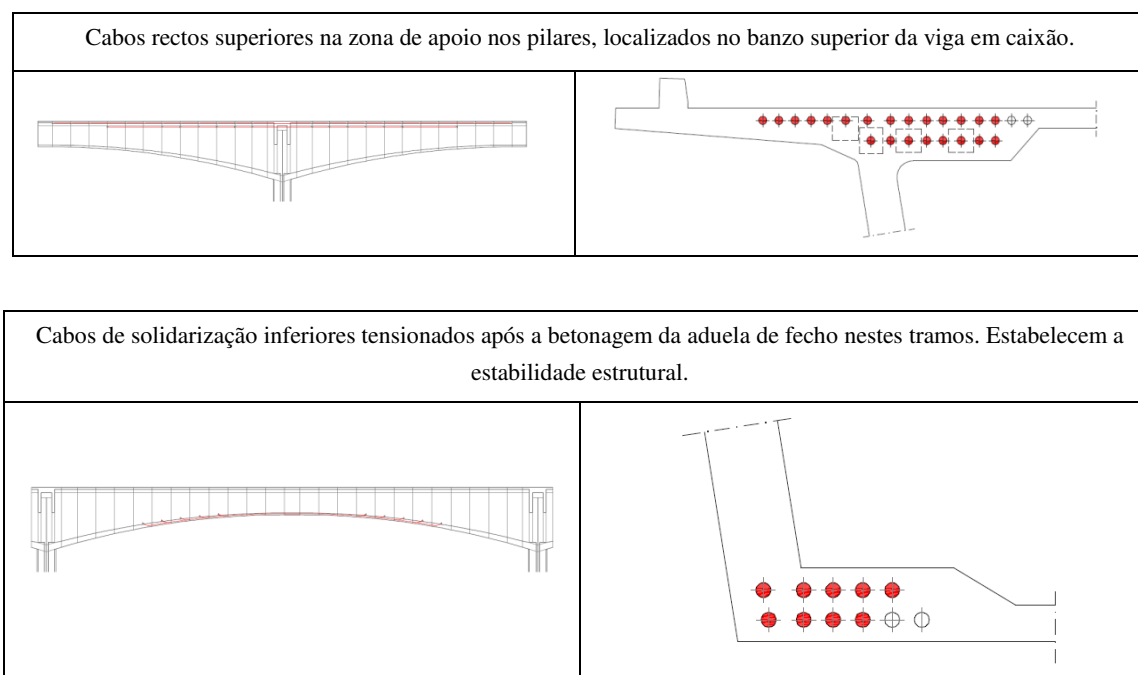


Fig. 20 – Localização e traçado dos cabos de consola e cabos de solidarização para a construção com cimbra autolavável [5]

Os cabos de consola são geralmente simétricos relativamente ao pilar e são colocados na proximidade da fibra superior. Estes cabos são pré-esforçados à medida que as consolas vão avançando e destinam-se a resistir aos momentos flectores negativos que são especialmente intensos durante a fase construtiva e a garantir a solidarização das aduelas novas com as já construídas. É aconselhável a utilização de apenas um cabo de pré-esforço por cada alma de aduela nova a betonar para evitar o congestionamento de cabos sobre o pilar, uma vez que é nesta secção que passam todos os cabos de pré-esforço de consola.

Este tipo de cabos pode ser de traçado parabólico ou horizontal. O traçado horizontal permite uma grande simplificação construtiva dado não existirem cabos no interior das almas o que facilita as operações de colocação, nivelamento e fixação das bainhas de pré-esforço às armaduras ordinárias, melhorando as condições de vibração do betão permitindo uma redução da espessura das almas. Com este traçado consegue-se, também, uma redução do atrito nas bainhas que facilita o enfiamento dos cabos e garante um decréscimo das perdas de pré-esforço por atrito ao longo das bainhas, obtendo-se tensões úteis superiores às obtidas com cabos inclinados e/ou parabólicos. A grande desvantagem deste tipo de traçado é a não redução do esforço transversal, visto não serem introduzidos esforços verticais ascendentes, que pode obrigar à utilização de pré-esforço vertical nas almas do caixão para assegurar capacidade resistente necessária à estabilidade da estrutura.

Os cabos de solidarização ou continuidade são colocados na vizinhança da aduela de fecho e são pré-esforçados logo após o fecho das consolas. Estes cabos destinam-se a assegurar a continuidade do tabuleiro e a resistir aos momentos flectores, essencialmente positivos, que se geram em fase de utilização aquando da aplicação das restantes cargas permanentes (betuminoso, passeios, etc.), sobrecargas rodoviárias e devido à alteração do funcionamento estrutural da obra de arte.

Os valores das forças de pré-esforço a introduzir devem ser criteriosamente escolhidos de modo a que os deslocamentos verticais das consolas durante a construção sejam pequenos, as deformações a longo prazo devido à fluência e retracção da estrutura final não excedam limites aceitáveis e a estabilidade

estrutural esteja garantida em todas as fases. O primeiro ponto é facilmente controlável dado ser suficiente colocar pré-esforço para anular a totalidade do peso próprio. Esta situação conduz a uma estrutura sobredimensionada e, muitas vezes, excessivamente cara condicionada pela fase construtiva. No entanto é recomendado o sobredimensionamento do pré-esforço longitudinal, principalmente nos primeiros segmentos onde a contribuição para potenciais deformações é mais significativa, dados os custos elevados das reparações depois da obra estar concluída.

3.3.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

Uma obra de arte construída por este método apresenta, como se poderá constatar no Capítulo 4, um equilíbrio maior entre momentos positivos e negativos do que no caso dos avanços sucessivos em que os momentos negativos são predominantes. Consequentemente, o traçado parabólico (ver figura 21) é o que mais se adequa a este tipo de obras uma vez que nos apoios se pretende contrariar os momentos negativos e a meio vão os momentos positivos, que apresentam valores da mesma ordem de grandeza.

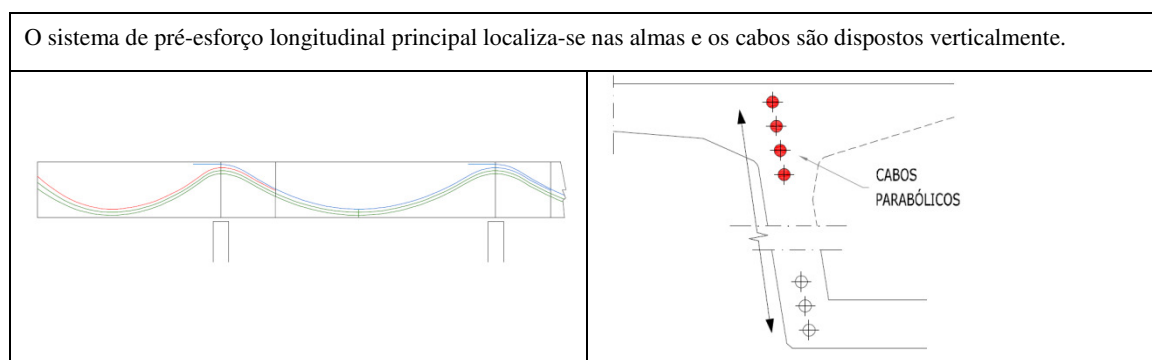


Fig. 21 – Traçado parabólico - tipo dos cabos de pré-esforço de continuidade e sua localização na secção transversal para a construção com cimbra autolanzável [5]

O primeiro passo para a obtenção dos efeitos do pré-esforço é a definição do traçado do cabo. Este traçado é idealizado através de um conjunto de curvas cujas equações são do 1º e/ou 2º grau, o que torna a definição das equações do traçado do cabo muito simples de obter, sendo apenas necessário conhecer as coordenadas de 2 ou 3 pontos do traçado (consoante se trate de uma recta ou uma parábola, respectivamente).

As expressões 3.2 e 3.3 permitem definir as equações de rectas ou parábolas, respectivamente:

$$y = mx + b . \quad (3.2)$$

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.3)$$

O ponto de inflexão do traçado encontra-se na linha que une os dois extremos, conforme ilustra a figura 22, e é conveniente que se encontre muito perto do centro de gravidade da secção transversal a uma distância do apoio que corresponda à zona de momentos nulos devido à acção do peso próprio. Isto deve-se ao facto de ser vantajoso inverter o sentido da parábola na mesma zona onde os momentos devido ao peso próprio passam de positivos a negativos ou vice-versa.

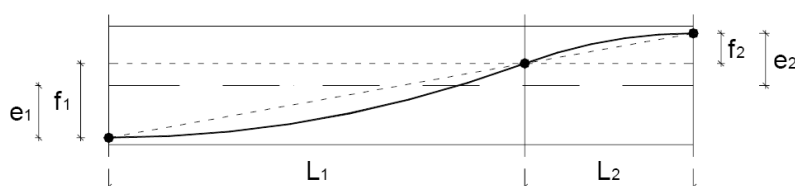


Fig. 22 – Determinação do ponto de inflexão entre dois troços parabólicos

Quando se aplica uma tensão nos cabos simultaneamente nas duas extremidades introduzem-se as seguintes acções sobre os cabos e sobre o betão, conforme ilustram as figuras 23 e 24.

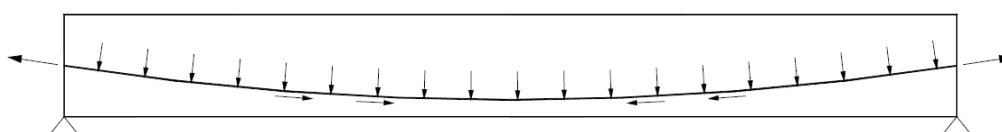


Fig. 23 – Acções exercidas sobre o cabo (traçado parabólico)

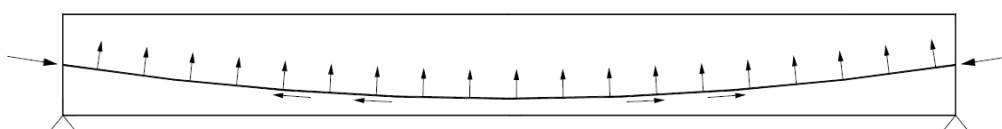


Fig. 24 – Acções exercidas sobre o betão (traçado parabólico)

As perdas instantâneas por deformação elástica do betão e reentrada das cunhas e as perdas associadas ao comportamento diferido quer do aço de pré-esforço quer do betão são consideradas simplificada-mente neste trabalho. Considera-se 15% de perdas instantâneas e 10% de perdas diferidas, o que implica que a força de pré-esforço a longo prazo corresponde a, aproximadamente, 75% da força instalada no instante da aplicação do mesmo.

Em seguida descrevem-se dois métodos que permitem a quantificação dos esforços devido à aplicação do pré-esforço.

“Método das cargas equivalentes”[8]

Este método consiste na decomposição dos efeitos provocados pelo pré-esforço por forças equivalentes. No caso de traçados parabólicos têm-se forças uniformes ascendentes quando as parábolas são côncavas e forças uniformes descendentes quando as parábolas são convexas. Há, também, que decompor as forças nas ancoragens conforme a figura 25.

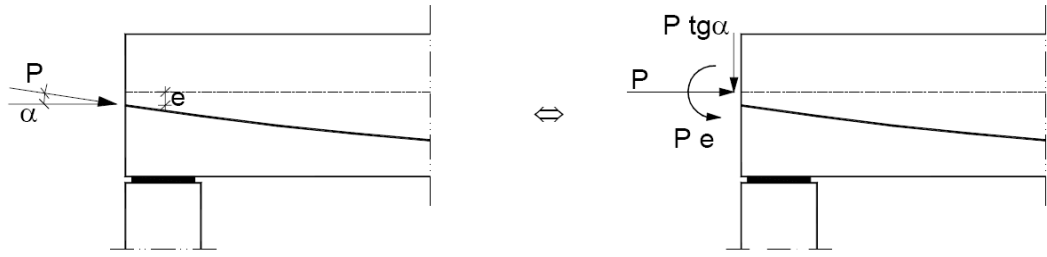


Fig. 25 – Decomposição das forças nas ancoragens

Dado os tabuleiros serem elementos relativamente esbeltos, o ângulo α apresenta, normalmente, um valor pequeno pelo que se considera $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ e $\cos \alpha \approx 1$.

Para um cabo com traçado parabólico temos a seguinte expressão que permite determinar a carga equivalente (as variáveis e seu significado encontram-se na figura 26):

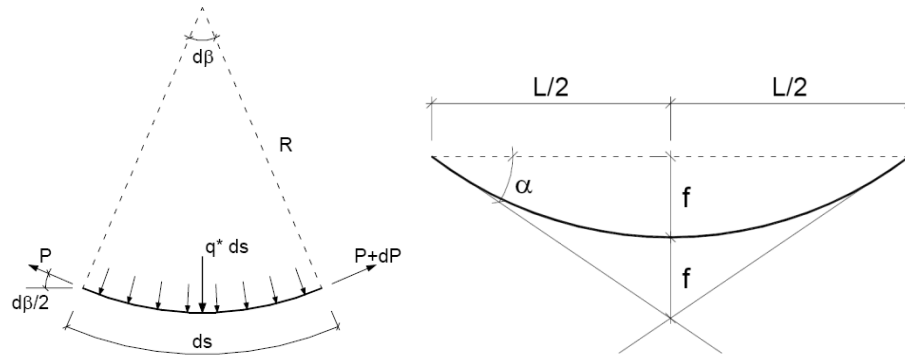


Fig. 26 – Parábola e seus elementos definidores

$$\tan \alpha = \frac{\partial \beta}{2} = \frac{2f}{L/2} = \frac{4f}{L} \Rightarrow \partial \beta = \frac{8f}{L} \quad (3.4)$$

$$\partial s \cong L \quad (3.5)$$

A partir de (3.4) e (3.5) obtém-se,

$$\frac{\partial \beta}{\partial s} = \frac{8f}{L^2} \Rightarrow q = \frac{8Pf}{L^2} \quad (3.6)$$

“Método dos coeficientes de influência” [9]

De acordo com este método os momentos flectores totais devido à acção do pré-esforço obtêm-se segundo a equação:

$$M_p(x) = P(x).e(x) + \overline{M}_p(x) \quad (3.7)$$

onde,

$M_p(x)$ - momento flector total devido à acção do pré-esforço

$P(x).e(x)$ - momento flector isostático

$\overline{M}_p(x)$ - momento flector hiperstático

O momento flector hiperstático é calculado a partir dos coeficientes de influência e de acordo com as equações (3.8) e (3.9).

$$\overline{M}_{p,i}(x) = P(x).e(x).\eta \overline{M}_{p,i}(x).dx \quad (3.8)$$

$$\overline{M}_{p,i} = \int_0^L P(x).e(x).\eta \overline{M}_{p,i}(x).dx \quad (3.9)$$

Define-se coeficiente de influência $\eta \overline{M}_{p,i}(x)$ como sendo o momento flector hiperstático existente na secção i , devido à acção de uma força de pré-esforço unitária ($P = 1$) com uma excentricidade unitária ($e = 1$) ao longo de um elemento de comprimento unitário ($L = 1$) que está localizado na abcissa x . Pelo que, o momento flector hiperstático $\overline{M}_{p,i}(x)$ existente em i devido à acção de uma força de pré-esforço P que actua com uma excentricidade e num elemento de comprimento dx na secção x é obviamente dado pela expressão 3.8.

Consequentemente, o momento flector hiperstático total $\overline{M}_{p,i}$, existente em i devido à acção de um cabo de pré-esforço caracterizado por uma força $P(x)$ e pelo traçado $e(x)$, pode ser determinado integrando a expressão 3.8 ao longo do comprimento total L da estrutura em análise, conforme a equação 3.9.

Em face das expressões 3.10 e 3.11 fica claro que os coeficientes de influência são independentes do traçado do cabo e da força de pré-esforço dependendo apenas da geometria e das características da estrutura.

$$\left(\eta \overline{M}_{p,i}(x)\right)(1) = \left(-\frac{\partial^2(M_{Q,i}(x))}{\partial^2} \cdot E \cdot I(x)\right) \cdot \left(\frac{1}{E \cdot I(x)}\right) \quad (3.10)$$

No caso de um tabuleiro com inércia constante os coeficientes de influência definem-se com a seguinte equação:

$$\eta \overline{M}_{p,i}(x) = -\frac{\partial^2(M_{Q,i}(x))}{\partial x^2} \quad (3.11)$$

onde,

$M_{Q,i}(x)$ - é a linha de influência para momentos flectores na secção i para cargas verticais

A figura 27 permite compreender a diferença, a nível conceptual, entre um e outro método de cálculo dos esforços devido à aplicação do pré-esforço. No caso das cargas equivalentes é necessário definir primeiro as características geométricas do pré-esforço para depois caracterizar as forças exercidas sobre o betão e no final aplicar estas acções à estrutura e calculá-la. O método dos coeficientes de influência parte de princípios diferentes. Em primeiro lugar definem-se as características da estrutura, depois calculam-se as suas propriedades e determinam-se os coeficientes de influência que são independentes do valor do pré-esforço e do traçado dos cabos do mesmo. Este método apresenta a vantagem de se ter que calcular a estrutura uma única vez sendo muito mais simples a determinação dos efeitos do pré-esforço aquando da alteração das suas características.

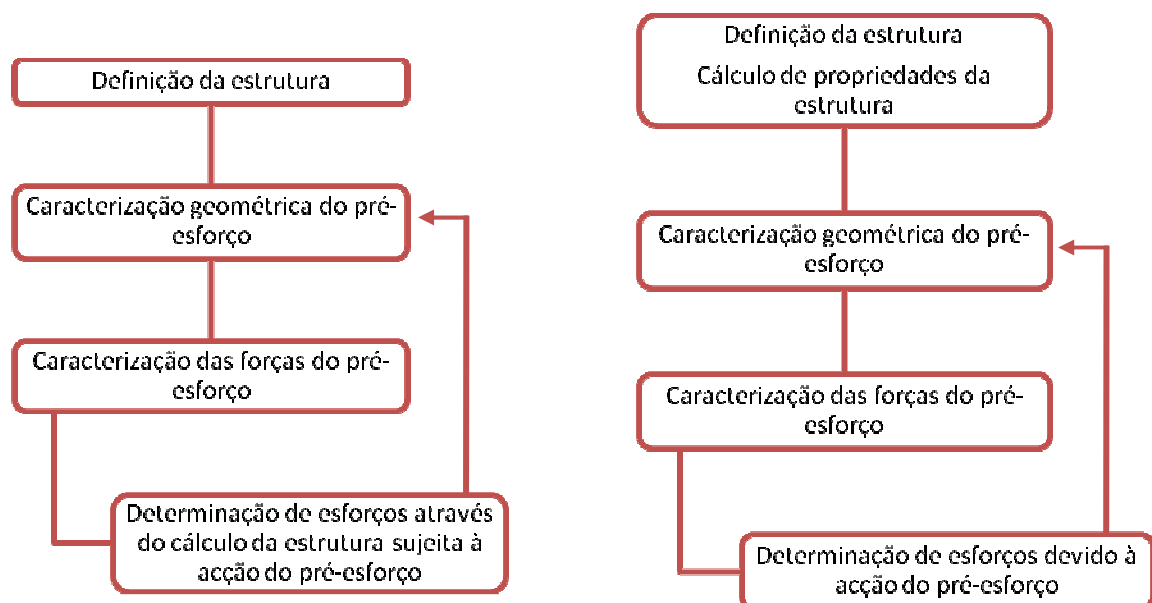


Fig. 27 – Método das cargas equivalentes Vs. Método dos coeficientes de influência [9]

4

ANÁLISE COMPARATIVA

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Naturalmente, quando se trata de obras extensas, com processos construtivos complexos, a influência do processo construtivo no comportamento estrutural atinge o seu expoente máximo sendo, muitas vezes, determinante no próprio dimensionamento da estrutura. A consideração do faseamento construtivo na concepção e dimensionamento de pontes e viadutos é vital visto que o seu sistema estático se altera durante todo o processo e de forma gradual.

Por conseguinte, desta sequência lógica de solicitação de uma estrutura que se vai alterando ao longo do tempo de construção, resultam esforços e deformações que não se verificam numa situação equivalente a betonar toda a estrutura numa única etapa, com um sistema estrutural correspondente à concepção para a fase de exploração. De facto, esta influência pode ser tão expressiva que a concepção da estrutura não pode ser alheia ao modo de a construir.

Deve, portanto, o dimensionamento de qualquer estrutura corresponder ao fruto de uma análise cuidada, após uma, também importante, modelação da realidade e a confrontação dos resultados obtidos com uma visão crítica alicerçada num conhecimento profundo das estruturas.

No presente capítulo apresentam-se os cálculos e descrição dos processos iterativos que permitem a optimização das soluções inicialmente escolhidas. Faz-se um estudo faseado baseado no princípio da sobreposição de efeitos entrando-se, inicialmente, apenas com o efeito do peso próprio acrescentando-se depois a acção das sobrecargas rodoviárias e do pré-esforço. Com o objectivo de obter uma solução optimizada é feita, aquando da aplicação de cada carga, uma análise e controlo de tensões.

Durante a construção dos troços de um viaduto com o cimbri autolanzável, cada tramo que é betonado e entra em carga está estruturalmente ligado aos anteriores mas o seu comportamento é descompensado pela ausência do tramo seguinte. O posicionamento do cimbri compensa este efeito ao carregar a consola com comprimento aproximado de um quinto de vão, produzindo um efeito favorável no tramo anterior ao contrariar a deformação causada pelo peso próprio do tabuleiro. Neste processo, a acção do pré-esforço é auxiliada pelo efeito supra mencionado, contudo o seu traçado é usualmente condicionado pela verificação dos Estados Limites de Utilização, nomeadamente o Estado Limite de Descompressão.

Já nos avanços sucessivos, o caso é ligeiramente diferente. Este processo consiste em vários sistemas isostáticos constituídos pelas aduelas e pilares cujo coeficiente de segurança à instabilidade vai diminuindo progressivamente à medida que o comprimento das consolas aumenta. No que respeita ao comportamento do tabuleiro, até à fase em que se procede ao fecho do vão, este processo origina tensões de tracção nas fibras superiores das secções transversais das consolas, em toda a sua extensão. Neste caso, o cimbri é, ele próprio, desfavorável para o tabuleiro devi-

do à sua posição no extremo das consolas e o facto de o seu sistema de fixação aí introduzir um momento flector concentrado. Estas tensões são então contrariadas pela adopção de pré-esforço longitudinal aplicado simétrica e exclusivamente na zona superior das almas do caixão. Esta medida evita a ocorrência de fissuração durante a fase construtiva que, a ter lugar, conduziria à perda de controlo. Garante-se desta forma, a homogeneidade das secções, sempre comprimidas e consegue-se limitar as deformações a longo prazo. Após a entrada em carga do peso próprio das aduelas de fecho entre consolas estabelece-se a continuidade da estrutura e ocorre uma redistribuição de esforços que é dependente do estado de tensão do tabuleiro.

A análise longitudinal a efectuar é composta por diversos ciclos de cálculo dos quais resulta a solução final para o presente estudo. Neste processo, iterativo por natureza e com grande quantidade de variáveis em jogo, vão-se redefinindo as secções dos elementos estruturais e numa fase final o traçado dos cabos de pré-esforço, de modo a refinar o seu dimensionamento. De uma forma geral, este trabalho consiste na verificação e controlo das tensões durante a fase de construção e durante a fase de exploração.

A verificação da segurança para a fase construtiva é realizada em todos os instantes críticos envolvidos nesta fase. Essencialmente, efectua-se uma avaliação ao nível de tensões na estrutura considerando as solicitações: acções associadas à montagem, desmontagem dos cimbres; betonagem do tabuleiro sobre o cimbra; aplicação do pré-esforço; entrada em carga (descimbramento).

Tendo em conta o tempo decorrido entre cada uma destas acções e a capacidade resistente dos materiais, atingida até esse período, procura-se controlar a máxima tensão de compressão e a máxima tensão de tracção para o tabuleiro, que são condicionadas pela resistência do betão adoptado. Estes níveis dependem da concepção estrutural, isto é, do tipo de secção, das suas dimensões, modelação de vãos; do traçado de pré-esforço, número e tipo de cabos e ainda dos próprios materiais preconizados. Esta avaliação revela-se de extrema importância visto que é fundamental evitar o esmagamento do betão ou a ocorrência de fissurações nas secções durante a fase construtiva sob pena de não ser possível garantir um bom funcionamento da estrutura na fase de exploração. Esta análise de tensões, “carregamento a carregamento”, é efectuada para que se possa averiguar a evolução das tensões durante todo o faseamento.

No caso específico deste trabalho, o tabuleiro é constituído por uma viga contínua em caixão unicelular de betão armado pré-esforçado e de secção transversal com geometria variável ou não, consoante o processo construtivo a adoptar. Em rigor, a altura da secção sobre os pilares é condicionada pelo comprimento do vão, pelo peso próprio da estrutura e pelo processo construtivo adoptado. Por outro lado, a altura da secção para o meio vão menos solicitado é condicionada pela redistribuição de esforços, sobrecargas de exploração, efeitos diferidos e gradientes térmicos verificados na fase de serviço, no entanto, estes dois últimos efeitos não foram considerados no presente trabalho.

A determinação de esforços e tensões do tabuleiro foi efectuada com base num modelo de pórtico tridimensional de elementos finitos de barra realizado no programa de cálculo automático Robot Structural Analysis, da Autodesk. A modelação longitudinal consiste em elementos finitos de barra segundo os eixos principais das secções da obra de arte, com as características de cada secção transversal do tabuleiro. O seu desenvolvimento ao longo do viaduto acompanha, naturalmente, a variação parabólica em termos de dimensões das secções e, obviamente, área, inércia e outras propriedades geométricas variáveis das secções. O tabuleiro foi dividido em troços de 5m de comprimento, aduelas, aos quais foram atribuídas características correspondentes às propriedades da secção média nesse troço.

Neste trabalho, relativamente às acções verticais, não se teve em consideração o efeito de arco que advém da variação do centro de gravidade de cada secção.

No caso dos avanços sucessivos e enquanto a estrutura é isostática, este efeito não existe. No entanto, quando se está perante uma estrutura hiperstática, como é o caso do tabuleiro contínuo construído com cimbres autolancáveis ou aquando da união das consolas nos avanços sucessivos, e quando o eixo principal das secções não é rectilíneo ao longo de todo o tabuleiro, aparecem tensões de compressão devido à aplicação de cargas verticais. A este fenómeno dá-se o nome de efeito de arco. Verificou-se que, neste caso, este efeito não introduz grandes variações nos resultados pelo que não foi considerado. Por outro lado, a ocorrência ou não deste efeito depende, nos tramos centrais de um tabuleiro contínuo, do tipo de ligação considerada entre o tabuleiro e os pilares e no caso de uma ligação monolítica entre estes, da capacidade de encastramento dos pilares consoante o seu comprimento e secção.

A apresentação dos cálculos e respectivos resultados está dividida de acordo com as acções consideradas e em função do processo construtivo utilizado, reservando-se o último ponto deste capítulo (4.4) a uma reflexão comparativa dos resultados obtidos para cada um dos processos construtivos.

i) Materiais e verificação de segurança

Os materiais considerados são o betão C45/55, A500 NR SD para a armadura passiva e o S1820 para o aço de pré-esforço.

As características do betão C45/55 são as seguintes:

$$f_{ck} = 45,00 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{45}{1,5} = 30,00 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk} = 4,90 \text{ MPa}$$

As verificações de segurança foram efectuadas à luz da regulamentação vigente a nível nacional. De um modo geral, os elementos considerados essenciais à verificação dos critérios de dimensionamento foram os seguintes:

- RSA (Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes); [10]
- REBAP (Regulamento de Estruturas de Betão Armado Pré-Esforçado). [11]

No entanto, tendo em conta o panorama europeu no que respeita à futura implementação da Norma Europeia (Eurocódigos), recorreu-se também ao especificado no EC2 – Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão Armado. [12]

Na análise longitudinal do tabuleiro as verificações de segurança realizadas foram as seguintes, consoante se esteja perante a fase construtiva ou de exploração:

FASE CONSTRUTIVA

- Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções;
- Tensão máxima de compressão limitada a $f_{ck,j} / \gamma_c$ para betão com a idade de j dias para a combinação $1,0S_{G,1} + 1,0S_{G,2}$;

FASE DE EXPLORAÇÃO

- Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções $1,0S_G + \psi_2 \cdot S_{Q,1}$;

Em que:

S_G - Cargas Permanentes - acção devido ao peso próprio da estrutura e ao pré-esforço;

$S_{G,1}$ - Cargas Permanentes - acção devido ao peso próprio da estrutura;

$S_{G,2}$ - Cargas Permanentes - acção devido às sobrecargas construtivas;

$S_{Q,1}$ - Sobrecargas - acção devido às sobrecargas rodoviárias.

ψ_2 - Valor reduzido da sobrecarga rodoviária para a combinação quase permanente das acções.

Segundo a legislação considerada e anteriormente enunciada devem-se verificar as seguintes equações em Estado Limite de Utilização:

- Limite da tensão de compressão para a combinação $1,0.S_{G,1}+1,0.S_{G,2}$ (em fase construtiva, para que a tensão nunca seja superior à tensão resistente da secção no instante j)

$$\sigma^- \leq f_{ck,j} \quad (4.1)$$

- Limite da tensão de compressão para a combinação rara de acções considerando o peso próprio da estrutura, os efeitos da aplicação do pré-esforço e as sobrecargas rodoviárias (em fase de exploração)

$$\sigma_{raras}^- \leq 0,6 f_{ck} \quad (4.2)$$

- Limite da tensão de compressão para a combinação quase permanente de acções considerando o peso próprio da estrutura, os efeitos da aplicação do pré-esforço e as sobrecargas rodoviárias (em fase de exploração)

$$\sigma_{c.q.p.}^- \leq 0,45 f_{ck} \quad (4.3)$$

- As tracções devem ser limitadas à capacidade resistente do betão considerado, em Estado Limite de Utilização, quer para a combinação quase permanente de acções quer para a combinação rara, conforme a seguinte equação:

$$\sigma^+ \leq f_{ctk} \quad (4.4)$$

As verificações de segurança a efectuar encontram-se sintetizadas na tabela 1.

Tabela 1 – Quadro síntese das verificações de segurança a realizar em fase construtiva e de exploração

Fase	Combinação	Ações a considerar	Tensão limite compressão	Tensão limite tracção
Construtiva	$1,0S_{G,1} + 1,0S_{G,2}$	Peso próprio e sobrecargas construtivas	$f_{ck,j}$	
Exploração	Rara	Peso próprio, pré-esforço e sobrecargas rodoviárias	$0,6f_{ck}$	f_{ctk}
Exploração	Quase permanente	Peso próprio, pré-esforço e sobrecargas rodoviárias	$0,45f_{ck}$	f_{ctk}

ii) Definição geométrica

Como condicionantes de projecto admite-se a secção apresentada na figura 28 em que apenas a altura total da secção (**H**) e a espessura do banzo inferior (**e**) são variáveis.

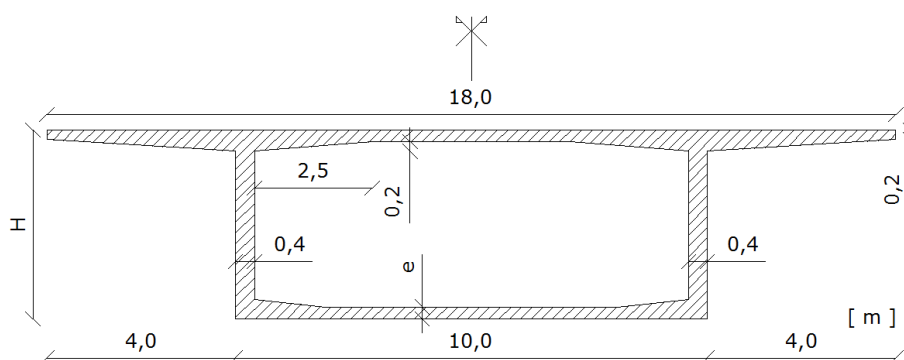


Fig. 28 – Secção em viga caixão: características geométricas e variáveis

O estudo é feito tendo em consideração uma viga contínua, com vãos centrais de 100m e vãos extremos de 60 m, conforme ilustra a figura 29. A largura total considerada para o tabuleiro foi de 18 m correspondente a uma estrada com quatro faixas de rodagem (duas faixas em cada sentido de circulação), um separador central e bermas laterais.

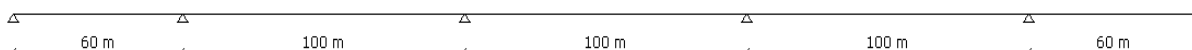


Fig. 29 – Perfil longitudinal adoptado

O trabalho consiste na optimização geométrica, procura das variáveis **H** e **e** da secção transversal em caixão e no controlo permanente das tensões nas fibras superiores e/ou inferiores da secção.

Inicialmente foram estudadas 3 soluções-tipo, tendo-se sempre em conta as duas variáveis, para cada processo construtivo: cimbra autolancável e avanços sucessivos. Resultam então 6 soluções iniciais, 3 para cada processo construtivo, como se esquematiza na figura seguinte.

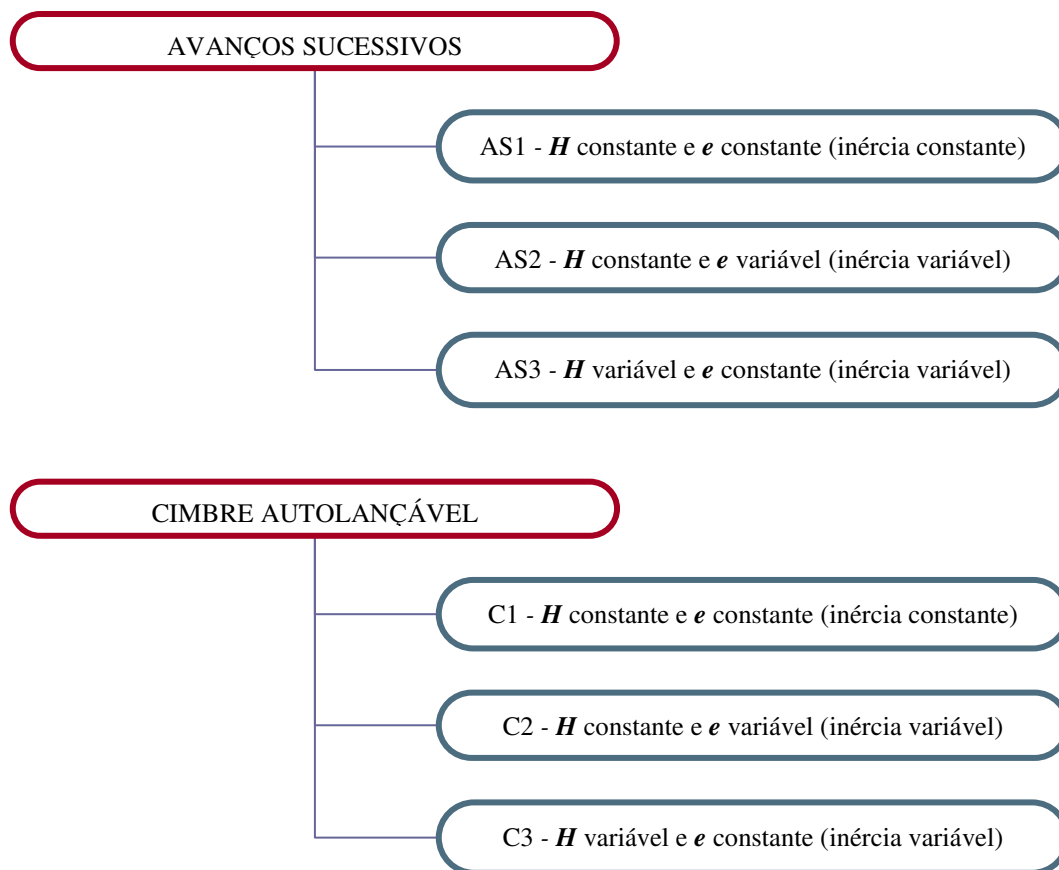


Fig. 30 – Soluções-tipo a estudar para ambos os processos construtivos

De notar que apenas se atribuiu nomenclaturas diferentes para cada processo construtivo de forma a facilitar a referência a cada uma destas soluções em cada subcapítulo, 4.2 e 4.3, estudo dos avanços sucessivos e do cimbra autolanzável, respectivamente. Assim, os resultados das soluções AS1, AS2 e AS3 são directamente comparáveis com os resultados C1, C2 e C3 pelo facto das características geométricas serem as mesmas.

As diversas secções transversais à frente apresentadas, foram assumidas como as secções de partida do processo iterativo. Deste modo, as primeiras tensões são calculadas admitindo estas secções, que vão sendo, posteriormente, alteradas consoante os resultados obtidos pretendendo-se que estes se situem dentro dos limites atrás referidos.

O primeiro passo na procura da definição das variáveis em estudo consiste na consideração do peso próprio do tabuleiro em fase construtiva. Foi feita uma análise das tensões devida, única e exclusivamente, ao peso próprio da estrutura na secção em que o momento flector é máximo, ou seja, na aduela sobre o pilar (apoio). Posteriormente foram efectuadas verificações das tensões faseadamente, considerando a construção aduela a aduela ou tramo a tramo, introduzindo as sobrecargas construtivas.

Nas figuras que se seguem apresentam-se as características geométricas e restantes propriedades das secções transversais em cada secção, consoante a sua variação longitudinal ao longo do tabuleiro.



Fig. 31 – Identificação de secções

A solução AS1 / C1, uma das soluções iniciais, com secção e inércia constante ao longo de todo o tabuleiro consiste na consideração de uma altura total da viga caixão (**H**) de 4,0m e uma espessura de 0,20m para o banzo inferior (**e**). Na figura 32 encontra-se representada esta secção. A sua relação L/H é de 1/25.

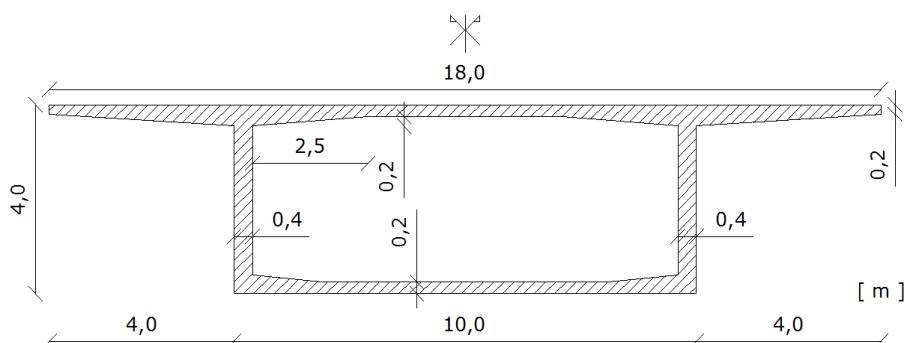


Fig. 32 – Secção transversal da solução AS1 / C1 para **H** = constante e **e** = constante (inércia constante)

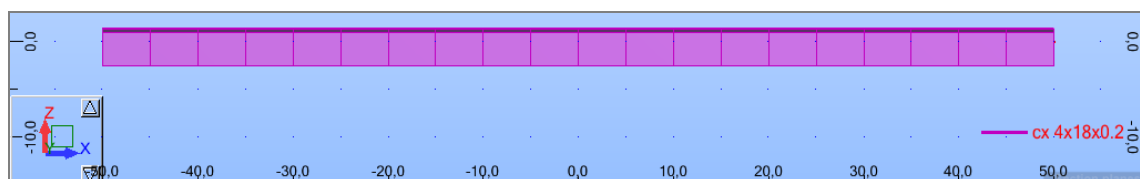


Fig. 33 – Secções consideradas na solução AS1 / C1 para **H** = constante e **e** = constante

A solução AS2 / C2 conta com uma altura total da viga em caixão (**H**) constante e igual a 4,0 m e espessura do banzo inferior (**e**) variável, de acordo com a figura 34, originando as secções da tabela 2 e figura 35.

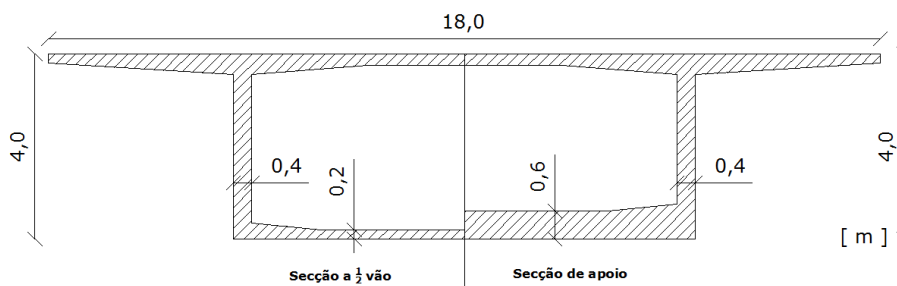


Fig. 34 – Secções transversais da solução AS2 / C2 para **H** = constante e **e** = variável

Tabela 2 – Propriedades das secções para **H** = constante e **e** = variável (AS2 / C2)

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)
1	H=4,0m ; e=0,60m	14,445	39,400	2,073	1,927
2	H=4,0m ; e=0,55m	14,060	38,515	2,144	1,886
3	H=4,0m ; e=0,50m	13,675	37,522	2,158	1,842
4	H=4,0m ; e=0,45m	13,290	36,410	2,207	1,793
5	H=4,0m ; e=0,40m	12,905	35,167	2,260	1,740
6	H=4,0m ; e=0,35m	12,520	33,778	2,317	1,683
7	H=4,0m ; e=0,30m	12,135	32,229	2,380	1,620
8	H=4,0m ; e=0,25m	11,750	30,502	2,448	1,552
9	H=4,0m ; e=0,20m	11,365	28,576	2,552	1,478
10	H=4,0m ; e=0,20m	11,365	28,576	2,552	1,478
11	H=4,0m ; e=0,20m	11,365	28,576	2,552	1,478

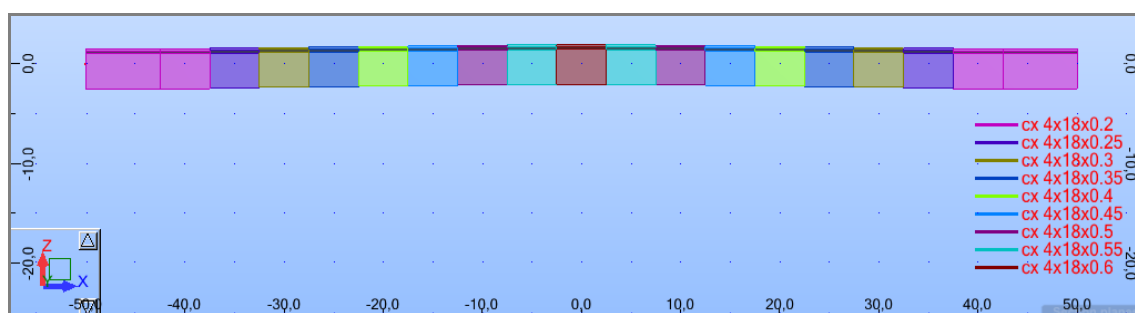


Fig. 35 – Secções consideradas na solução AS2 / C2 para **H** = constante e **e** = variável

A duas próximas figuras (fig. 36 e 37) e a tabela 3 referem-se às secções consideradas para a solução AS3 / C3, cuja altura da viga caixão (**H**) é variável e espessura do banzo inferior (**e**) constante e igual a 0,20 m.

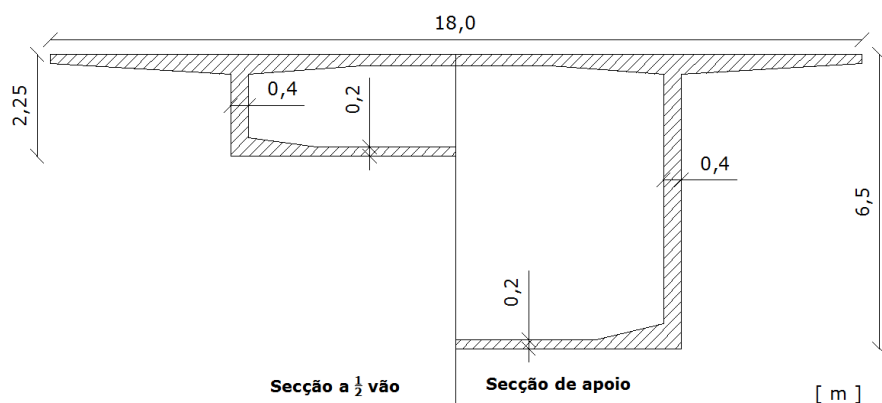
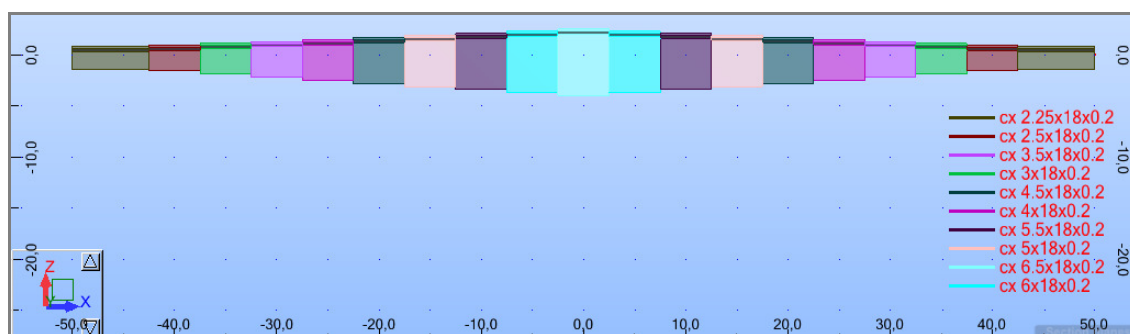


Fig. 36 – Secções transversais da solução AS3 / C3 para **H** = variável e **e** = constante

Tabela 3 – Propriedades das secções para H = variável e e = constante (AS3 / C3)

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I_y (m ⁴)	y_{inf} (m)	y_{sup} (m)
1	$H=6,5\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	13,365	88,255	4,002	2,498
2	$H=6,0\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	12,965	73,276	3,711	2,289
3	$H=5,5\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	12,565	59,874	3,419	2,081
4	$H=5,0\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	12,165	47,993	3,123	1,877
5	$H=4,5\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	11,765	37,579	2,825	1,675
6	$H=4,0\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	11,365	28,576	2,552	1,478
7	$H=3,5\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	10,965	20,928	2,217	1,283
8	$H=3,0\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	10,565	14,576	1,907	1,093
9	$H=2,5\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	10,165	9,464	1,592	0,908
10	$H=2,25\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	9,965	7,353	1,432	0,818
11	$H=2,25\text{m}$; $e=0,20\text{m}$	9,965	7,353	1,432	0,818

Fig. 37 – Secções consideradas na solução AS3 / C3 para H = variável e e = constante

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os procedimentos, para cada processo construtivo, que permitiram a evolução do presente estudo com vista à optimização das soluções iniciais.

4.2. AVANÇOS SUCESSIVOS

4.2.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS CONSTRUTIVAS

4.2.1.1. Soluções tipo iniciais – AS1, AS2 e AS3

Assumindo as configurações geométricas anteriormente expostas obtém-se os diagramas de momentos flectores a seguir apresentados e consequentemente os valores das tensões máximas para cada caso, para a situação da consola com $L_{máx.}$ igual a metade do vão, ou seja, 50 m.

Neste trabalho considera-se que, segundo o método dos avanços sucessivos, se betona uma aduela a cada 5 dias, aproximadamente, e pré-esforçam-se os cabos durante os 5 dias seguintes. Partindo deste pressuposto e tendo por base as tensões obtidas com os diagramas de momentos flectores e propriedades das secções para os 3 casos em estudo pode-se verificar se foram ou não ultrapassados os limites das tensões para os j dias, para cada aduela.

i) Consideração do peso próprio do tabuleiro

Relativamente ao controlo das tensões em fase construtiva, faz-se uma comparação dos diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio que se apresentam na figura 38.

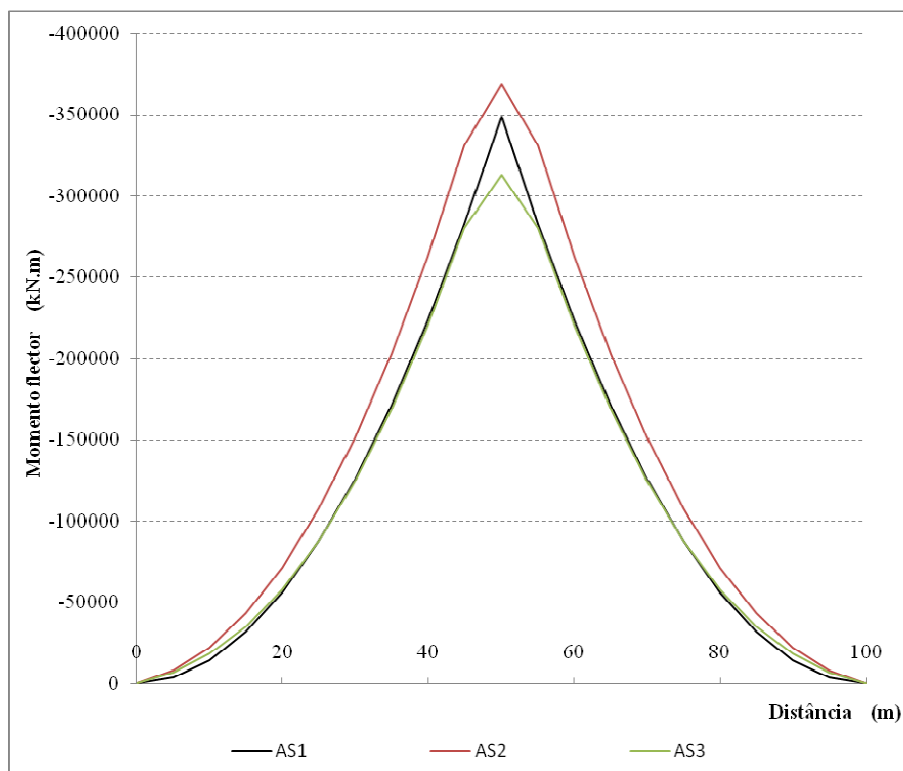


Fig. 38 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio para as 3 soluções-tipo iniciais (AS1, AS2 e AS3)

Note-se que o momento flector mais elevado ocorre para o caso em que a altura do tabuleiro é constante e a espessura do banzo inferior é variável (AS2). Isto justifica-se porque com esta solução o peso das aduelas mais distantes do pilar é maior do que nos outros casos, conduzindo a momentos flectores maiores. Os valores dos momentos são de 370000 kN.m, 350000 kN.m e 320000 kN.m consoante estejamos perante a solução AS1, AS2 ou AS3, respectivamente. Com estes resultados obtém-se as seguintes tensões:

Tabela 4 – Comparação das tensões devidas ao peso próprio da estrutura para as 3 soluções-tipo iniciais (AS1 a AS3)

Secção transversal		Avanços Sucessivos	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	AS1 - H constante (H=4,0m ; e=0,20m)	-30,76	18,02
	AS2 - H constante e e variável (H=4,0m ; e=0,60m)	-19,39	18,03
	AS3 - H variável (H=6,5m ; e=0,20m)	-14,18	8,85

Teve-se como objectivo inicial aproximar as tensões de compressão a 20% de f_{ck} . Esta opção foi tomada uma vez que ainda se tem de considerar o esforço de compressão devido à aplicação do pré-esforço, que é significativo, os esforços da acção das sobrecargas rodoviárias e revestimentos e que se pretende obter tensões que cumpram os limites referidos no início deste capítulo.

$$0,20 \cdot f_{ck} = 0,20 \cdot 45 = 9 \text{ MPa}$$

Admitindo os 9 MPa como tensão limite de compressão para a acção isolada do peso próprio da estrutura, facilmente se percebe que terá de ser iniciado um processo iterativo uma vez que, nenhuma das soluções anteriores é satisfatória. A tensão de compressão com valor absoluto menor é para a solução AS3 e vale 14 MPa contra os 9MPa pretendidos.

No entanto, através da análise dos resultados da tabela 4 prevê-se que a solução de um tabuleiro com altura variável das secções transversais será a que mais se adequa ao caso dos avanços sucessivos. Consequentemente, é com este tipo de geometria que se procede às próximas iterações.

Com base nas equações 4.1 a 4.4, compreende-se que uma vez que quer para combinações raras quer para combinações quase permanentes, o coeficiente de majoração do peso próprio da estrutura e da acção do pré-esforço é o mesmo e igual a 1,0, a limitação de tensões para a combinação quase permanente deve ser a condicionante visto ser mais exigente ao nível da tensão limite e não haver uma diferença significativa no valor das acções aplicadas à estrutura para um e outro caso. Isto deve-se à influência do peso próprio no dimensionamento, segundo este processo, ser muito significativa perante as outras acções, principalmente as sobrecargas rodoviárias.

Relativamente às tracções, devem ser limitadas a f_{ctk} para que não ocorra fendilhação no betão e deve ser colocada armadura passiva, caso seja necessário. É com a aplicação do pré-esforço que se consegue reduzir significativamente as tracções e cumprir o Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções.

Para além da verificação das tensões devido à acção isolada do peso próprio da estrutura é também efectuada uma verificação tendo em conta o processo construtivo, construção aduela a aduela, e a capacidade resistente do betão.

ii) Verificação das tensões de compressão devido ao peso próprio da estrutura e das sobrecargas construtivas (peso do carro móvel e restantes cargas construtivas)

Na tabela 5 estão apresentados os valores dos momentos flectores actuates, em cada aduela, para cada fase de construção. O estudo pressupõe a construção de uma aduela em cada fase considerada. Para além do peso próprio, que aumenta aquando da construção de uma nova aduela, considerou-se a acção das sobrecargas construtivas. Encontra-se também nessa tabela o valor da tensão característica resistente do betão C 45/55 para o tempo decorrido em cada fase.

De notar que se considerou como tensão limite $0,7 \cdot f_{ck}(t)$ uma vez que à acção do peso próprio e das sobrecargas construtivas falta ainda adicionar o efeito do pré-esforço que aumentará o valor das compressões e por outro lado reduzirá significativamente as tracções que não são verificadas nesta fase por se admitir que estão controladas pelo pré-esforço.

Considerou-se o peso próprio da estrutura, o peso do carro de avanços e o peso da aduela seguinte ainda com betão líquido. Na figura 39 ilustra-se o modo como estas acções foram consideradas. Por exemplo, aquando da betonagem da aduela 5 os esforços introduzidos são os representados.

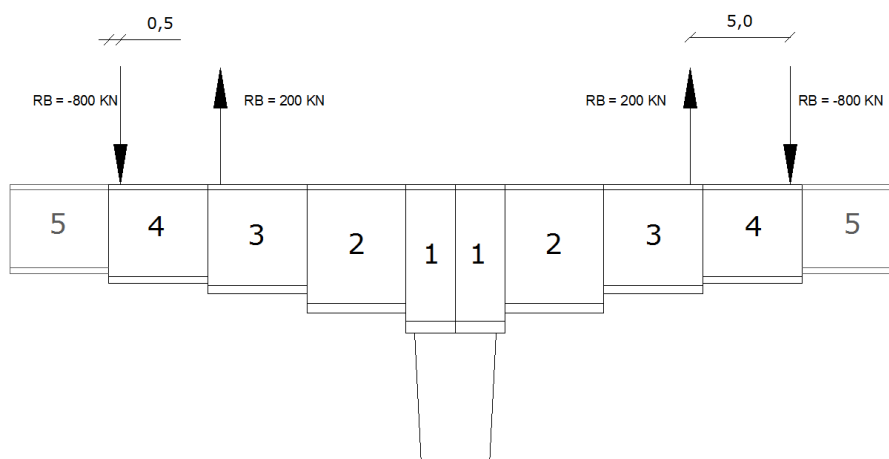


Fig. 39 – Esquema de carregamento considerado para o carro de avanços em faseamento construtivo

Neste caso retirar-se-á o valor dos diagramas de momentos flectores correspondentes às aduelas 1, 2, 3 e 4 e verificar-se-á o valor das tensões. Na figura 40 está representado o diagrama de momentos flectores para esta situação. Estes valores estão na tabela 5 e apresentados da seguinte forma: aos 5 dias verifica-se a aduela 1, aos 10 dias verificam-se as aduelas 1 e 2, aos 20 dias verificam-se as aduelas 1, 2 e 3 e assim sucessivamente até se atingir o ponto de união das consolas.

A partir dos 28 dias a aduela 1, no apoio, apresenta já a sua capacidade resistente final. Quando as consolas começam a ficar cada vez maiores e os momentos flectores mais altos já decorreu mais tempo desde a betonagem da 1ª aduela logo a capacidade resistente na secção mais desfavorável é maior. Analisemos a tabela 5 que permite tecer algumas considerações relativamente a esta verificação.

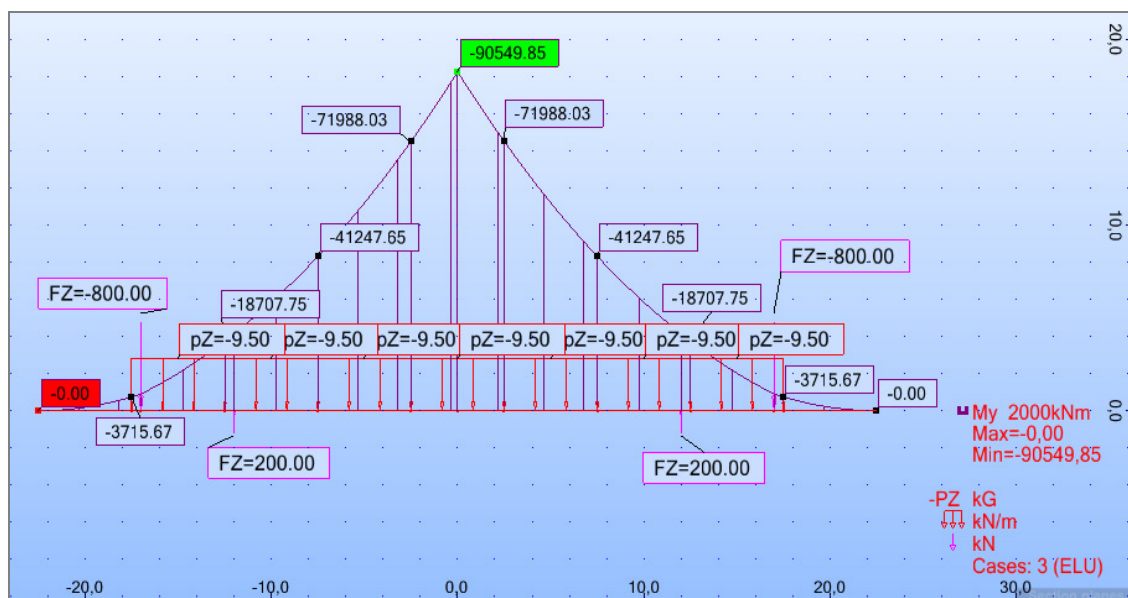


Fig. 40 – Diagrama de momentos flectores devido à acção do peso próprio e sobrecargas construtivas aquando da betonagem da aduela 5

Tabela 5 – Momentos flectores devido à acção do peso próprio, sobrecargas construtivas e carro móvel e capacidade resistente do betão em fase construtiva, para j dias

t (dias)	$\beta_{cc}(t)$ Mpa	$f_{cm}(t)$ Mpa	$f_{ck}(t)$ Mpa	Momentos flectores kN.m									σ^- Mpa	$0,7 \cdot f_{ck}(t)$ Mpa
5	0,71	37,7	29,7	10875	19719	19215	18708	18203	17697	17192	13195	8750	-1,8	20,8
10	0,85	44,8	36,8	30585	42385	41248	40111	38974	37837	30881	22288		-3,4	25,8
20	0,96	50,6	42,6		57112	71988	69967	67946	65924	55757	42616		-5,0	29,8
28	1,00	53,0	45,0			90550	108125	104965	101807	88175	69880		-6,6	31,5
28	1,00	53,0	45,0				130395	150286	145737	128388	104435		-8,3	31,5
28	1,00	53,0	45,0					176140	197969	176650	146532		-10,1	31,5
28	1,00	53,0	45,0						227276	233211	196424		-11,8	31,5
28	1,00	53,0	45,0							264685	254365		-12,9	31,5
28	1,00	53,0	45,0								356920		-16,2	31,5

Os valores dos momentos flectores apresentados na tabela anterior devem ser interpretados da seguinte forma: a negrito representa-se sempre o momento flector na secção de encastramento (apoio) e a primeira linha corresponde ao momento flector na aduela imediatamente anterior à que se encontra em fase de betonagem. Na coluna mais à esquerda apenas se encontra betonada a primeira aduela, nas colunas mais à direita, avançando aduela a aduela, atinge-se a zona de fecho das consolas.

Como se pode verificar na tabela anterior, a tensão máxima em fase construtiva, sem consideração dos efeitos do pré-esforço, nunca ultrapassa a tensão resistente de compressão e a folga que existe para a aplicação do pré-esforço é grande, de onde se conclui que se pode proceder a uma optimização da solução sem ter que fazer novamente esta verificação uma vez que se procura uma solução que conduza a tensões menores.

4.2.1.2. Optimização da solução para os avanços sucessivos

Com base nos resultados das soluções consideradas anteriormente e da análise de diversos exemplos de pontes e viadutos com grandes vãos e construídos pelo método dos avanços sucessivos, prosseguiu-se com várias iterações considerando uma altura variável do tabuleiro, e introduzindo uma variação longitudinal da espessura do banzo inferior, com vista a encontrar a solução óptima.

Relativamente à solução AS3, a nova aproximação (AS3a) baseia-se na secção da figura 41, com altura total do caixão (**H**) de 6,5m na zona do apoio e 2,25m a meio vão, mantendo a relação e restantes dimensões da solução AS3. No entanto, devido à necessidade de se reduzir as tensões no apoio, é considerado um espessamento do banzo inferior (**e**), passando este a ser de 0,65m no apoio e 0,20m a meio vão. Em seguida e à semelhança do que foi feito anteriormente, expõem-se os resultados obtidos.

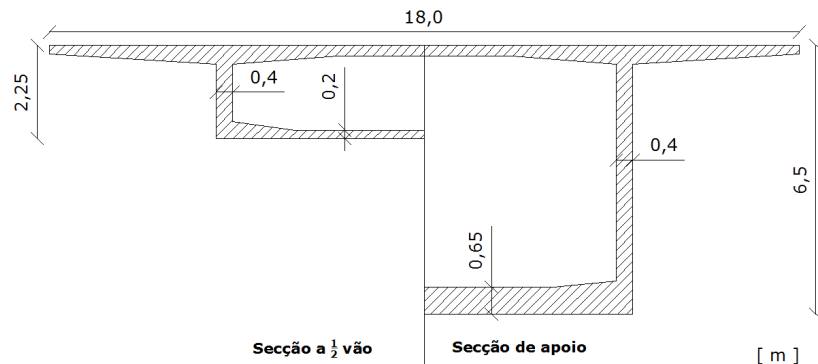


Fig. 41 – Secções transversais da solução AS3a

Tabela 6 – Propriedades das secções para **H** = variável e **e** = variável para AS3a

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I_y (m ⁴)	y_{inf} (m)	y_{sup} (m)
1	H=6,5m ; e=0,65m	17,515	127,682	3,166	3,334
2	H=5,5m ; e=0,55m	15,795	82,976	2,806	2,694
3	H=4,5m ; e=0,45m	13,69	47,781	2,476	2,024
4	H=4,0m ; e=0,35m	12,52	33,778	2,317	1,683

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)
5	H=3,5m ; e=0,30m	11,74	23,65	2,089	1,411
6	H=3,0m ; e=0,25m	10,95	15,6	1,848	1,152
7	H=2,7m ; e=0,25m	10,71	12,17	1,666	1,034
8	H=2,5m ; e=0,20m	10,17	9,46	1,592	0,908
9	H=2,25m ; e=0,20m	9,965	7,353	1,432	0,818
10	H=2,25m ; e=0,20m	9,965	7,353	1,432	0,818
11	H=2,25m ; e=0,20m	9,965	7,353	1,432	0,818

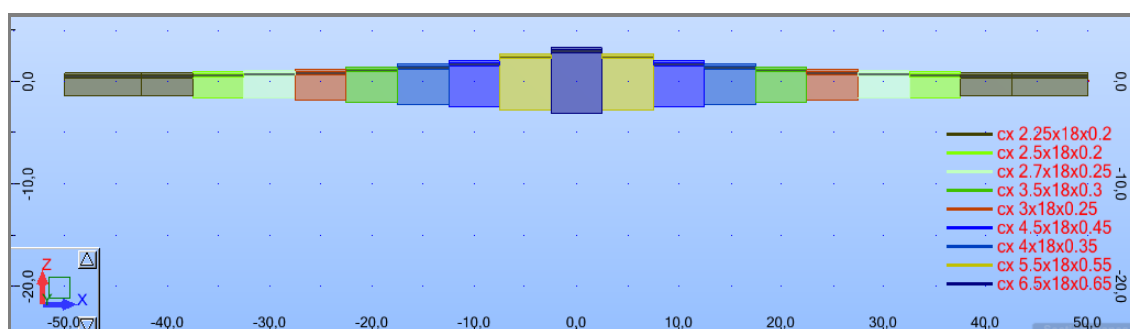


Fig. 42 – Secções consideradas na solução AS3a

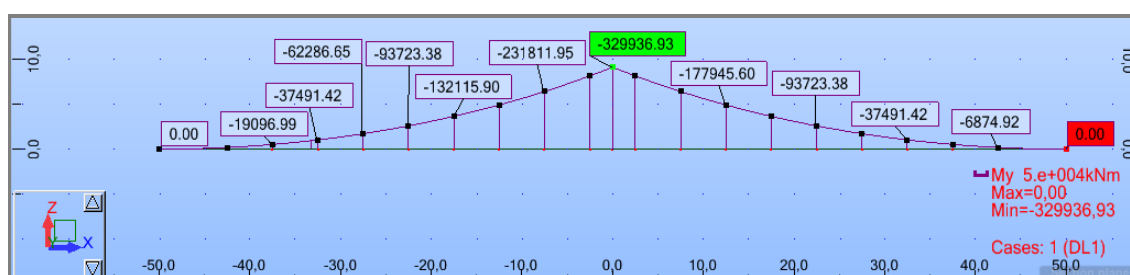


Fig. 43 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3a

Tabela 7 – Comparação das tensões para a solução AS3a, na secção junto ao apoio

Secção transversal		Avanços Sucessivos	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	AS3a - H variável e e variável		
	(H=6,5m ; e=0,65m)	-8,18	8,62

Da tabela 7 conclui-se que a tensão de compressão de 8,18 MPa se apresenta, nesta fase, como um bom resultado uma vez que se aproxima dos 9 MPa (a primeira iteração conduziu a uma tensão de compressão superior de 14,18 MPa). No entanto, proceder-se-á a outra iteração para que se possa optar pela solução que se afigure mais adequada.

A partir do conhecimento dos resultados anteriores, propõem-se novas secções (solução AS3b) com altura total da viga caixão (**H**) de 7,0m no apoio e de 2,25m a meio vão. A espessura do banzo inferior (**e**) é de 0,60m e 0,20m no apoio e a meio vão, respectivamente (ver figura 44). Uma vez que se aumentou a altura da secção, aumentando significativamente a inércia da secção, considerou-se uma menor espessura do banzo inferior do caixão (**e**). Analisando a geometria de todo o tabuleiro é, obviamente, na secção de apoio que se verificam as principais alterações visto ser esta a secção onde, nesta fase, se registam os esforços condicionantes.

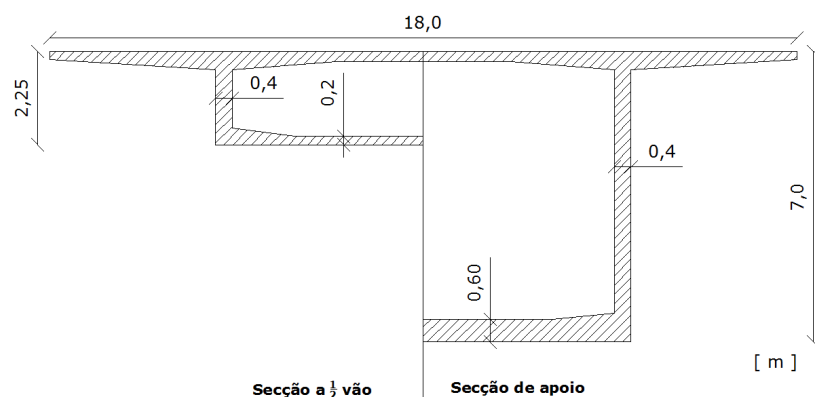


Fig. 44 – Secções transversais da solução AS3b

Tabela 8 – Propriedades das secções para **H** = variável e **e** = variável para AS3b

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)
1	H=7,0m ; e=0,60m	17,3	146,36	3,506	3,494
2	H=6,0m ; e=0,50m	15,46	96,48	3,183	2,843
3	H=5,0m ; e=0,40m	13,71	58,75	2,808	2,192
4	H=4,5m ; e=0,35m	12,92	44,31	2,599	1,901
5	H=4,0m ; e=0,30m	12,14	32,23	2,38	1,62
6	H=3,5m ; e=0,30m	11,74	23,65	2,089	1,411
7	H=3,0m ; e=0,25m	10,95	15,6	1,848	1,152
8	H=2,7m ; e=0,25m	10,71	12,17	1,666	1,034
9	H=2,5m ; e=0,20m	10,17	9,46	1,592	0,908
10	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818
11	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818

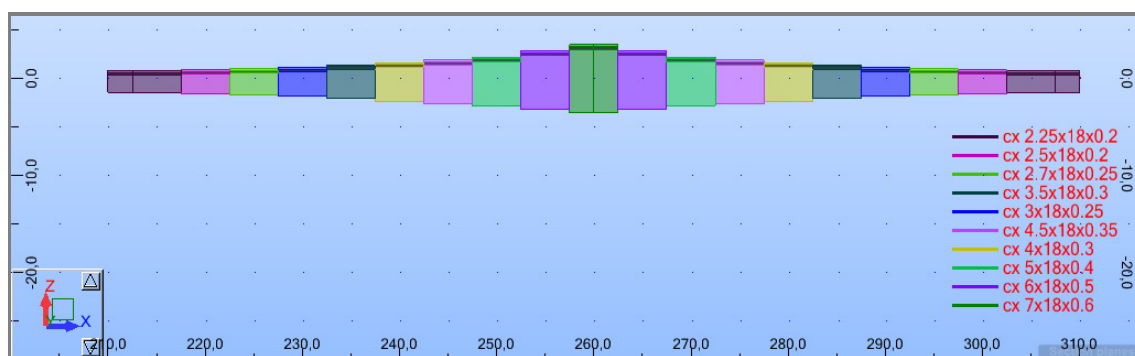


Fig. 45 – Secções consideradas na solução AS3b

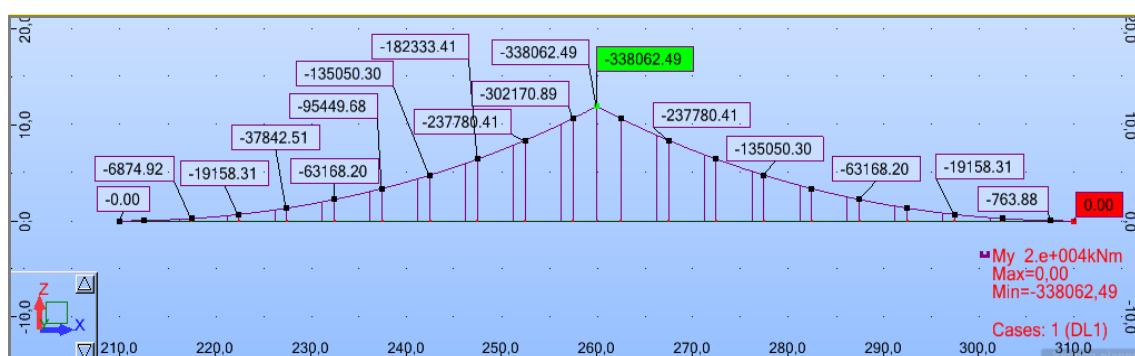


Fig. 46 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3b

Tabela 9 – Comparação das tensões para a solução AS3b, na secção junto ao apoio

Secção transversal		Avanços Sucessivos	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	AS3b - H variável e e variável		
	(H=7,0m ; e=0,60m)	-8,10	8,07

Observou-se não ter havido uma variação significativa dos valores absolutos das tensões relativamente à solução AS3a.

Se os momentos flectores no apoio fossem iguais aos obtidos na solução anterior (AS3a), dado o módulo de flexão desta secção ser superior à anterior, seria óbvia a diminuição da tensão de compressão no apoio. No entanto, o peso próprio das aduela alterou aumentando o valor do momento flector na secção de apoio. Mesmo assim, de acordo com a tabela 9, a tensão de compressão diminuiu ligeiramente. As tensões das fibras inferiores e superiores encontram-se mais equilibradas nesta última solução (AS3b).

Procede-se a uma nova solução, AS3c, onde as variáveis **H** e **e** assumem os valores de 7,5m e 0,55m, respectivamente, na secção de apoio. A meio vão, em concordância com as iterações anteriores, os valores das variáveis mantêm. Pretende-se com esta iteração seguir o mesmo princípio da iteração anterior, aumentando-se a altura total da viga caixão (**H**), diminuindo a espessura do banzo inferior (**e**).

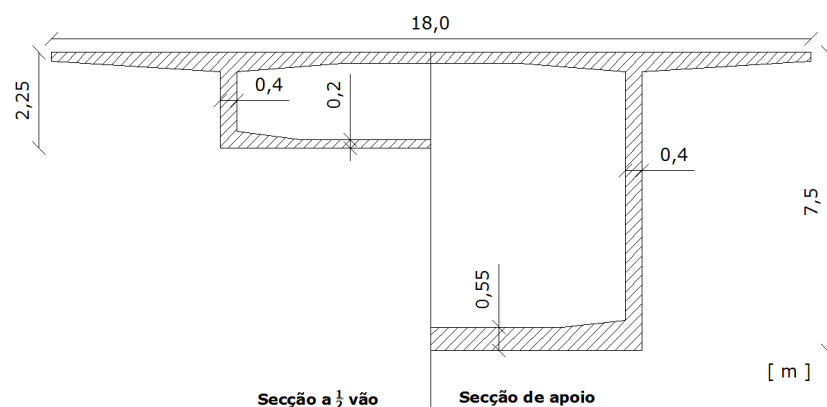


Fig. 47 – Secções transversais da solução AS3c

Tabela 10 – Propriedades das secções para **H** = variável e **e** = variável para AS3c

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)
1	H=7,5m ; e=0,55m	17,16	165,97	3,849	3,651
2	H=6,5m ; e=0,45m	15,29	110,79	3,541	2,959
3	H=5,5m ; e=0,35m	13,72	70,19	3,156	2,344
4	H=4,5m ; e=0,30m	12,54	42,29	2,668	1,832
5	H=4,0m ; e=0,30m	12,14	32,23	2,38	1,62
6	H=3,5m ; e=0,25m	11,35	22,37	2,15	1,35
7	H=3,0m ; e=0,25m	10,95	15,6	1,848	1,152
8	H=2,7m ; e=0,25m	10,71	12,17	1,666	1,034
9	H=2,5m ; e=0,20m	10,17	9,46	1,592	0,908
10	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818
11	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818

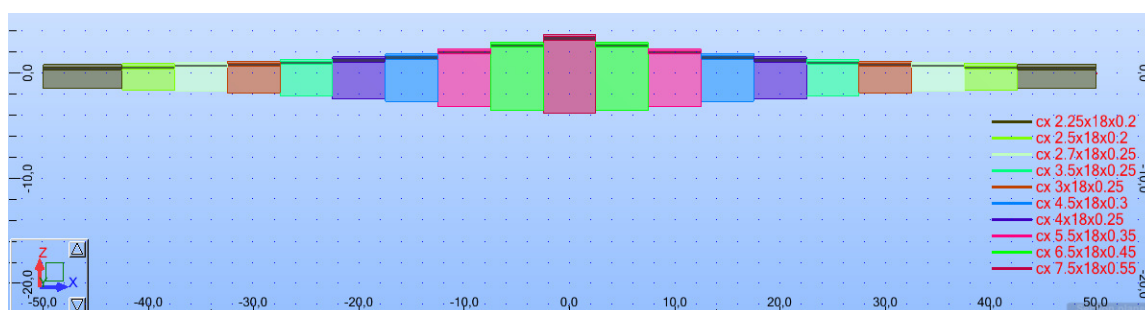


Fig. 48 – Secções consideradas na solução AS3c

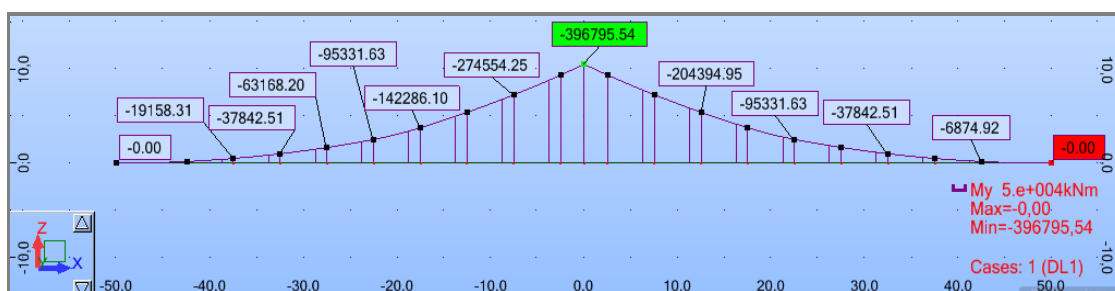


Fig. 49 – Diagramas de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio para a solução AS3c

Tabela 11 – Comparação das tensões para a solução AS3c, na secção junto ao apoio

Secção transversal		Avanços Sucessivos	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	AS3c - H variável e e variável		
	(H=7,5m ; e=0,55m)	-9,21	8,73

Neste caso os momentos flectores são superiores aos momentos flectores das soluções AS3a e AS3b (figura 49) e, apesar de estarmos perante uma secção com um módulo de flexão superior às anteriores, o valor da tensão de compressão é superior. Se por um lado o aumento da capacidade resistente da secção beneficia o controlo das tensões, por outro lado implica o aumento das cargas aplicadas à estrutura, nomeadamente o peso próprio.

Em fase construtiva e antes do fecho das consolas, a estrutura apresenta, unicamente, momentos flectores negativos que são máximos junto aos pilares, na secção de encastramento. Por este facto, apenas se apresentaram os resultados desta secção, que é a condicionante, ou seja, onde as tensões apresentam valores máximos

Apresenta-se a tabela 12 com a evolução das tensões de compressão em função da alteração das variáveis **H** e **e** para as soluções consideradas.

Por lapso, nas tabelas anteriores onde se apresentam as tensões devido ao peso próprio da estrutura, não foi considerado o peso próprio do carro de avanços pelo que na tabela seguinte os valores das tensões já se encontram corrigidos.

Tabela 12 – Evolução dos valores das compressões com a variação de **H** e **e** para as soluções estudadas para os avanços sucessivos (AS3 a AS3c)

Solução	H (m)	e (m)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)
AS3	6,5	0,20	-15,54
AS3a	6,5	0,65	-8,93
AS3b	7,0	0,60	-8,82
AS3c	7,5	0,55	-9,90

Conclui-se que a altura óptima é cerca de 6,5 a 7,0 m. Através da comparação das soluções AS3 e AS3a, em que a única diferença é a espessura do banzo inferior ser de 0,20m no primeiro caso e 0,60 m no segundo, pode-se verificar que este espessamento beneficia significativamente as tensões de compressão reduzindo-as a cerca de metade.

4.2.2. SOBRECARGAS RODOVIÁRIAS E REVESTIMENTOS

Com base no princípio da sobreposição dos efeitos calcularam-se as tensões devido às sobrecargas rodoviárias e restantes revestimentos para a combinação quase permanente de acções às quais se somaram as tensões anteriormente obtidas relativas ao peso próprio da estrutura.

De acordo com o que foi enunciado anteriormente as cargas a considerar nesta fase são: o peso dos restantes revestimentos (betuminoso, passeios, guardas, vigas de bordadura) tomado igual a 20 kN/m^3 que, considerando uma espessura equivalente igual a 8cm, vale $1,6 \text{ kN/m}^2$; a sobrecarga rodoviária de 4 kN/m^2 e a carga de faca de 50 kN/m aplicada em toda a largura do tabuleiro e a considerar a meio vão do vão central de 100 m visto ser a localização que conduz a momentos flectores mais elevados.

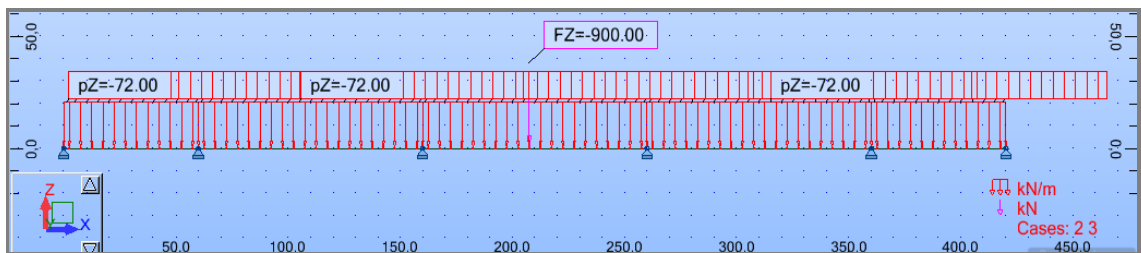
Os valores apresentados neste subcapítulo correspondem à verificação do Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções $1,0 \cdot S_{G,1} + 1,0 \cdot S_{rev.} + \psi_2 \cdot S_{Q,1}$.

De acordo com o RSA o valor reduzido das sobrecargas rodoviárias para a combinação quase permanente de acções, ϕ_2 é igual 0,2, no entanto, considerou-se esse valor igual a 0,4. É um valor conservativo, do lado da segurança que corresponde a ϕ_1 , valor reduzido para a combinação frequente de acções e que é muitas vezes utilizado em projecto deste tipo de pontes. [5]

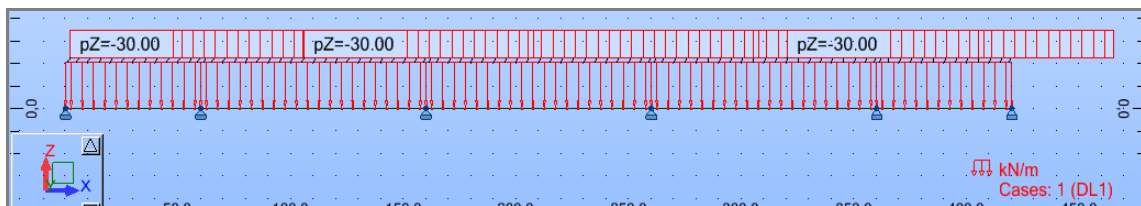
Para a obtenção do diagrama de momentos flectores devido à aplicação do peso dos revestimentos e das sobrecargas rodoviárias, utiliza-se o esquema de cálculo das figuras 50 e 51. Os resultados obtidos para os momentos flectores e com os quais se calculam as tensões da tabela 13 são os apresentados nas figuras 52a, b, c.



Fig. 50 – Modelo de cálculo considerado para AS3a, AS3b e AS3c

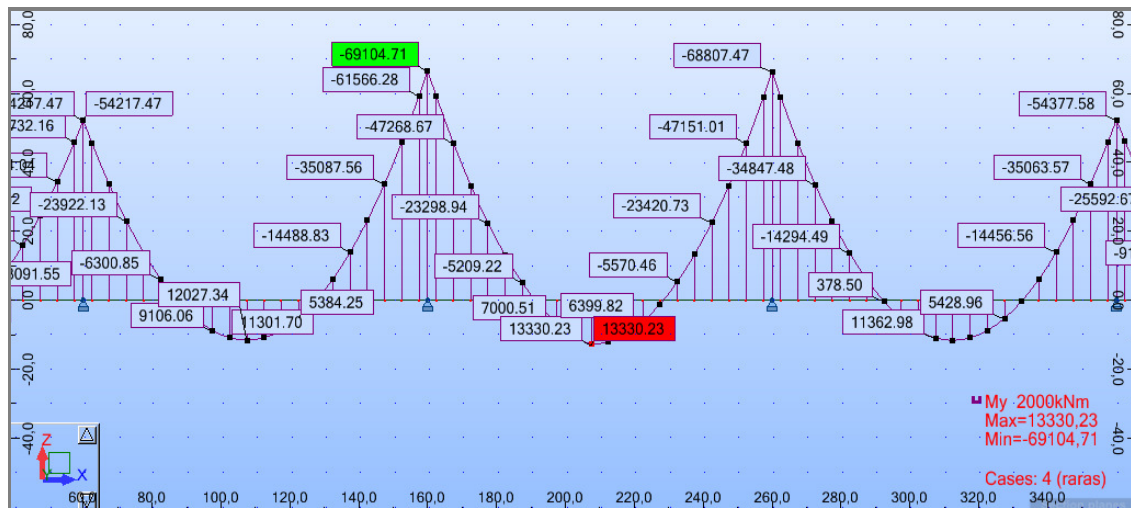


a.

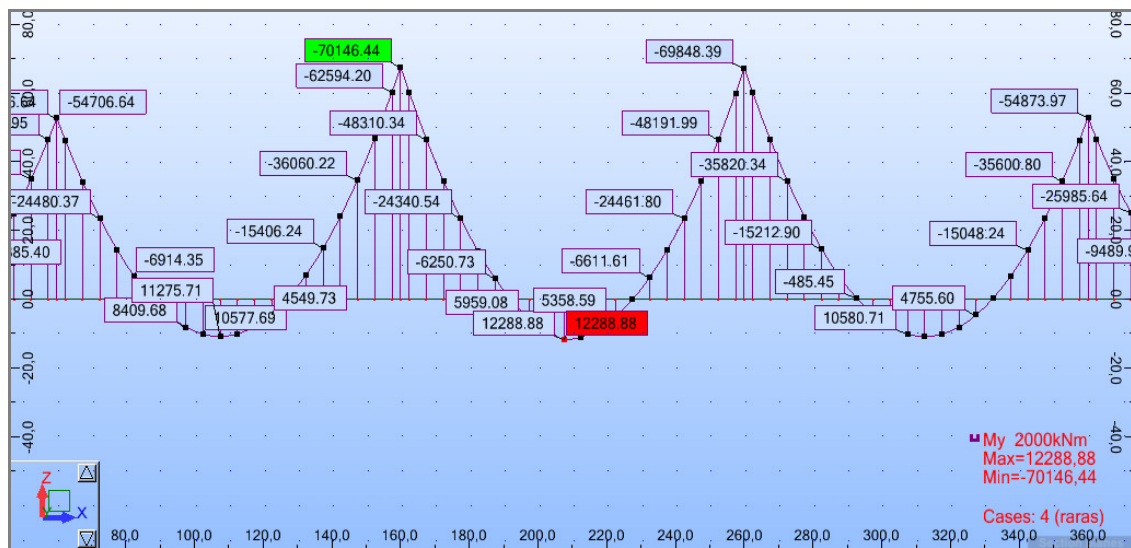


b.

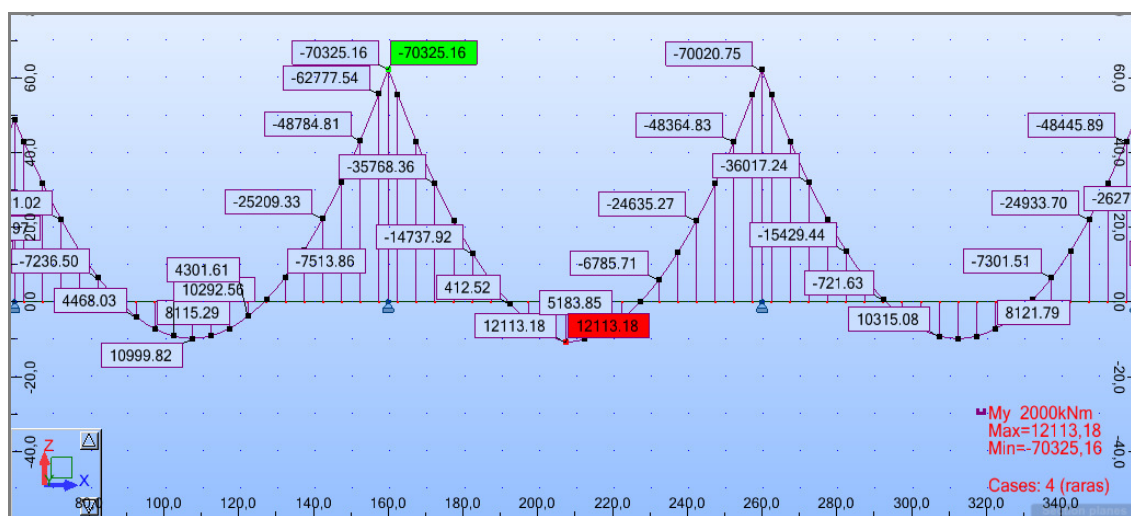
Fig. 51 – Acções consideradas para AS3a, AS3b e AS3c – a. Sobr. e carga de faca | b. Revestimentos



a.



b.



c.

Fig. 52 – Diagramas de momentos flectores devido à sobrecarga, carga de faca e revestimentos

a. AS3a | b. AS3b | c. AS3c

Tabela 13 – Comparação das tensões para os 3 casos em estudo após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias e dos restantes revestimentos

Secção transversal			Peso próprio		Sobrecarga rodoviária e revestimentos		Total	
			$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
AS3a	Apoio	H variav. = 6,5m e variav. = 0,65m	-8,93	9,40	-1,71	1,80	-10,64	11,20
	1/2 Vão	H variav. = 2,25m e variav. = 0,20m			2,60	-1,48	2,60	-1,48
AS3b	Apoio	H variav. = 7,0m e variav. = 0,60m	-8,82	8,79	-1,68	1,67	-10,50	10,46
	1/2 Vão	H variav. = 2,25m e variav. = 0,20m			2,40	-1,37	2,40	-1,37
AS3c	Apoio	H variav. = 7,5m e variav. = 0,55m	-9,90	9,39	-1,63	1,55	-11,53	10,94
	1/2 Vão	H variav. = 2,25m e variav. = 0,20m			2,36	-1,35	2,36	-1,35

Uma tensão de compressão de 10 MPa correspondente ao efeito do peso próprio da estrutura, dos revestimentos e das sobrecargas rodoviárias afigura-se como um resultado satisfatório uma vez que corresponde a aproximadamente a 25% da tensão resistente característica do betão considerado e portanto existe ainda uma folga confortável até o limite de 45% de f_{ck} aquando da contabilização de todos os efeitos, nomeadamente do pré-esforço.

Nesta fase e dado estar-se perante 3 soluções que apresentam valores muito satisfatórios, opta-se por uma das três soluções em questão e prossegue-se com o dimensionamento do pré-esforço para a solução escolhida.

Após uma análise cuidada da tabela 13 constata-se que a solução AS3b, para além de apresentar o menor esforço de compressão no apoio, tem também o menor esforço de tracção, o que conduz, com certeza, a um menor valor do pré-esforço que, consequentemente, não agravará tanto as tensões de compressão. Por este facto, apesar da diferença entre as compressões no apoio para as 3 soluções não serem significativas, prossegue-se com a solução AS3b.

4.2.3. PRÉ-ESFORÇO

O dimensionamento do pré-esforço consiste, à semelhança do procedimento já utilizado, num processo iterativo, iniciando-se este processo com um valor para o pré-esforço superior a aplicar, P_{∞} , de 5000 KN por aduela, na fase construtiva, com funcionamento em consola.

P_{∞} é o valor do pré-esforço útil, ou seja, após consideração de perdas instantâneas e diferidas. De forma a se obter o valor da força de pré-esforço a aplicar no macaco, P'_0 , considerou-se,

simplificadamente, 15% para perdas instantâneas e 10% para perdas diferidas. Consequentemente, o pré-esforço a aplicar no macaco foi considerado, aproximadamente, 25% superior ao P_{∞} considerado nos cálculos.

Os cabos superiores são de traçado rectilíneo e estão a uma distância de 0,10m do bordo superior da viga caixão obtendo-se as excentricidades da tabela 14 que permitem determinar os momentos flectores provocados pela força de compressão aplicada aos cabos. Relativamente aos cabos inferiores, estes acompanham o desenvolvimento do banzo inferior e estão afastados 0,15m do bordo inferior da viga.

Aquando da aplicação do pré-esforço superior, aduela a aduela, a estrutura é isostática logo a determinação dos efeitos da aplicação desta carga é muito simples. O esforço axial introduzido consiste no somatório de todas as forças de compressão introduzidas nos cabos, e o momento flector no apoio (secção mais desfavorável) obtém-se do somatório dos momentos ($P_{\infty}.e$) de cada aduela (ver tabela 14).

Tabela 14 – Propriedades geométricas do tabuleiro e esforços devido à aplicação do pré-esforço superior (AS3b)

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)	e _{inf} (m)	e _{sup} (m)	P ^s _∞ (kN)	P ^s _∞ . e _{sup} . (kN.m)
1	H=7,0m ; e=0,60m	17,3	146,36	3,506	3,494		3,394		3255
2	H=6,0m ; e=0,50m	15,46	96,48	3,157	2,843		2,743	5000	13715
3	H=5,0m ; e=0,40m	13,71	58,75	2,808	2,192		2,092	5000	10460
4	H=4,5m ; e=0,35m	12,92	44,31	2,599	1,901	2,449	1,801	5000	9005
5	H=4,0m ; e=0,30m	12,14	32,23	2,38	1,62	2,23	1,52	5000	7600
6	H=3,5m ; e=0,30m	11,74	23,65	2,089	1,411	1,939	1,311	5000	6555
7	H=3,0m ; e=0,25m	10,95	15,6	1,848	1,152	1,698	1,052	5000	5260
8	H=2,7m ; e=0,25m	10,71	12,17	1,666	1,034	1,516	0,934	5000	4670
9	H=2,5m ; e=0,20m	10,17	9,46	1,592	0,908	1,442	0,808	5000	4040
10	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818	1,282	0,718	5000	3590
11	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818	1,282			
								N = 45000 kN	M = 68150 kN.m

Com os resultados obtidos calcularam-se novas tensões que ajudam a compreender as alterações geradas devido à introdução do pré-esforço superior. Como se pode observar na tabela 15, com uma força de pré-esforço de 5000 kN aplicada por aduela, não se conseguem eliminar as tracções, por isso houve a necessidade de se proceder a novas iterações com diferentes valores de pré-esforço cujos resultados se apresentam, resumidamente, na mesma tabela.

Tabela 15 – Tensões para a solução AS3b após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço superior

Secção transversal	Peso próprio		Sobrecarga rodoviária e revestimentos		Pré-esforço superior				Total	
	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	P_{∞}^s $\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$P_{\infty}^s \cdot e_{sup.}$ $\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
P = 5000kN Apoio $H_{variav.}=7,0m$ $e_{variav.}=0,60m$	-8,82	8,79	-1,68	1,67	-2,60	-2,60	1,63	-1,63	-11,47	6,23
1/2 Vão $H_{variav.}=2,25m$ $e_{variav.}=0,20m$			2,40	-1,37					2,40	-1,37
P = 10000kN Apoio $H_{variav.}=7,0m$ $e_{variav.}=0,60m$	-8,82	8,79	-1,68	1,67	-5,20	-5,20	3,27	-3,25	-12,44	2,01
1/2 Vão $H_{variav.}=2,25m$ $e_{variav.}=0,20m$			2,40	-1,37					2,40	-1,37
P = 11000kN Apoio $H_{variav.}=7,0m$ $e_{variav.}=0,60m$	-8,82	8,79	-1,68	1,67	-5,72	-5,72	3,59	-3,58	-12,63	1,16
1/2 Vão $H_{variav.}=2,25m$ $e_{variav.}=0,20m$			2,40	-1,37					2,40	-1,37
P = 12000kN Apoio $H_{variav.}=7,0m$ $e_{variav.}=0,60m$	-8,82	8,79	-1,68	1,67	-6,24	-6,24	3,92	-3,90	-12,82	0,31
1/2 Vão $H_{variav.}=2,25m$ $e_{variav.}=0,20m$			2,40	-1,37					2,40	-1,37

Após quatro iterações foi encontrado o valor de P_{∞} para o qual as tensões ao nível da fibra superior do apoio quase se anulam. Por outras palavras, aplicando uma força de pré-esforço de 12000 kN, faseadamente em 8 aduelas a partir dos apoios, obtém-se uma compressão total de

108000 kN e um momento de 163560 kN.m na secção do apoio atingindo-se, praticamente, o Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções.

Note-se igualmente que o aumento da força de pré-esforço não traduz um aumento significativo da tensão de compressão na fibra inferior, dada a sua elevada excentricidade. Ao contrário do que se esperava, a tensão de tracção provocada pelos momentos flectores advindos da aplicação do pré-esforço superior na zona do apoio compensam, quase na totalidade, a tensão de compressão introduzida pela força axial de compressão dos cabos deste pré-esforço.

Partindo, desde já, do valor obtido para o pré-esforço superior procura-se agora um valor para o pré-esforço de continuidade (inferior) que anule as tracções nas fibras inferiores nos meios vãos do tabuleiro.

Após o fecho das consolas a estrutura torna-se hiperstática. Assim, é necessário recorrer ao programa de cálculo automático, introduzir o esforço de compressão devido ao pré-esforço inferior e os momentos flectores devido à excentricidade, no final de cada aduela (ver figura 53 e tabela 16) de forma a se obter os diagramas de esforço axial e momentos flectores em todo o tabuleiro. As tensões resultantes com estes esforços estão apresentadas na tabela 17 e caso não se anulem as compressões com o valor do pré-esforço inferior arbitrado proceder-se-á a novas iterações deste valor.

Tabela 16 – Propriedades geométricas do tabuleiro e esforços devido à aplicação do pré-esforço superior e inferior (AS3b)

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)	e _{inf} (m)	e _{sup} (m)	Pré-esforço superior		Pré-esforço inferior	
								P ^s _∞ (kN)	P ^s _∞ . e _{sup.} (kN.m)	P ⁱ _∞ (kN)	P ⁱ _∞ . e (kN.m)
1	H=7,0m ; e=0,60m	17,3	146,36	3,506	3,494		3,394		7812		
2	H=6,0m ; e=0,50m	15,46	96,48	3,183	2,843		2,743	12000	32916		
3	H=5,0m ; e=0,40m	13,71	58,75	2,808	2,192		2,092	12000	25104		
4	H=4,5m ; e=0,35m	12,92	44,31	2,599	1,901	2,449	1,801	12000	21612		
5	H=4,0m ; e=0,30m	12,14	32,23	2,38	1,62	2,23	1,52	12000	18240		
6	H=3,5m ; e=0,30m	11,74	23,65	2,089	1,411	1,939	1,311	12000	15732	2000	3878
7	H=3,0m ; e=0,25m	10,95	15,6	1,848	1,152	1,698	1,052	12000	12624	2000	3396
8	H=2,7m ; e=0,25m	10,71	12,17	1,666	1,034	1,516	0,934	12000	11208	2000	3032
9	H=2,5m ; e=0,20m	10,17	9,46	1,592	0,908	1,442	0,808	12000	9696	2000	2884
10	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818	1,282	0,718	12000	8616	2000	2564
11	H=2,25m ; e=0,20m	9,97	7,35	1,432	0,818	1,282					
								N = 108000 kN	M = 163560 kN.m		

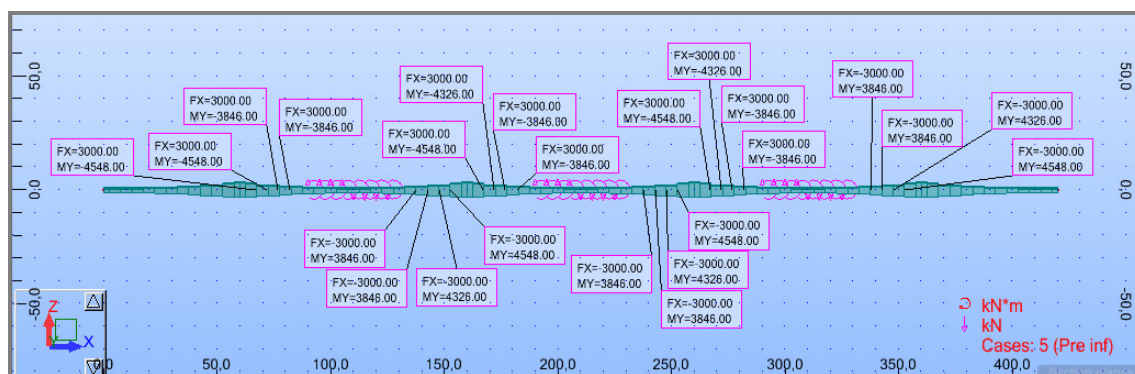


Fig. 53 – Esquema de carregamento a aplicar ao tabuleiro para determinação dos esforços devido aos efeitos do pré-esforço inferior (AS3b)

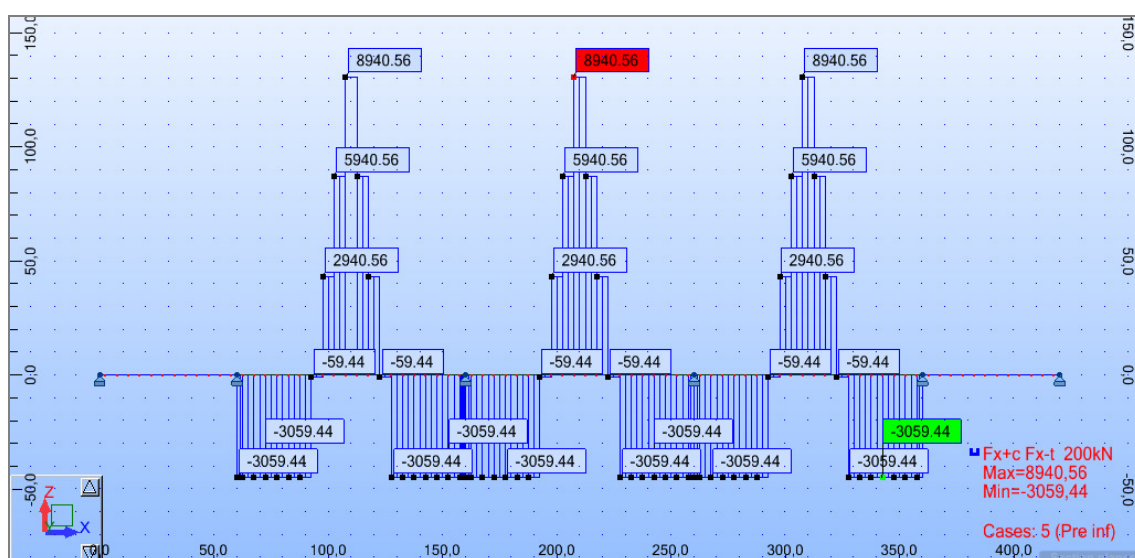


Fig. 54 – Diagrama de esforço axial resultante da aplicação do pré-esforço inferior (AS3b)

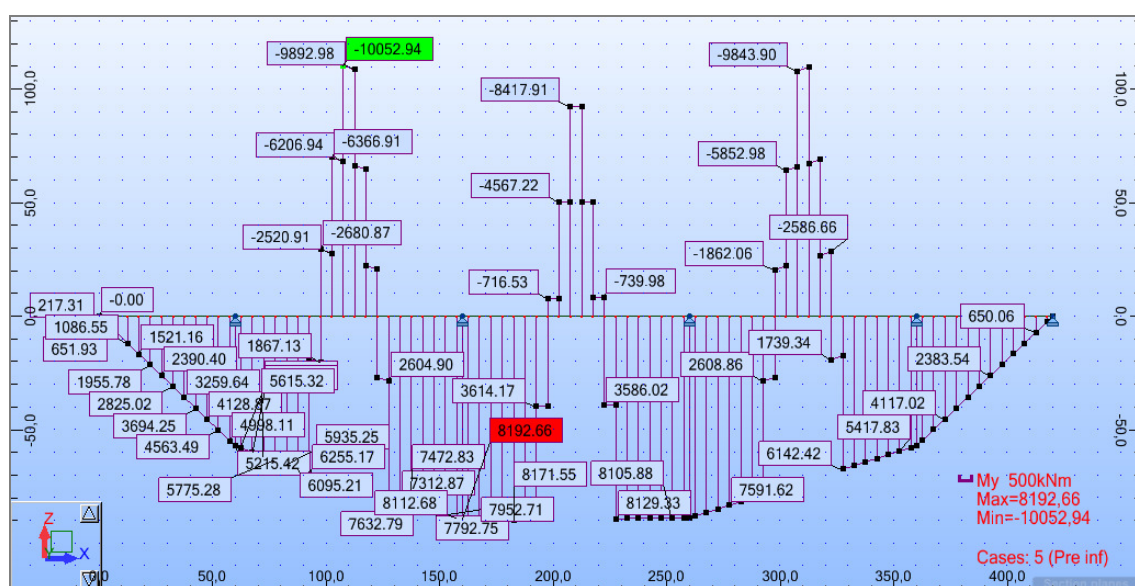


Fig. 55 – Diagrama de momentos flectores resultante da aplicação do pré-esforço inferior (AS3b)

Dos resultados constantes na tabela anterior foi necessária uma 2ª iteração para se chegar a um valor satisfatório das tensões, cumprindo o Estado Limite de Descompressão a meio vão. De notar que não se verifica um grande aumento das tensões de compressão nas fibras anteriormente comprimidas. Propõe-se a consideração de um valor para o pré-esforço inferior de 3000 kN por aduela e aplicado nas 4 aduelas centrais, a meio vão.

A disposição dos cabos de pré-esforço e correspondentes forças a aplicar encontram-se esquematizados na figura 56.

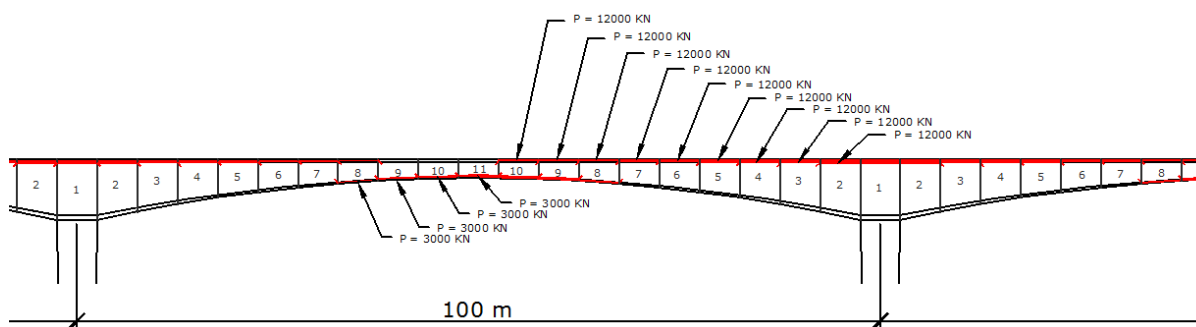


Fig. 56 – Pré-esforço superior e inferior a aplicar ao tabuleiro (AS3b) – esquematização de um vão tipo de 100m

Assim verifica-se o Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções em todas as fibras excepto na fibra superior da secção sobre o pilar. Está-se perante um tabuleiro com todas as suas fibras praticamente comprimidas, cujas compressões são sempre inferiores a 45% da tensão resistente do betão à compressão, uma vez que a tensão máxima de compressão é de 12,45 MPa correspondente a cerca de 28% de f_{ck} . Relativamente à tensão de tracção, existente sobre os apoios, apresenta valor igual a 0,30 MPa inferior aos 4,90 MPa, limite de resistência à tracção considerado.

Convém realçar que no presente trabalho não foram considerados os efeitos diferidos, como a fluência e retracção. A fluência, no caso do peso próprio da estrutura e depois da união das consolas provoca, a longo prazo, uma redistribuição de esforços que consiste numa diminuição dos momentos flectores negativos no apoio e um aumento dos momentos flectores positivos a meio vão, aproximando-se o diagrama de momentos flectores a longo prazo do diagrama de momentos flectores obtido se a aplicação das cargas fosse instantânea e no tabuleiro contínuo. Assim há uma tendência para a diminuição da tensão de compressão no apoio.

4.3. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

4.3.1. PESO PRÓPRIO E SOBRECARGAS CONSTRUTIVAS

Em primeiro lugar e à semelhança do que se fez para os avanços sucessivos, determinaram-se as tensões devido ao peso próprio da estrutura durante a construção da obra de arte para as 3 soluções-tipo iniciais (C1, C2 e C3) descritas no início deste capítulo. Posteriormente foi feita uma verificação das tensões considerando também a acção das sobrecargas construtivas. Neste caso as tensões limitam-se apenas à capacidade resistente do betão para os j dias decorridos após a betonagem de cada tramo.

A determinação dos diagramas de momentos flectores é faseada recorrendo ao princípio da sobreposição de efeitos. No Anexo A encontram-se os diagramas e tabelas que permitiram determinar os diagramas de momentos flectores finais. No entanto e para que seja mais simples o seguimento deste

trabalho, apresentam-se, neste capítulo, apenas os resultados finais que permitem uma compreensão clara do trabalho.

4.3.1.1. Soluções tipo iniciais – C1, C2 e C3

i) Consideração do peso próprio do tabuleiro

Na figura 57 estão representados os diagramas de momentos flectores considerando-se o faseamento construtivo, para a acção isolada do peso próprio do tabuleiro, para as 3 soluções-tipo consideradas (C1, C2 e C3). Os diagramas correspondentes a cada fase de construção pelo método do cimbra auto-lançável podem ser consultados no Anexo A, como foi dito anteriormente. Na tabela 18 encontram-se as tensões obtidas.

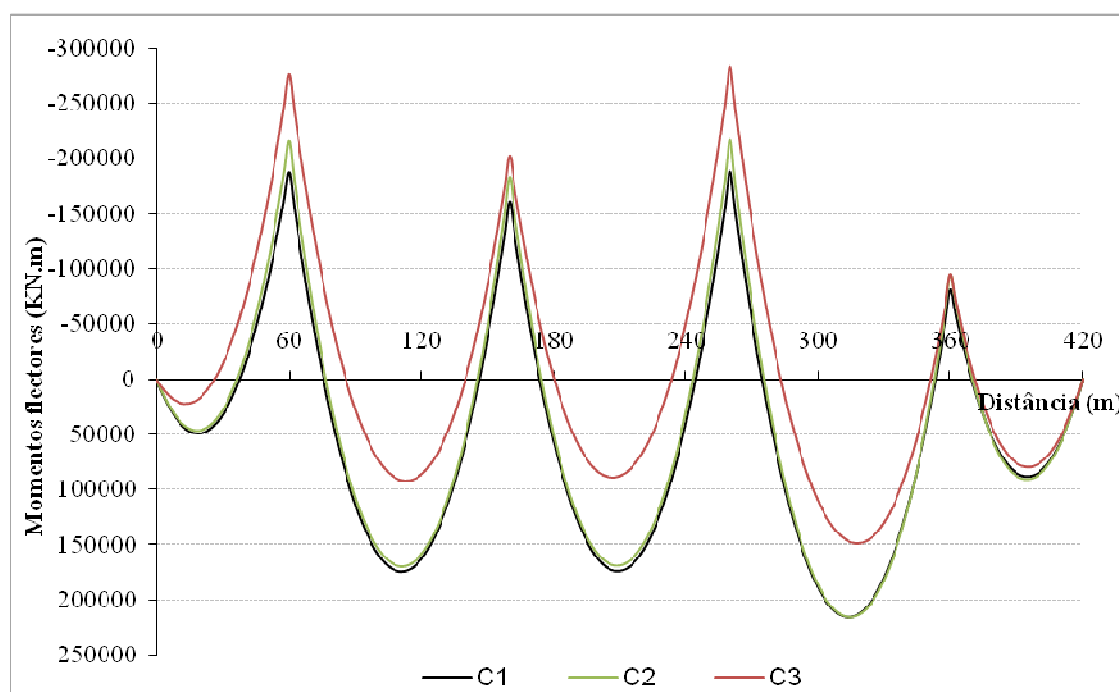


Fig. 57 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para as 3 soluções-tipo iniciais (C1, C2 e C3)

Tabela 18 – Comparação das tensões para as 3 soluções-tipo iniciais para a acção isolada do peso próprio da estrutura (C1 a C3)

Secção transversal		Cimbra	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C1 - H constante (H=4,0m ; e=0,20m)	-16,66	9,76
	C2 - H constante e e variável (H=4,0m ; e=0,60m)	-11,40	10,60
	C3 - H variável (H=6,5m ; e=0,20m)	-12,85	8,02
	C1 - H constante (H=4,0m ; e=0,20m)	19,00	-11,13

Secção transversal		Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
1/2 Vão	C2 - H constante e e variável (H=4,0m ; e=0,20m)	19,00	-11,13
	C3 - H variável (H=2,25m ; e=0,20m)	28,97	-16,55

Da análise destes valores não existe ainda nenhuma solução próxima dos 9 MPa da tensão de referência inicial, no entanto verifica-se que a solução mais equilibrada é a que tem altura total da viga caixão (**H**) constante e a espessura do banzo inferior (**e**) variável sendo esta espessura maior no apoio e menor a meio vão.

Apesar de no apoio a solução com altura variável apresentar uma tensão de compressão baixa e tracções também baixas, apresenta por outro lado tensões elevadas a meio vão. Consequentemente, optou-se por prosseguir o dimensionamento adoptando a solução de altura constante e espessura do banzo inferior variável procurando melhorar as tensões, quer de tracção quer de compressão, no apoio e a meio vão.

Nos subcapítulos seguintes são apresentadas as várias iterações realizadas com o objectivo de obter melhores resultados.

ii) Verificação das tensões de compressão devido ao peso próprio da estrutura e das sobrecargas construtivas (peso do carro móvel e restantes cargas construtivas)

Para além da verificação das tensões devido à acção isolada do peso próprio da estrutura foi também efectuada uma verificação tendo em conta o processo construtivo, construção tramo a tramo e a capacidade resistente do betão. Esta verificação foi feita para o caso em que a altura total da viga é constante e a espessura do banzo inferior é variável. Tal opção deveu-se ao facto de que sendo esta a situação a estudar posteriormente é com este caso que é possível tecer algumas conclusões.

Considerou-se um peso de 5kN/m^2 correspondente ao peso próprio do cimbra autolancável incluindo cofragens. Dado a largura do tabuleiro ser de 18m tem-se 90 kN/m para o peso próprio do cimbra e cofragens. Aplicando esta carga uniformemente distribuída a uma estrutura simplesmente apoiada com um vão de 100 m e uma consola de 15 m – correspondente a 1/5 do vão – e considerando também o peso do betão líquido do tramo a construir (representado na figura 58 a tracejado) obtêm-se as reacções nos apoios de 14400 kN e 20600 kN. A carga de 14400 kN deve ser introduzida na consola enquanto a carga de 20600 kN vai directamente para o pilar não introduzindo esforços no tabuleiro.

Com estas acções calcularam-se os diagramas de momentos flectores de acordo com o esquema representado na figura seguinte.

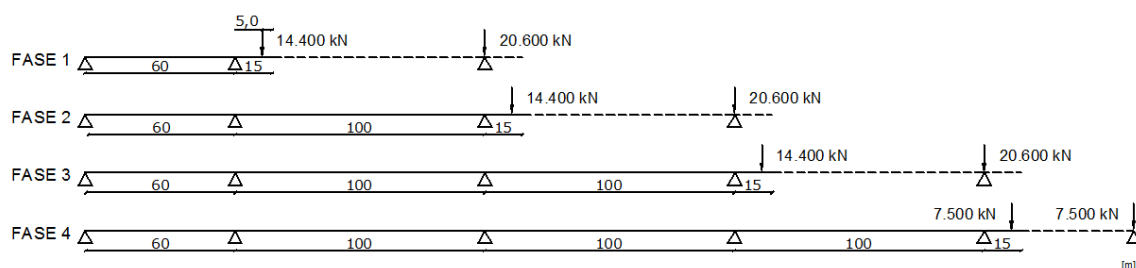


Fig. 58 – Esquema de cálculo em faseamento construtivo devido à betonagem do tramo seguinte do tabuleiro

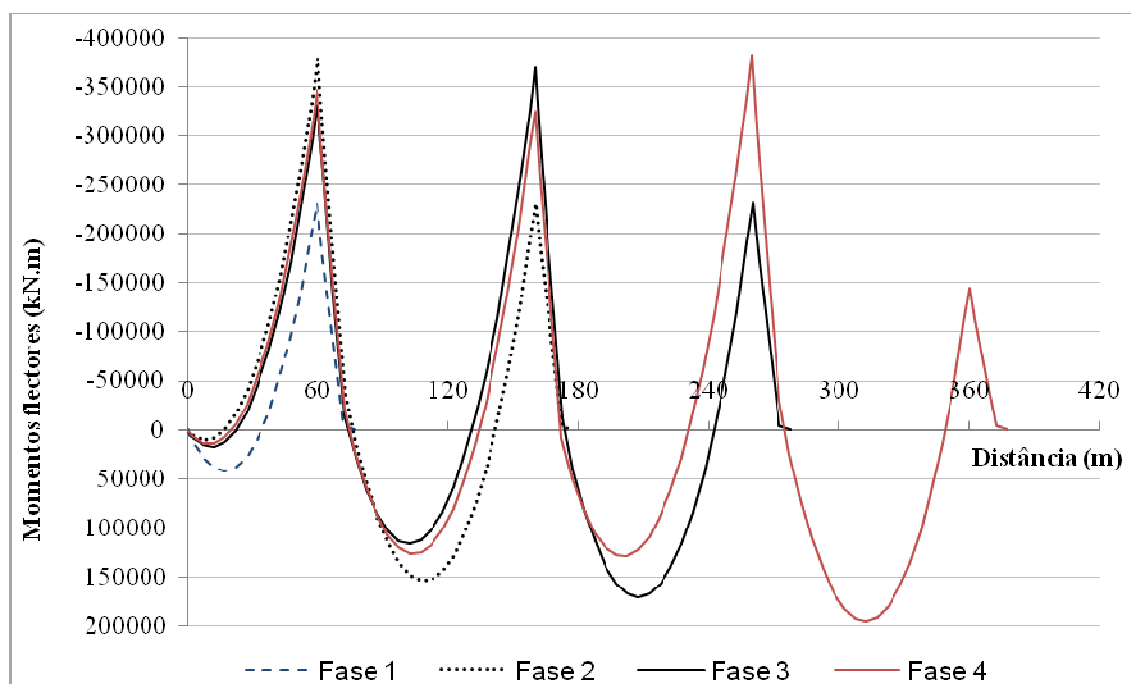


Fig. 59 – Diagramas de momentos flectores devido ao peso próprio da estrutura e construção do tramo seguinte do tabuleiro para cada fase de construção

A figura 59 permite verificar que o momento flector negativo máximo, no apoio, tem o valor de 380000 kN.m e o momento flector positivo máximo vale 190000 kN.m. Com estes momentos o valor das tensões no apoio e a meio vão são os apresentados na tabela 19.

Considerando que o tramo seguinte é betonado 15 dias após a betonagem do primeiro tramo, são também apresentadas na tabela seguinte as tensões limite do betão.

Uma vez que à acção do peso próprio e das sobrecargas construtivas falta adicionar o efeito do pré-esforço (que aumentará o valor das compressões e reduzirá significativamente as tracções que não são verificadas nesta fase por se admitir que estão controladas pelo pré-esforço), pretende-se que as compressões obtidas se encontrem ainda relativamente afastadas do valor considerado como limite. Pelo que se considera 70% da capacidade resistente do betão como valor limite para as tensões de compressão instaladas na secção para a acção do peso próprio da estrutura e sobrecargas construtivas.

Tabela 19 – Comparação das tensões em fase construtiva considerando a acção do peso próprio do tabuleiro e as sobrecargas construtivas

t (dias)	$\beta_{cc}(t)$ Mpa	$f_{cm}(t)$ Mpa	$f_{ck}(t)$ Mpa	Momentos kN.m		σ^- Mpa	$0,7 \cdot f_{ck}(t)$ Mpa
				Apoio	1/2 vão		
15	0,91	48,4	40,4	-231000		-12,2	28,3
15	0,91	48,4	40,4		190000	-9,8	28,3
30	1,00	53,0	45,0	-380000		-19,7	31,5

Como se pode observar as tensões calculadas não ultrapassam as tensões limite, ficam até relativamente distantes. Pode-se concluir que não será necessário efectuar uma nova verificação deste tipo uma vez que para além de existir uma folga para as tensões limite, é provável que, com o aumento das inércias nas próximas iterações, estas tensões sejam ainda mais baixas.

4.3.1.2. Optimização da solução para o cimbre autolanzável

A partir dos resultados obtidos e com base na solução C2, partiu-se para uma nova aproximação (C2a) pretendendo-se a redução das compressões ao nível da fibra inferior no apoio e das fibras superiores a meio vão. Para tal optou-se por manter a altura total da viga caixão (**H**) igual a 4,0 m e aumentar a espessura do banzo inferior (**e**) no apoio para 0,80m, refazendo-se a distribuição geométrica longitudinalmente. As secções consideradas são as apresentadas nas figuras 60 e 61 e as correspondentes tensões estão na tabela 20. Na figura 62 apresenta-se o diagrama de momentos flectores para esta solução.

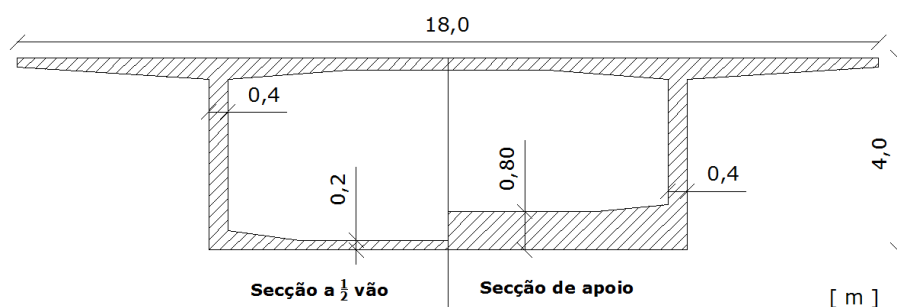


Fig. 60 – Secções transversais da solução C2a

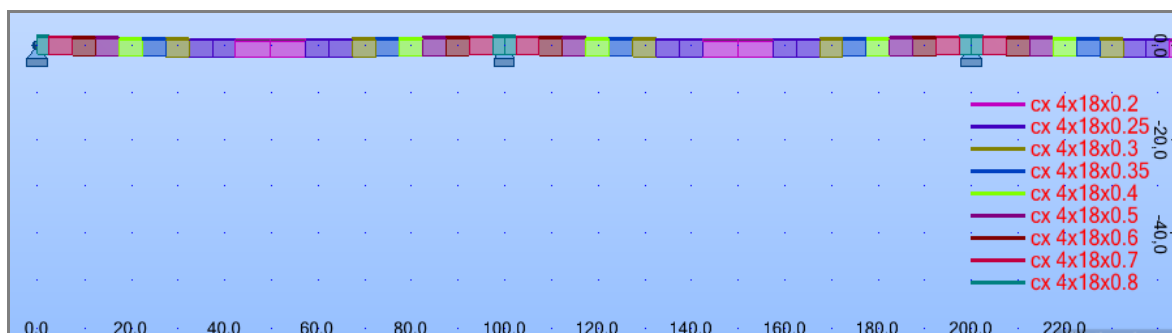


Fig. 61 – Secções consideradas na solução C2a

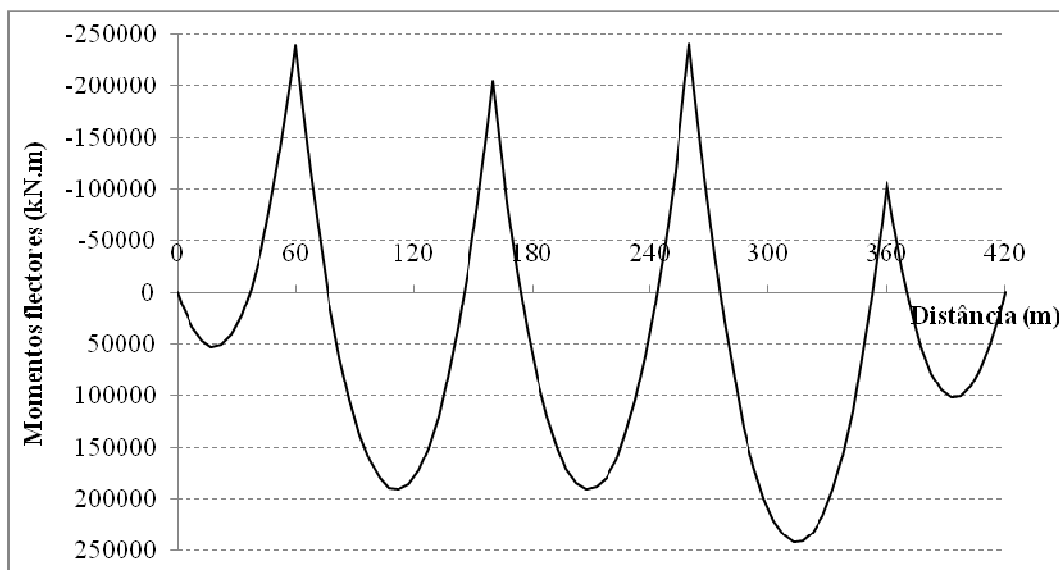


Fig. 62 – Diagrama de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C2a

Tabela 20 – Comparação das tensões para a solução C2a, na secção junto ao apoio e a meio vão

Secção transversal		Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2a - H constante e e variável		
	(H=4,0m ; e=0,80m)	-9,88	11,90
1/2 Vão	C2a - H constante e e variável		
	(H=4,0m ; e=0,20m)	21,37	-12,52

Analisando as compressões obtidas para esta iteração rapidamente se percebe que, como era de esperar, estas diminuíram no apoio devido ao aumento da inércia da secção transversal nesta zona e aumentaram a meio vão dado não se ter alterado a secção e ter-se aumentado o peso próprio de toda a estrutura.

Parte-se para uma nova iteração com o objectivo principal de diminuir as compressões a meio vão passando a solução pelo aumento da altura total do tabuleiro (**H**).

A solução anterior levou a considerar a solução C2b com uma altura total da viga caixão (**H**) de 4,2m, superior à anterior, e uma espessura para o banzo inferior (**e**) igual à da secção inicial a variar de 0,60 a 0,20 m. O facto de se manter a espessura do banzo inferior prende-se com o facto de se obterem soluções directamente comparáveis. Na figura 63 mostra-se as secções consideradas.

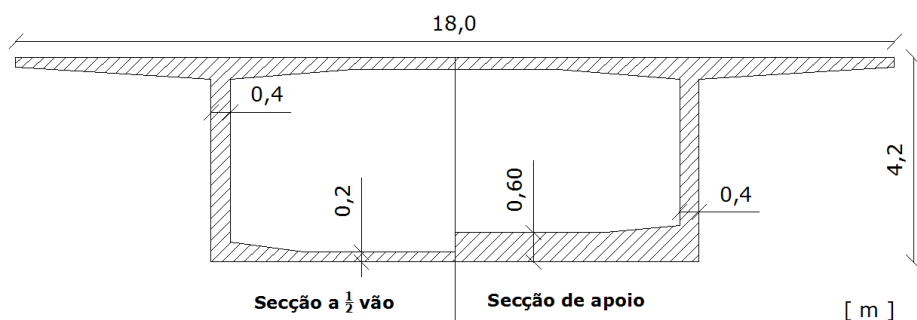


Fig. 63 – Secções transversais da solução C2b

Neste caso e para as soluções seguintes não serão apresentadas as imagens com a representação das secções geométricas consideradas ao longo do tabuleiro, nem o diagrama de momentos flectores devido à acção isolada do peso próprio da estrutura uma vez que são semelhantes aos da solução C2a e não foram considerados relevantes para a compreensão deste trabalho. Optou-se por apresentar apenas uma tabela com as tensões obtidas para cada solução, à semelhança do que se fez para esta solução através da tabela 21.

Tabela 21 – Comparação das tensões para solução C2b, na secção junto ao apoio e a meio vão

Secção transversal		Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2b - H constante e e variável (H=4,2m ; e=0,60m)	-11,04	10,30
1/2 Vão	C2b - H constante e e variável (H=4,2m ; e=0,20m)	18,75	-11,03

Relativamente à solução inicial C2 as tensões da tabela anterior correspondem em parte ao esperado, ou seja, uma redução do valor das compressões no apoio, de -11,40 MPa para -11,04 MPa visto se ter aumentado a resistência em todas as secções transversais do tabuleiro. No entanto a tensão de compressão no apoio aumentou relativamente à iteração anterior C2a (passou de -9,88 MPa para os -11,04 MPa desta solução). Se por um lado com estas secções se aumentou a inércia do tabuleiro, por outro lado alterou-se a posição do centro de gravidade de cada secção e também o valor dos momentos flectores no apoio e a meio vão. Estes valores não são muito distintos dos das soluções anteriores (C2 e C2a) pelo que se conclui que a compressão no apoio aumentou devido ao aumento da distância entre o centro de gravidade da secção e a fibra superior.

No entanto, estes resultados são bastante mais equilibrados do que os obtidos na solução C2a pelo que esta solução se afigura preferível. De qualquer forma ainda estamos com 11 MPa, distantes do objectivo estabelecido dos 9 MPa. Em busca de melhores resultados passa-se à iteração seguinte.

Com base nos valores anteriores e tendo em atenção as variações de tensões verificadas associadas às alterações geométricas, propõe-se a solução C2c com uma secção com altura máxima do caixão (**H**) de 4,5m ao longo de todo o tabuleiro e uma espessura do banzo inferior (**e**) variável de 0,60m no apoio a 0,20m a meio vão (ver figura 64). Manteve-se a variação da espessura optando-se por aumentar apenas a altura total da viga, como se fez na iteração anterior.

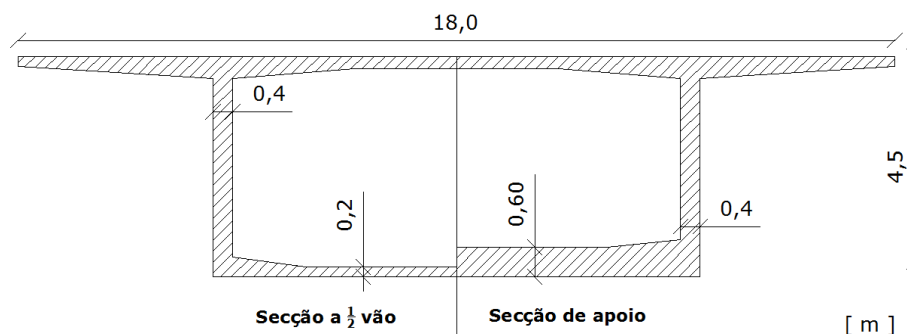


Fig. 64 – Secções transversais da solução C2c

Tabela 22 – Comparação das tensões para a solução C2c, na secção junto ao apoio e a meio vão

Secção transversal		Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2c - H constante e e variável		
	(H=4,5m ; e=0,60m)	-9,66	9,24
1/2 Vão	C2c - H constante e e variável		
	(H=4,5m ; e=0,20m)	16,91	-10,03

Como se pode constatar na tabela 22 houve, efectivamente, uma redução do valor das compressões no apoio e a meio vão apesar de ainda não serem satisfatórias. Dado haver necessidade de se proceder a mais uma iteração (C2d), assume-se também como objectivo, não só reduzir as compressões das fibras mas também as tracções uma vez que assim se pode chegar a soluções com menos pré-esforço.

A solução C2d consiste em aumentar a espessura do banzo inferior (**e**) no apoio mantendo-se a altura total da viga (**H**) igual a 4,5m, como o apresentado na figura 65. Desta forma aumenta-se a inércia da secção junto aos pilares que apesar do aumento do peso próprio da estrutura, deve permitir uma redução das compressões nesta zona. Por outro lado, com o espessamento do banzo inferior (**e**) a posição do centro de gravidade baixa, o que favorece realmente as compressões mas implicará, provavelmente, um aumento das tracções nesta secção. Os resultados estão representados na tabela 23.

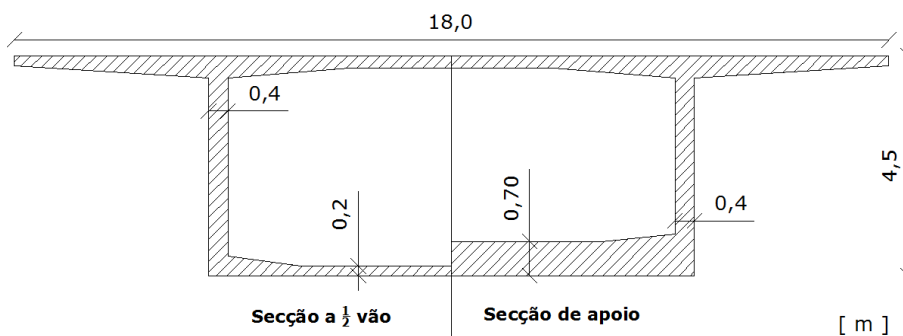


Fig. 65 – Secções transversais da solução C2d

Tabela 23 – Comparação das tensões para a solução C2d, na secção junto ao apoio e a meio vão

Secção transversal	Cimbre	
	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio		
C2d - H constante e e variável (H=4,5m ; e=0,70m)	-9,04	9,56
1/2 Vão		
C2d - H constante e e variável (H=4,5m ; e=0,20m)	17,02	-10,09

Conforme o esperado, conseguiu-se uma diminuição das compressões no apoio mas as tracções aumentaram a meio vão. Apesar de tudo esta secção não é condicionante. Como se pode verificar, devido ao aumento do peso próprio da estrutura as tensões a meio vão aumentaram, principalmente as tracções, o que conduziu a uma nova iteração C2e.

No seguimento das alterações anteriores e perante os resultados já analisados, a solução C2e consiste num aumento da altura total do caixão (**H**) para 4,8m e numa diminuição da espessura do banzo inferior (**e**) no apoio para 0,50m, mantendo os 0,20 m a meio vão (ver figura 66).

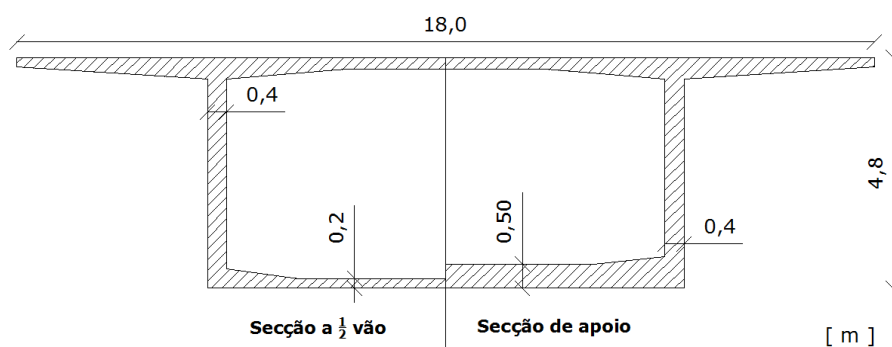


Fig. 66 – Secções transversais da solução C2e

Tabela 24 – Comparação das tensões para a solução C2e, na secção junto ao apoio e a meio vão

	Secção transversal	Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2e - H constante e e variável (H=4,8m ; e=0,50m)	-9,76	8,70
1/2 Vão	C2e - H constante e e variável (H=4,8m ; e=0,20m)	15,34	-9,67

Os resultados apresentados na tabela 24 aproximam-se muito dos valores desejados. De qualquer modo passa-se a uma última solução (C2f) para verificar se é possível tirar partido do espessamento do banzo inferior mantendo a altura total da secção.

De acordo com o raciocínio exposto na solução anterior, nesta última iteração mantem-se a altura de 4,8m da viga caixão (**H**) e aumenta-se para 0,60m a espessura do banzo inferior (**e**) na zona dos apoios. Vejamos a figura 67 e os resultados na tabela 25.

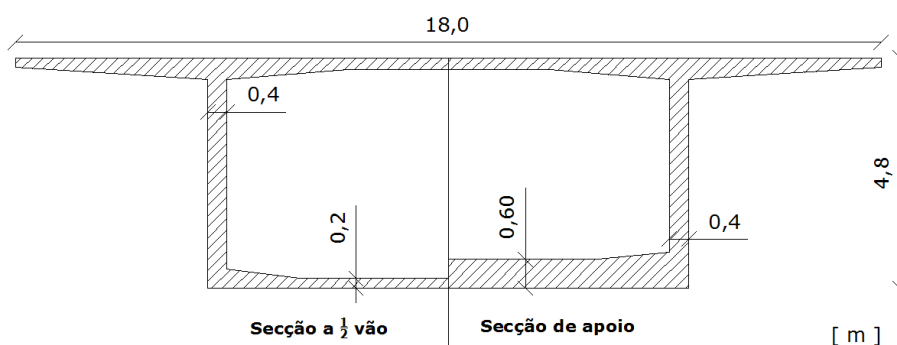


Fig. 67 – Secções transversais da solução C2f

Tabela 25 – Comparação das tensões para a solução C2f, na secção junto ao apoio e a meio vão

	Secção transversal	Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2f - H constante e e variável (H=4,8m ; e=0,60m)	-8,86	9,16

	Secção transversal	Cimbre	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
1/2 Vão	C2f - H constante e e variável (H=4,8m ; e=0,20m)	15,28	-9,63

Relativamente às compressões conseguiu-se, efectivamente, uma redução, mais acentuada junto aos pilares. Verifica-se apenas um valor ligeiramente superior para as tracções, quer no apoio quer a meio vão.

Na tabela 26 apresentam-se os resultados obtidos para as soluções C2 a C2f para que seja possível analisar-se mais facilmente as diferenças devido às alterações das variáveis **H** e **e**.

Tabela 26 – Evolução dos valores das compressões com a variação de **H** e **e** para as soluções estudadas para o cimbra autolanzável (C2 a C2f)

	Solução	H (m)	e (m)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	C2	4,0	0,60	-11,40	10,60
	C2a	4,0	0,80	-9,88	11,90
	C2b	4,2	0,60	-11,04	10,30
	C2c	4,5	0,60	-9,66	9,24
	C2d	4,5	0,70	-9,04	9,56
	C2e	4,8	0,50	-9,76	8,70
	C2f	4,8	0,60	-8,86	9,16
1/2 Vão	C2	4,0	0,20	19,00	-11,13
	C2a	4,0	0,20	21,37	-12,52
	C2b	4,2	0,20	18,75	-11,03
	C2c	4,5	0,20	16,91	-10,03
	C2d	4,5	0,20	17,02	-10,09
	C2e	4,8	0,20	15,34	-9,67
	C2f	4,8	0,20	15,28	-9,63

Através da comparação dos valores constantes na tabela anterior pode-se concluir que se tirou maior partido do aumento da altura total da viga caixão (**H**) do que unicamente do espessamento do banzo inferior (**e**) conforme se pode constatar pela comparação das soluções C2 com C2a e C2 com C2b, respectivamente. No caso do cimbra autolanzável o aumento da altura total da secção beneficia significativamente as tensões. Os valores da tabela representados a negrito são os que mais se aproximam da tensão-objectivo de 9 MPa para esta fase, igual à considerada nos avanços sucessivos.

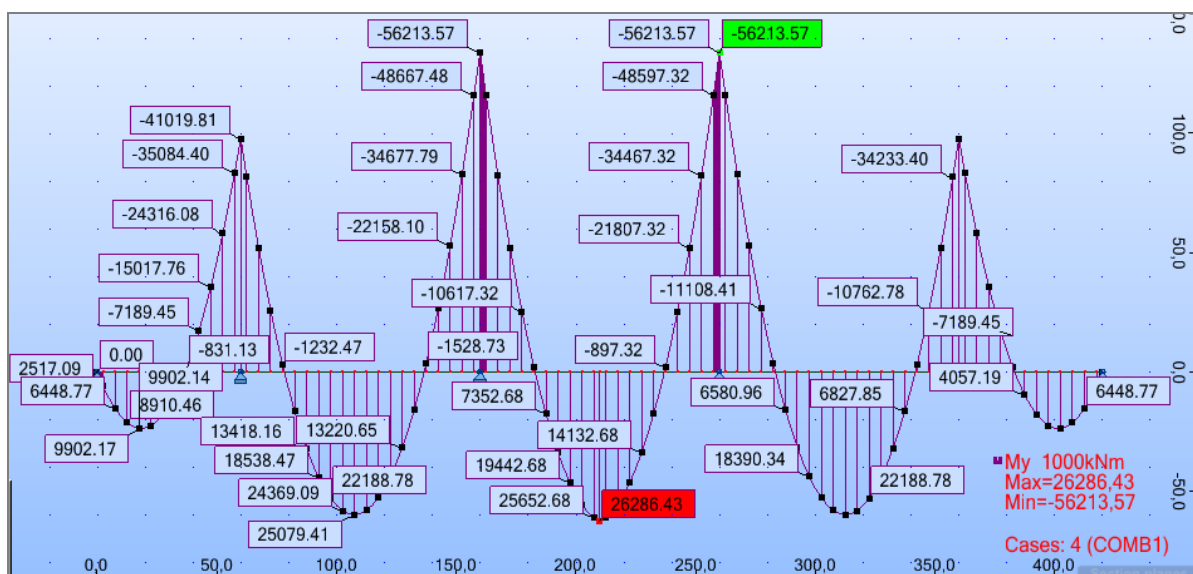
Com vista a escolher a secção que melhor se adequa ao tabuleiro e processo construtivo em questão prossegue-se a verificação das tensões com as soluções C2c, C2d, C2e e C2f acrescentando as sobrecargas rodoviárias e revestimentos.

Por lapso os diagramas e tabelas anteriores relativas à quantificação do peso próprio do tabuleiro para a construção com cimbra autolanzável não contemplam o peso do cimbra e do betão líquido do tramo a construir. Os valores encontram-se corrigidos a partir do subcapítulo 4.3.3 onde se estuda o pré-esforço a utilizar. Esta correcção consiste num aumento das tensões, principalmente na zona dos apoios.

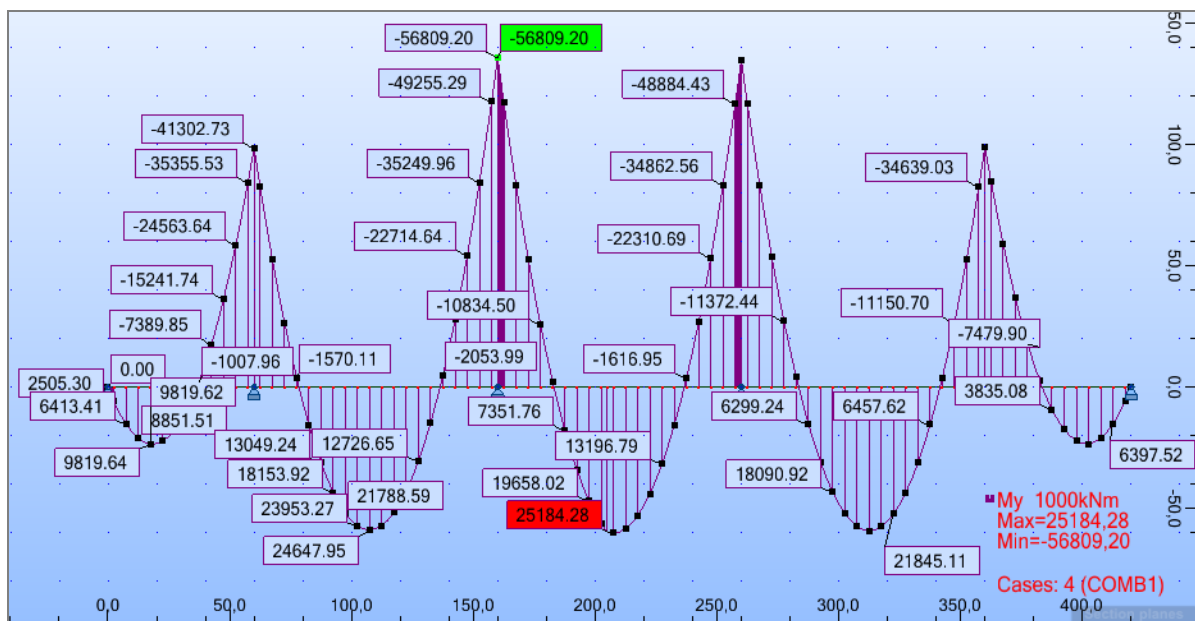
4.3.2. SOBRECARGAS RODOVIÁRIAS E REVESTIMENTOS

As sobrecargas rodoviárias e revestimentos considerados são os já referidos neste capítulo para o método dos avanços sucessivos. Assim, considerou-se uma acção de 20 kN/m^3 para os revestimentos que para uma espessura equivalente de 8 cm resulta em $1,6 \text{ kN/m}^2$ a aplicar ao tabuleiro, uma sobrecarga rodoviária de 4 kN/m^2 e a carga de faca de 50 kN/m em toda a largura do tabuleiro e aplicada na secção mais desfavorável. Para verificação do Estado limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções considerou-se 40% das sobrecargas rodoviárias, à semelhança do que foi efectuado nos avanços sucessivos.

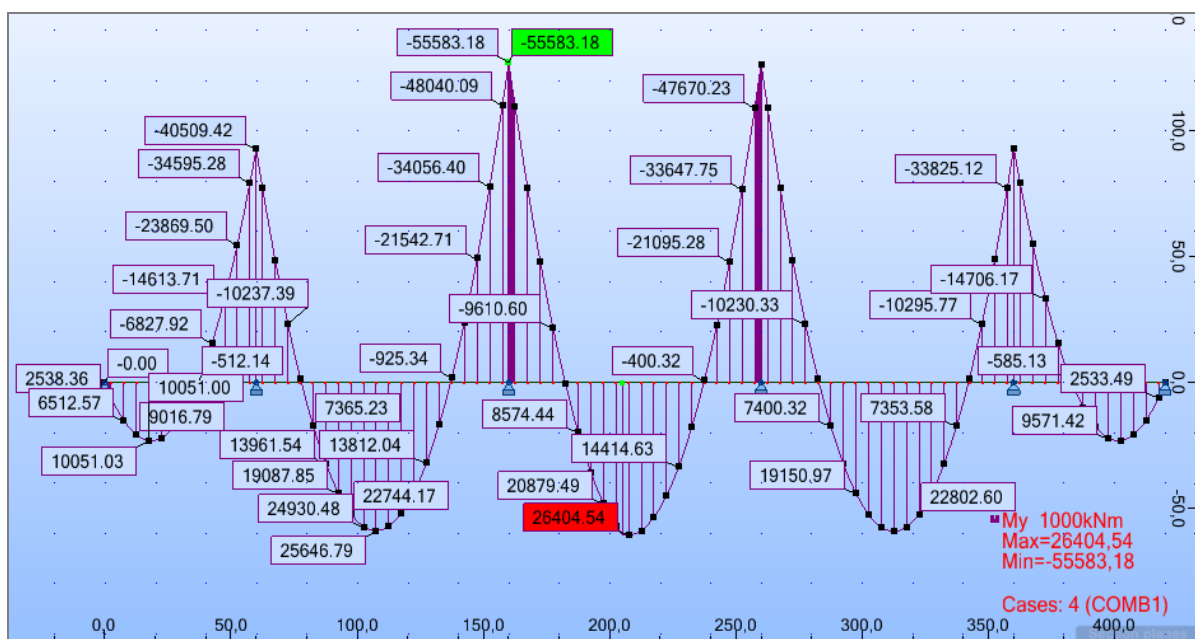
A modelação do tabuleiro para a consideração destas acções e tendo em conta o processo construtivo foi em tudo semelhante à modelação para os avanços sucessivos. Uma vez que estas acções só são aplicadas depois de construído todo o tabuleiro, os seus resultados em nada dependem do processo construtivo. Existirá, no entanto, uma distribuição diferente dos esforços de acordo com as geometrias adoptadas pelo que se apresenta apenas neste sub-capítulo os diagramas de momentos flectores resultantes para as quatro soluções ainda em estudo (C2c, C2d, C2e e C2f), figura 68.



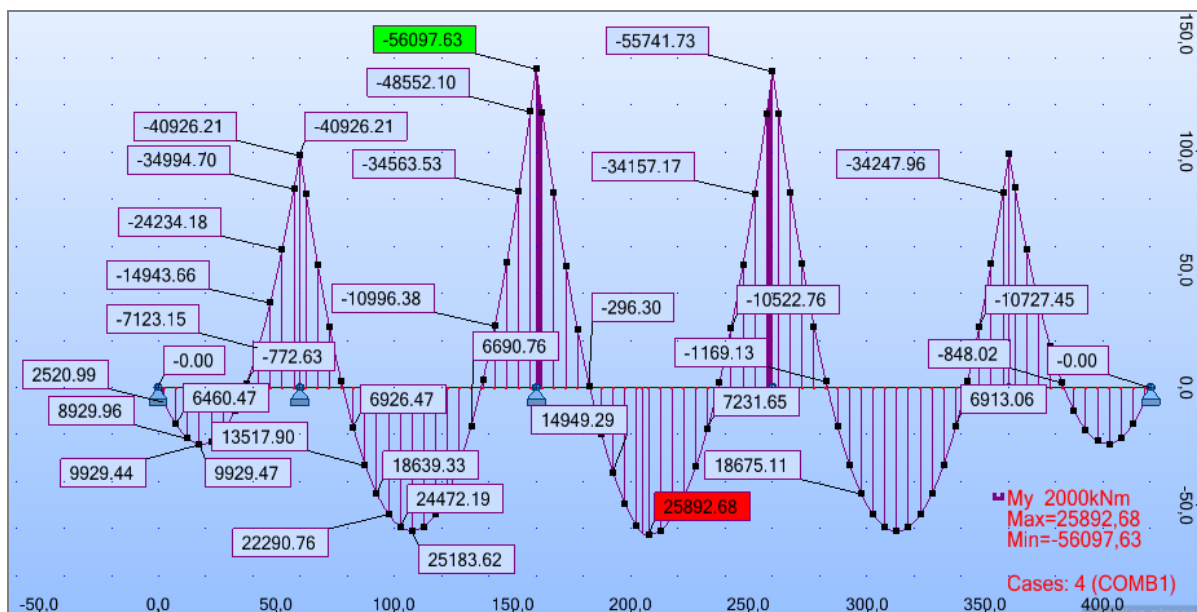
a.



b.



c.



d.

Fig. 68 – Diagramas de momentos flectores para as sobrecargas rodoviárias e revestimentos | a. C2c | b. C2d | c. C2e | d. C2f

Da análise dos diagramas anteriores constata-se que os momentos flectores positivos e negativos, a meio vão ou no apoio, respectivamente, são muito próximos para as quatro soluções. No entanto, ao nível das tensões podem existir algumas diferenças visto as inércias e as posições do centro de gravidade das diferentes secções variarem. A tabela 27 permite retirar algumas conclusões.

Tabela 27 – Comparação das tensões para os 4 casos em estudo após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias e revestimentos

Secção transversal			Peso próprio		Sobrecarga rodoviária e revestimentos		Total	
			$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Solução C2c	Apoio	H const. = 4,5m e variáv. = 0,60m	-9,66	9,24	-2,46	2,35	-12,11	11,59
	1/2 Vão	H const. = 4,5m e variáv. = 0,20m	16,91	-10,03	1,98	-1,17	18,89	-11,20
Solução C2d	Apoio	H const. = 4,5m e variáv. = 0,70m	-9,04	9,56	-2,25	2,38	-11,30	11,95
	1/2 Vão	H const. = 4,5m e variáv. = 0,20m	17,02	-10,09	1,89	-1,12	18,91	-11,21

Secção transversal			Peso próprio		Sobrecarga rodoviária e revestimentos		Total	
			$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Solução C2e	Apoio	H const. = 4,8m e variáv. = 0,50m	-9,76	8,70	-2,42	2,16	-12,18	10,86
	1/2 Vão	H const. = 4,8m e variáv. = 0,20m	15,34	-9,67	1,71	-1,08	17,05	-10,75
Solução C2f	Apoio	H const. = 4,8m e variáv. = 0,60m	-8,86	9,16	-2,17	2,24	-11,03	11,40
	1/2 Vão	H const. = 4,8m e variáv. = 0,20m	15,28	-9,63	1,68	-1,06	16,96	-10,69

A consideração desta acção é sem dúvida importante para a limitação das tensões em serviço, no entanto, após consideração das sobrecargas rodoviárias e revestimentos não se verificaram grandes alterações entre as diversas soluções, apenas aumentaram os seus valores absolutos. Apesar deste aumento, verifica-se que as compressões se aproximam dos 11 MPa que se consideram satisfatórios para esta fase. A solução C2f é a que apresenta os valores mais baixos para as compressões mas não apresenta valores significativamente mais baixos do que as outras soluções. De qualquer forma, esta solução é a que tem também os valores menores para as tracções e os mais equilibrados. Por este facto pensa-se ser a solução preferível de entre as restantes para se proceder ao dimensionamento do pré-esforço.

4.3.3. PRÉ-ESFORÇO

De acordo com o exposto no capítulo 3, o traçado parabólico é o que mais se adequa a tabuleiros construídos através do cimbra autolanzável visto as tensões, nomeadamente as tracções que se pretendem anular, apresentarem valores próximos quer na zona dos apoios quer a meio vão.

A distância considerada entre o eixo do cabo e a fibra superior do tabuleiro foi de 0,10m e nos meios vãos a distância considerada entre o eixo do cabo e a fibra inferior da secção foi de 0,15m. Pretende-se excentricidades maiores nas zonas onde as tracções são mais elevadas, sobre os pilares, para que se tire maior partido da acção do pré-esforço.

Considerando então as secções da solução C2f, em que a altura total da viga caixão (**H**) é constante e igual a 4,8m e a espessura do banzo inferior (**e**) varia de 0,60m a 0,20m desde os apoios até ao meio vão, respectivamente, apresenta-se na figura 69 o traçado adoptado para os cabos de pré-esforço e posicionamento do centro de gravidade das secções do tabuleiro.

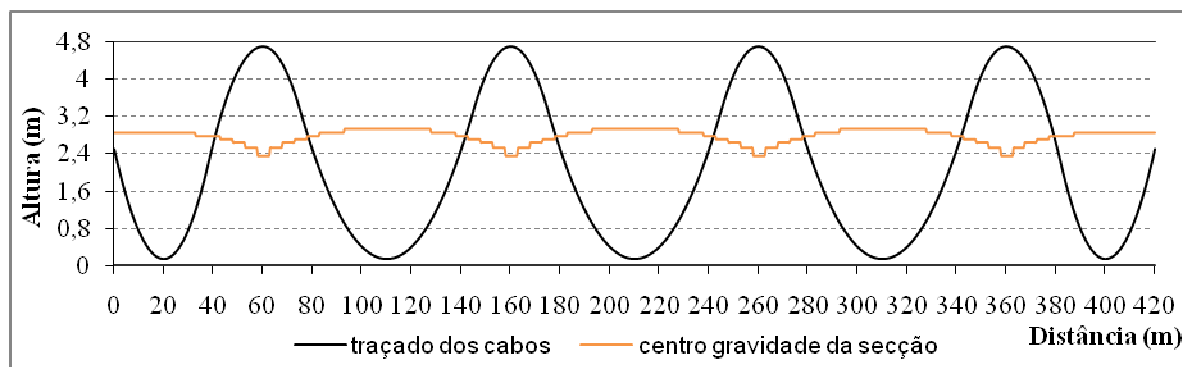


Fig. 69 – Traçado dos cabos de pré-esforço adoptado e posição do centro de gravidade das secções

No Anexo B detalha-se todos os procedimentos a fazer para a obtenção dos resultados deste subcapítulo, como é o caso das equações do traçado do cabo e respectivas excentricidades relativamente ao centro de gravidade das secções.

Na tabela 28 estão indicadas todas as características geométricas das secções consideradas neste estudo, área, inércia segundo o eixo principal horizontal e posição do centro de gravidade.

Tabela 28 – Propriedades das secções em cada tramo para a solução em estudo C2f

Secção	Dimensões H e e	A (m ²)	I _y (m ⁴)	y _{inf} (m)	y _{sup} (m)
1	H=4,8m ; e=0,60m	15,385	61,11	2,44	2,36
2	H=4,8m ; e=0,50m	14,615	58,267	2,538	2,262
3	H=4,8m ; e=0,40m	13,845	54,795	2,653	2,147
4	H=4,8m ; e=0,35m	13,46	52,787	2,718	2,082
5	H=4,8m ; e=0,30m	13,075	50,573	2,787	2,013
6	H=4,8m ; e=0,25m	12,69	48,134	2,863	1,937
7	H=4,8m ; e=0,25m	12,69	48,134	2,863	1,937
8	H=4,8m ; e=0,20m	12,31	45,45	2,944	1,856
9	H=4,8m ; e=0,20m	12,31	45,45	2,944	1,856
10	H=4,8m ; e=0,20m	12,31	45,45	2,944	1,856
11	H=4,8m ; e=0,20m	12,31	45,45	2,944	1,856

Definidas as excentricidades do cabo relativamente ao centro de gravidade das secções - com o objectivo de se obter um valor inicial para o valor do pré-esforço útil necessário para se verificar o Estado Limite de Descompressão para a acção do peso próprio da estrutura e com ele verificar as tensões no tabuleiro - recorre-se às seguintes equações:

$$\text{Apoio} \quad \sigma = -\frac{P_{\infty}}{A} - \frac{P_{\infty} \cdot e}{I} \cdot y_{\text{sup}} + \frac{M_{pp}^{-}}{I} \cdot y_{\text{sup}} \leq 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2} \text{ Vão} \quad \sigma = -\frac{P_{\infty}}{A} - \frac{P_{\infty} \cdot e}{I} \cdot y_{\text{inf}} + \frac{M_{pp}^{+}}{I} \cdot y_{\text{inf}} \leq 0 \quad (4.6)$$

Atribuindo às equações anteriores os valores de A , e , I , y_{sup} , y_{inf} , e momentos flectores devido ao peso próprio do tabuleiro (que são os maiores e os que existem aquando da aplicação do pré-esforço) determina-se que o valor do pré-esforço útil total deve ser superior a 38900 kN ou 46800 kN. Tendo por base os valores obtidos, o primeiro valor considerado para a força do pré-esforço útil foi de 50000 kN.

De entre os dois métodos possíveis para determinação dos diagramas de momentos flectores resultantes da aplicação do pré-esforço, método das cargas equivalentes e método dos coeficientes de influência (descritos no capítulo 3), foi adoptado o método dos coeficientes de influência pois este apresenta-se como um método fiável, versátil e mais adequado para a determinação dos efeitos do pré-esforço. Por outro lado é um método em que todo o processo iterativo de alteração do valor do pré-esforço útil é simples sendo apenas necessário conhecer, em cada iteração, o valor do P_{∞} . As tabelas de cálculo podem ser consultadas no Anexo B.

Na figura 70 está o diagrama de momentos flectores total (momentos isostáticos e hiperstáticos) para um pré-esforço de 50000 kN. Como se pode conferir na tabela 29, este valor não é suficiente para que sejam eliminadas ou se cumpra o valor resistente do betão à tracção ($\sigma_{\text{sup}}[\text{apoio}] = 5,98 \text{ MPa}$ e ($\sigma_{\text{inf}}[1/2 \text{ vão}] = 6,42 \text{ MPa}$), sendo necessária uma nova iteração em que o valor do pré-esforço útil considerado foi de 70000 kN. O correspondente diagrama de momentos flectores e valores das tensões encontram-se, respectivamente, na figura e tabela referidas.

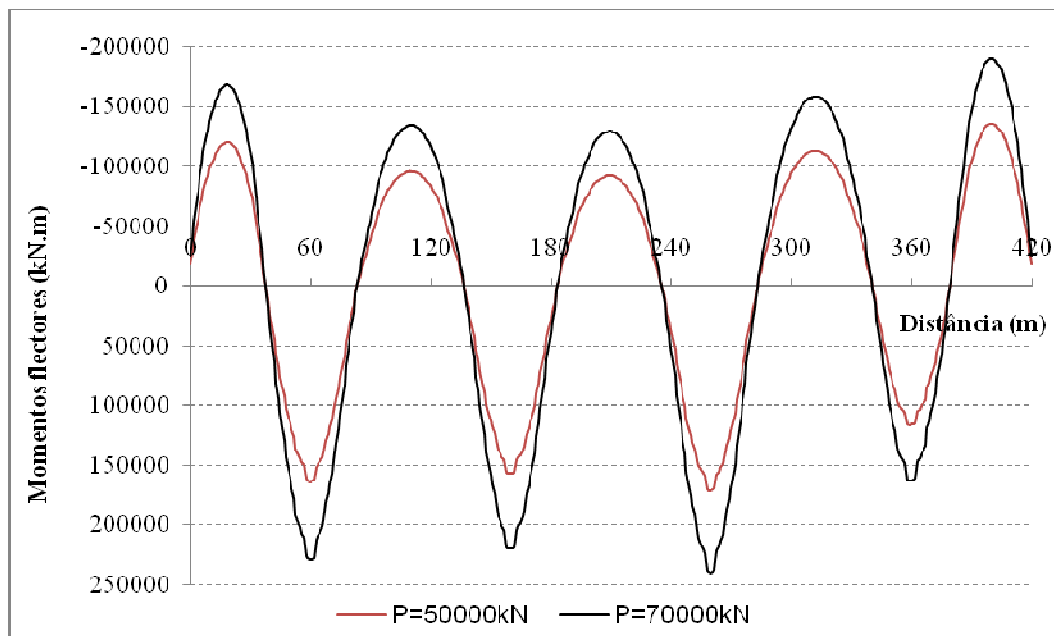


Fig. 70 – Diagrama de momentos flectores (método dos coeficientes de influência) para a solução C2f para $P_{\infty} = 50000 \text{ kN}$ e $P_{\infty} = 70000 \text{ kN}$

Os detalhes de cálculo do pré-esforço foram remetidos para o Anexo B uma vez que não se considerou fundamentais para a compreensão deste trabalho mas poderão ser interessantes para perceber como

funciona o método dos coeficientes de influência, quais as vantagens e como se atingiram os resultados aqui presentes.

Note-se que os valores das tensões da tabela seguinte, relativos à consideração do peso próprio da estrutura, já se encontram corrigidos em relação aos apresentados anteriormente.

Tabela 29 – Tensões para a solução C2f após aplicação do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço

Secção transversal		Peso próprio		Sobrecarga rodoviária e revestimentos		Pré-esforço				Total		
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	P_{∞}		M_{total}		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	
						$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)	$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)			
P = 50000kN	Apoio	H const. = 4,8m e variáv. = 0,60m	-13,13	13,58	-2,17	2,24	-3,25	-3,25	6,37	-6,59	-12,18	5,98
	1/2 Vão	H const. = 4,8m e variáv. = 0,20m	15,28	-9,63	1,68	-1,06	-4,06	-4,06	-6,48	4,08	6,42	-10,67
P = 70000kN	Apoio	H const. = 4,8m e variáv. = 0,60m	-13,13	13,58	-2,17	2,24	-4,55	-4,55	8,69	-8,98	-11,16	2,29
	1/2 Vão	H const. = 4,8m e variáv. = 0,20m	15,28	-9,63	1,68	-1,06	-5,69	-5,69	-8,74	5,51	2,53	-10,87

Analisando a tabela 29 conclui-se que um pré-esforço útil de 70000 kN, com o traçado parabólico apresentado, é suficiente para diminuir significativamente as tracções, principalmente a meio vão, verificando-se que os valores das tensões obtidos são sempre inferiores aos valores limite. As compressões encontram-se abaixo dos 12 MPa a considerar. As tracções apresentam o valor máximo de 2,53 MPa, inferior aos 4,90 MPa referente à tensão resistente do betão considerado à tracção.

Recorde-se que na tabela anterior os valores das tensões devido ao peso próprio já se encontram corrigidos.

4.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com base nos resultados obtidos e apresentados anteriormente fez-se uma análise que consistiu na interpretação dos seguintes pontos:

- No caso da construção pelos avanços sucessivos a solução longitudinal que mais se adequa é a de altura da viga variável, sendo esta superior na zona dos apoios e inferior a meio vão.

No caso do cimbria a solução é, efectivamente, diferente apresentando o tabuleiro altura constante variando apenas a espessura do banzo inferior do caixão, maior no apoio e

menor a meio vão. Esta diferença verifica-se porque o funcionamento estrutural para um e outro caso é completamente distinto.

Nos avanços sucessivos, em fase construtiva, apenas existem momentos negativos que são muito altos junto aos pilares pelo que é normal que a secção nesta zona tenha que apresentar capacidade resistente superior à secção do meio vão. Com este processo construtivo consegue-se tabuleiros mais esbeltos a meio vão, concentrando-se os esforços nos apoios. Por outro lado, os esforços obtidos com a utilização do cimbra autolanzável são mais próximos no apoio e a meio vão, justificando-se assim a opção por secções de alturas iguais ao longo de todo o tabuleiro.

- No apoio, o efeito da sobrecarga faz-se notar mais, ao nível das tensões, no caso do cimbra autolanzável do que numa ponte construída por avanços sucessivos uma vez que segundo este último processo construtivo temos secções de grande inércia nesta zona. Seria necessário que o valor dos momentos flectores no apoio para a construção aduela a aduela fosse significativamente superior ao obtido com as secções consideradas para a construção com cimbra autolanzável para que estas diferenças se fizessem sentir ao nível das tensões. Isto deve-se ao facto da inércia na zona dos pilares das secções consideradas para os avanços sucessivos ser maior do que as secções da solução de construção com cimbra.

Por outro lado, a meio vão, as compressões apresentam valores muito próximos para ambos os processos construtivos, no entanto, as tracções são mais elevadas no caso dos avanços sucessivos, não porque o valor do momento flector nesta zona seja maior do que com o outro processo construtivo mas porque a secção apresenta uma inércia inferior.

A tabela 30 clarifica o raciocínio exposto uma vez que permite a comparação directa entre as tensões para a consideração isolada das sobrecargas construtivas e revestimentos para as soluções AS3b e C2f.

Tabela 30 – Comparação das tensões para a acção isolada das sobrecargas rodoviárias e revestimentos para as soluções AS3b e C2f

Solução		Sobrecargas rodoviárias e revestimentos	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{sup.}$ (MPa)
Apoio	AS3b	-1,68	1,67
	C2f	-2,17	2,24
1/2 Vão	AS3b	2,40	-1,37
	C2f	1,68	-1,06

- O traçado dos cabos de pré-esforço é diferente em ambos os casos. Nos avanços sucessivos optou-se por cabos rectilíneos superiores nos apoios e inferiores, de solidarização, a meio vão. Os cabos superiores são os mais importantes para o controlo de tensões e estabilidade da estrutura principalmente nas zonas mais próximas dos apoios. No caso do cimbra usaram-se cabos com traçado parabólico que permitiram a obtenção de diagramas simetricamente opostos aos diagramas provocados pelas outras acções distribuídas, nomeadamente pelo peso próprio do tabuleiro.

- Para as soluções finais consideradas para cada um dos processos construtivos, AS3b e C2f, verifica-se que ao nível das compressões os avanços sucessivos são mais exigentes na secção de apoio enquanto no caso do cimbra autolanzável esse valor é da mesma ordem de grandeza na secção de apoio e a meio vão. O valor máximo da tensão de compressão para ambos os processos construtivos é semelhante, cerca de 12 MPa.

Analisando globalmente as tensões constata-se que para os avanços sucessivos se atingiu praticamente o Estado Limite de Descompressão para a combinação quase permanente de acções, verificando-se que todas as fibras se encontram comprimidas excepto a fibra superior na secção sobre o apoio que se encontra ligeiramente traccionada. Para o caso do cimbra autolanzável este estado não se verificou existindo um pequeno esforço de tracção, de 2,5 MPa nas fibras inferiores da secção e a meio vão e de 2,3 MPa nas fibras superiores no apoio. Apesar de não se ter atingido o Estado Limite de Descompressão o valor da tensão de tracção é inferior à tensão limite resistente à tracção do betão considerado que é de 4,90 MPa.

Também se pode constatar que nos avanços sucessivos se obtiveram valores das tensões baixos em todas as fibras sendo apenas a fibra superior junto aos apoios a apresentar valores mais altos. Vejamos a tabela 31:

Tabela 31 – Comparação das tensões após consideração do peso próprio da estrutura, das sobrecargas rodoviárias, dos revestimentos e do pré-esforço para as soluções AS3b e C2f

Solução		Peso próprio, sobrecargas rodoviárias, revestimentos e pré-esforço	
		$\sigma_{inf.}$ (MPa)	$\sigma_{Sup.}$ (MPa)
Apoio	AS3b	-12,45	0,30
	C2f	-11,16	2,29
1/2 Vão	AS3b	-0,08	-0,77
	C2f	2,53	-10,87

- Verificou-se que para vãos com cerca de 100m, como o estudado neste trabalho, o volume de betão armado do tabuleiro, para cada um dos processos construtivos, é da mesma ordem de grandeza. Conforme o apresentado na tabela 32 o volume de betão gasto na solução AS3b corresponde a cerca 93 % do volume gasto na solução C2f.

Relativamente à quantidade de aço de pré-esforço aplicado em cada solução a situação é relativamente diferente. De acordo com as duas soluções estudadas, AS3b e C2f, gasta-se mais pré-esforço no caso do cimbra autolanzável do que nos avanços sucessivos, sendo esta relação de 89 %.

A tabela 32 apresenta o volume de betão armado e a quantidade de aço de pré-esforço utilizado em cada uma das soluções, AS3b e C2f, para cada tramo de tabuleiro de 100 m.

Tabela 32 – Comparação das quantidades de betão armado e aço pré-esforçado para as soluções AS3b e C2f para cada tramo de tabuleiro de 100 m

Solução	Volume de Betão Armado (m ³)	Quantidade de aço de pré-esforço (ml/1000kN)
AS3b	1215	6350
C2f	1310	7100
Rácio AS/C	93 %	89 %

5

CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método dos avanços sucessivos para construção de tabuleiros em betão armado pré-esforçado exige um controlo apertado de esforços e tensões, no entanto apresenta-se como um processo construtivo versátil uma vez que, em teoria, através deste processo construtivo se poderia construir pontes com vãos tão grandes quanto se queira ou seja necessário. Não havendo condicionantes na altura do tabuleiro, principalmente junto aos apoios, seria sempre possível chegar-se a soluções satisfatórias. Este processo apresenta a desvantagem de se ter de dimensionar a secção para quando o tabuleiro ainda trabalha em consola e obviamente para quando o seu comprimento é máximo, cerca de $L/2$. Deste facto surgem secções dimensionadas em fase construtiva que estarão sobredimensionadas para a fase de exploração havendo, necessariamente um gasto de betão e pré-esforço excessivo relativamente ao que o tabuleiro necessita em fase de exploração.

No caso de obras de arte com vãos próximos do estudado, considera-se que o cimbra autolançável com OPS pode ter algumas vantagens caso a obra de arte em questão apresente uma grande extensão, com vários vãos de comprimento e traçado semelhante que compense o investimento.

Uma vez que para o caso concreto dos 100 m de vão se chegou a valores próximos para o volume de betão e para os quilogramas de aço de pré-esforço a utilizar no tabuleiro para cada processo construtivo, poder-se-á tirar partido de uma maior rapidez de construção no caso da utilização de um cimbra autolançável com recurso ao pré-esforço orgânico, actualmente exaustivamente estudado, para vencer grandes vãos, pela BERD. Com este método cada ciclo, que corresponde à betonagem de 1 tramo, tem a duração aproximada de 2 semanas. Ou seja, em 15 dias constrói-se cerca de 100 m de tabuleiro estando no final deste tempo o cimbra preparado para avançar para a posição de betonagem do tramo seguinte.

Em comparação com os avanços sucessivos, em que o tempo de betonagem de cada aduela e aplicação do respectivo pré-esforço é de cerca de 10 dias, mesmo que se usem dois carros móveis e se construa simetricamente nas duas direcções a partir do pilar, demorar-se-ia cerca de 50 dias para betonar o mesmo vão, o que corresponde a 3 vezes mais tempo do que com o cimbra autolançável.

No entanto, a nível económico é necessário que o número de vãos com o mesmo comprimento e características semelhantes seja grande e compense o investimento inicial que é necessário fazer numa obra de uma ponte ou viaduto construído com recurso a cimbres autolançáveis. Este processo apresenta a vantagem do cimbra poder ser posteriormente adaptado e reutilizado noutras obras com vãos semelhantes.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Conclui-se o presente trabalho com a apresentação de um conjunto de sugestões para futuras evoluções deste estudo. Propõem-se que, para além das verificações nele efectuadas ao nível da análise longitudinal do tabuleiro, se estudem também os aspectos seguintes:

- Análises dos efeitos diferidos;
- Verificação das deformações e implicações destas para cada um dos processos construtivos;
- Generalização do estudo a todas as secções do tabuleiro;
- Cálculo das perdas instantâneas e diferidas do pré-esforço para ambos os processos construtivos e análise da sua influência;
- Investigação dos vãos máximos dos cimbres autolanzáveis com utilização do pré-esforço orgânico (OPS);
- Estudo económico de custos de construção, de meios e materiais, para ambos os processos construtivos e análise comparativa dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0004697>
- [2] <http://www.dormanlongtechnology.com/English/projects/Shibanpo.htm>
- [3] Mathivat, J. *Construccion de puentes de hormigon pretensado por voladizos sucesivos*. Editores técnicos associados, s.a. Barcelona, 1980.
- [4] Adão da Fonseca, A., Pacheco, P. et al. *Estudo experimental da aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres autolançáveis*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto.
- [5] Xavier, L. *Viaduto de Vila Pouca de Aguiar*. Relatório de estágio formal para admissão a membro efectivo da Ordem dos Engenheiros, Maio de 2006.
- [6] A.I.T.E.C. – *L'Industria Italiana del cemento* – Maio 1988b.
- [7] SCHLAICH, J., SCHEEF, H. *Concrete box-girder bridges*. IABSE, AIPC e IVBH, Zurich 1982.
- [8] Appleton, J., Marchão, C. *Betão armado e pré-esforçado II. Folhas de apoio às aulas – Módulo 1: Pré-esforço*. Instituto Superior Técnico – IST, 2005/2006.
- [9] Pacheco, P. *Apontamentos das aulas práticas da disciplina de Pontes – Método dos coeficientes de influência*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2004/2005.
- [10] R.S.A. – *Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes*. 1983
- [11] R.E.B.A.P. – *Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*. 1983
- [12] NP EN 1992-1-1:2004. *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão – parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. European Committee for Standardization - CEN, Abril 2004.

BIBLIOGRAFIA

Adão da Fonseca, A., Pacheco, P. et al. *Estudo experimental da aplicação de pré-esforço orgânico em cimbres autolancáveis*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto.

A.I.T.E.C. – *L'Industria Italiana del cemento* – Maio 1988b.

André, A. *Estudo experimental da aplicação de pré-esforço orgânico num cembre autolancável em modelo reduzido*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Setembro de 2004.

Appleton, J., Marchão, C. *Betão armado e pré-esforçado II. Folhas de apoio às aulas – Módulo 1: Pré-esforço*. Instituto Superior Técnico – IST, 2005/2006.

Baptista, Marco A. *Análise diferida de pontes construídas tramo a tramo com cimbres autoportantes e autolancáveis*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Novembro de 1995.

Ferraz, M. *Um modelo de análise para o estudo de pontes como estruturas evolutivas*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Junho de 2001.

Grattèsat, G. *Conception des ponts*. Eyrolles, Paris, 1978.

<http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0004697>

<http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0011456>

<http://www.dormanlongtechnology.com/English/projects/Shibanpo.htm>

Manterola, J. *Puentes: tomo I*. ETS Ingenieros de caminos, canales e puertos, Madrid.

Manterola, J. *Puentes: tomo II*. ETS Ingenieros de caminos, canales e puertos, Madrid.

Manterola, J. *Puentes: tomo IV*. ETS Ingenieros de caminos, canales e puertos, Madrid.

Mathivat, J. *Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos*. Editores técnicos asociados, s.a. Barcelona, 1980.

Menn, C. *Prestressed concrete bridges*. Birkhauser Verlag, Basel, 1990.

Moás, Luis P. *Análise do tabuleiro de pontes construídas pelo método dos avanços sucessivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Fevereiro de 1994.

NP EN 1992-1-1:2004. *Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão – parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. European Committee for Standardization - CEN, Abril 2004.

NP EN 206-1:2007. *Parte 1: Desempenho, especificação, produção e conformidade*. Instituto Português da Qualidade - IPQ, Lisboa, 2007.

Pacheco, P. *Pré-Esforço Orgânico – Um Exemplo de Sistema Efectivo*. Tese de doutoramento em engenharia civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Dezembro de 2004.

Pacheco, P. *Apontamentos das aulas práticas da disciplina de Pontes – Método dos coeficientes de influência*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2004/2005.

R.E.B.A.P. – Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado. 1983

R.S.A. – Regulamento de segurança e acções para estruturas de edifícios e pontes. 1983

Schlaich, J., Scheef, H. *Concrete box-girder bridges*. IABSE, AIPC e IVBH, Zürich 1982.

Xavier, L. *Viaduto de Vila Pouca de Aguiar*. Relatório de estágio formal para admissão a membro efectivo da Ordem dos Engenheiros, Maio de 2006.

Anexo A

CÁLCULO FASEADO DOS DIAGRAMAS DE MOMENTOS FLECTORES PARA A ACÇÃO DO PESO PRÓPRIO DO TABULEIRO PARA A CONSTRUÇÃO COM CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

Neste anexo apresentam-se as tabelas e diagramas que resultaram do cálculo dos efeitos do peso próprio da estrutura em fase construtiva para as 3 soluções iniciais consideradas (C1, C2 e C3) e que permitiram obter os resultados apresentados neste trabalho.

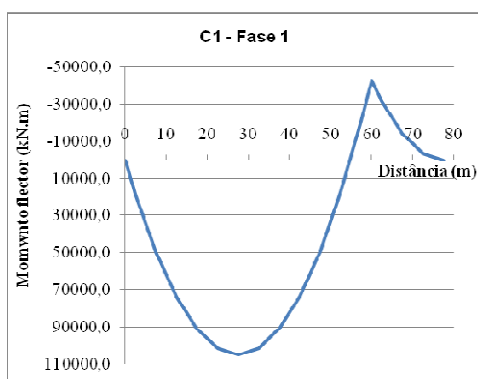
Note-se que as tabelas e diagramas apresentados neste anexo não reflectem a introdução do peso do cimbra autolançável. Esta correcção foi enunciada no subcapítulo 4.3.1.2, no entanto mantiveram-se nesta secção os resultados uma vez que os procedimentos de cálculo são os mesmos.

Tabela A.1 – Momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C1 para cada fase construtiva e valores totais

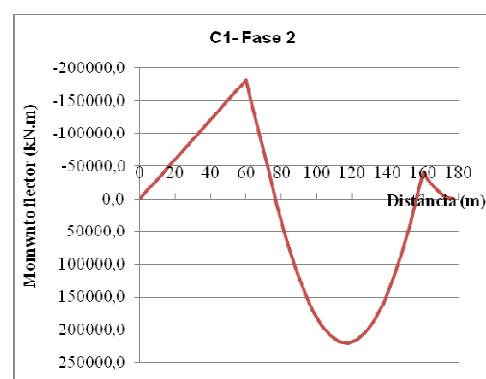
C1 - H constante e e constante						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					TOTAL
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	18258,9	-7593,5	2059,3	-552,3	36,6	12208,9
7,5	49549,4	-22780,5	6177,8	-1656,8	109,7	31399,6
12,5	73870,4	-37967,4	10296,3	-2761,3	182,8	43620,7
17,5	91221,7	-53154,4	14414,8	-3865,8	255,9	48872,2
22,5	101603,5	-68341,4	18533,3	-4970,3	329,0	47154,1
27,5	105015,7	-83528,4	22651,8	-6074,8	402,1	38466,4
32,5	101458,3	-98715,3	26770,3	-7179,3	475,2	22809,1
37,5	90931,3	-113902,3	30888,8	-8283,8	548,3	182,3
42,5	73434,8	-129089,3	35007,3	-9388,3	621,4	-29414,2
47,5	48968,6	-144276,3	39125,8	-10492,8	694,5	-65980,2
52,5	17532,9	-159463,2	43244,3	-11597,3	767,6	-109515,8
57,5	-20872,5	-174650,2	47362,8	-12701,8	840,7	-160021,0
60	-42688,7	-182243,7	49422,0	-13254,1	877,3	-187887,2
62,5	-31363,1	-155036,5	44232,7	-11862,4	785,2	-153244,1
67,5	-13939,2	-100622,0	33854,1	-9079,1	600,9	-89185,2
72,5	-3484,8	-46207,5	23475,5	-6295,7	416,7	-32095,8
77,5	0,0	8207,0	13096,8	-3512,3	232,5	18024,0

C1 - H constante e e constante						
Distância	Momentos flectores (kN.m)					
(m)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	TOTAL
82,5		59136,7	2718,2	-729,0	48,3	61174,2
87,5		103096,9	-7660,4	2054,4	-136,0	97354,8
92,5		140087,4	-18039,0	4837,7	-320,2	126565,9
97,5		170108,3	-28417,7	7621,1	-504,4	148807,3
102,5		193159,7	-38796,3	10404,5	-688,7	164079,2
107,5		209241,5	-49174,9	13187,8	-872,9	172381,5
112,5		218353,6	-59553,5	15971,2	-1057,1	173714,2
117,5		220496,2	-69932,2	18754,5	-1241,3	168077,3
122,5		215669,3	-80310,8	21537,9	-1425,6	155470,8
127,5		203872,7	-90689,4	24321,3	-1609,8	135894,7
132,5		185106,5	-101068,0	27104,6	-1794,0	109349,1
137,5		159370,8	-111446,7	29888,0	-1978,3	75833,8
142,5		126665,4	-121825,3	32671,3	-2162,5	35349,0
147,5		86990,5	-132203,9	35454,7	-2346,7	-12105,4
152,5		40346,0	-142582,5	38238,0	-2530,9	-66529,4
157,5		-13268,1	-152961,2	41021,4	-2715,2	-127923,0
160		-42688,7	-158150,5	42413,1	-2807,3	-161233,4
162,5		-31363,1	-131545,6	37442,8	-2478,3	-127944,2
167,5		-13939,2	-78335,7	27502,2	-1820,3	-66593,0
172,5		-3484,8	-25125,9	17561,7	-1162,4	-12211,4
177,5		0,0	28084,0	7621,1	-504,4	35200,6
182,5			77809,0	-2319,5	153,5	75643,0
187,5			120564,5	-12260,0	811,5	109115,9
192,5			156350,3	-22200,6	1469,4	135619,1
197,5			185166,6	-32141,2	2127,4	155152,8
202,5			207013,3	-42081,7	2785,3	167716,9
207,5			221890,4	-52022,3	3443,3	173311,4
212,5			229797,9	-61962,9	4101,3	171936,3
217,5			230735,9	-71903,4	4759,2	163591,6
222,5			224704,2	-81844,0	5417,2	148277,4
227,5			211703,0	-91784,6	6075,1	125993,5
232,5			191732,2	-101725,1	6733,1	96740,1
237,5			164791,8	-111665,7	7391,0	60517,1
242,5			130881,8	-121606,3	8049,0	17324,5
247,5			90002,2	-131546,8	8706,9	-32837,7
252,5			42153,0	-141487,4	9364,9	-89969,5
257,5			-12665,7	-151428,0	10022,8	-154070,9
260			-42688,7	-156398,2	10351,8	-188735,1
262,5			-31363,1	-129837,1	9128,0	-152072,2
267,5			-13939,2	-76714,9	6680,4	-83973,6
272,5			-3484,8	-23592,7	4232,8	-22844,6
277,5			0,0	29529,5	1785,3	31314,8
282,5				79167,0	-662,3	78504,6
287,5				121834,8	-3109,9	118724,9
292,5				157533,1	-5557,5	151975,6
297,5				186261,7	-8005,1	178256,6
302,5				208020,8	-10452,7	197568,1
307,5				222810,3	-12900,3	209910,0
312,5				230630,2	-15347,9	215282,4
317,5				231480,6	-17795,5	213685,1
322,5				225361,3	-20243,1	205118,2
327,5				212272,5	-22690,7	189581,8
332,5				192214,0	-25138,3	167075,8
337,5				165186,0	-27585,9	137600,2
342,5				131188,4	-30033,4	101155,0

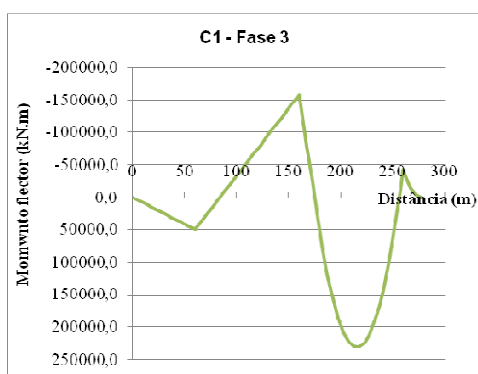
C1 - H constante e e constante						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	TOTAL
347,5				90221,2	-32481,0	57740,2
352,5				42284,4	-34928,6	7355,8
357,5				-12621,9	-37376,2	-49998,2
360				-42688,7	-38600,0	-81288,7
362,5				-31363,1	-26501,0	-57864,1
367,5				-13939,2	-2303,0	-16242,1
372,5				-3484,8	21895,1	18410,3
377,5				0,0	46093,1	46093,1
382,5					66806,3	66806,3
387,5					80550,0	80550,0
392,5					87324,0	87324,0
397,5					87128,5	87128,5
402,5					79963,4	79963,4
407,5					65828,7	65828,7
412,5					44724,4	44724,4
417,5					16650,5	16650,5
420					0,0	0,0



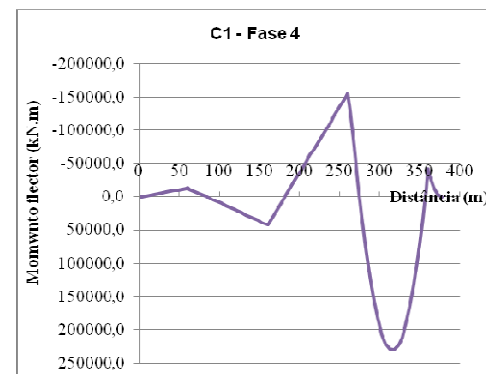
+



+



+



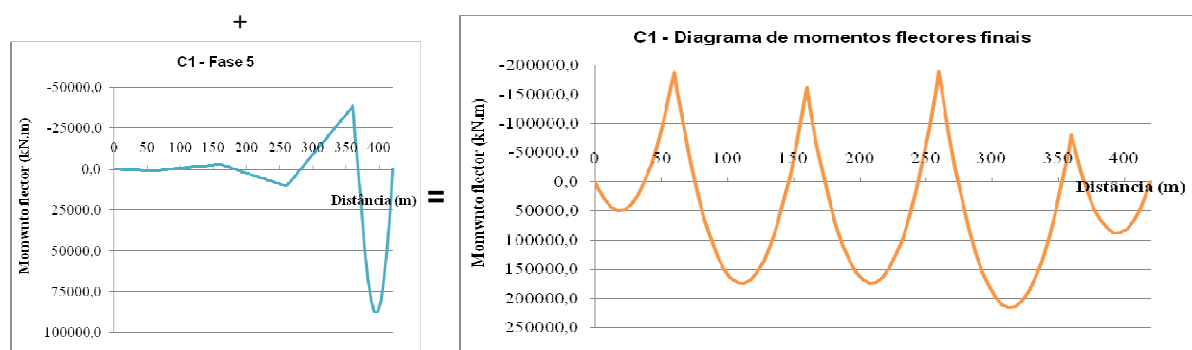


Fig. A.1 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C1 para cada fase construtiva e valores totais

Tabela A.2 – Momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C2 para cada fase construtiva e valores totais

C2 - H constante e e variável						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					TOTAL
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	18750,7	-8730,5	2578,2	-749,9	53,1	11901,7
7,5	51025,0	-26191,4	7734,6	-2249,6	159,3	30477,9
12,5	76329,7	-43652,4	12891,0	-3749,2	265,4	42084,6
17,5	94664,9	-61113,3	18047,5	-5248,9	371,6	46721,7
22,5	106030,4	-78574,3	23203,9	-6748,6	477,8	44389,1
27,5	110308,3	-96035,2	28360,3	-8248,3	583,9	34969,0
32,5	107262,5	-113496,1	33516,7	-9748,0	690,1	18225,1
37,5	96656,8	-130957,1	38673,1	-11247,7	796,3	-6078,7
42,5	78255,2	-148418,0	43829,5	-12747,4	902,4	-38178,3
47,5	51821,5	-165879,0	48985,9	-14247,1	1008,6	-78310,1
52,5	17119,7	-183339,9	54142,4	-15746,8	1114,8	-126709,9
57,5	-26086,4	-200800,9	59298,8	-17246,5	1221,0	-183614,0
60	-50952,3	-209531,3	61877,0	-17996,4	1274,0	-215329,0
62,5	-37265,7	-180461,4	55809,5	-16230,2	1149,0	-176998,8
67,5	-16418,2	-122321,5	43674,5	-12697,8	898,9	-106864,1
72,5	-4075,1	-64181,6	31539,5	-9165,4	648,9	-45233,7
77,5	0,0	-6041,7	19404,5	-5633,0	398,8	8128,5
82,5		48141,2	7269,5	-2100,6	148,7	53458,7
87,5		94528,1	-4865,5	1431,7	-101,4	90993,0
92,5		133355,2	-17000,5	4964,1	-351,4	120967,4
97,5		164858,6	-29135,5	8496,5	-601,5	143618,1
102,5		189274,4	-41270,5	12028,9	-851,6	159181,2
107,5		206720,5	-53405,5	15561,3	-1101,7	167774,7
112,5		217197,1	-65540,5	19093,7	-1351,7	169398,5
117,5		220704,1	-77675,5	22626,0	-1601,8	164052,8
122,5		217241,5	-89810,5	26158,4	-1851,9	151737,6
127,5		206691,2	-101945,5	29690,8	-2101,9	132334,6
132,5		188817,2	-114080,5	33223,2	-2352,0	105608,0
137,5		163383,4	-126215,5	36755,6	-2602,1	71321,4
142,5		130153,7	-138350,4	40288,0	-2852,2	29239,0
147,5		88891,8	-150485,4	43820,3	-3102,2	-20875,5
152,5		39361,9	-162620,4	47352,7	-3352,3	-79258,1
157,5		-18672,3	-174755,4	50885,1	-3602,4	-146145,0
160		-50952,3	-180822,9	52651,3	-3727,4	-182851,3
162,5		-37265,7	-152470,7	46876,3	-3318,6	-146178,6

C2 - H constante e e variável						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					TOTAL
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
167,5		-16418,2	-95766,2	35326,3	-2500,9	-79359,1
172,5		-4075,1	-39061,8	23776,3	-1683,2	-21043,7
177,5		0,0	17642,7	12226,3	-865,6	29003,5
182,5			70390,2	676,3	-47,9	71018,6
187,5			115341,7	-10873,7	769,8	105237,9
192,5			152733,4	-22423,7	1587,5	131897,2
197,5			182801,4	-33973,6	2405,1	151232,9
202,5			205781,7	-45523,6	3222,8	163480,9
207,5			221792,4	-57073,6	4040,5	168759,3
212,5			230833,6	-68623,6	4858,2	167068,1
217,5			232905,1	-80173,6	5675,8	158407,4
222,5			228007,1	-91723,6	6493,5	142777,0
227,5			216021,4	-103273,6	7311,2	120059,0
232,5			196712,0	-114823,6	8128,8	90017,3
237,5			169842,8	-126373,6	8946,5	52415,7
242,5			135177,6	-137923,6	9764,2	7018,2
247,5			92480,4	-149473,6	10581,9	-46411,3
252,5			41515,0	-161023,5	11399,5	-108109,0
257,5			-17954,6	-172573,5	12217,2	-178310,9
260			-50952,3	-178348,5	12626,0	-216674,8
262,5			-37265,7	-150058,2	11226,7	-176097,2
267,5			-16418,2	-93477,4	8428,0	-101467,7
272,5			-4075,1	-36896,7	5629,3	-35342,5
277,5			0,0	19684,1	2830,6	22514,7
282,5				72307,9	31,8	72339,7
287,5				117135,7	-2766,9	114368,8
292,5				154403,6	-5565,6	148838,1
297,5				184347,9	-8364,3	175983,6
302,5				207204,5	-11163,0	196041,5
307,5				223091,5	-13961,7	209129,8
312,5				232008,9	-16760,4	215248,5
317,5				233956,8	-19559,1	214397,6
322,5				228935,0	-22357,8	206577,2
327,5				216825,6	-25156,6	191669,1
332,5				197392,5	-27955,3	169437,2
337,5				170399,5	-30754,0	139645,6
342,5				135610,6	-33552,7	102058,0
347,5				92789,7	-36351,4	56438,3
352,5				41700,6	-39150,1	2550,5
357,5				-17892,7	-41948,8	-59841,5
360				-50952,3	-43348,2	-94300,4
362,5				-37265,7	-30372,5	-67638,2
367,5				-16418,2	-4421,2	-20839,5
372,5				-4075,1	21530,1	17455,0
377,5				0,0	47481,3	47481,3
382,5					69475,6	69475,6
387,5					83674,0	83674,0
392,5					90312,5	90312,5
397,5					89745,3	89745,3
402,5					82090,5	82090,5
407,5					67348,1	67348,1
412,5					45636,0	45636,0
417,5					16954,4	16954,4
420					0,0	0,0

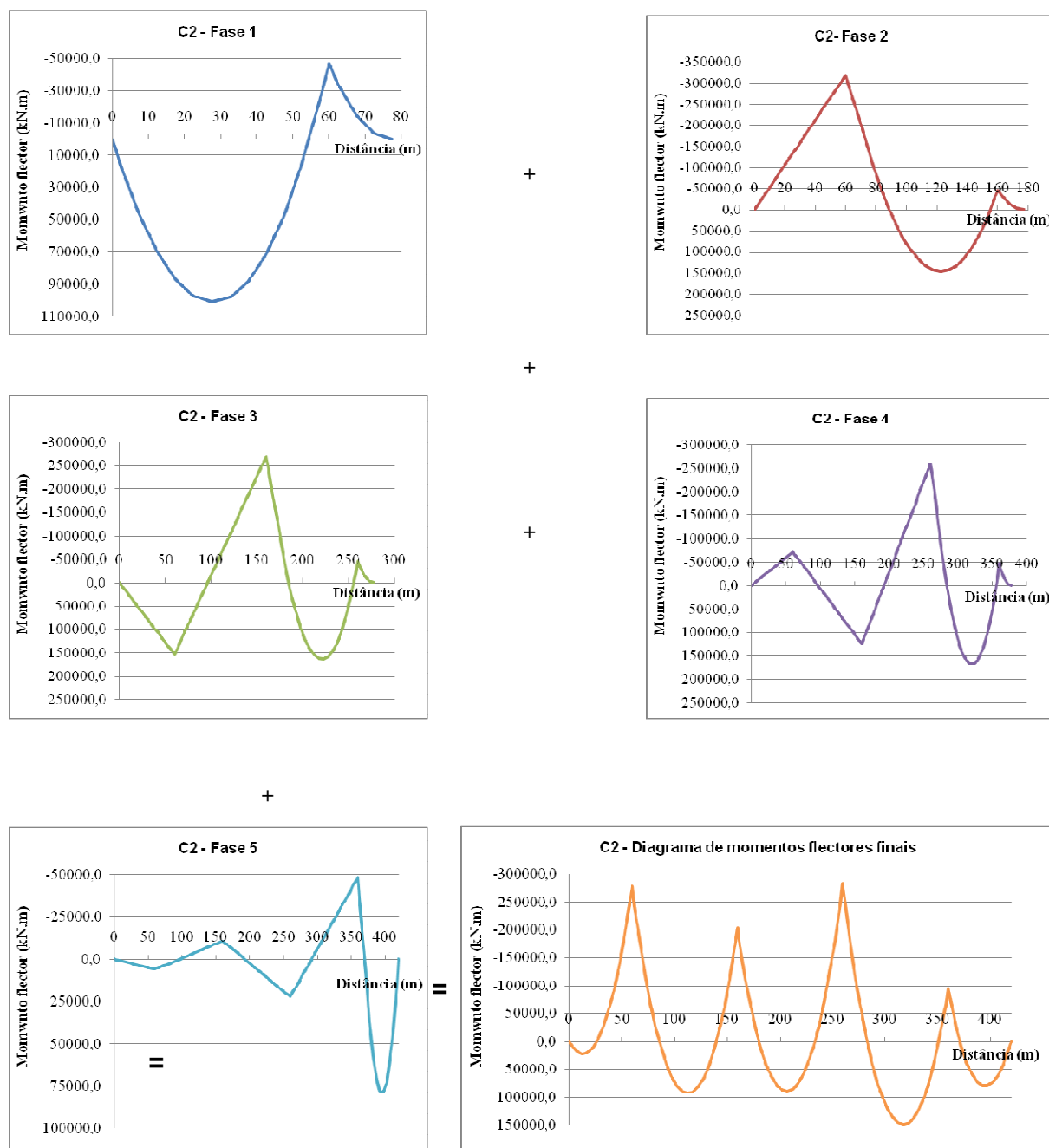


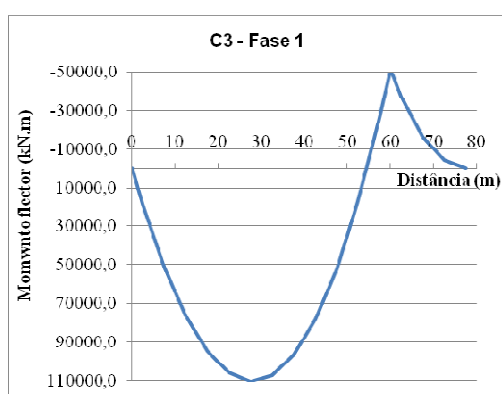
Fig. A.2 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C2 para cada fase construtiva e valores totais

Tabela A.3 – Momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C3 para cada fase construtiva e valores totais

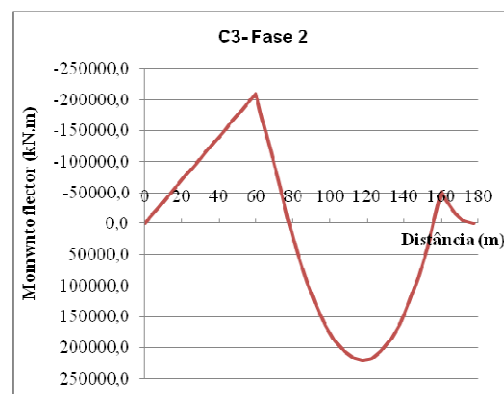
C3 - H variável e e constante						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					TOTAL
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	17259,8	-13271,9	6394,3	-2957,1	256,0	7681,0
7,5	46920,1	-39815,6	19182,9	-8871,3	767,9	18183,9
12,5	70101,4	-66359,4	31971,4	-14785,5	1279,8	22207,8

C3 - H variável e e constante						
Distância	Momentos flectores (kN.m)					
(m)	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	TOTAL
17,5	86803,8	-92903,1	44760,0	-20699,6	1791,7	19752,6
22,5	97027,1	-119446,9	57548,5	-26613,8	2303,6	10818,5
27,5	100771,5	-145990,6	70337,1	-32528,0	2815,5	-4594,6
32,5	97914,2	-172534,4	83125,7	-38442,2	3327,4	-26609,3
37,5	88210,0	-199078,1	95914,2	-44356,4	3839,3	-55471,0
42,5	71413,6	-225621,9	108702,8	-50270,5	4351,2	-91424,9
47,5	47279,6	-252165,7	121491,4	-56184,7	4863,1	-134716,3
52,5	15562,8	-278709,4	134279,9	-62098,9	5375,0	-185590,6
57,5	-23982,2	-305253,2	147068,5	-68013,1	5886,9	-244293,0
60	-46766,8	-318525,0	153462,8	-70970,2	6142,9	-276656,4
62,5	-34184,1	-289167,9	142878,4	-66075,3	5719,2	-240829,8
67,5	-15043,0	-230453,7	121709,6	-56285,6	4871,8	-175200,9
72,5	-3730,1	-171739,4	100540,8	-46495,9	4024,5	-117400,2
77,5	0,0	-113025,2	79371,9	-36706,2	3177,1	-67182,4
82,5		-57918,4	58203,1	-26916,5	2329,8	-24302,0
87,5		-9903,9	37034,3	-17126,8	1482,4	11486,1
92,5		31263,8	15865,5	-7337,1	635,1	40427,2
97,5		65829,8	-5303,3	2452,6	-212,3	62766,7
102,5		94039,4	-26472,1	12242,3	-1059,6	78749,9
107,5		116076,7	-47640,9	22032,0	-1907,0	88560,8
112,5		132003,0	-68809,7	31821,7	-2754,3	92260,5
117,5		141818,2	-89978,5	41611,4	-3601,7	89849,3
122,5		145461,0	-111147,4	51401,0	-4449,0	81265,7
127,5		142747,5	-132316,2	61190,7	-5296,4	66325,7
132,5		133432,4	-153485,0	70980,4	-6143,7	44784,2
137,5		117270,4	-174653,8	80770,1	-6991,1	16395,6
142,5		94016,1	-195822,6	90559,8	-7838,4	-19085,1
147,5		63424,2	-216991,4	100349,5	-8685,8	-61903,4
152,5		25249,6	-238160,2	110139,2	-9533,1	-112304,6
157,5		-20753,2	-259329,0	119928,9	-10380,5	-170533,8
160		-46766,8	-269913,4	124823,8	-10804,2	-202660,7
162,5		-34184,1	-241771,6	115226,1	-9973,4	-170703,0
167,5		-15043,0	-185487,9	96030,8	-8312,0	-112812,1
172,5		-3730,1	-129204,3	76835,5	-6650,5	-62749,4
177,5		0,0	-72920,6	57640,2	-4989,1	-20269,5
182,5			-20244,4	38444,9	-3327,6	14872,9
187,5			25339,6	19249,6	-1666,2	42923,0
192,5			64076,6	54,3	-4,7	64126,2
197,5			96212,0	-19141,0	1656,8	78727,8
202,5			121991,1	-38336,3	3318,2	86973,0
207,5			141597,8	-57531,6	4979,7	89045,8
212,5			155093,5	-76726,9	6641,1	85007,6
217,5			162478,1	-95922,2	8302,6	74858,4
222,5			163690,4	-115117,6	9964,0	58536,9
227,5			158546,3	-134312,9	11625,5	35858,9
232,5			146800,6	-153508,2	13287,0	6579,4
237,5			128208,0	-172703,5	14948,4	-29547,1
242,5			102523,1	-191898,8	16609,9	-72765,8
247,5			69500,7	-211094,1	18271,3	-123322,1
252,5			28895,5	-230289,4	19932,8	-181461,2
257,5			-19537,9	-249484,7	21594,2	-247428,4
260			-46766,8	-259082,3	22425,0	-283424,2
262,5			-34184,1	-231211,3	20652,1	-244743,3
267,5			-15043,0	-175469,2	17106,3	-173405,9
272,5			-3730,1	-119727,1	13560,5	-109896,7

C3 - H variável e e constante						
Distância (m)	Momentos flectores (kN.m)					
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	TOTAL
277,5			0,0	-63985,0	10014,7	-53970,3
282,5				-11850,3	6468,9	-5381,4
287,5				33192,1	2923,1	36115,2
292,5				71387,6	-622,6	70765,0
297,5				102981,4	-4168,4	98813,0
302,5				128219,0	-7714,2	120504,7
307,5				147284,1	-11260,0	136024,1
312,5				160238,2	-14805,8	145432,5
317,5				167081,3	-18351,6	148729,7
322,5				167752,0	-21897,4	145854,7
327,5				162066,4	-25443,1	136623,3
332,5				149779,2	-28988,9	120790,2
337,5				130645,0	-32534,7	98110,3
342,5				104418,5	-36080,5	68338,1
347,5				70854,6	-39626,3	31228,3
352,5				29707,8	-43172,1	-13464,3
357,5				-19267,2	-46717,8	-65985,0
360				-46766,8	-48490,7	-95257,6
362,5				-34184,1	-36268,4	-70452,4
367,5				-15043,0	-11823,6	-26866,6
372,5				-3730,1	12621,2	8891,1
377,5				0,0	37066,0	37066,0
382,5					57903,3	57903,3
387,5					71648,4	71648,4
392,5					78546,6	78546,6
397,5					78843,1	78843,1
402,5					72660,6	72660,6
407,5					59999,2	59999,2
412,5					40858,8	40858,8
417,5					15239,3	15239,3
420					0,0	0,0



+



+

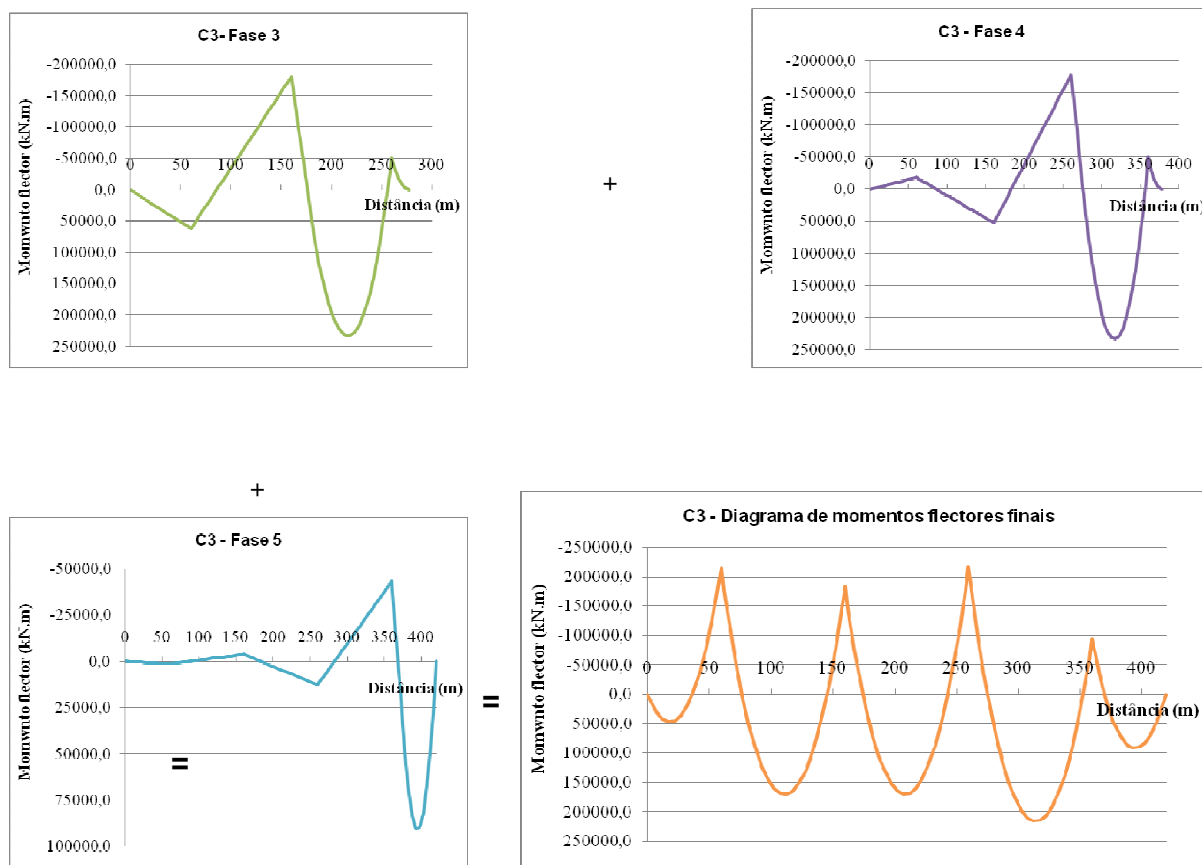


Fig. A.3 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para a solução C3 para cada fase construtiva e valores totais

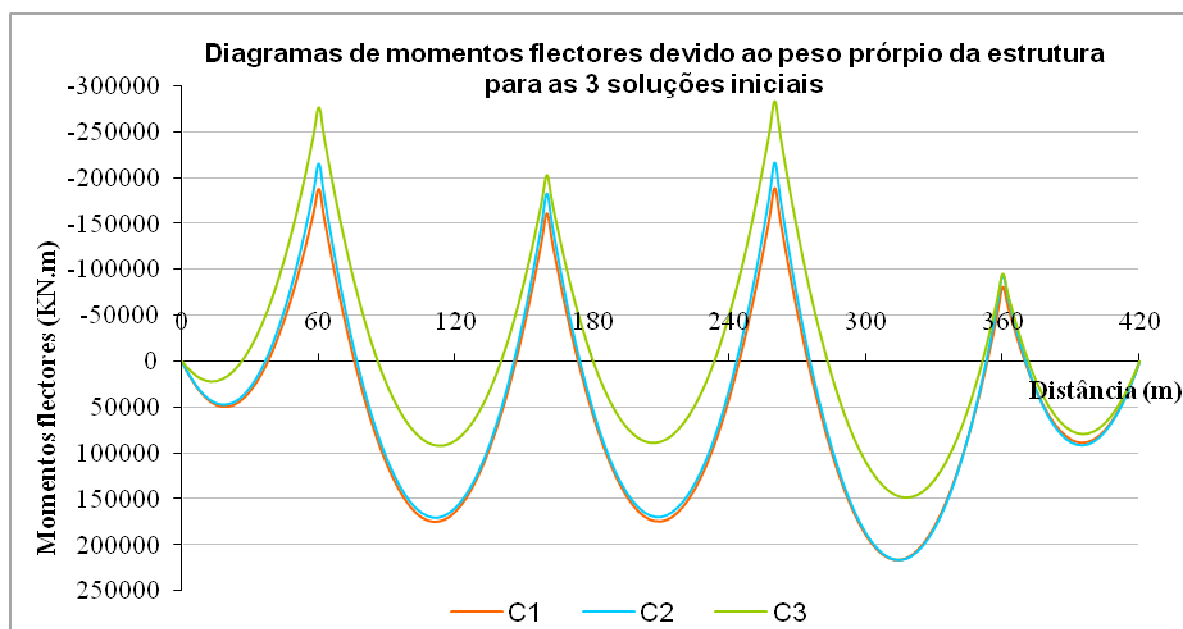


Fig. A.4 – Diagramas de momentos flectores para a acção isolada do peso próprio da estrutura para as soluções C1, C2 e C3

Anexo B

DIMENSIONAMENTO DO PRÉ-ESFORÇO PARA A CONSTRUÇÃO COM CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

No anexo B constam os cálculos que foram necessários para a determinação do pré-esforço a aplicar no caso do cimbra autolanzável com recurso ao método dos coeficientes de influência.

Numa primeira fase apresentam-se as características do traçado do cabo e depois as tabelas e diagramas referentes ao cálculo propriamente dito dos momentos flectores resultantes da aplicação de uma força de pré-esforço de 70000kN com o traçado apresentado.

As tabelas e imagens apresentadas neste Anexo servem como ilustrativas da forma como se calculou e dimensionou o pré-esforço para o tabuleiro construído com recurso ao cimbra autolanzável. O diagrama apresentado no Capítulo 4 do trabalho teve por base este método de cálculo, no entanto, considerou-se o faseamento construtivo do tabuleiro e consequentemente da aplicação do pré-esforço.

B.1 – Traçado dos cabos de pré-esforço

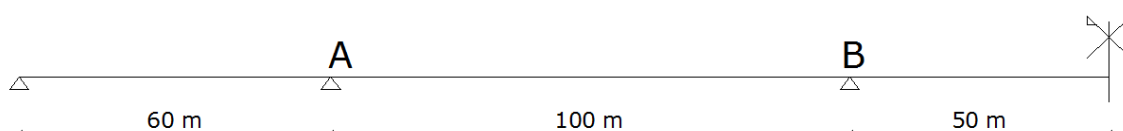


Fig. B.1 – Características do tabuleiro considerado

Tabela B.1 – Equações das parábolas para o traçado considerado

Parábola	Equação
1	$y = 0,00588 x^2$
2	$y = 0,00633 x^2$
3	$y = 0,00516 x^2$
4	$y = 0,00607 x^2$
5	$y = 0,0026 x^2$

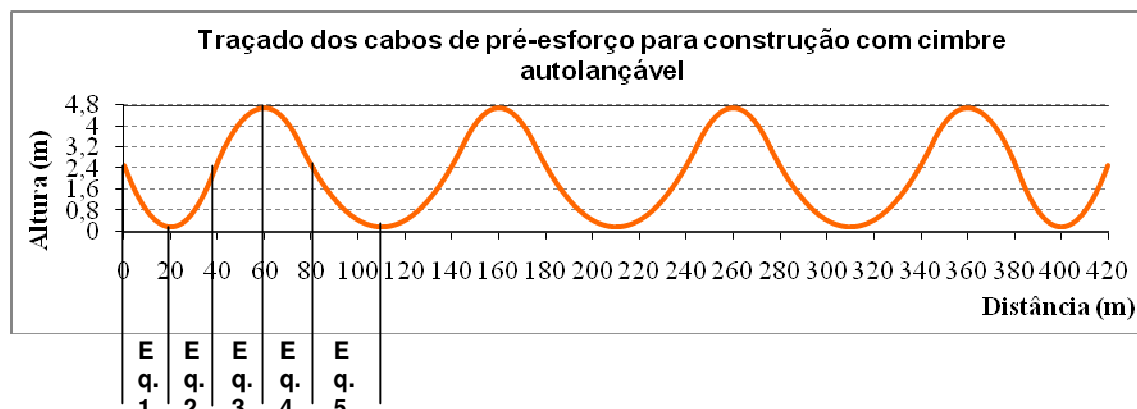


Fig. B.2 – Traçado dos cabos de pré-esforço e identificação de parábolas para a solução C2f

Tabela B.2 – Coordenadas do centro de gravidade das secções de betão do tabuleiro, dos cabos de pré-esforço e inércia das secções para a solução C2f

x(m)	e(x) cabo (m)	c.g. secção (m)	I (x) (m ⁴)	x(m)	e(x) cabo (m)	c.g. secção (m)	I (x) (m ⁴)
	Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção		Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção
0	2,502	2,863	48,13	33	1,21977	2,787	50,57
1	2,27268	2,863	48,13	34	1,39068	2,787	50,57
2	2,05512	2,863	48,13	35	1,57425	2,787	50,57
3	1,84932	2,863	48,13	36	1,77048	2,787	50,57
4	1,65528	2,863	48,13	37	1,97937	2,787	50,57
5	1,473	2,863	48,13	38	2,20092	2,787	50,57
6	1,30248	2,863	48,13	39	2,42444	2,787	50,57
7	1,14372	2,863	48,13	40	2,636	2,787	50,57
8	0,99672	2,863	48,13	41	2,83724	2,787	50,57
9	0,86148	2,863	48,13	42	3,02816	2,787	50,57
10	0,738	2,863	48,13	43	3,20876	2,718	52,79
11	0,62628	2,863	48,13	44	3,37904	2,718	52,79
12	0,52632	2,863	48,13	45	3,539	2,718	52,79
13	0,43812	2,863	48,13	46	3,68864	2,718	52,79
14	0,36168	2,863	48,13	47	3,82796	2,718	52,79
15	0,297	2,863	48,13	48	3,95696	2,653	54,8
16	0,24408	2,863	48,13	49	4,07564	2,653	54,8
17	0,20292	2,863	48,13	50	4,184	2,653	54,8
18	0,17352	2,863	48,13	51	4,28204	2,653	54,8
19	0,15588	2,863	48,13	52	4,36976	2,653	54,8
20	0,15	2,863	48,13	53	4,44716	2,538	58,27
21	0,15633	2,863	48,13	54	4,51424	2,538	58,27
22	0,17532	2,863	48,13	55	4,571	2,538	58,27
23	0,20697	2,863	48,13	56	4,61744	2,538	58,27
24	0,25128	2,863	48,13	57	4,65356	2,538	58,27
25	0,30825	2,863	48,13	58	4,67936	2,36	61,11
26	0,37788	2,863	48,13	59	4,69484	2,36	61,11
27	0,46017	2,863	48,13	60	4,7	2,36	61,11
28	0,55512	2,863	48,13	61	4,69393	2,36	61,11
29	0,66273	2,863	48,13	62	4,67572	2,36	61,11
30	0,783	2,863	48,13	63	4,64537	2,538	58,27
31	0,91593	2,863	48,13	64	4,60288	2,538	58,27
32	1,06152	2,863	48,13	65	4,54825	2,538	58,27

$x(m)$	$e(x)$ cabo (m)	c.g. secção (m)	$I(x)$ (m^4)
	Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção
66	4,48148	2,538	58,27
67	4,40257	2,538	58,27
68	4,31152	2,653	54,8
69	4,20833	2,653	54,8
70	4,093	2,653	54,8
71	3,96553	2,653	54,8
72	3,82592	2,653	54,8
73	3,67417	2,718	52,79
74	3,51028	2,718	52,79
75	3,33425	2,718	52,79
76	3,1556	2,718	52,79
77	2,9814	2,718	52,79
78	2,8124	2,787	50,57
79	2,6486	2,787	50,57
80	2,49	2,787	50,57
81	2,3366	2,787	50,57
82	2,1884	2,787	50,57
83	2,0454	2,863	48,13
84	1,9076	2,863	48,13
85	1,775	2,863	48,13
86	1,6476	2,863	48,13
87	1,5254	2,863	48,13
88	1,4084	2,863	48,13
89	1,2966	2,863	48,13
90	1,19	2,863	48,13
91	1,0886	2,863	48,13
92	0,9924	2,863	48,13
93	0,9014	2,944	45,45
94	0,8156	2,944	45,45
95	0,735	2,944	45,45
96	0,6596	2,944	45,45
97	0,5894	2,944	45,45
98	0,5244	2,944	45,45
99	0,4646	2,944	45,45
100	0,41	2,944	45,45
101	0,3606	2,944	45,45
102	0,3164	2,944	45,45
103	0,2774	2,944	45,45
104	0,2436	2,944	45,45
105	0,215	2,944	45,45
106	0,1916	2,944	45,45
107	0,1734	2,944	45,45
108	0,1604	2,944	45,45
109	0,1526	2,944	45,45
110	0,15	2,944	45,45
111	0,1526	2,944	45,45
112	0,1604	2,944	45,45
113	0,1734	2,944	45,45
114	0,1916	2,944	45,45
115	0,215	2,944	45,45
116	0,2436	2,944	45,45
117	0,2774	2,944	45,45
118	0,3164	2,944	45,45

$x(m)$	$e(x)$ cabo (m)	c.g. secção (m)	$I(x)$ (m^4)
	Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção
119	0,3606	2,944	45,45
120	0,41	2,944	45,45
121	0,4646	2,944	45,45
122	0,5244	2,944	45,45
123	0,5894	2,944	45,45
124	0,6596	2,944	45,45
125	0,735	2,944	45,45
126	0,8156	2,944	45,45
127	0,9014	2,944	45,45
128	0,9924	2,863	48,13
129	1,0886	2,863	48,13
130	1,19	2,863	48,13
131	1,2966	2,863	48,13
132	1,4084	2,863	48,13
133	1,5254	2,863	48,13
134	1,6476	2,863	48,13
135	1,775	2,863	48,13
136	1,9076	2,863	48,13
137	2,0454	2,863	48,13
138	2,1884	2,787	50,57
139	2,3366	2,787	50,57
140	2,49	2,787	50,57
141	2,6486	2,787	50,57
142	2,8124	2,787	50,57
143	2,9814	2,718	52,79
144	3,1556	2,718	52,79
145	3,335	2,718	52,79
146	3,51028	2,718	52,79
147	3,67417	2,718	52,79
148	3,82592	2,653	54,8
149	3,96553	2,653	54,8
150	4,093	2,653	54,8
151	4,20833	2,653	54,8
152	4,31152	2,653	54,8
153	4,40257	2,538	58,27
154	4,48148	2,538	58,27
155	4,54825	2,538	58,27
156	4,60288	2,538	58,27
157	4,64537	2,538	58,27
158	4,67572	2,36	61,11
159	4,69393	2,36	61,11
160	4,7	2,36	61,11
161	4,69393	2,36	61,11
162	4,67572	2,36	61,11
163	4,64537	2,538	58,27
164	4,60288	2,538	58,27
165	4,54825	2,538	58,27
166	4,48148	2,538	58,27
167	4,40257	2,538	58,27
168	4,31152	2,653	54,8
169	4,20833	2,653	54,8
170	4,093	2,653	54,8
171	3,96553	2,653	54,8

x(m)	e(x) cabo (m)	c.g. secção (m)	I (x) (m⁴)	x(m)	e(x) cabo (m)	c.g. secção (m)	I (x) (m⁴)
	Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção		Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção
172	3,82592	2,653	54,8	225	0,735	2,944	45,45
173	3,67417	2,718	52,79	226	0,8156	2,944	45,45
174	3,51028	2,718	52,79	227	0,9014	2,944	45,45
175	3,33425	2,718	52,79	228	0,9924	2,863	48,13
176	3,1556	2,718	52,79	229	1,0886	2,863	48,13
177	2,9814	2,718	52,79	230	1,19	2,863	48,13
178	2,8124	2,787	50,57	231	1,2966	2,863	48,13
179	2,6486	2,787	50,57	232	1,4084	2,863	48,13
180	2,49	2,787	50,57	233	1,5254	2,863	48,13
181	2,3366	2,787	50,57	234	1,6476	2,863	48,13
182	2,1884	2,787	50,57	235	1,775	2,863	48,13
183	2,0454	2,863	48,13	236	1,9076	2,863	48,13
184	1,9076	2,863	48,13	237	2,0454	2,863	48,13
185	1,775	2,863	48,13	238	2,1884	2,787	50,57
186	1,6476	2,863	48,13	239	2,3366	2,787	50,57
187	1,5254	2,863	48,13	240	2,49	2,787	50,57
188	1,4084	2,863	48,13	241	2,6486	2,787	50,57
189	1,2966	2,863	48,13	242	2,8124	2,787	50,57
190	1,19	2,863	48,13	243	2,9814	2,718	52,79
191	1,0886	2,863	48,13	244	3,1556	2,718	52,79
192	0,9924	2,863	48,13	245	3,335	2,718	52,79
193	0,9014	2,944	45,45	246	3,51028	2,718	52,79
194	0,8156	2,944	45,45	247	3,67417	2,718	52,79
195	0,735	2,944	45,45	248	3,82592	2,653	54,8
196	0,6596	2,944	45,45	249	3,96553	2,653	54,8
197	0,5894	2,944	45,45	250	4,093	2,653	54,8
198	0,5244	2,944	45,45	251	4,20833	2,653	54,8
199	0,4646	2,944	45,45	252	4,31152	2,653	54,8
200	0,41	2,944	45,45	253	4,40257	2,538	58,27
201	0,3606	2,944	45,45	254	4,48148	2,538	58,27
202	0,3164	2,944	45,45	255	4,54825	2,538	58,27
203	0,2774	2,944	45,45	256	4,60288	2,538	58,27
204	0,2436	2,944	45,45	257	4,64537	2,538	58,27
205	0,215	2,944	45,45	258	4,67572	2,36	61,11
206	0,1916	2,944	45,45	259	4,69393	2,36	61,11
207	0,1734	2,944	45,45	260	4,7	2,36	61,11
208	0,1604	2,944	45,45	261	4,69393	2,36	61,11
209	0,1526	2,944	45,45	262	4,67572	2,36	61,11
210	0,15	2,944	45,45	263	4,64537	2,538	58,27
211	0,1526	2,944	45,45	264	4,60288	2,538	58,27
212	0,1604	2,944	45,45	265	4,54825	2,538	58,27
213	0,1734	2,944	45,45	266	4,48148	2,538	58,27
214	0,1916	2,944	45,45	267	4,40257	2,538	58,27
215	0,215	2,944	45,45	268	4,31152	2,653	54,8
216	0,2436	2,944	45,45	269	4,20833	2,653	54,8
217	0,2774	2,944	45,45	270	4,093	2,653	54,8
218	0,3164	2,944	45,45	271	3,96553	2,653	54,8
219	0,3606	2,944	45,45	272	3,82592	2,653	54,8
220	0,41	2,944	45,45	273	3,67417	2,718	52,79
221	0,4646	2,944	45,45	274	3,51028	2,718	52,79
222	0,5244	2,944	45,45	275	3,33425	2,718	52,79
223	0,5894	2,944	45,45	276	3,1556	2,718	52,79
224	0,6596	2,944	45,45	277	2,9814	2,718	52,79

$x(m)$	$e(x)$ cabo (m) Distância do cabo à fibra inferior da secção	c.g. secção (m) Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	$I(x)$ (m ⁴) Inércia da secção
278	2,8124	2,787	50,57
279	2,6486	2,787	50,57
280	2,49	2,787	50,57
281	2,3366	2,787	50,57
282	2,1884	2,787	50,57
283	2,0454	2,863	48,13
284	1,9076	2,863	48,13
285	1,775	2,863	48,13
286	1,6476	2,863	48,13
287	1,5254	2,863	48,13
288	1,4084	2,863	48,13
289	1,2966	2,863	48,13
290	1,19	2,863	48,13
291	1,0886	2,863	48,13
292	0,9924	2,863	48,13
293	0,9014	2,944	45,45
294	0,8156	2,944	45,45
295	0,735	2,944	45,45
296	0,6596	2,944	45,45
297	0,5894	2,944	45,45
298	0,5244	2,944	45,45
299	0,4646	2,944	45,45
300	0,41	2,944	45,45
301	0,3606	2,944	45,45
302	0,3164	2,944	45,45
303	0,2774	2,944	45,45
304	0,2436	2,944	45,45
305	0,215	2,944	45,45
306	0,1916	2,944	45,45
307	0,1734	2,944	45,45
308	0,1604	2,944	45,45
309	0,1526	2,944	45,45
310	0,15	2,944	45,45
311	0,1526	2,944	45,45
312	0,1604	2,944	45,45
313	0,1734	2,944	45,45
314	0,1916	2,944	45,45
315	0,215	2,944	45,45
316	0,2436	2,944	45,45
317	0,2774	2,944	45,45
318	0,3164	2,944	45,45
319	0,3606	2,944	45,45
320	0,41	2,944	45,45
321	0,4646	2,944	45,45
322	0,5244	2,944	45,45
323	0,5894	2,944	45,45
324	0,6596	2,944	45,45
325	0,735	2,944	45,45
326	0,8156	2,944	45,45
327	0,9014	2,944	45,45
328	0,9924	2,863	48,13
329	1,0886	2,863	48,13
330	1,19	2,863	48,13

$x(m)$	$e(x)$ cabo (m) Distância do cabo à fibra inferior da secção	c.g. secção (m) Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	$I(x)$ (m ⁴) Inércia da secção
331	1,2966	2,863	48,13
332	1,4084	2,863	48,13
333	1,5254	2,863	48,13
334	1,6476	2,863	48,13
335	1,775	2,863	48,13
336	1,9076	2,863	48,13
337	2,0454	2,863	48,13
338	2,1884	2,787	50,57
339	2,3366	2,787	50,57
340	2,49	2,787	50,57
341	2,6486	2,787	50,57
342	2,8124	2,787	50,57
343	2,9814	2,718	52,79
344	3,1556	2,718	52,79
345	3,335	2,718	52,79
346	3,51028	2,718	52,79
347	3,67417	2,718	52,79
348	3,82592	2,653	54,8
349	3,96553	2,653	54,8
350	4,093	2,653	54,8
351	4,20833	2,653	54,8
352	4,31152	2,653	54,8
353	4,40257	2,538	58,27
354	4,48148	2,538	58,27
355	4,54825	2,538	58,27
356	4,60288	2,538	58,27
357	4,64537	2,538	58,27
358	4,67572	2,36	61,11
359	4,69393	2,36	61,11
360	4,7	2,36	61,11
361	4,69484	2,36	61,11
362	4,67936	2,36	61,11
363	4,65356	2,538	58,27
364	4,61744	2,538	58,27
365	4,571	2,538	58,27
366	4,51424	2,538	58,27
367	4,44716	2,538	58,27
368	4,36976	2,653	54,8
369	4,28204	2,653	54,8
370	4,184	2,653	54,8
371	4,07564	2,653	54,8
372	3,95696	2,653	54,8
373	3,82796	2,718	52,79
374	3,68864	2,718	52,79
375	3,539	2,718	52,79
376	3,37904	2,718	52,79
377	3,20876	2,718	52,79
378	3,02816	2,787	50,57
379	2,83724	2,787	50,57
380	2,636	2,787	50,57
381	2,42444	2,787	50,57
382	2,20256	2,787	50,57
383	1,97937	2,787	50,57

$x(m)$	$e(x)$ cabo (m)	c.g. secção (m)	$I(x)$ (m ⁴)	$x(m)$	$e(x)$ cabo (m)	c.g. secção (m)	$I(x)$ (m ⁴)
	Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção		Distância do cabo à fibra inferior da secção	Distância do centro de gravidade à fibra inferior da secção	Inércia da secção
384	1,77048	2,787	50,57	408	0,52632	2,863	48,13
385	1,57425	2,787	50,57	409	0,62628	2,863	48,13
386	1,39068	2,787	50,57	410	0,738	2,863	48,13
387	1,21977	2,787	50,57	411	0,86148	2,863	48,13
388	1,06152	2,863	48,13	412	0,99672	2,863	48,13
389	0,91593	2,863	48,13	413	1,14372	2,863	48,13
390	0,783	2,863	48,13	414	1,30248	2,863	48,13
391	0,66273	2,863	48,13	415	1,473	2,863	48,13
392	0,55512	2,863	48,13	416	1,65528	2,863	48,13
393	0,46017	2,863	48,13	417	1,84932	2,863	48,13
394	0,37788	2,863	48,13	418	2,05512	2,863	48,13
395	0,30825	2,863	48,13	419	2,27268	2,863	48,13
396	0,25128	2,863	48,13	420	2,502	2,863	48,13
397	0,20697	2,863	48,13				
398	0,17532	2,863	48,13				
399	0,15633	2,863	48,13				
400	0,15	2,863	48,13				
401	0,15588	2,863	48,13				
402	0,17352	2,863	48,13				
403	0,20292	2,863	48,13				
404	0,24408	2,863	48,13				
405	0,297	2,863	48,13				
406	0,36168	2,863	48,13				
407	0,43812	2,863	48,13				

B.2 – Determinação dos diagramas devido à aplicação do pré-esforço

Tabela B.3 – Cálculo do momento flector isostático, hiperstático e final para a solução C2f

x (m)	$L_i(x)$ M_A	$L_i(x)$ M_B	$\eta M_A(x)$	$\eta M_B(x)$	$P(x)$ (kN)	$et(x)$ (m)	$M_{iso}(x)$ (kN.m)	$(\eta M_A * M_i)$ $so * \Delta x * I) / I$ (x)	$(\eta M_B * M_i)$ $so * \Delta x * I) / I$ (x)	$M_{hip}(x)$ (kN.m)	$M_{total}(x)$ (kN.m)
0	0,00	0,00	0,000000	0,000000	70000	-0,36	-25270,0	0,00	0,00	0,0	-25270
1	-0,22	0,06	-0,000108	0,000030	70000	-0,59	-41322,4	4,20	-1,17	806,6	-40516
2	-0,43	0,12	-0,000524	0,000072	70000	-0,81	-56551,6	28,00	-3,83	1613,2	-54938
3	-0,65	0,19	-0,000937	0,000200	70000	-1,01	-70957,6	62,76	-13,39	2419,8	-68538
4	-0,86	0,25	-0,001345	0,000327	70000	-1,21	-84540,4	107,38	-26,08	3226,4	-81314
5	-1,07	0,31	-0,001750	0,000452	70000	-1,39	-97300,0	160,76	-41,54	4033,0	-93267
6	-1,28	0,37	-0,002151	0,000576	70000	-1,56	-109236,4	221,85	-59,45	4839,6	-104397
7	-1,49	0,43	-0,002549	0,000699	70000	-1,72	-120349,6	289,64	-79,46	5646,2	-114703
8	-1,70	0,49	-0,002943	0,000821	70000	-1,87	-130639,6	363,12	-101,26	6452,8	-124187
9	-1,90	0,55	-0,003335	0,000941	70000	-2,00	-140106,4	441,30	-124,52	7259,4	-132847
10	-2,10	0,60	-0,003725	0,001060	70000	-2,13	-148750,0	523,22	-148,92	8066,0	-140684
11	-2,29	0,66	-0,004112	0,001178	70000	-2,24	-156570,4	607,94	-174,15	8872,6	-147698
12	-2,48	0,72	-0,004496	0,001294	70000	-2,34	-163567,6	694,50	-199,92	9679,2	-153888
13	-2,67	0,77	-0,004879	0,001409	70000	-2,42	-169741,6	781,99	-225,92	10485,8	-159256
14	-2,85	0,82	-0,005259	0,001523	70000	-2,50	-175092,4	869,50	-251,87	11292,4	-163800
15	-3,03	0,87	-0,005637	0,001636	70000	-2,57	-179620,0	956,10	-277,48	12099,0	-167521
16	-3,20	0,92	-0,006013	0,001747	70000	-2,62	-183324,4	1040,90	-302,46	12905,6	-170419
17	-3,37	0,97	-0,006387	0,001857	70000	-2,66	-186205,6	1123,00	-326,56	13712,2	-172493
18	-3,53	1,01	-0,006758	0,001966	70000	-2,69	-188263,6	1201,52	-349,49	14518,8	-173745
19	-3,68	1,06	-0,007128	0,002073	70000	-2,71	-189498,4	1275,56	-371,00	15325,4	-174173
20	-3,82	1,10	-0,007496	0,002179	70000	-2,71	-189910,0	1344,26	-390,84	16132,0	-173778
21	-3,96	1,14	-0,007861	0,002284	70000	-2,71	-189466,9	1406,50	-408,68	16938,6	-172528
22	-4,09	1,18	-0,008224	0,002388	70000	-2,69	-188137,6	1461,14	-424,21	17745,2	-170392

23	-4,21	1,21	-0,008585	0,002490	70000	-2,66	-185922,1	1507,26	-437,16	18551,8	-167370
24	-4,32	1,24	-0,008943	0,002591	70000	-2,61	-182820,4	1543,94	-447,30	19358,4	-163462
25	-4,43	1,27	-0,009298	0,002691	70000	-2,55	-178832,5	1570,27	-454,37	20165,0	-158668
26	-4,52	1,30	-0,009651	0,002789	70000	-2,49	-173958,4	1585,38	-458,14	20971,6	-152987
27	-4,61	1,33	-0,010000	0,002886	70000	-2,40	-168198,1	1588,37	-458,39	21778,2	-146420
28	-4,68	1,35	-0,010346	0,002982	70000	-2,31	-161551,6	1578,39	-454,89	22584,8	-138967
29	-4,75	1,37	-0,010689	0,003076	70000	-2,20	-154018,9	1554,59	-447,42	23391,4	-130628
30	-4,80	1,38	-0,011027	0,003169	70000	-2,08	-145600,0	1516,16	-435,78	24198,0	-121402
31	-4,84	1,39	-0,011362	0,003261	70000	-1,95	-136294,9	1462,30	-419,76	25004,6	-111290
32	-4,87	1,40	-0,011691	0,003352	70000	-1,80	-126103,6	1392,23	-399,16	25811,2	-100292
33	-4,89	1,41	-0,012016	0,003441	70000	-1,57	-109706,1	1184,80	-339,31	26617,8	-83088
34	-4,90	1,41	-0,012336	0,003529	70000	-1,40	-97742,4	1083,69	-310,04	27424,4	-70318
35	-4,90	1,41	-0,012650	0,003616	70000	-1,21	-84892,5	965,19	-275,90	28231,0	-56662
36	-4,88	1,40	-0,012959	0,003702	70000	-1,02	-71156,4	828,73	-236,72	29037,6	-42119
37	-4,85	1,40	-0,013260	0,003786	70000	-0,81	-56534,1	673,76	-192,35	29844,2	-26690
38	-4,80	1,38	-0,013555	0,003869	70000	-0,59	-41025,6	499,80	-142,64	30650,8	-10375
39	-4,75	1,37	-0,013843	0,003950	70000	-0,36	-25379,2	315,74	-90,10	31457,4	6078
40	-4,68	1,35	-0,014122	0,004030	70000	-0,15	-10570,0	134,16	-38,29	32264,0	21694
41	-4,59	1,32	-0,014393	0,004109	70000	0,05	3516,8	-45,49	12,99	33070,6	36587
42	-4,49	1,29	-0,014656	0,004187	70000	0,24	16881,2	-222,36	63,53	33877,2	50758
43	-4,38	1,26	-0,014908	0,004264	70000	0,49	34353,2	-440,94	126,10	34683,8	69037
44	-4,25	1,22	-0,015151	0,004339	70000	0,66	46272,8	-603,60	172,85	35490,4	81763
45	-4,11	1,18	-0,015383	0,004413	70000	0,82	57470,0	-761,13	218,33	36297,0	93767
46	-3,95	1,14	-0,015603	0,004485	70000	0,97	67944,8	-912,76	262,37	37103,6	105048
47	-3,77	1,09	-0,015812	0,004556	70000	1,11	77697,2	-1057,72	304,79	37910,2	115607
48	-3,58	1,03	-0,016008	0,004626	70000	1,30	91277,2	-1211,84	350,23	38716,8	129994
49	-3,37	0,97	-0,016190	0,004695	70000	1,42	99584,8	-1337,20	387,77	39523,4	139108
50	-3,15	0,91	-0,016358	0,004762	70000	1,53	107170,0	-1454,01	423,30	40330,0	147500
51	-2,91	0,84	-0,016512	0,004828	70000	1,63	114032,8	-1561,63	456,65	41136,6	155169
52	-2,66	0,76	-0,016650	0,004893	70000	1,72	120173,2	-1659,45	487,70	41943,2	162116
53	-2,38	0,69	-0,016771	0,004957	70000	1,91	133641,2	-1748,18	516,68	42749,8	176391
54	-2,09	0,60	-0,016875	0,005019	70000	1,98	138336,8	-1820,83	541,55	43556,4	181893
55	-1,79	0,51	-0,016961	0,005080	70000	2,03	142310,0	-1882,67	563,86	44363,0	186673
56	-1,46	0,42	-0,017028	0,005139	70000	2,08	145560,8	-1933,28	583,52	45169,6	190730
57	-1,12	0,32	-0,017075	0,005198	70000	2,12	148089,2	-1972,31	600,39	45976,2	194065
58	-0,77	0,22	-0,017102	0,005255	70000	2,32	162355,2	-2065,01	634,53	46782,8	209138
59	-0,39	0,11	-0,017106	0,005311	70000	2,33	163438,8	-2079,37	645,54	47589,4	211028
60	0,00	0,00	-0,017088	0,007500	70000	2,34	163800,0	-2081,78	913,69	48393,8	212194
61	-0,59	-0,12	-0,017286	0,007180	70000	2,33	163375,1	-2100,38	872,40	48580,8	211956
62	-1,16	-0,24	-0,017301	0,006859	70000	2,32	162100,4	-2085,79	826,92	48767,6	210868
63	-1,72	-0,37	-0,017305	0,006540	70000	2,11	147515,9	-1991,13	752,46	48954,4	196470
64	-2,26	-0,50	-0,017299	0,006222	70000	2,06	144541,6	-1950,29	701,48	49141,2	193683
65	-2,78	-0,64	-0,017282	0,005906	70000	2,01	140717,5	-1896,88	648,22	49328,1	190046
66	-3,28	-0,78	-0,017256	0,005591	70000	1,94	136043,6	-1831,04	593,31	49514,9	185558
67	-3,77	-0,92	-0,017219	0,005278	70000	1,86	130519,9	-1752,96	537,35	49701,7	180222
68	-4,24	-1,07	-0,017172	0,004967	70000	1,66	116096,4	-1653,49	478,24	49888,5	165985
69	-4,69	-1,22	-0,017116	0,004657	70000	1,56	108873,1	-1545,52	420,50	50075,3	158948
70	-5,12	-1,38	-0,017050	0,004349	70000	1,44	100800,0	-1425,41	363,54	50262,1	151062
71	-5,54	-1,54	-0,016975	0,004042	70000	1,31	91877,1	-1293,50	307,98	50448,9	142326
72	-5,94	-1,70	-0,016890	0,003736	70000	1,17	82104,4	-1150,15	254,44	50635,7	132740
73	-6,32	-1,87	-0,016797	0,003433	70000	0,96	66931,9	-967,92	197,81	50822,5	117754
74	-6,69	-2,04	-0,016694	0,003131	70000	0,79	55459,6	-797,11	149,48	51009,3	106469
75	-7,04	-2,21	-0,016583	0,002830	70000	0,62	43137,5	-615,88	105,11	51196,2	94334
76	-7,37	-2,38	-0,016463	0,002531	70000	0,44	30632,0	-434,17	66,75	51383,0	82015
77	-7,69	-2,56	-0,016334	0,002234	70000	0,26	18438,0	-259,30	35,46	51569,8	70008
78	-7,99	-2,74	-0,016198	0,001938	70000	0,03	1778,0	-25,88	3,10	51756,6	53535
79	-8,27	-2,92	-0,016053	0,001643	70000	-0,14	-9688,0	139,78	-14,31	51943,4	42255
80	-8,54	-3,10	-0,015900	0,001350	70000	-0,30	-20790,0	297,10	-25,23	52130,2	31340
81	-8,79	-3,28	-0,015740	0,001059	70000	-0,45	-31528,0	446,01	-30,01	52317,0	20789
82	-9,03	-3,46	-0,015572	0,000769	70000	-0,60	-41902,0	586,43	-28,98	52503,8	10602
83	-9,25	-3,65	-0,015396	0,000481	70000	-0,82	-57232,0	832,10	-26,01	52690,6	-4541
84	-9,46	-3,83	-0,015214	0,000195	70000	-0,96	-66878,0	960,81	-12,29	52877,4	-14001
85	-9,65	-4,02	-0,015024	-0,000090	70000	-1,09	-76160,0	1080,51	6,50	53064,3	-23096
86	-9,83	-4,20	-0,014827	-0,000374	70000	-1,22	-85078,0	1191,23	30,04	53251,1	-31827
87	-9,99	-4,39	-0,014624	-0,000656	70000	-1,34	-93632,0	1293,02	57,98	53437,9	-40194
88	-10,13	-4,57	-0,014414	-0,000936	70000	-1,45	-101822,0	1385,93	90,01	53624,7	-48197
89	-10,26	-4,76	-0,014198	-0,001215	70000	-1,57	-109648,0	1470,06	125,80	53811,5	-55837

90	-10,38	-4,94	-0,013975	-0,001492	70000	-1,67	-117110,0	1545,49	165,03	53998,3	-63112
91	-10,49	-5,12	-0,013747	-0,001768	70000	-1,77	-124208,0	1612,37	207,37	54185,1	-70023
92	-10,58	-5,30	-0,013512	-0,002042	70000	-1,87	-130942,0	1670,81	252,51	54371,9	-76570
93	-10,65	-5,48	-0,013272	-0,002315	70000	-2,04	-142982,0	1897,71	330,97	54558,7	-88423
94	-10,72	-5,66	-0,013027	-0,002586	70000	-2,13	-148988,0	1940,87	385,25	54745,5	-94242
95	-10,77	-5,83	-0,012776	-0,002855	70000	-2,21	-154630,0	1975,61	441,52	54932,4	-99698
96	-10,80	-6,01	-0,012521	-0,003123	70000	-2,28	-159908,0	2002,15	499,43	55119,2	-104789
97	-10,83	-6,17	-0,012260	-0,003390	70000	-2,35	-164822,0	2020,72	558,69	55306,0	-109516
98	-10,84	-6,34	-0,011995	-0,003654	70000	-2,42	-169372,0	2031,58	618,96	55492,8	-113879
99	-10,84	-6,50	-0,011725	-0,003918	70000	-2,48	-173558,0	2034,96	679,96	55679,6	-117878
100	-10,83	-6,66	-0,011451	-0,004179	70000	-2,53	-177380,0	2031,16	741,35	55866,4	-121514
101	-10,81	-6,82	-0,011173	-0,004440	70000	-2,58	-180838,0	2020,45	802,86	56053,2	-124785
102	-10,77	-6,97	-0,010891	-0,004698	70000	-2,63	-183932,0	2003,13	864,16	56240,0	-127692
103	-10,73	-7,11	-0,010605	-0,004955	70000	-2,67	-186662,0	1979,51	924,97	56426,8	-130235
104	-10,67	-7,25	-0,010315	-0,005211	70000	-2,70	-189028,0	1949,91	984,99	56613,6	-132414
105	-10,60	-7,39	-0,010023	-0,005465	70000	-2,73	-191030,0	1914,66	1043,94	56800,5	-134230
106	-10,53	-7,52	-0,009727	-0,005717	70000	-2,75	-192668,0	1874,09	1101,52	56987,3	-135681
107	-10,44	-7,65	-0,009428	-0,005968	70000	-2,77	-193942,0	1828,56	1157,45	57174,1	-136768
108	-10,35	-7,77	-0,009127	-0,006217	70000	-2,78	-194852,0	1778,42	1211,45	57360,9	-137491
109	-10,24	-7,88	-0,008823	-0,006465	70000	-2,79	-195398,0	1724,02	1263,26	57547,7	-137850
110	-10,13	-7,99	-0,008517	-0,006711	70000	-2,79	-195580,0	1665,74	1312,58	57734,5	-137846
111	-10,01	-8,09	-0,008209	-0,006956	70000	-2,79	-195398,0	1603,96	1359,16	57921,3	-137477
112	-9,88	-8,18	-0,007899	-0,007199	70000	-2,78	-194852,0	1539,04	1402,72	58108,1	-136744
113	-9,74	-8,27	-0,007587	-0,007440	70000	-2,77	-193942,0	1471,38	1443,01	58294,9	-135647
114	-9,60	-8,34	-0,007273	-0,007680	70000	-2,75	-192668,0	1401,35	1479,76	58481,7	-134186
115	-9,44	-8,41	-0,006959	-0,007919	70000	-2,73	-191030,0	1329,35	1512,73	58668,6	-132361
116	-9,28	-8,48	-0,006643	-0,008156	70000	-2,70	-189028,0	1255,77	1541,64	58855,4	-130173
117	-9,12	-8,53	-0,006327	-0,008391	70000	-2,67	-186662,0	1181,00	1566,27	59042,2	-127620
118	-8,95	-8,58	-0,006010	-0,008625	70000	-2,63	-183932,0	1105,42	1586,35	59229,0	-124703
119	-8,77	-8,62	-0,005693	-0,008857	70000	-2,58	-180838,0	1029,43	1601,66	59415,8	-121422
120	-8,59	-8,64	-0,005375	-0,009088	70000	-2,53	-177380,0	953,42	1611,94	59602,6	-117777
121	-8,40	-8,66	-0,005058	-0,009317	70000	-2,48	-173558,0	877,78	1616,97	59789,4	-113769
122	-8,20	-8,67	-0,004740	-0,009544	70000	-2,42	-169372,0	802,88	1616,50	59976,2	-109396
123	-8,00	-8,67	-0,004424	-0,009770	70000	-2,35	-164822,0	729,11	1610,32	60163,0	-104659
124	-7,80	-8,66	-0,004108	-0,009994	70000	-2,28	-159908,0	656,84	1598,20	60349,8	-99558
125	-7,59	-8,64	-0,003793	-0,010217	70000	-2,21	-154630,0	586,45	1579,91	60536,7	-94093
126	-7,38	-8,61	-0,003479	-0,010439	70000	-2,13	-148988,0	518,29	1555,23	60723,5	-88265
127	-7,16	-8,56	-0,003166	-0,010658	70000	-2,04	-142982,0	452,71	1523,96	60910,3	-82072
128	-6,95	-8,51	-0,002855	-0,010877	70000	-1,87	-130942,0	353,07	1344,90	61097,1	-69845
129	-6,73	-8,44	-0,002546	-0,011093	70000	-1,77	-124208,0	298,67	1301,15	61283,9	-62924
130	-6,50	-8,37	-0,002240	-0,011308	70000	-1,67	-117110,0	247,66	1250,58	61470,7	-55639
131	-6,28	-8,28	-0,001935	-0,011522	70000	-1,57	-109648,0	200,35	1193,00	61657,5	-47990
132	-6,05	-8,18	-0,001633	-0,011734	70000	-1,45	-101822,0	157,01	1128,24	61844,3	-39978
133	-5,82	-8,07	-0,001334	-0,011944	70000	-1,34	-93632,0	117,92	1056,09	62031,1	-31601
134	-5,59	-7,95	-0,001037	-0,012153	70000	-1,22	-85078,0	83,35	976,39	62217,9	-22860
135	-5,36	-7,81	-0,000745	-0,012360	70000	-1,09	-76160,0	53,55	888,95	62404,8	-13755
136	-5,12	-7,66	-0,000455	-0,012566	70000	-0,96	-66878,0	28,74	793,61	62591,6	-4286
137	-4,89	-7,50	-0,000169	-0,012770	70000	-0,82	-57232,0	9,16	690,18	62778,4	5546
138	-4,66	-7,33	0,000112	-0,012973	70000	-0,60	-41902,0	-4,23	488,56	62965,2	21063
139	-4,42	-7,14	0,000390	-0,013174	70000	-0,45	-31528,0	-11,04	373,30	63152,0	31624
140	-4,19	-6,94	0,000663	-0,013374	70000	-0,30	-20790,0	-12,38	249,89	63338,8	42549
141	-3,96	-6,73	0,000931	-0,013572	70000	-0,14	-9688,0	-8,11	118,17	63525,6	53838
142	-3,73	-6,50	0,001194	-0,013768	70000	0,03	1778,0	1,91	-22,00	63712,4	65490
143	-3,50	-6,26	0,001452	-0,013963	70000	0,26	18438,0	23,06	-221,65	63899,2	82337
144	-3,27	-6,00	0,001705	-0,014156	70000	0,44	30632,0	44,97	-373,34	64086,0	94718
145	-3,04	-5,74	0,001952	-0,014348	70000	0,62	43190,0	72,58	-533,53	64272,9	107463
146	-2,82	-5,46	0,002193	-0,014538	70000	0,79	55459,6	104,71	-694,18	64459,7	119919
147	-2,60	-5,16	0,002428	-0,014727	70000	0,96	66931,9	139,90	-848,65	64646,5	131578
148	-2,37	-4,85	0,002656	-0,014914	70000	1,17	82104,4	180,86	-1015,58	64833,3	146938
149	-2,16	-4,53	0,002878	-0,015100	70000	1,31	91877,1	219,27	-1150,60	65020,1	156897
150	-1,94	-4,19	0,003092	-0,015284	70000	1,44	100800,0	258,51	-1277,73	65206,9	166007
151	-1,73	-3,83	0,003299	-0,015466	70000	1,56	108873,1	297,93	-1396,54	65393,7	174267
152	-1,52	-3,47	0,003499	-0,015647	70000	1,66	116096,4	336,94	-1506,61	65580,5	181677
153	-1,32	-3,08	0,003691	-0,015826	70000	1,86	130519,9	375,80	-1611,18	65767,3	196287
154	-1,12	-2,69	0,003875	-0,016004	70000	1,94	136043,6	411,24	-1698,23	65954,1	201998
155	-0,92	-2,28	0,004051	-0,016180	70000	2,01	140717,5	444,66	-1775,92	66141,0	206858
156	-0,73	-1,85	0,004219	-0,016355	70000	2,06	144541,6	475,60	-1843,87	66327,8	210869

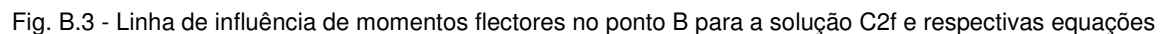
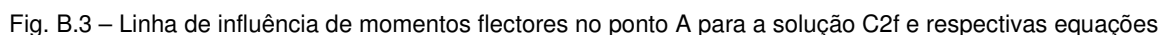
157	-0,54	-1,41	0,004377	-0,016528	70000	2,11	147515,9	503,61	-1901,73	66514,6	214030
158	-0,35	-0,96	0,004526	-0,016700	70000	2,32	162100,4	545,69	-2013,31	66701,4	228802
159	-0,17	-0,49	0,004666	-0,016870	70000	2,33	163375,1	567,00	-2049,80	66888,2	230263
160	0,00	0,00	0,004977	-0,017038	70000	2,34	163800,0	606,28	-2075,66	67187,0	230987
161	0,17	-0,50	0,004968	-0,016801	70000	2,33	163375,1	603,63	-2041,45	67187,0	230562
162	0,33	-0,99	0,004965	-0,016644	70000	2,32	162100,4	598,64	-2006,64	67187,0	229287
163	0,49	-1,46	0,004964	-0,016486	70000	2,11	147515,9	571,22	-1896,89	67187,0	214703
164	0,65	-1,91	0,004964	-0,016326	70000	2,06	144541,6	559,70	-1840,62	67187,0	211729
165	0,80	-2,35	0,004959	-0,016165	70000	2,01	140717,5	544,34	-1774,19	67187,0	207905
166	0,94	-2,78	0,004952	-0,016001	70000	1,94	136043,6	525,43	-1697,94	67187,0	203231
167	1,08	-3,19	0,004941	-0,015836	70000	1,86	130519,9	503,00	-1612,22	67187,0	197707
168	1,22	-3,59	0,004927	-0,015670	70000	1,66	116096,4	474,45	-1508,83	67187,0	183283
169	1,35	-3,97	0,004911	-0,015502	70000	1,56	108873,1	443,46	-1399,77	67187,0	176060
170	1,47	-4,34	0,004892	-0,015332	70000	1,44	100800,0	408,99	-1281,78	67187,0	167987
171	1,59	-4,69	0,004870	-0,015161	70000	1,31	91877,1	371,13	-1155,25	67187,0	159064
172	1,70	-5,03	0,004846	-0,014987	70000	1,17	82104,4	330,00	-1020,58	67187,0	149291
173	1,81	-5,35	0,004819	-0,014813	70000	0,96	66931,9	277,71	-853,59	67187,0	134119
174	1,92	-5,66	0,004790	-0,014636	70000	0,79	55459,6	228,71	-698,86	67187,0	122647
175	2,02	-5,96	0,004758	-0,014458	70000	0,62	43137,5	176,70	-536,97	67187,0	110325
176	2,11	-6,24	0,004723	-0,014279	70000	0,44	30632,0	124,57	-376,57	67187,0	97819
177	2,21	-6,51	0,004687	-0,014097	70000	0,26	18438,0	74,40	-223,78	67187,0	85625
178	2,29	-6,76	0,004647	-0,013914	70000	0,03	1778,0	7,43	-22,23	67187,0	68965
179	2,37	-7,00	0,004606	-0,013729	70000	-0,14	-9688,0	-40,10	119,54	67187,0	57499
180	2,45	-7,23	0,004562	-0,013543	70000	-0,30	-20790,0	-85,24	253,06	67187,0	46397
181	2,52	-7,44	0,004516	-0,013355	70000	-0,45	-31528,0	-127,96	378,43	67187,0	35659
182	2,59	-7,64	0,004468	-0,013166	70000	-0,60	-41902,0	-168,25	495,81	67187,0	25285
183	2,65	-7,83	0,004417	-0,012974	70000	-0,82	-57232,0	-238,74	701,20	67187,0	9955
184	2,71	-8,01	0,004365	-0,012781	70000	-0,96	-66878,0	-275,66	807,20	67187,0	309
185	2,77	-8,17	0,004310	-0,012587	70000	-1,09	-76160,0	-310,00	905,24	67187,0	-8973
186	2,82	-8,31	0,004254	-0,012391	70000	-1,22	-85078,0	-341,75	995,47	67187,0	-17891
187	2,86	-8,45	0,004195	-0,012193	70000	-1,34	-93632,0	-370,94	1078,07	67187,0	-26445
188	2,91	-8,57	0,004135	-0,011993	70000	-1,45	-101822,0	-397,59	1153,18	67187,0	-34635
189	2,94	-8,68	0,004073	-0,011792	70000	-1,57	-109648,0	-421,70	1220,99	67187,0	-42461
190	2,98	-8,78	0,004009	-0,011589	70000	-1,67	-117110,0	-443,32	1281,65	67187,0	-49923
191	3,01	-8,87	0,003943	-0,011385	70000	-1,77	-124208,0	-462,47	1335,35	67187,0	-57021
192	3,03	-8,95	0,003875	-0,011179	70000	-1,87	-130942,0	-479,20	1382,26	67187,0	-63755
193	3,05	-9,01	0,003806	-0,010971	70000	-2,04	-142982,0	-544,23	1568,65	67187,0	-75795
194	3,07	-9,06	0,003736	-0,010762	70000	-2,13	-148988,0	-556,56	1603,34	67187,0	-81801
195	3,09	-9,11	0,003663	-0,010550	70000	-2,21	-154630,0	-566,46	1631,42	67187,0	-87443
196	3,10	-9,14	0,003590	-0,010338	70000	-2,28	-159908,0	-574,00	1653,09	67187,0	-92721
197	3,10	-9,16	0,003514	-0,010123	70000	-2,35	-164822,0	-579,25	1668,56	67187,0	-97635
198	3,11	-9,17	0,003438	-0,009907	70000	-2,42	-169372,0	-582,27	1678,03	67187,0	-102185
199	3,11	-9,17	0,003360	-0,009690	70000	-2,48	-173558,0	-583,15	1681,72	67187,0	-106371
200	3,10	-9,15	0,003281	-0,009470	70000	-2,53	-177380,0	-581,95	1679,85	67187,0	-110193
201	3,10	-9,13	0,003200	-0,009249	70000	-2,58	-180838,0	-578,76	1672,64	67187,0	-113651
202	3,09	-9,10	0,003119	-0,009027	70000	-2,63	-183932,0	-573,67	1660,31	67187,0	-116745
203	3,07	-9,06	0,003036	-0,008803	70000	-2,67	-186662,0	-566,76	1643,09	67187,0	-119475
204	3,06	-9,02	0,002953	-0,008577	70000	-2,70	-189028,0	-558,12	1621,21	67187,0	-121841
205	3,04	-8,96	0,002868	-0,008349	70000	-2,73	-191030,0	-547,86	1594,91	67187,0	-123843
206	3,01	-8,89	0,002782	-0,008120	70000	-2,75	-192668,0	-536,07	1564,42	67187,0	-125481
207	2,99	-8,82	0,002696	-0,007889	70000	-2,77	-193942,0	-522,85	1529,99	67187,0	-126755
208	2,96	-8,74	0,002609	-0,007656	70000	-2,78	-194852,0	-508,30	1491,86	67187,0	-127665
209	2,93	-8,65	0,002521	-0,007422	70000	-2,79	-195398,0	-492,53	1450,29	67187,0	-128211
210	2,90	-8,55	0,002432	-0,007186	70000	-2,79	-195580,0	-475,64	1405,51	67187,0	-128393
211	2,86	-8,45	0,002343	-0,006949	70000	-2,79	-195398,0	-457,74	1357,80	67187,0	-128211
212	2,83	-8,34	0,002253	-0,006710	70000	-2,78	-194852,0	-438,94	1307,42	67187,0	-127665
213	2,79	-8,22	0,002162	-0,006469	70000	-2,77	-193942,0	-419,36	1254,61	67187,0	-126755
214	2,75	-8,10	0,002071	-0,006227	70000	-2,75	-192668,0	-399,10	1199,66	67187,0	-125481
215	2,70	-7,97	0,001980	-0,005983	70000	-2,73	-191030,0	-378,28	1142,84	67187,0	-123843
216	2,66	-7,84	0,001889	-0,005737	70000	-2,70	-189028,0	-357,00	1084,41	67187,0	-121841
217	2,61	-7,70	0,001797	-0,005489	70000	-2,67	-186662,0	-335,40	1024,66	67187,0	-119475
218	2,56	-7,55	0,001705	-0,005240	70000	-2,63	-183932,0	-313,57	963,87	67187,0	-116745
219	2,51	-7,40	0,001613	-0,004990	70000	-2,58	-180838,0	-291,63	902,33	67187,0	-113651
220	2,45	-7,24	0,001520	-0,004737	70000	-2,53	-177380,0	-269,70	840,31	67187,0	-110193
221	2,40	-7,08	0,001428	-0,004483	70000	-2,48	-173558,0	-247,89	778,13	67187,0	-106371
222	2,34	-6,92	0,001336	-0,004228	70000	-2,42	-169372,0	-226,31	716,06	67187,0	-102185
223	2,29	-6,75	0,001244	-0,003970	70000	-2,35	-164822,0	-205,06	654,42	67187,0	-97635

224	2,23	-6,58	0,001152	-0,003712	70000	-2,28	-159908,0	-184,27	593,51	67187,0	-92721
225	2,17	-6,40	0,001061	-0,003451	70000	-2,21	-154630,0	-164,04	533,62	67187,0	-87443
226	2,11	-6,22	0,000970	-0,003189	70000	-2,13	-148988,0	-144,47	475,08	67187,0	-81801
227	2,05	-6,04	0,000879	-0,002925	70000	-2,04	-142982,0	-125,66	418,20	67187,0	-75795
228	1,98	-5,85	0,000789	-0,002659	70000	-1,87	-130942,0	-97,50	328,83	67187,0	-63755
229	1,92	-5,67	0,000699	-0,002392	70000	-1,77	-124208,0	-81,96	280,58	67187,0	-57021
230	1,86	-5,48	0,000610	-0,002123	70000	-1,67	-117110,0	-67,42	234,81	67187,0	-49923
231	1,79	-5,29	0,000521	-0,001853	70000	-1,57	-109648,0	-53,96	191,84	67187,0	-42461
232	1,73	-5,09	0,000433	-0,001581	70000	-1,45	-101822,0	-41,67	151,99	67187,0	-34635
233	1,66	-4,90	0,000347	-0,001307	70000	-1,34	-93632,0	-30,64	115,55	67187,0	-26445
234	1,59	-4,70	0,000261	-0,001031	70000	-1,22	-85078,0	-20,93	82,87	67187,0	-17891
235	1,53	-4,51	0,000175	-0,000754	70000	-1,09	-76160,0	-12,62	54,25	67187,0	-8973
236	1,46	-4,31	0,000091	-0,000476	70000	-0,96	-66878,0	-5,78	30,04	67187,0	309
237	1,39	-4,11	0,000009	-0,000195	70000	-0,82	-57232,0	-0,46	10,55	67187,0	9955
238	1,33	-3,92	-0,000073	0,000087	70000	-0,60	-41902,0	2,75	-3,27	67187,0	25285
239	1,26	-3,72	-0,000154	0,000370	70000	-0,45	-31528,0	4,35	-10,50	67187,0	35659
240	1,19	-3,52	-0,000233	0,000656	70000	-0,30	-20790,0	4,35	-12,25	67187,0	46397
241	1,13	-3,33	-0,000310	0,000943	70000	-0,14	-9688,0	2,70	-8,21	67187,0	57499
242	1,06	-3,13	-0,000387	0,001231	70000	0,03	1778,0	-0,62	1,97	67187,0	68965
243	1,00	-2,94	-0,000461	0,001522	70000	0,26	18438,0	-7,32	24,16	67187,0	85625
244	0,93	-2,75	-0,000534	0,001814	70000	0,44	30632,0	-14,09	47,83	67187,0	97819
245	0,87	-2,56	-0,000606	0,002107	70000	0,62	43190,0	-22,52	78,36	67187,0	110377
246	0,80	-2,37	-0,000675	0,002403	70000	0,79	55459,6	-32,23	114,72	67187,0	122647
247	0,74	-2,18	-0,000743	0,002699	70000	0,96	66931,9	-42,79	155,56	67187,0	134119
248	0,68	-1,99	-0,000808	0,002998	70000	1,17	82104,4	-55,04	204,15	67187,0	149291
249	0,61	-1,81	-0,000872	0,003298	70000	1,31	91877,1	-66,45	251,32	67187,0	159064
250	0,55	-1,63	-0,000934	0,003600	70000	1,44	100800,0	-78,04	300,97	67187,0	167987
251	0,49	-1,45	-0,000993	0,003903	70000	1,56	108873,1	-89,65	352,47	67187,0	176060
252	0,43	-1,28	-0,001050	0,004209	70000	1,66	116096,4	-101,10	405,24	67187,0	183283
253	0,37	-1,10	-0,001105	0,004515	70000	1,86	130519,9	-112,47	459,69	67187,0	197707
254	0,32	-0,94	-0,001157	0,004824	70000	1,94	136043,6	-122,78	511,87	67187,0	203231
255	0,26	-0,77	-0,001207	0,005134	70000	2,01	140717,5	-132,46	563,50	67187,0	207905
256	0,21	-0,61	-0,001254	0,005446	70000	2,06	144541,6	-141,39	613,96	67187,0	211729
257	0,15	-0,45	-0,001299	0,005759	70000	2,11	147515,9	-149,42	662,65	67187,0	214703
258	0,10	-0,30	-0,001340	0,006074	70000	2,32	162100,4	-161,60	732,31	67187,0	229287
259	0,05	-0,15	-0,001410	0,006391	70000	2,33	163375,1	-171,33	776,55	67187,0	230562
260	0,00	0,00	-0,001456	0,006709	70000	2,34	163800,0	-177,42	817,35	67187,0	230987
261	-0,05	0,14	-0,001456	0,004500	70000	2,33	163375,1	-176,91	546,79	66888,6	230264
262	-0,09	0,28	-0,001455	0,004259	70000	2,32	162100,4	-175,47	513,41	66701,8	228802
263	-0,14	0,41	-0,001454	0,004261	70000	2,11	147515,9	-167,33	490,31	66515,0	214031
264	-0,18	0,54	-0,001452	0,004261	70000	2,06	144541,6	-163,73	480,39	66328,2	210870
265	-0,23	0,66	-0,001449	0,004258	70000	2,01	140717,5	-159,09	467,33	66141,4	206859
266	-0,27	0,78	-0,001446	0,004252	70000	1,94	136043,6	-153,42	451,17	65954,5	201998
267	-0,31	0,90	-0,001442	0,004243	70000	1,86	130519,9	-146,75	431,94	65767,7	196288
268	-0,34	1,01	-0,001436	0,004231	70000	1,66	116096,4	-138,31	407,41	65580,9	181677
269	-0,38	1,12	-0,001431	0,004217	70000	1,56	108873,1	-129,17	380,77	65394,1	174267
270	-0,41	1,22	-0,001424	0,004200	70000	1,44	100800,0	-119,04	351,11	65207,3	166007
271	-0,45	1,32	-0,001417	0,004180	70000	1,31	91877,1	-107,94	318,53	65020,5	156898
272	-0,48	1,42	-0,001408	0,004158	70000	1,17	82104,4	-95,91	283,13	64833,7	146938
273	-0,51	1,51	-0,001400	0,004133	70000	0,96	66931,9	-80,66	238,18	64646,9	131579
274	-0,54	1,59	-0,001390	0,004106	70000	0,79	55459,6	-66,38	196,05	64460,1	119920
275	-0,57	1,67	-0,001380	0,004076	70000	0,62	43137,5	-51,25	151,40	64273,3	107411
276	-0,59	1,75	-0,001369	0,004045	70000	0,44	30632,0	-36,10	106,67	64086,4	94718
277	-0,62	1,83	-0,001357	0,004010	70000	0,26	18438,0	-21,55	63,66	63899,6	82338
278	-0,64	1,90	-0,001345	0,003974	70000	0,03	1778,0	-2,15	6,35	63712,8	65491
279	-0,67	1,96	-0,001332	0,003935	70000	-0,14	-9688,0	11,60	-34,27	63526,0	53838
280	-0,69	2,03	-0,001318	0,003895	70000	-0,30	-20790,0	24,63	-72,77	63339,2	42549
281	-0,71	2,08	-0,001304	0,003852	70000	-0,45	-31528,0	36,95	-109,15	63152,4	31624
282	-0,72	2,14	-0,001289	0,003807	70000	-0,60	-41902,0	48,55	-143,37	62965,6	21064
283	-0,74	2,19	-0,001274	0,003760	70000	-0,82	-57232,0	68,83	-203,23	62778,8	5547
284	-0,76	2,24	-0,001257	0,003712	70000	-0,96	-66878,0	79,41	-234,41	62592,0	-4286
285	-0,77	2,28	-0,001241	0,003661	70000	-1,09	-76160,0	89,22	-263,31	62405,2	-13755
286	-0,79	2,32	-0,001223	0,003609	70000	-1,22	-85078,0	98,27	-289,94	62218,3	-22860
287	-0,80	2,35	-0,001205	0,003555	70000	-1,34	-93632,0	106,57	-314,31	62031,5	-31600
288	-0,81	2,39	-0,001187	0,003499	70000	-1,45	-101822,0	114,11	-336,44	61844,7	-39977
289	-0,82	2,42	-0,001168	0,003442	70000	-1,57	-109648,0	120,90	-356,36	61657,9	-47990
290	-0,83	2,44	-0,001148	0,003383	70000	-1,67	-117110,0	126,96	-374,09	61471,1	-55639

291	-0,84	2,46	-0,001128	0,003322	70000	-1,77	-124208,0	132,29	-389,68	61284,3	-62924
292	-0,84	2,48	-0,001107	0,003260	70000	-1,87	-130942,0	136,90	-403,14	61097,5	-69845
293	-0,85	2,50	-0,001086	0,003197	70000	-2,04	-142982,0	155,28	-457,11	60910,7	-82071
294	-0,85	2,51	-0,001064	0,003132	70000	-2,13	-148988,0	158,58	-466,67	60723,9	-88264
295	-0,85	2,52	-0,001042	0,003066	70000	-2,21	-154630,0	161,16	-474,13	60537,1	-94093
296	-0,86	2,53	-0,001020	0,002999	70000	-2,28	-159908,0	163,05	-479,56	60350,2	-99558
297	-0,86	2,53	-0,000997	0,002930	70000	-2,35	-164822,0	164,27	-483,00	60163,4	-104659
298	-0,86	2,53	-0,000973	0,002861	70000	-2,42	-169372,0	164,83	-484,55	59976,6	-109395
299	-0,86	2,53	-0,000949	0,002790	70000	-2,48	-173558,0	164,77	-484,25	59789,8	-113768
300	-0,85	2,52	-0,000925	0,002718	70000	-2,53	-177380,0	164,10	-482,18	59603,0	-117777
301	-0,85	2,51	-0,000901	0,002646	70000	-2,58	-180838,0	162,85	-478,43	59416,2	-121422
302	-0,85	2,50	-0,000876	0,002572	70000	-2,63	-183932,0	161,04	-473,07	59229,4	-124703
303	-0,84	2,49	-0,000850	0,002497	70000	-2,67	-186662,0	158,71	-466,17	59042,6	-127619
304	-0,84	2,47	-0,000825	0,002422	70000	-2,70	-189028,0	155,88	-457,84	58855,8	-130172
305	-0,83	2,46	-0,000799	0,002346	70000	-2,73	-191030,0	152,58	-448,15	58669,0	-132361
306	-0,83	2,43	-0,000773	0,002269	70000	-2,75	-192668,0	148,84	-437,19	58482,1	-134186
307	-0,82	2,41	-0,000746	0,002192	70000	-2,77	-193942,0	144,69	-425,05	58295,3	-135647
308	-0,81	2,39	-0,000719	0,002114	70000	-2,78	-194852,0	140,17	-411,83	58108,5	-136743
309	-0,80	2,36	-0,000692	0,002035	70000	-2,79	-195398,0	135,30	-397,61	57921,7	-137476
310	-0,79	2,33	-0,000665	0,001956	70000	-2,79	-195580,0	130,12	-382,51	57734,9	-137845
311	-0,78	2,30	-0,000638	0,001876	70000	-2,79	-195398,0	124,66	-366,60	57548,1	-137850
312	-0,77	2,27	-0,000610	0,001796	70000	-2,78	-194852,0	118,95	-350,00	57361,3	-137491
313	-0,76	2,23	-0,000583	0,001716	70000	-2,77	-193942,0	113,04	-332,79	57174,5	-136768
314	-0,74	2,19	-0,000555	0,001635	70000	-2,75	-192668,0	106,95	-315,08	56987,7	-135680
315	-0,73	2,16	-0,000527	0,001555	70000	-2,73	-191030,0	100,72	-296,97	56800,9	-134229
316	-0,72	2,12	-0,000499	0,001474	70000	-2,70	-189028,0	94,39	-278,55	56614,0	-132414
317	-0,70	2,08	-0,000471	0,001393	70000	-2,67	-186662,0	87,98	-259,93	56427,2	-130235
318	-0,69	2,03	-0,000443	0,001311	70000	-2,63	-183932,0	81,54	-241,21	56240,4	-127692
319	-0,67	1,99	-0,000415	0,001230	70000	-2,58	-180838,0	75,10	-222,48	56053,6	-124784
320	-0,66	1,94	-0,000387	0,001149	70000	-2,53	-177380,0	68,70	-203,84	55866,8	-121513
321	-0,64	1,90	-0,000359	0,001068	70000	-2,48	-173558,0	62,36	-185,39	55680,0	-117878
322	-0,63	1,85	-0,000331	0,000987	70000	-2,42	-169372,0	56,13	-167,23	55493,2	-113879
323	-0,61	1,80	-0,000304	0,000907	70000	-2,35	-164822,0	50,03	-149,45	55306,4	-109516
324	-0,59	1,75	-0,000276	0,000826	70000	-2,28	-159908,0	44,11	-132,14	55119,6	-104788
325	-0,58	1,70	-0,000248	0,000746	70000	-2,21	-154630,0	38,38	-115,41	54932,8	-99697
326	-0,56	1,65	-0,000221	0,000667	70000	-2,13	-148988,0	32,90	-99,33	54745,9	-94242
327	-0,54	1,60	-0,000194	0,000587	70000	-2,04	-142982,0	27,67	-84,00	54559,1	-88423
328	-0,52	1,55	-0,000167	0,000509	70000	-1,87	-130942,0	20,59	-62,90	54372,3	-76570
329	-0,51	1,50	-0,000140	0,000431	70000	-1,77	-124208,0	16,39	-50,49	54185,5	-70022
330	-0,49	1,44	-0,000113	0,000353	70000	-1,67	-117110,0	12,51	-39,02	53998,7	-63111
331	-0,47	1,39	-0,000087	0,000276	70000	-1,57	-109648,0	9,00	-28,57	53811,9	-55836
332	-0,45	1,33	-0,000061	0,000200	70000	-1,45	-101822,0	5,86	-19,20	53625,1	-48197
333	-0,43	1,28	-0,000035	0,000124	70000	-1,34	-93632,0	3,13	-10,97	53438,3	-40194
334	-0,42	1,23	-0,000010	0,000049	70000	-1,22	-85078,0	0,82	-3,97	53251,5	-31827
335	-0,40	1,17	0,000015	-0,000024	70000	-1,09	-76160,0	-1,06	1,76	53064,7	-23095
336	-0,38	1,12	0,000039	-0,000097	70000	-0,96	-66878,0	-2,47	6,15	52877,8	-14000
337	-0,36	1,06	0,000063	-0,000169	70000	-0,82	-57232,0	-3,41	9,15	52691,0	-4541
338	-0,34	1,01	0,000086	-0,000240	70000	-0,60	-41902,0	-3,26	9,05	52504,2	10602
339	-0,32	0,96	0,000109	-0,000310	70000	-0,45	-31528,0	-3,10	8,79	52317,4	20789
340	-0,31	0,90	0,000132	-0,000379	70000	-0,30	-20790,0	-2,46	7,08	52130,6	31341
341	-0,29	0,85	0,000154	-0,000446	70000	-0,14	-9688,0	-1,34	3,89	51943,8	42256
342	-0,27	0,80	0,000175	-0,000513	70000	0,03	1778,0	0,28	-0,82	51757,0	53535
343	-0,25	0,75	0,000195	-0,000578	70000	0,26	18438,0	3,10	-9,17	51570,2	70008
344	-0,24	0,70	0,000215	-0,000641	70000	0,44	30632,0	5,68	-16,91	51383,4	82015
345	-0,22	0,64	0,000235	-0,000704	70000	0,62	43190,0	8,72	-26,16	51196,6	94387
346	-0,20	0,59	0,000253	-0,000764	70000	0,79	55459,6	12,08	-36,50	51009,7	106469
347	-0,18	0,55	0,000271	-0,000824	70000	0,96	66931,9	15,60	-47,46	50822,9	117755
348	-0,17	0,50	0,000288	-0,000881	70000	1,17	82104,4	19,59	-60,01	50636,1	132741
349	-0,15	0,45	0,000304	-0,000937	70000	1,31	91877,1	23,15	-71,43	50449,3	142326
350	-0,14	0,40	0,000319	-0,000992	70000	1,44	100800,0	26,67	-82,91	50262,5	151063
351	-0,12	0,36	0,000333	-0,001044	70000	1,56	108873,1	30,11	-94,31	50075,7	158949
352	-0,11	0,31	0,000347	-0,001095	70000	1,66	116096,4	33,40	-105,47	49888,9	165985
353	-0,09	0,27	0,000359	-0,001144	70000	1,86	130519,9	36,58	-116,50	49702,1	180222
354	-0,08	0,23	0,000371	-0,001192	70000	1,94	136043,6	39,35	-126,43	49515,3	185559
355	-0,06	0,19	0,000381	-0,001237	70000	2,01	140717,5	41,84	-135,74	49328,5	190046
356	-0,05	0,15	0,000391	-0,001280	70000	2,06	144541,6	44,04	-144,30	49141,6	193683
357	-0,04	0,11	0,000399	-0,001321	70000	2,11	147515,9	45,90	-152,00	48954,8	196471

358	-0,02	0,07	0,000406	-0,001360	70000	2,32	162100,4	48,95	-163,97	48768,0	210868
359	-0,01	0,03	0,000412	-0,001397	70000	2,33	163375,1	50,07	-169,74	48581,2	211956
360	0,00	0,00	0,000507	-0,001432	70000	2,34	163800,0	61,74	-174,41	48393,8	212194
361	0,01	-0,03	0,000500	-0,001335	70000	2,33	163438,8	60,77	-162,27	47589,4	211028
362	0,02	-0,06	0,000499	-0,001349	70000	2,32	162355,2	60,20	-162,93	46782,8	209138
363	0,03	-0,09	0,000498	-0,001361	70000	2,12	148089,2	57,56	-157,19	45976,2	194065
364	0,04	-0,12	0,000497	-0,001370	70000	2,08	145560,8	56,45	-155,52	45169,6	190730
365	0,05	-0,15	0,000496	-0,001376	70000	2,03	142310,0	55,10	-152,74	44363,0	186673
366	0,06	-0,18	0,000494	-0,001380	70000	1,98	138336,8	53,28	-148,88	43556,4	181893
367	0,07	-0,20	0,000490	-0,001381	70000	1,91	133641,2	51,12	-143,96	42749,8	176391
368	0,08	-0,22	0,000487	-0,001380	70000	1,72	120173,2	48,49	-137,54	41943,2	162116
369	0,08	-0,24	0,000482	-0,001377	70000	1,63	114032,8	45,58	-130,20	41136,6	155169
370	0,09	-0,26	0,000477	-0,001371	70000	1,53	107170,0	42,39	-121,87	40330,0	147500
371	0,10	-0,28	0,000471	-0,001363	70000	1,42	99584,8	38,93	-112,61	39523,4	139108
372	0,10	-0,30	0,000465	-0,001354	70000	1,30	91277,2	35,23	-102,48	38716,8	129994
373	0,11	-0,32	0,000459	-0,001342	70000	1,11	77697,2	30,70	-89,78	37910,2	115607
374	0,11	-0,33	0,000452	-0,001329	70000	0,97	67944,8	26,45	-77,72	37103,6	105048
375	0,12	-0,34	0,000445	-0,001313	70000	0,82	57470,0	22,02	-64,98	36297,0	93767
376	0,12	-0,36	0,000438	-0,001296	70000	0,66	46272,8	17,43	-51,65	35490,4	81763
377	0,12	-0,37	0,000430	-0,001278	70000	0,49	34353,2	12,71	-37,79	34683,8	69037
378	0,13	-0,38	0,000422	-0,001258	70000	0,24	16881,2	6,40	-19,08	33877,2	50758
379	0,13	-0,39	0,000414	-0,001236	70000	0,05	3516,8	1,31	-3,91	33070,6	36587
380	0,13	-0,39	0,000405	-0,001213	70000	-0,15	-10570,0	-3,85	11,53	32264,0	21694
381	0,14	-0,40	0,000397	-0,001189	70000	-0,36	-25379,2	-9,05	27,13	31457,4	6078
382	0,14	-0,40	0,000388	-0,001164	70000	-0,58	-40910,8	-14,28	42,79	30650,8	-10260
383	0,14	-0,41	0,000380	-0,001137	70000	-0,81	-56534,1	-19,29	57,80	29844,2	-26690
384	0,14	-0,41	0,000371	-0,001110	70000	-1,02	-71156,4	-23,71	70,99	29037,6	-42119
385	0,14	-0,41	0,000362	-0,001082	70000	-1,21	-84892,5	-27,60	82,53	28231,0	-56662
386	0,14	-0,41	0,000353	-0,001052	70000	-1,40	-97742,4	-30,98	92,45	27424,4	-70318
387	0,14	-0,41	0,000344	-0,001022	70000	-1,57	-109706,1	-33,88	100,81	26617,8	-83088
388	0,14	-0,41	0,000334	-0,000992	70000	-1,80	-126103,6	-39,82	118,10	25811,2	-100292
389	0,14	-0,41	0,000325	-0,000961	70000	-1,95	-136294,9	-41,85	123,62	25004,6	-111290
390	0,14	-0,40	0,000316	-0,000929	70000	-2,08	-145600,0	-43,42	127,69	24198,0	-121402
391	0,14	-0,40	0,000306	-0,000897	70000	-2,20	-154018,9	-44,57	130,39	23391,4	-130628
392	0,13	-0,39	0,000297	-0,000864	70000	-2,31	-161551,6	-45,31	131,80	22584,8	-138967
393	0,13	-0,39	0,000288	-0,000831	70000	-2,40	-168198,1	-45,67	132,02	21778,2	-146420
394	0,13	-0,38	0,000278	-0,000798	70000	-2,49	-173958,4	-45,66	131,12	20971,6	-152987
395	0,13	-0,37	0,000268	-0,000765	70000	-2,55	-178832,5	-45,31	129,21	20165,0	-158668
396	0,12	-0,36	0,000259	-0,000732	70000	-2,61	-182820,4	-44,64	126,38	19358,4	-163462
397	0,12	-0,35	0,000249	-0,000699	70000	-2,66	-185922,1	-43,67	122,73	18551,8	-167370
398	0,12	-0,34	0,000239	-0,000666	70000	-2,69	-188137,6	-42,42	118,36	17745,2	-170392
399	0,11	-0,33	0,000229	-0,000634	70000	-2,71	-189466,9	-40,91	113,36	16938,6	-172528
400	0,11	-0,32	0,000218	-0,000601	70000	-2,71	-189910,0	-39,16	107,84	16132,0	-173778
401	0,10	-0,31	0,000208	-0,000569	70000	-2,71	-189498,4	-37,21	101,90	15325,4	-174173
402	0,10	-0,30	0,000197	-0,000538	70000	-2,69	-188263,6	-35,07	95,67	14518,8	-173745
403	0,10	-0,28	0,000186	-0,000507	70000	-2,66	-186205,6	-32,78	89,21	13712,2	-172493
404	0,09	-0,27	0,000175	-0,000477	70000	-2,62	-183324,4	-30,34	82,62	12905,6	-170419
405	0,09	-0,25	0,000164	-0,000448	70000	-2,57	-179620,0	-27,79	75,97	12099,0	-167521
406	0,08	-0,24	0,000152	-0,000419	70000	-2,50	-175092,4	-25,15	69,34	11292,4	-163800
407	0,08	-0,22	0,000140	-0,000392	70000	-2,42	-169741,6	-22,44	62,80	10485,8	-159256
408	0,07	-0,21	0,000127	-0,000365	70000	-2,34	-163567,6	-19,69	56,40	9679,2	-153888
409	0,07	-0,19	0,000115	-0,000340	70000	-2,24	-156570,4	-16,93	50,22	8872,6	-147698
410	0,06	-0,18	0,000101	-0,000315	70000	-2,13	-148750,0	-14,20	44,29	8066,0	-140684
411	0,05	-0,16	0,000087	-0,000292	70000	-2,00	-140106,4	-11,52	38,66	7259,4	-132847
412	0,05	-0,14	0,000073	-0,000270	70000	-1,87	-130639,6	-8,95	33,37	6452,8	-124187
413	0,04	-0,13	0,000057	-0,000250	70000	-1,72	-120349,6	-6,52	28,43	5646,2	-114703
414	0,04	-0,11	0,000042	-0,000231	70000	-1,56	-109236,4	-4,29	23,87	4839,6	-104397
415	0,03	-0,09	0,000025	-0,000214	70000	-1,39	-97300,0	-2,30	19,68	4033,0	-93267
416	0,02	-0,07	0,000008	-0,000199	70000	-1,21	-84540,4	-0,61	15,85	3226,4	-81314
417	0,02	-0,05	0,000005	-0,000185	70000	-1,01	-70957,6	-0,31	12,38	2419,8	-68538
418	0,01	-0,04	0,000003	-0,000173	70000	-0,81	-56551,6	-0,14	9,23	1613,2	-54938
419	0,01	-0,02	0,000001	-0,000150	70000	-0,59	-41322,4	-0,05	5,85	806,6	-40516
420	0,00	0,00	0,000000	0,000000	70000	-0,36	-25270,0	0,00	0,00	0,0	-25270

$\Sigma =$ **48393,83** **67186,96**



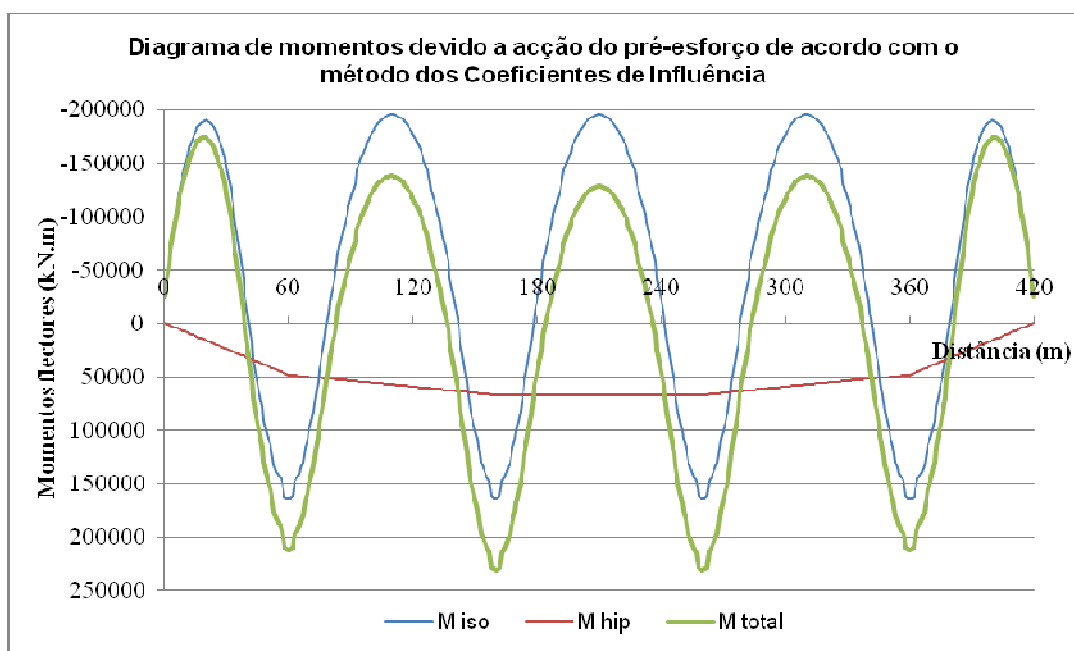


Fig. B.5 – Diagramas de momentos flectores isostático, hiperstático e total para a solução C2f com as características mencionadas

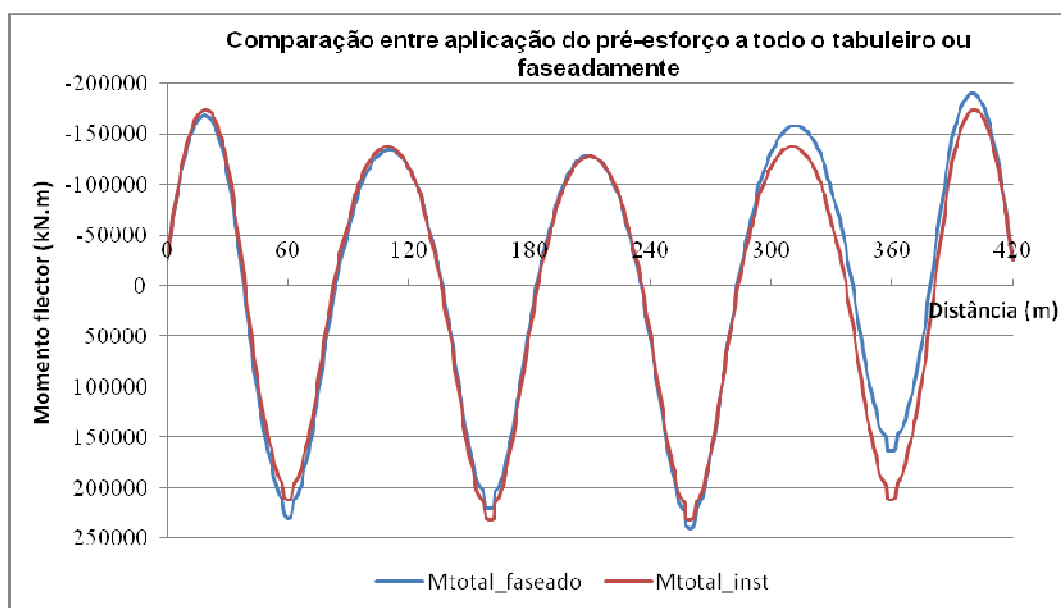


Fig. B.6 – Diagramas de momentos flectores considerando a aplicação do pré-esforço faseadamente, por tramos, ou instantaneamente, com tabuleiro contínuo