

ESTUDO ECONÓMICO DE PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE TABULEIROS BETONADOS *IN SITU EM PONTES DE PEQUENO E MÉDIO VÃO*

RODOLFO ALEXANDRE DE ALMEIDA RODRIGUES

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

Orientador: Professor Doutor Pedro Álvares Ribeiro do Carmo
Pacheco

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

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.

Aos meus Pais

*Ter grande conhecimento e não o usar, é como ter uma grande biblioteca e não abrir um
único livro*

Inácio Dantas

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio, compreensão e motivação que sempre demonstraram durante a execução deste trabalho e de toda a minha vida académica.

Ao meu orientador, Professor Pedro Pacheco, pelo seu apoio, orientação e disponibilidade na realização deste trabalho. Bem como, todos os importantes conhecimentos e sugestões que me transmitiu para o aperfeiçoamento do meu trabalho.

A todos engenheiros e técnicos que através dos seus conhecimentos e/ou de disponibilização de informação e sem a qual não seria possível a realização do estudo económico.

RESUMO

O presente trabalho incide essencialmente na elaboração de um estudo económico de processos construtivos de tabuleiros betonados *in situ* em pontes de pequeno e médio vão, para avaliar e quantificar os custos, inerentes a cada um dos métodos construtivos abrangidos, para categorias de pontes estabelecidas com base em dois parâmetros, a dimensão do vão e o número de vãos.

O estudo económico de um determinado mercado implica a recolha e organização de informação sobre as características dos produtos associados a essa área de negócio. Por isso, na primeira fase deste trabalho é realizada uma exposição dos procedimentos e características dos quatro métodos construtivos: cimbra ao solo, cimbra autolanzável, deslocamentos sucessivos e avanços sucessivos. São ainda analisadas as condições de aplicabilidade de cada técnica construtiva, bem como, é elaborado um diagrama onde se procura resumir esse conhecimento.

Na segunda fase do trabalho são realizadas e apresentadas as várias etapas que compõe o estudo económico. Descrição dos elementos que constituem as quatro estruturas de custos e referência aos pressupostos em que se baseia o cálculo das suas quantidades e dos, respectivos, custos. Determinação dos custos totais para cada método construtivo nos várias categorias de pontes originadas pela combinação dos parâmetros, dimensão do vão e número de vãos. Análise dos resultados obtidos pela comparação dos custos totais dos processos construtivos e definição da solução economicamente mais favorável nas várias categorias de pontes.

PALAVRAS-CHAVE: estudo económico, cimbra ao solo, cimbra autolanzável, deslocamentos sucessivos e avanços sucessivos.

ABSTRACT

The present work is essentially an elaboration of an economic study of constructive processes of cast-in-place bridge deck in bridges of small and medium span, to evaluate and quantify the costs for each one of the constructive processes, to categories of bridges based on two parameters, the dimension of the span and the number of spans.

The economic study of a certain market implies the gathering and organization of information about the characteristics of the products associated with that area of business. Therefore, the first phase of this work is a description of the procedures and characteristics of the four constructive methods: full staging method, movable scaffolding method, incremental launching method and free cantilever method. The conditions of applicability of each construction technique are analyzed and a diagram where that knowledge is resumed is elaborated.

In the second phase of the work, the several steps of the economic work are accomplished and presented. Description of the elements that compose the four structures of costs and reference to the bases of the calculation of its quantities and respective costs. Determination of the total costs for each constructive method in the several categories of bridges originated by the combination of the parameters dimension of the span and the number of spans. Analysis of the obtained results by comparison of the total costs for the constructive processes and definition of the most economically favorable solution on the various categories of bridges.

KEYWORDS: economic study, full staging method, movable scaffolding method, incremental launching method and free cantilever method.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	3
1.2. TABULEIRO	3
1.2.1. GENERALIDADES.....	3
1.2.2. LAJE MACIÇA, VAZADA E NERVURADA.....	4
1.2.3. LAJE VIGADA	5
1.2.4. VIGA EM CAIXÃO	5
1.2.5. APARELHOS DE APOIO	6
1.2.6. JUNTAS DE DILATAÇÃO.....	6
1.3. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM CIMBRE AO SOLO	7
1.4. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	8
1.4.1. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL SUPERIOR	9
1.4.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL INFERIOR.....	10
1.5. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM PRÉ-FABRICAÇÃO	11
1.5.1. VIGAS PRÉ-FABRICADAS	11
1.5.2. ADUELAS PRÉ-FABRICADAS	12
1.6. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM O MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS.....	14
1.7. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM O MÉTODO DOS AVANÇOS SUCESSIVOS	16

2. Processos Construtivos - Descrição e Aplicabilidade	19
2.1. GENERALIDADES	19
2.2. CIMBRE AO SOLO	19
2.2.1. DESCRIÇÃO	19
2.2.1.1. Montagem do cimbra.....	19
2.2.1.2. Aplicação do pré-esforço	21

2.2.2. APLICABILIDADE	22
2.3. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL.....	22
2.3.1. DESCRIÇÃO	22
2.3.1.1. Transporte, montagem e colocação do cimbra autolanzável.....	22
2.3.1.2. Colocação e posicionamento da cofragem	23
2.3.1.3. Montagem e colocação da armadura.....	24
2.3.1.4. Betonagem e aplicação do pré-esforço.....	25
2.3.1.5. Movimentação do cimbra	25
2.3.2. APLICABILIDADE	28
2.4. DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS	29
2.4.1. DESCRIÇÃO	29
2.4.1.1. Fase de fabricação	29
2.4.1.2. Fase de lançamento	32
2.4.1.3. Aplicação do pré-esforço.....	36
2.4.2. APLICABILIDADE	36
2.5. AVANÇOS SUCESSIVOS	37
2.5.1. DESCRIÇÃO	37
2.5.1.1. Execução das aduelas	37
2.5.1.2. Aplicação do pré-esforço.....	40
2.5.2. APLICABILIDADE	41
2.6. DIAGRAMA BASE DE APLICABILIDADE DOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS.....	41
 3. ESTUDO ECONÓMICO	 45
3.1. GENERALIDADES.....	45
3.2. ENCARGOS COMUNS A TODOS OS PROCESSOS CONSTRUTIVOS	47
3.2.1. BETÃO.....	47
3.2.2. AÇO PARA ARMADURAS PASSIVAS	48
3.2.3. AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO	49
3.2.4. COFRAGENS	50
3.3. CIMBRE AO SOLO.....	51
3.3.1. ESTRUTURA DE CUSTOS.....	51
3.3.2. RESULTADOS.....	52
3.3.2.1. Cimbra ao solo de 0 a 15 metros de altura	54

3.3.2.2. Cimbra ao solo de 15 a 30 metros de altura	57
3.3.2.3. Cimbra ao solo de 30 a 45 metros de altura	60
3.4. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL	62
3.4.1. ESTRUTURA DE CUSTOS	62
3.4.2. RESULTADOS.....	64
3.5. DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS	70
3.5.1. ESTRUTURA DE CUSTOS	70
3.5.2. RESULTADOS.....	72
3.6. AVANÇOS SUCESSIVOS.....	79
3.6.1. ESTRUTURA DE CUSTOS	79
3.6.2. RESULTADOS.....	81
3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
3.7.1. NÚMERO DE VÃOS	85
3.7.2. DIMENSÃO DO VÃO	86
3.7.3. PROCESSO CONSTRUTIVO MAIS ECONÓMICO	89
 4. Conclusão.....	 91
4.1. CONCLUSÃO.....	91
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	92
 BIBLIOGRAFIA.....	 93
 Anexo	 A1

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Exemplos de aparelhos de apoio	6
Fig.2 – Escoramento ao solo	7
Fig.3 – Cimbra ao solo de asnas e colunas metálicas	8
Fig.4 – Cimbra autolanzável superior	10
Fig.5 – Cimbra autolanzável inferior	10
Fig.6 – Vigas pré-fabricadas em caixão	11
Fig.7 – Aduelas pré-fabricadas	12
Fig.8 – Equipamento de colocação e elevação autónomo	13
Fig.9 – Viga de lançamento para aduelas pré-fabricadas	13
Fig.10 – Variação dos momentos nas secções transversais durante o empurre	14
Fig.11 – Momentos do tabuleiro sem e com o nariz metálico	15
Fig.12 – Nariz metálico	15
Fig.13 – Exemplo de elementos estruturais auxiliares durante a fase de construção	16
Fig.14 – Método dos avanços sucessivos com execução simétrica a partir do pilar	17
Fig.15 – Solução construtiva mista de avanços sucessivos e cimbra ao solo	17
Fig.16 – Carro de avanço	18
Fig.17 – Montagem de um cimbra ao solo	19
Fig.18 – Execução de tramos sucessivos de tabuleiro por cimbra ao solo	21
Fig.19 – Montagem por módulos de um cimbra autolanzável inferior	22
Fig.20 – Cofragem num cimbra inferior	23
Fig.21 – Abertura da cofragem num cimbra superior	23
Fig.22 – Montagem da armadura num cimbra inferior	24
Fig.23 – Consolas e bogies num cimbra autolanzável inferior	26
Fig.24 – Afastamento das vigas principais do cimbra móvel para a sua movimentação separada	27
Fig.25 – Faseamento construtivo	31
Fig.26 – Aparelho de empurre: macacos hidráulicos verticais e horizontais	33
Fig.27 – Método de aplicação directa: etapas	34
Fig.28 – Sistema de guiamento do tabuleiro	34
Fig.29 – Dispositivo de escorregamento	35
Fig.30 – Execução da aduela zero	38
Fig.31 – Método dos avanços sucessivos: etapas	39

Fig.32 – Diagrama base de aplicabilidade dos processos construtivos	42
Fig.33 – Curva simplificada da variação da quantidade de betão da secção transversal em função do vão	47
Fig.34 – Curva simplificada da variação da quantidade de aço para armaduras passivas em função do vão	48
Fig.35 – Curva simplificada da variação da quantidade de aço para pré-esforço em função do vão ..	49
Fig.36 – Curva simplificada da variação da área de cofragem em função do vão	50
Fig.37 – Curva simplificada da variação do custo amortizado por obra de um cimbra autolancável em função do vão	63
Fig.38 – Curva simplificada da variação do custo sem amortização de um carro de avanço em função do vão	80
Fig.39 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais médios em função do número de vãos .	85
Fig.40 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 4 vãos	86
Fig.41 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 8 vãos	87
Fig.42 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 14 vãos	87
Fig.43 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 20 vãos	88

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1 – Distribuição típica de custos em pontes de betão	2
Quadro 2 – Quadro dos custos unitários para o cimbra ao solo.....	53
Quadro 3 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura até 15 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros.....	54
Quadro 4 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura até 15 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros.....	55
Quadro 5 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo até 15 metros de altura	56
Quadro 6 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 15 e 30 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros	57
Quadro 7 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 15 e 30 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros	58
Quadro 8 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo de 15 a 30 metros de altura	59
Quadro 9 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 30 e 45 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros	60
Quadro 10 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 30 e 45 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros	61
Quadro 11 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo de 30 a 45 metros de altura.....	62
Quadro 12 – Quadro dos custos amortizados para o cimbra autolançável.....	64
Quadro 13 – Quadro dos custos unitários para o cimbra autolançável.....	65
Quadro 14 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolançável para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros	66
Quadro 15 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolançável para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros	67
Quadro 16 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolançável para uma dimensão de vão entre 50 e 60 metros	68
Quadro 17 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolançável para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros	69
Quadro 18 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra autolançável.....	70
Quadro 19 – Custos unitários amortizados para o sistema de guiamento	73
Quadro 20 – Custos unitários amortizados para o sistema de empurre.....	73
Quadro 21 – Custos unitários amortizados para o nariz metálico	73
Quadro 22 – Quadro dos custos unitários para os deslocamentos sucessivos	74
Quadro 23 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros	75

Quadro 24 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros.....	76
Quadro 25 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 50 e 60 metros.....	77
Quadro 26 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros.....	78
Quadro 27 – Intervalos dos custos relativos totais para os deslocamentos sucessivos	79
Quadro 28 – Quadro dos custos para o carro de avanço	81
Quadro 29 – Quadro dos custos unitários para os avanços sucessivos	81
Quadro 30 – Quadro dos custos relativos para os avanços sucessivos para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros.....	82
Quadro 31 – Quadro dos custos relativos para os avanços sucessivos para uma dimensão de vão entre 70 e 100 metros.....	83
Quadro 32 – Intervalos dos custos relativos totais para os avanços sucessivos	84
Quadro 33 – Quadro dos processos construtivos mais económicos	89

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- C. S. 0-15 – Cimbra ao solo com altura até 15 metros
- C. S. 15-30 – Cimbra ao solo com altura entre 15 e 30 metros
- C. S. 30-45 – Cimbra ao solo com altura entre 30 e 45 metros
- C. A. – Cimbra autolanzável
- D. S. – Deslocamentos sucessivos
- A. S. – Avanços sucessivos

1

INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

As pontes estão certamente no grupo das estruturas de engenharia civil que mais são condicionadas pelo processo construtivo e, actualmente, os processos construtivos são cada vez mais complexos dado que todos os agentes da indústria da construção civil encetam uma busca constante pela economia e confiança nas soluções estruturais. Cada método construtivo tem as suas vantagens e inconvenientes, mas na generalidade todos eles servem propósitos específicos e possuem inúmeras variantes que permitem adequar e potencializar as suas virtudes de acordo com as características de cada obra.

O desenvolvimento do projecto de uma ponte consiste principalmente na conjugação da sua solução estrutural e do seu processo construtivo e nessa conjugação há que conjugar técnica, segurança e economia. Factores associados á obra como os condicionamentos e restrições á distribuição da estrutura no terreno de implantação serão elementos de decisão, mas o processo construtivo nunca perderá a sua preponderância no produto final: a ponte.

Podemos assim concluir que o estudo de concepção de uma ponte engloba a análise dos mais variados métodos construtivos na procura da satisfação dos principais objectivos de uma obra: prazos, custos, qualidade e segurança. Evidentemente, o custo total da obra é o factor transversal a todas as decisões e que condiciona todas as decisões do projectista, apesar disso, são as análises simples dos comportamentos dos materiais, das suas deformações e da estática da estrutura que servirão de alicerces a todo o projecto.

1.1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

A perspectiva económica, desde de finais do século XX e início de XXI tornou-se preponderante nas decisões que dizem respeito à concepção e ao processo construtivo. É então da maior importância conhecer, mesmo que de uma forma geral, quais os principais custos inerentes à construção de uma ponte e as suas parcelas mais preponderantes. Essa análise permite concluir que dois factores estão a ter uma influência crescente, o custo da mão-de-obra e o custo da segurança.

Com base em estudos efectuados por instituições americanas foi possível concluir que desde 1960, a relação entre o custo da mão-de-obra e o custo de materiais duplicou, bem como, a relação entre o custo de mão-de-obra e o custo de equipamentos também duplicou, podemos assim concluir que actualmente os processos construtivos são fortemente condicionados pela minimização da mão-de-obra, sendo os EUA um dos principais exemplos disso [2].

Sendo o âmbito deste trabalho as pontes de pequeno e médio vão, tem especial interesse fazer referência à distribuição de custos para este grupo de pontes e referir que os custos dos processos construtivos aproximam-se com frequência de 20% do valor total da obra.

Quadro 1 – Distribuição típica de custos em pontes de betão (adaptado de Schlaich e Scheef) [2]

Aço passivo	Betão	Processo construtivo	Pré-esforço	Serviços	Acabamentos	Pilares	Fundações
17 %	6 %	20 %	11 %	8 %	14 %	6 %	18 %

A escolha do processo construtivo de pontes tem sempre associada a minimização do custo total da obra, o qual se distribui pelos seguintes pontos:

- Quantidade e nível de especialização da mão-de-obra;
- Custo dos equipamentos;
- Custo de materiais;
- Facilidade e rapidez de execução;
- Risco e segurança do processo construtivo.

Nos custos da mão-de-obra podemos facilmente sentir a influência do processo construtivo dado que a quantidade e o nível de especialização da mão-de-obra são proporcionais à complexidade da tecnologia de construção.

Certos processos construtivos podem requerer equipamentos específicos e especiais e esses equipamentos poderão ter um peso importante no custo total. Também para os equipamentos auxiliares (as vigas de lançamento, os cimbres, carrinhos de avanços, etc.) é importante racionalizar entre a sua disponibilidade na empresa construtora ou a necessidade de efectuar um investimento na sua aquisição ou aluguer, racionalização que poderá influenciar a escolha de um determinado processo construtivo.

No que diz respeito aos materiais, é importante referir que não basta considerar os materiais necessários para a construção da ponte em si, mas é também preciso contabilizar os encargos com materiais de trabalhos auxiliares e indispensáveis à execução da estrutura. Em função do processo construtivo utilizado na obra, poderá ainda ser necessário sobredimensionar os materiais da estrutura para responder às tensões desenvolvidas, muitas vezes superiores às tensões de serviço, durante a execução da obra devido às várias configurações da estrutura nesse período.

A facilidade e rapidez de execução, são dois factores que têm um enorme peso na produtividade do processo construtivo escolhido, mas estes dois factores não se definem por si só mas são antes definidos com base nas características do local de implantação em que se processa a construção, características respeitantes à localização da obra sejam elas a topografia, condições climáticas, cota da rasante, nível de especialização da mão-de-obra disponível e características de execução da obra, nomeadamente no que se refere a fundações. O acesso ao local da obra, é outro dos factores que afecta a rapidez e a facilidade de execução porque dele dependem a disponibilidade e utilização de materiais e equipamentos. Analisando isoladamente a rapidez de execução constata-se que este factor tem vindo a ganhar importância, visto que condiciona a entrada em funcionamento da estrutura e respectivamente a capacidade do dono de obra conseguir o retorno do seu investimento através da cobrança do serviço prestado.

Por fim, o risco e a segurança com que se desenvolve o processo construtivo são dois elementos essenciais e sempre presentes, tanto na fase de projecto como na fase de construção. A segurança durante a execução da obra deve ser um factor de grande preocupação, porque a maioria dos acidentes ocorrem durante a fase construtiva. É também de salientar que determinados processos construtivos os esforços mais preponderantes para o cálculo da estrutura verificam-se durante uma das fases da execução da obra [1].

Resumindo, nas pontes existe uma clara relação entre a concepção e a escolha do processo construtivo, assim a decisão sobre o processo construtivo a utilizar resulta normalmente da consideração ponderada dos seguintes factores de decisão:

- Custo;
- Exequibilidade e existência de conhecimentos e capacidade técnica;
- Equipamento;
- Avaliação do risco e segurança;
- Sistemas estruturais intercalares;
- Faseamento construtivo;
- Controlo geométrico;
- Controlo de qualidade dos materiais;
- Geotecnia;
- Relevo;
- Cota da rasante;
- Prazo;
- Condições ambientais.

1.1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Os principais objectivos deste trabalho são avaliar e quantificar os diversos encargos que compõem cada um dos métodos construtivos de tabuleiros betonados in situ em pontes de pequeno e médio vão e através da comparação dos resultados obtidos estabelecer indicações para um processo de decisão sustentado.

A viabilidade de um método construtivo não se resume ao lado económico, por isso neste trabalho elabora-se também um diagrama base sobre as vantagens e limitações técnicas de cada processo.

Outro objectivo deste trabalho passa por elaborar uma compilação das técnicas construtivas que são actualmente utilizadas na execução de tabuleiros em pontes de pequeno e médio vão, e entre os quais poderemos encontrar os processos construtivos que são alvo de análise económica neste trabalho.

1.2. TABULEIRO

1.2.1. GENERALIDADES

Na actualidade existe um infindável número de métodos construtivos de pontes que não poderão ser todos referidos neste trabalho citam-se aqui apenas aqueles mais correntemente utilizados no panorama da construção de obras públicas em Portugal.

Os critérios que regem a escolha de um método construtivo não são rígidos nem estão claramente definidos, pelo contrário, um dos principais objectivos é claro e bem explícito e é o de conseguir a solução mais económica. Para atingir esse objectivo é preciso avaliar as características particulares de cada projecto, se na análise da execução da obra propriamente dita os factores importantes são o perfil

de empreiteiro, o equipamento disponível, o custo de mão-de-obra e o tipo de equipamento a utilizar, no que diz respeito às características da ponte são o gabarit, o número e dimensão dos vãos e a curvatura em planta e alçado, para citar algumas.

A betonagem *in situ* de um tabuleiro utiliza dois elementos auxiliares principais, a estrutura portante da cofragem e a própria cofragem em si. O cimbres tem diferentes características, de acordo com as necessidades técnico-económicas da obra em que vai ser utilizado, pode ser fixo ou móvel, e no caso de possuir mobilidade podemos distinguir dois processos construtivos, os cimbres autolanzáveis ou os cimbres dos avanços sucessivos (carrinhos de avanços). De igual modo, a cofragem pode ser reutilizável ou não, o tabuleiro pode ser executado com elementos pré-fabricados ou através da betonagem *in situ*, existindo ainda uma terceira alternativa que consiste em utilizar elementos pré-fabricados e betonados no local, em simultâneo.

1.2.2. LAJE MACIÇA, VAZADA E NERVURADA

Para pontes em viga isostática de um único tramo e com vãos até 20 m, a secção transversal do tabuleiro em laje maciça tem-se mostrado uma boa opção, especialmente, nos casos de viadutos de auto-estrada com geometria complexa em planta ou em laje enviesada. Trata-se de uma solução estruturalmente pouco otimizada, mas que assegura uma muito elevada facilidade construtiva.

As principais vantagens desta solução de secção transversal são:

- Cofragem simples;
- Simplicidade de betonagem;
- Facilidade de execução;
- Fácil variação da geometria em planta;
- Disposição simples de armaduras ordinárias e de pré-esforço.

As principais desvantagens:

- Peso próprio elevado;
- Excessiva utilização de betão e aço;
- Pré-esforço pouco rentabilizado devido à baixa espessura do tabuleiro e consequente baixa excentricidade dos cabos.

A pré-fabricação tem uma forte incidência em pontes com este tipo de lajes e assim uma outra solução para a laje passa pela utilização de vigas pré-fabricadas em forma de T invertido, onde estas vigas são colocadas lado a lado e solidarizadas pelo betão, em função da distância transversal entre duas vigas poderá ser dispensada a cofragem inferior, o que facilita a execução desta solução.

A redução do peso próprio pode ser uma solução para minimizar as desvantagens da laje maciça. A laje vazada consegue a redução de peso com a introdução no seu interior de cofragens perdidas sendo importante assegurar que a cofragem é bem fixada para que não se solte e flutue durante a betonagem. Deve-se também garantir que não existem vazios sob as cofragens perdidas através da utilização de vibradores. A laje nervurada tem a vantagem de conseguir uma redução de peso como a laje vazada mas sem os problemas da cofragem perdida, por outro lado, a sua execução e betonagem é mais complexa que a da laje maciça [3].

1.2.3. LAJE VIGADA

A laje vigada é a opção mais acertada para secção transversal do tabuleiro quando devido ao aumento do vão da ponte, a solução em laje maciça atinge valores de peso próprio que desaconselham a sua utilização, tanto a nível económico como estrutural.

Os elementos estruturais de uma laje vigada são as longarinas, as vigas longitudinais, e as carlingas, as vigas transversais. O sistema estrutural composto por estes dois tipos de vigas suporta o tabuleiro e consequentemente as cargas depositadas nele. As cargas são conduzidas do tabuleiro para as longarinas, vigas principais que vencem o vão, as carlingas têm como função principal estabelecer uma ligação entre as longarinas e dependendo ou não do contacto com a laje podem também servir de suporte ao tabuleiro.

A largura do tabuleiro é a principal condicionante do número de vigas principais, mas esse número deve ser o menor possível de modo a facilitar a execução e a reduzir custos, graças à simplificação da cofragem. A pré-fabricação das vigas principais é também uma opção, o que dispensa a betonagem e a cofragem e facilita a montagem, desde que se disponha de equipamentos capazes de suportar o peso das vigas, as carlingas devem ser inexistentes ou em número reduzido visto que a sua execução é *in situ* e mais uma vez deve-se economizar em cofragem [3].

A solução de laje vigada é economicamente viável para vãos até cerca de 50 m, e as suas vantagens são:

- Peso próprio inferior ao das vigas caixão;
- Betonagem mais simples que as vigas caixão;
- Simplicidade de cofragem e armadura;
- Utilização de pré-fabricação, o que reduz consideravelmente as necessidades de cofragem e betonagem.

1.2.4. VIGA EM CAIXÃO

A secção transversal do tabuleiro em caixão é, habitualmente, considerada pelos projectistas quando se faz o desenvolvimento de pontes que possuem uma ou mais características:

- A limitação da altura disponível sob o tabuleiro, normalmente associada a vias de comunicação e muito frequente no espaço urbano;
- Pontes curvas, onde a resistência à torção é importante e as vigas em caixão têm um bom comportamento;
- Pontes de grande vão, onde as outras soluções de laje são inviáveis devido a limitações económicas e de peso próprio.

As vigas em caixão são uma solução de eficiência superior as lajes vigadas porque apresentam uma maior esbelteza e as suas deformações por fluência são inferiores pois o betão nas vigas em caixão encontra-se submetido a menores tensões de compressão, bem como, um banzo inferior na zona dos apoios que devido á sua configuração em laje consegue mais facilmente absorver essas mesmas tensões. Por fim, como tem uma maior altura proporciona uma maior excentricidade aos cabos de pré-esforço nas secções com momentos negativos.

Apesar de todas as vantagens, a viga em caixão tem também alguns inconvenientes que poderão ter alguma importância no estudo do processo construtivo visto que uma das suas principais desvantagens é a execução mais complexa de cofragens, betonagens e armaduras, bem como um peso próprio mais elevado [3].

1.2.5. APARELHOS DE APOIO

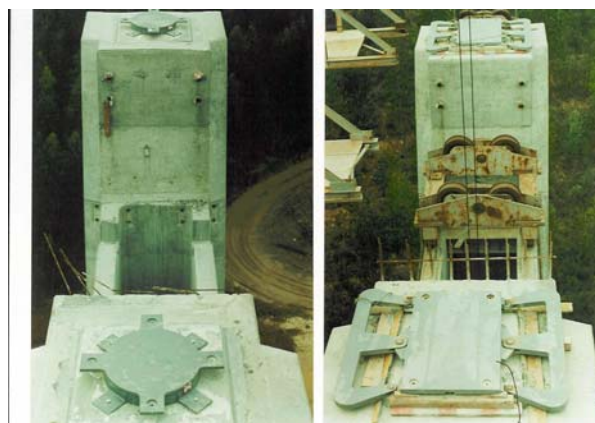


Fig.1 – Exemplos de aparelhos de apoio [9]

As pontes em viga contínua caracterizam-se por apoios simples ou duplos nos pilares, esta concepção estrutural é utilizada quando a ponte é relativamente baixa o que se traduz numa maior rigidez dos seus pilares. Para pontes com pilares de altura inferior a 20 m, logo de elevada rigidez, será necessário colocar aparelhos de apoio de neoprene cintado de modo a acautelar os esforços devido às variações de comprimento. Nas pontes de pequeno comprimento, as variações de comprimento poderão ser anuladas apenas com a distorção do neoprene. Nas outras situações é recomendado recorrer a um aparelho de neoprene com lâmina de teflon que possui um coeficiente de atrito ao deslizamento muito reduzido. Com a adopção destes elementos de apoio simples ou duplos é possível diminuir ou quase anular os esforços criados pelas variações de comprimento do tabuleiro associadas a fenómenos de retracção do betão, de fluência e térmicos.

A solução de ponte em pórtico não transmite grandes esforços aos pilares, pois a inércia do tabuleiro é muito superior assim os pilares podem ser constituídos por uma secção tubular, ou em alternativa no seu topo ou em todo o seu desenvolvimento, por duas lâminas que permitem que os pilares apresentem menos rigidez quando mobilizados pelas variações de comprimento do tabuleiro, sem que a resposta perante os momentos de desequilíbrio das consolas durante a fase de construção seja afectada, devem as lâminas dos pilares durante a fase de execução da obra serem contraventadas para reduzir a sua esbelteza [1], [3].

1.2.6. JUNTAS DE DILATAÇÃO

Como já foi referido anteriormente, o tabuleiro sofre variações de comprimento devido a fenómenos de retracção do betão, de fluência e térmicos, essas variações são amortizadas pela criação de juntas de dilatação entre a ponte e os seus encontros podendo mesmo no caso de pontes de grande extensão ser necessária a criação de juntas intermédias, neste caso é preciso criar apoios móveis no local das juntas para que as vigas principais que foram interrompidas possam variar de comprimento livremente.

Num tabuleiro é reconhecido que as juntas de dilatação são os seus elementos mais críticos pois acarretam custos de manutenção e outros tipos de despesas. Algumas medidas que podem evitar estes encargos são a escolha de juntas com grande qualidade e resistência que apesar de mais dispendiosas virão mais tarde a justificar o investimento devido à redução nos custos de manutenção e reparação,

outra das medidas passa pela utilização de cobre juntas para amplitudes de deslocamentos superiores a 3 cm de modo a proteger as juntas de dilatação do desgaste provocado pelo tráfego rodoviário.

As juntas de dilatação podem ser de diferentes tipos e constituídas por diferentes materiais sendo que a mais simples e básica é a junta de dilatação constituída por aglomerado negro de cortiça pensada para pequenos deslocamentos. Outra solução passa pela utilização de juntas de neoprene, desenvolvidas por empresas especializadas que definem as amplitudes de deslocamentos de cada tipo de dispositivo comercializado. Por fim, existem ainda as juntas em dente metálico, com ou sem lâmina de vedação [3].

1.3. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM CIMBRE AO SOLO



Fig.2 – Escoramento ao solo [11]

O cimbra fixo é o processo construtivo mais comum na construção de pontes de betão armado podendo também ser utilizado em pontes de pedra. Caracteriza-se pela execução de uma cofragem apoiada num cimbra fixo, esse cimbra pode também ser designado por cavalete ou se toda a estrutura do cimbra for exclusivamente constituída por escoras adopta-se a designação de escoramento.

A variante mais simples e correntemente mais utilizada do cimbra ao solo consiste numa estrutura de prumos de madeira ou, mais actualmente, de perfis ou tubos metálicos fundada no terreno sob o tabuleiro através de técnicas rudimentares, como por exemplo, utilizando tábuas de madeira ou maciços de betão que permitem uma melhor distribuição pelo solo das cargas suportadas pelo cimbra.

A segurança deste processo construtivo está intimamente ligada com o contraventamento dos elementos que constituem o cimbra dado que mesmo em tabuleiros com uma rasante baixa é preciso acautelar os fenómenos de instabilidade das escoras. Mas para que a execução do tabuleiro se faça sem acidentes é preciso analisar outro factor, o terreno e a sua capacidade resistente sob acção das cargas transmitidas pelo cimbra, porque os principais acidentes associados a este método são os colapsos do cimbra devido aos assentamentos dos terrenos de fundação.

As escoras são peças de grande esbelteza com cargas axiais elevadas e a capacidade resistente é, normalmente, mobilizada quase na sua totalidade por questões económicas assim o escoramento deforma-se bastante sob o peso próprio do betão. Este fenómeno deve ser previsto pelo projectista através da análise dos planos do cavalete apresentados pelo construtor dado que é vital que a geometria do tabuleiro seja a definida no projecto e evitar que o durante o tempo de cura do betão,

onde existem baixos níveis de capacidade resistente, o betão sofra fissuração devido aos assentamentos do escoramento [1], [2], [3].



Fig.3 – Cimbra ao solo de asnas e colunas metálicas [9]

As pontes de pedra são também cenário possível para a utilização deste método para suporte provisório dos arcos da ponte, com cimbres de elevado nível de complexidade e que se constituem como verdadeiras obras de arte de carpintaria.

1.4. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

No sistema de cimbra autolançável, o sistema de suporte da cofragem é constituído por uma ou mais vigas metálicas em treliça ou alma cheia sendo possível adoptar duas disposições das vigas metálicas, superior ao tabuleiro designado o sistema por cimbra móvel superior, ou inferior ao tabuleiro designado de cimbra móvel inferior. Os cimbres autolançáveis têm um âmbito de funcionamento que abrange tabuleiros contínuos com qualquer tipo de secção transversal: laje maciça, vigada, nervurada ou em caixão. Este método construtivo está equipado com um sistema de avanço, daí a designação de autolançável, um sistema que é constituído por dispositivos de apoio nos elementos da estrutura já construídos, especialmente nos pilares, dispositivos de cofragem e descofragem e dispositivos para descimbramento. Estas estruturas de aço são consideravelmente pesadas, entre 250 a 500 kg por tonelada de betão suportada, dado que para além de suportarem o peso do betão vencem vãos de dimensões consideráveis.

Os cimbres autolançáveis são constituídos por um conjunto de elementos, apresentados em seguida de acordo com a sua função:

- Estrutura portante, viga de lançamento, normalmente constituída por um número variável de vigas em caixão metálicas de alma cheia ou treliçada;
- Elementos transversais de apoio às plataformas de trabalho e aos sistemas de escoramento das cofragens, para as várias fases de construção, tendo em consideração as sucessivas fases de betonagem;
- Sistema de movimentação do cimbra;
- Estrutura auxiliar para movimentação;
- Estrutura para apoio da viga de lançamento, consolas ou pórticos;

- Cofragem.

A principal desvantagem da utilização deste método construtivo é o seu custo pois o processo de reutilização de um cimbra noutra obra que não aquela para a qual ele foi pensado e projectado é, normalmente, muito complicado e dispendioso dado que cada obra se compõe de um conjunto de circunstâncias especiais e únicas sendo apenas justificável a sua utilização em obras de grande extensão e com um número elevado de vão idênticos. Apesar do que foi referido existem casos de sucesso na reutilização de cimbres mas sempre associados a elevados custos de modificação.

Outra limitação dos cimbres autolançáveis são os viadutos e pontes com raios de curvatura pequenos não sendo possível nestes casos utilizar a mesma técnica utilizada para viadutos em curva com raios superiores a 200 m em que o cimbra devido à sua configuração rectilínea se apoia nos pilares que delimitam o vão e a curvatura desse troço é conseguida através do formato da cofragem. Mais recentemente, tem-se verificado o desenvolvimento da técnica de aplicação de rótulas a meio vão das vigas principais e entre estas e os narizes o que permite que os cimbres sejam utilizados na execução de viadutos e pontes com raios de curvatura até 85 m para tabuleiros betonados *in situ*.

O cimbra autolançável é um processo construtivo que potencializa as suas capacidades para um universo de pontes de grande extensão com múltiplos tramos iguais ou para pontes construídas para alturas elevadas tendo em conta que para esta segunda situação o métodos dos avanços sucessivos pode ser também uma opção credível [1], [4], [5].

1.4.1. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL SUPERIOR

Como já foi referido os cimbres autolançáveis são classificados conforme a sua disposição em relação ao tabuleiro a suportar, os cimbres autolançáveis superiores possuem uma estrutura de suporte que se apoia em dois pontos, um dianteiro e um traseiro sendo que o apoio dianteiro é suportado por um pórtico metálico colocado no pilar junto ao troço a betonar em quanto que o apoio traseiro é suportado pelo ultimo troço betonado. Os pórticos que suportam a parte dianteiro do cimbra tem os seus montantes verticais a uma distancia transversal igual à dos macacos hidráulicos que fazem o travamento do cimbra durante a fase de betonagem.

Os cimbra móveis superiores têm incorporado um sistema de movimentação que pode ser de dois tipos, com a movimentação do cimbra a fazer-se através de forças que o empurram para o próximo troço a betonar, com a utilização de macacos hidráulicos no apoio traseiro. Por outro lado, através de guinchos mecânicos que produzem forças de tracção que deslocam o cimbra para local da próxima betonagem [1], [4], [5].



Fig.4 – Cimbra autolançável superior [11]

1.4.2. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL INFERIOR

A estrutura portante encontra-se sob o tabuleiro em construção, o cimbra possui um esquema de apoios semelhante ao cimbra superior com a exceção de necessitar de um sistema de apoio provisório nos pilares. Esse apoio nos pilares é feito com a utilização de consolas metálicas de uma das seguintes formas [1], [4], [5]:

- Através da criação de uma força de atrito que consegue resistir ao esforço de corte entre pilar e consola, essa força de atrito é desenvolvida com a utilização de anéis de atrito aplicados em varões de aço pré-esforçado que são comprimidos contra o betão dos pilares;
- Com pilares que possuem pequenos negativos que permitem o encaixe das escoras que irão suportar a consola e os apoios do cimbra;
- Um sistema misto de apoio, onde se aproveita a capacidade resistente das duas soluções anteriores pelo atrito dos anéis de atrito e pela compressão das escoras transmitindo o esforço ao pilar.

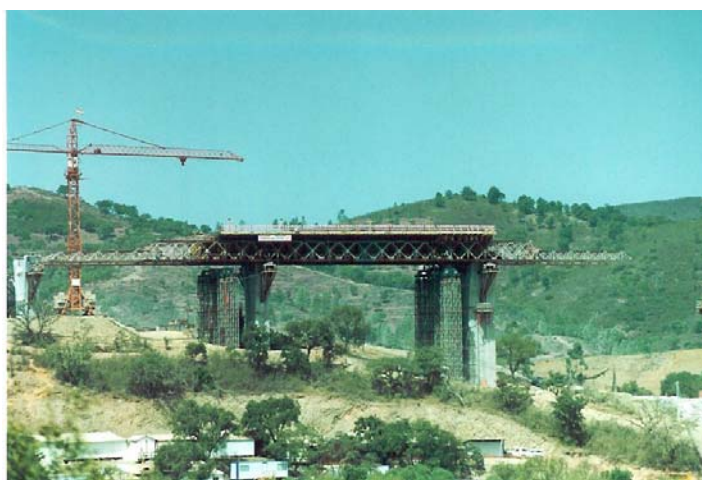


Fig.5 – Cimbra autolançável inferior [9]

1.5. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM PRÉ-FABRICAÇÃO

Uma das vantagens da utilização da pré-fabricação na execução de uma ponte é capacidade de racionalização do processo construtivo. A pré-fabricação possibilita uma redução e maior controlo dos custos de construção porque pode ser realizada tanto em obra como em fábrica mas sempre em ambientes de trabalho devidamente controlados e monitorizados o que se traduz numa industrialização do processo e, conseqüentemente, em reduções de custos e aumento da qualidade do produto final. Por outro lado, este método construtivo implica o uso de equipamentos de transporte e colocação específicos e com grande capacidade o que pode ser condicionante tanto a nível económico como logístico dado que implicam condições especiais de acesso ao local da obra, por fim, estes mesmos meios necessitam de mão-de-obra com um nível de especialização considerável.

Para além dos factores referidos, a pré-fabricação também apresenta algumas limitações ao nível da funcionalidade e estética da estrutura pois é corrente as pontes pré-fabricadas terem deficiente continuidade e homogeneidade nos elementos estruturais, bem como, as estruturas são esteticamente pouco agradáveis devido à racionalização associada à pré-fabricação [1].

1.5.1. VIGAS PRÉ-FABRICADAS

A forma mais corrente de construir uma ponte com elementos pré-fabricados é através da produção de vigas pré-fabricadas em estaleiro ou em fábrica. Com o comprimento igual à distancia entre pilares e com secções transversais com vários tipos de geometria, como por exemplo as vigas em forma de I ou de T, ou ainda com formas mais elaboradas como são as vigas em caixão ou em Π . Após a execução das vigas pré-fabricadas, o passo seguinte é a sua colocação em obra através de dois métodos distintos de acordo com as condições de acesso a partir do solo a toda a extensão da obra, assim se for possível aceder com os equipamentos pesados a toda a estrutura faz-se a colocação das vigas com o auxílio de guias, por outro lado, se for impossível chegar a toda ou parte da estrutura a solução passa pela utilização de vigas de lançamento.



Fig.6 – Vigas pré-fabricadas em caixão [11]

No processo de pré-fabricação, as vigas em caixão e em Π apesar de serem produção mais complexa devido às suas cofragens mais elaboradas possuem vantagens em relação às vigas em I e em T de produção mais rápida e simples. Porque na fase de betonagem da parte não pré-fabricada do tabuleiro estas vigas permitem, graças à sua geometria mais elaborada, a dispensa de cofragem pois assumem essa função quando colocadas encostadas umas às outras. No caso das vigas em I e em T podem ser

adoptadas soluções como um tabuleiro totalmente pré-fabricado através da aplicação de pré-lajes em betão ou um dispositivo de cofragem com apoios nas vigas pré-fabricadas e que se desloque sobre estas [1].

1.5.2. ADUELAS PRÉ-FABRICADAS

As aduelas pré-fabricadas são elementos utilizados numa das variantes do método dos avanços sucessivos que consiste na colocação das aduelas como se tratassem de peças de lego encaixadas umas nas outras formando, progressivamente, o tabuleiro. A qualidade e precisão da fabricação das aduelas é da maior importância para a obtenção da geometria projectada da ponte sendo necessária especial atenção para as curvaturas longitudinais e sobre-elevações transversais. As aduelas possuem a secção transversal definitiva do tabuleiro com excepção das consolas que podem só mais tarde ser betonadas em obra.

O método dos avanços sucessivos com aduelas pré-fabricados, tal como, nas betonadas *in situ* necessita que se faça a solidarização das aduelas após a sua colocação no seu local definitivo através da aplicação de cabos de pré-esforço. Mas no caso de aduelas pré-fabricadas é preciso ainda aplicar nas superfícies de contacto entre aduelas uma cola de resinas epóxicas que têm como principal finalidade a estanquidade da ligação e é também essencial para corrigir as imperfeições nas superfícies de contacto criadas pelo endentamento de resistência aos esforços de corte, por fim, pode em certos casos acrescentar capacidade resistente.



Fig.7 – Aduelas pré-fabricadas [11]

Tal como nas vigas prefabricadas, após a fabricação das aduelas é necessário proceder à sua colocação em obra, são referidos em seguida os métodos mais correntes para executar dessa tarefa:

- Utilização de um equipamento de grande capacidade de elevação, como por exemplo uma grua, um guincho, etc. Este processo de elevação e colocação das aduelas é consideravelmente simples e económico desde que o local de implantação da obra permita a aproximação dos equipamentos de transporte e elevação a toda a extensão da ponte;



Fig.8 – Equipamento de colocação e elevação autónomo [11]

- Utilização de uma viga de lançamento, esta técnica já foi referida anteriormente para a colocação das vigas pré-fabricadas e é também semelhante à utilizada para a execução de aduelas betonadas *in situ* [1].



Fig.9 – Viga de lançamento para aduelas pré-fabricadas [11]

1.6. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM O MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS

O método dos deslocamentos sucessivos é, provavelmente, o menos utilizado em Portugal dos quatro métodos que fazem parte do estudo económico. O conceito base deste processo construtivo é o de construir o tabuleiro por troços sucessivos, tal como nos avanços sucessivos, mas agora com a particularidade da cofragem estar fixa numa área situada atrás de um dos encontros. A cofragem encontra-se posicionada de acordo com o eixo do tabuleiro porque o troço que acabou de ser executado será colocado no seu lugar por movimentação longitudinal através de macacos hidráulicos.

O processo dos deslocamentos sucessivos com a utilização de uma unidade de fabricação num dos encontros consegue concentrar a área de trabalho e o investimento para o equipamento necessário para esse estaleiro é baixo, por outro lado, este método consegue combinar as vantagens da pré-fabricação:

- Betonagem dos troços numa cofragem fixa;
- Repetição e aperfeiçoamento das actividades devido ao processo sistemático;
- Local de trabalho protegido.

Com as vantagens da execução *in situ*:

- Estrutura monolítica sem juntas debilitadoras;
- Dispensa de equipamentos pesados para o transporte e elevação.

O funcionamento deste método implica a criação de algumas condições como a concepção dos encontros para suportar as forças horizontais desenvolvidas pelos macacos hidráulicos nas operações de empurre, os pilares devem oferecer uma superfície ampla no seu topo para receber os aparelhos de apoio deslizantes e ser dimensionados para suportar as forças horizontais mobilizadas pelo atrito.

Os troços de tabuleiro executados nas cofragens fixas sobre o encontro são betonados contra o troço anterior e têm, normalmente, comprimentos entre 10 a 30 m. A sua solidarização é conseguida através de cabos de pré-esforço, provisório ou definitivos. A definição do comprimento dos troços a betonar é influenciada por vários factores como a retracção do betão, por outro lado, é importante que as juntas entre dois troços betonados tenham a sua posição final em secções transversais de momento nulo.

A construção de pontes em betão armado é o domínio onde o método dos deslocamentos sucessivos possui uma considerável deficiência, a utilização excessiva de pré-esforço durante a fase construtiva devido à inversão acentuada dos esforços gerados em cada secção ao longo do processo construtivo [1], [5], [7].

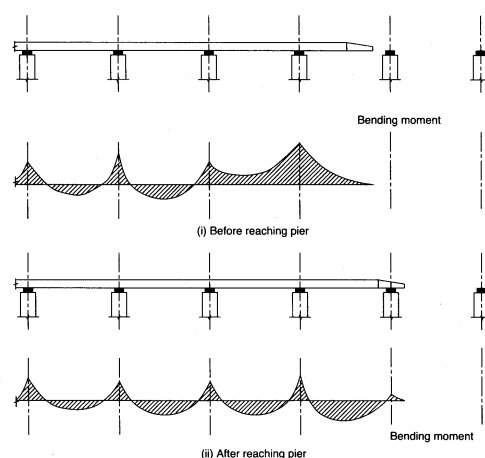


Fig.10 – Variação dos momentos nas secções transversais durante o empurre [2]

A alternância entre momentos negativos e positivos a que uma secção transversal se encontra sujeita ao longo do seu percurso até à sua posição final implica a adopção de algumas medidas para que o tabuleiro tenham um bom comportamento quando solicitado por esses esforços. A tipologia da secção transversal é, normalmente, viga em caixão de geometria constante com baixa esbelteza e elevada densidade de armadura dado que será solicitada por tensões de compressão tanto no banzo inferior como no superior.

A variação dos momentos implica também que o pré-esforço não pode ser projectado com grandes excentricidades nem pode ser usado para aumentar a capacidade resistente ao esforço de corte porque também este esforço varia de sinal ao longo das várias etapas da construção. Até o tabuleiro atingir a sua posição final, os cabos de pré-esforço localizam-se exclusivamente nos banzos da secção transversal com uma excentricidade quase nula só após terminada a movimentação do tabuleiro é que se colocam os cabos de pré-esforço definitivo com excentricidade variável. A necessidade de duas fase de colocação de pré-esforço e as quantidades de material envolvidas fazem com que se possam atingir valores de pré-esforço para este processo superiores a 50% do que seria necessário noutros métodos.

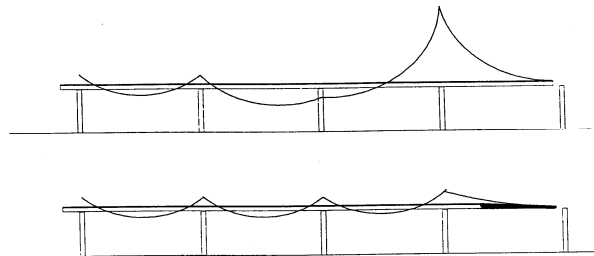


Fig.11 – Momentos do tabuleiro sem e com o nariz metálico [2]

Outra medida utilizada para diminuir os momentos a que se encontra sujeito o tabuleiro durante o empurre é a colocação de um nariz metálico na frente do tabuleiro porque com este equipamento é possível reduzir a dimensão da consola do tabuleiro até se atingir o pilar seguinte. O comprimento do nariz metálico é da ordem de 60% da dimensão dos vãos do tabuleiro [5], [7].



Fig.12 – Nariz metálico [11]

1.7. TABULEIRO CONSTRUÍDO COM O MÉTODO DOS AVANÇOS SUCESSIVOS

Normalmente a técnica de avanços sucessivos é usada para médios a grandes vãos, no entanto estando numa gama de vãos na fronteira daqueles que são aqueles que são o alvo deste trabalho, não podia deixar de fazer a sua inclusão.

O princípio dos avanços sucessivos é um método que se aplica a qualquer tipologia entre as quais a viga contínua, pórtico, arco, pontes atirantadas, etc. A construção do tabuleiro é executada a partir dos pilares e/ou encontros através de sucessivos segmentos em consola designados aduelas. O processo de avanços sucessivos produz, normalmente, aduelas correntes de 3 a 6 m e as aduelas de fecho tem dimensões de 2 a 3 m de comprimento. Cada aduela é solidarizada à anterior e possui capacidade resistente suficiente para suportar a sua própria carga e a carga das aduelas seguintes, essas cargas são, normalmente, compostas pelo peso próprio da aduela, das cofragens e o do equipamento utilizado na execução do tabuleiro. O passo seguinte à execução de uma aduela e antes de se proceder à descofragem, é a colocação e traccionamento dos cabos de pré-esforço de modo a conseguir-se a referida solidarização das aduelas.

A construção do tabuleiro de pontes por avanços sucessivos caracteriza-se, geralmente, pela utilização de aduelas betonadas *in situ* com progressão simétrica a partir dos pilares da obra conseguindo-se assim que não se desenvolvam desequilíbrios e esforços de flexão nos pilares e fundações. Como a betonagem de duas aduelas simétricas não é executada em simultâneo existe sempre um desequilíbrio temporário na estrutura e que tem que ser previsto e resolvido pelo projectista de duas formas, ou utilizando ligações auxiliares durante a fase construtiva ou através do encastramento da própria estrutura, como são exemplo as pontes em pórtico [1], [5], [6].



Fig.13 – Exemplo de elementos estruturais auxiliares durante a fase de construção (cabos de equilíbrio) [9]

O desenvolvimento do método dos avanços sucessivos é, normalmente, efectuado de uma forma simétrica aos apoios do tabuleiro quando a ponte é construída para fazer a travessia de um curso de água ou de um vale profundo. Existe também a variante assimétrica dos avanços sucessivos, que pode desenvolver-se a partir dos apoios ou de tramos previamente construídos, pode ainda ser necessária a utilização de apoios provisório para compensar o desequilíbrio da progressão assimétrica do tabuleiro.

Na realidade não existe apenas uma variante mas sim um conjunto de variantes dos avanços sucessivos, de seguida enumeram-se algumas:

- Simetricamente, para lados opostos do pilar;



Fig.14 – Método dos avanços sucessivos com execução simétrica a partir do pilar [11]

- A partir de um tramo previamente construído;
- A partir de um pilar ou de um encontro mas recorrendo a uma solução mista de avanços sucessivos e cimbra ao solo.

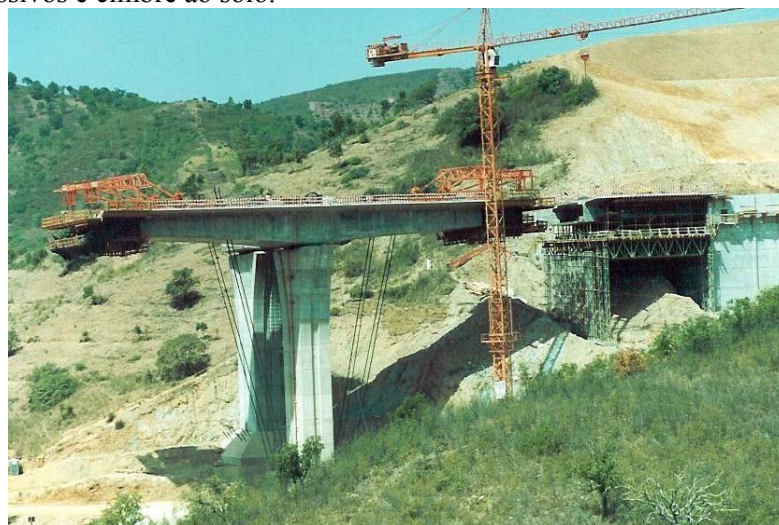


Fig.15 – Solução construtiva mista de avanços sucessivos e cimbra ao solo [9]

O carrinho de avanço é uma estrutura de suporte que actua de duas formas diferentes, isto é, assegura a localização física do segmento a construir, bem como, suporta o peso do segmento antes de o betão ganhar presa e da aplicação dos cabos de pré-esforço. A estrutura portante autónoma utilizada no método dos avanços sucessivos é, tradicionalmente, constituída por uma estrutura longitudinal onde o peso da aduela durante a betonagem é transmitido ao tabuleiro através de vigas longitudinais em consola, isto é, em consola na direcção do avanço e portanto encastrada sobre o tabuleiro ou inferiormente ao tabuleiro já construído. Apesar de este equipamento não demonstrar grande flexibilidade e adaptabilidade consegue abranger um intervalo de larguras e alturas de tabuleiro relativamente grande bastando para isso operar alterações não muito significativas [1], [5], [6].



Fig.16 – Carro de avanço [9]

Com os carrinhos de avanço tradicionais, a ocorrência de deformações durante a construção estava quase totalmente relacionada com a viga principal. A evolução da técnica permitiu desenvolver uma versão melhorada dos carrinhos de avanço tradicionais que não envolve um investimento muito elevado na sua produção. Os carrinhos de avanço têm sido modificados para incluir as cofragens na estrutura do carrinho de avanço formando uma cofragem autoportante e assim constituir um carrinho de avanço não deformável que evita potenciais problemas de controlo e correcção da geometria do tabuleiro, fissuras nas juntas entre aduelas e congestionamento da zona de trabalho. Os carros de avanço mais recentes permitem a execução de tabuleiros com qualquer tipo de traçado em planta e proceder a alterações da inércia da secção transversal do tabuleiro através da variação da espessura dos banzos ou das almas, ou ainda pela variação da altura da secção transversal [1], [5], [6].

2

PROCESSOS CONSTRUTIVOS DESCRIÇÃO E APLICABILIDADE

2.1. GENERALIDADES

O objectivo deste segundo capítulo é a descrição dos procedimentos envolvidos em cada um dos quatro métodos construtivos que são abrangidos por este trabalho: cimbra ao solo, cimbra autolanzável, deslocamentos sucessivos e avanços sucessivos, bem como, a determinação dos principais factores que condicionam ou favorecem a aplicação desses métodos construtivos.

A informação técnica e a execução prática de cada um dos processos construtivos descritos neste capítulo tem como suporte e fundamento a bibliografia associada a este trabalho e o contacto com engenheiros e técnicos com experiência prática na utilização dos processos construtivos.

2.2. CIMBRE AO SOLO

2.2.1. DESCRIÇÃO

2.2.1.1. Montagem do cimbra



Fig.17 – Montagem de um cimbra ao solo [9]

A construção de tabuleiros com cimbra ao solo é, normalmente, caracterizada por um cimbra com cavalete directo ao solo através de uma estrutura tubular ou estruturas metálicas formadas por asnas e colunas. Um cimbra ao solo tem que ser constituído por uma estrutura metálica devidamente contraventada e possuir na sua base, maciços de fundação, de forma a suportarem as cargas transmitidas pela estrutura. As soluções de estrutura tubular, habitualmente, usadas neste processo construtivo são os escoramentos com várias designações no mercado. Principalmente para o caso da utilização de estruturas tubulares, como cavaletes, poderá ser necessário o tratamento das zonas envolvidas, recorrendo à regularização e colocação de uma camada de “tout-venant” devidamente compactado, bem como, a colocação de vigas de madeira, cruzadas entre si, sobre as quais se apoia o escoramento. Desta forma, faz-se a distribuição e degradação das cargas no terreno e evitam-se assentamentos significativos do cavalete. Sobre estas estruturas são então posicionadas e montadas as cofragens, as armaduras, e posteriormente é executada a betonagem.

Para circunstâncias como vãos de maiores dimensões, rasantes elevadas ou um solo acidentado, é mais aconselhável optar pela utilização de vigas de suporte da cofragem ou treliças que descarregam por sua vez em apoios de dois tipos, os próprios pilares do tabuleiro com auxílio, se necessário, de pilares intermédios provisórios ou numa estrutura erguida a partir do solo, esta solução para vãos entre os 5 a 8 metros pode simplesmente utilizar vigas em I de aço, no caso de vãos de dimensão maior opta-se por uma estrutura reticulada articulada, por razões de economia de material e de peso da estrutura. A estrutura de suporte da cofragem deve ser equipada com um sistema de regulação da altura da cofragem para permitir os necessários ajustes e os descimbramentos durante a execução da obra [1].

O contraventamento, é uma entre várias medidas preventivas que é necessário estudar e ponderar para a aplicação deste método construtivo de forma eficaz e segura. Assim a capacidade de atingir bons resultados desta tecnologia de construção está dependente:

- Do estudo e cálculo das deformações do cimbra e da determinação das contra-flechas para compensar esses fenómenos;
- Do cuidado em proteger os elementos metálicos do cimbra da radiação solar;
- Do planeamento da betonagem com a preocupação de evitar uma distribuição desequilibrada do betão sobre a cofragem e com isso permitir que as deformações principais da estrutura do cimbra aconteçam quando o betão ainda as consegue acomodar sem fissuração, ou seja, antes do início da sua presa, uma solução de recurso é a utilização de retardadores de presa do betão;
- Da avaliação e manutenção permanente de todo o escoramento, especialmente a sua zona mais crítica, as fundações, para que se possa actuar de forma prematura nas deficiências da estrutura de suporte.

As armaduras são previamente cortadas e dobradas com as dimensões do projecto sendo colocadas sobre os moldes por equipas de operários especializados. A betonagem a realizar após a completa montagem das armaduras é feita de forma contínua e o betão é colocado com auxílio de uma bomba de betão, a sua vibração é feita através de vibradores tipo agulha.

Para comprimentos pequenos de tabuleiro, independentemente, da tipologia do cimbra ao solo utilizado para a execução da ponte é possível e aconselhável realizar a betonagem do tabuleiro na sua totalidade e em só uma etapa. Com o aumento do comprimento do tabuleiro, a betonagem de uma só vez torna-se impossível e passa a ser necessário dividir esse trabalho por várias etapas em que o cimbra é montado e desmontado sucessivamente de modo a proceder à betonagem de todo o tabuleiro.

É então necessário possuir mais do que um cimbra para se executar o trabalho dentro dos prazos estipulados para a obra através da criação de várias frentes de trabalho onde numa se procede à colocação das armaduras e à betonagem em quanto que na outra já possível fazer a montagem do cimbra para o próximo troço de tabuleiro [1].

A execução de um troço de tabuleiro enquadra-se num intervalo de tempo de cerca de 2 a 3 semanas, sendo que esse período de tempo engloba, pela ordem seguinte [10]:

- Desmontagem;
- Transporte;
- Montagem;
- Colocação da cofragem;
- Calibração do cimbra;
- Colocação da armadura;
- Betonagem;
- Ganho de resistência do betão, para se proceder à descofragem.

2.2.1.2. Aplicação do pré-esforço

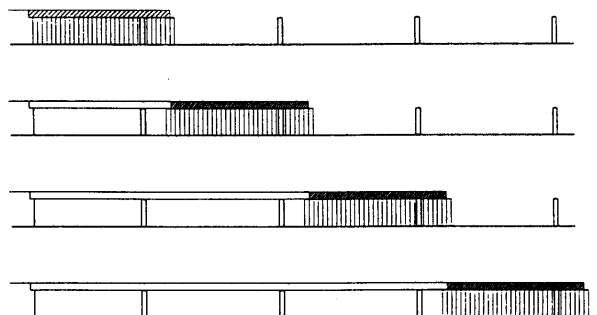


Fig.18 – Execução de tramos sucessivos de tabuleiro por cimbra ao solo [2]

Como já atrás foi referido, o sistema de cimbra ao solo para pontes de maior extensão é parcial implicando montagens e desmontagens sucessivas em função dos ciclos de betonagem e presa do betão. Este processo permite uma rentabilização do cimbra e obriga a um estudo dos planos de betonagem e pré-esforço para proceder à colocação das ancoragens de continuidade do pré-esforço nas juntas de betonagem, normalmente, a $1/4$ a $1/5$ de vão devido a serem as secções transversais do tabuleiro com momento nulo [1], [10].

2.2.2. APLICABILIDADE

O método construtivo de cimbra ao solo é, normalmente, uma opção economicamente viável e de fácil execução para pontes com vãos até 50 metros, as suas características tornam este procedimento adequado para a execução de um tabuleiro quando [1], [10]:

- O local onde a ponte é implantada é de fácil acesso, pouco acidentado e/ou não é atravessado por um curso de água;
- A rasante é baixa, inferior a 40 m;
- O terreno de fundação do cimbra é estável e com capacidade resistente.

2.3. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

2.3.1. DESCRIÇÃO

2.3.1.1. Transporte, montagem e colocação do cimbra autolançável

Os cimbres autolançáveis são transportados e colocados em obra, para que estas tarefas sejam executadas com facilidade, o cimbra é constituído por módulos. Esses módulos são constituídos por elementos ligados por parafusos, soldas e cavilhas. A ligação entre módulos é normalmente efectuada através de ligações aparafusadas e pré-esforçadas. Um cimbra autolançável é muito pesado e dispendioso e implica um período de montagem que pode chegar a dois meses [10].



Fig.19 – Montagem por módulos de um cimbra autolançável inferior [9]

O posicionamento inicial do cimbra em obra é um dos factores que mais influencia o funcionamento e a utilização deste método construtivo. Para cimbres autolançáveis superiores a montagem é efectuada sobre um dos encontros avançando a partir daí para o primeiro vão estando, respectivamente, apoiado no pilar a parte dianteira e no encontro a parte traseira. Por outro lado, os cimbres autolançáveis inferiores dado que se localizam abaixo do nível do tabuleiro não pode ser usado um processo de montagem semelhante ao anterior assim a montagem é realizada numa das margens e a sua colocação é feita com auxílio de gruas de grande capacidade directamente no segundo vão a ser betonado, já que o primeiro vão é normalmente executado por outro processo construtivo, usualmente cimbra ao solo [4].

2.3.1.2. Colocação e posicionamento da cofragem

A colocação e posicionamento da cofragem é uma tarefa executada de igual forma em ambas as variantes do cimbra autolançável apenas se distinguindo pela forma como são suportadas.

Dado que no caso dos cimbres inferiores a cofragem é escorada por elementos metálicos isolados ou em treliça, os quais se podem movimentar através de sistemas mecânicos. Na movimentação do cimbra inferior, a abertura de cofragens apenas necessita de ser parcial, isto é, possibilitada pela utilização dos carrinhos de rolamentos, bogies, que são constituídos por vigas de sustentação que suportam as vigas principais do cimbra. As consolas metálicas montadas nos pilares da estrutura criam plataformas que servem de base aos bogies e possuem um sistema hidráulico para movimentação transversal dos bogies sobre uns carris que têm a função de guia.

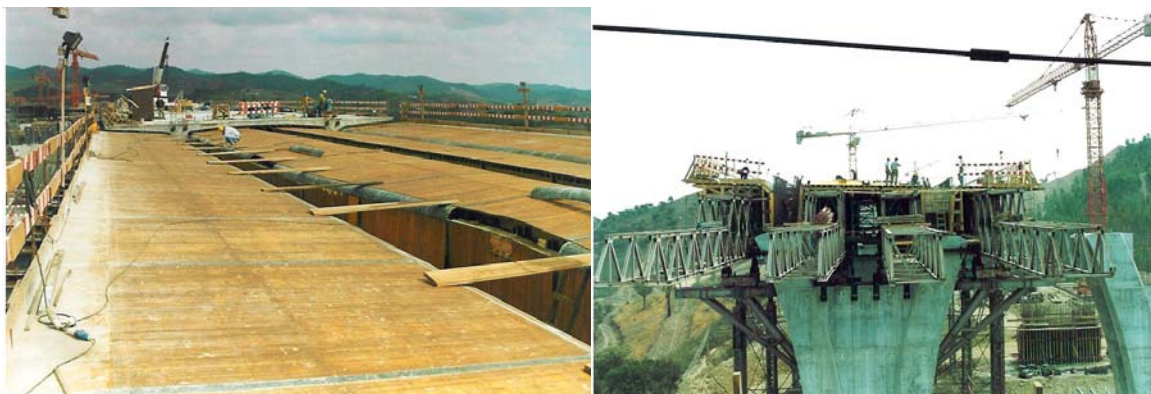


Fig.20 – Cofragem num cimbra inferior [9]

Nos cimbres superiores, os elementos que suportam a cofragem são constituídos por tirantes de aço de alta resistência que podem estar ou não ligados a sistemas hidráulicos que permitem a regulação em altura. A descofragem é a etapa seguinte com este procedimento a ser executado com a abertura total da cofragem de modo a evitar o embate com os pilares da estrutura. Terminada a movimentação do cimbra procede-se à elevação da cofragem para a execução de um novo tramo.



Fig.21 – Abertura da cofragem num cimbra superior [11]

Nas duas variantes de cimbra móvel terminada a colocação da cofragem na posição de betonagem faz-se o ajuste das cotas através de leituras topográficas. O controlo da geometria do cimbra e das cofragens é feito com base em cotas definidas no projecto e num plano de contra-flechas das cofragens que visa compensar as deformações do cimbra.

Na execução de vigas em caixão é necessário utilizar dois tipos de cofragem as exteriores e as interiores para criar o espaço interno do caixão. Esta cofragem dispõe de um sistema de avanço semelhante ao dos cimbramentos inferiores que permite deslizar no interior do caixão, normalmente por razões económicas no último tramo a cofragem deslizante é substituída por cofragem perdida [4].

2.3.1.3. Montagem e colocação da armadura

A armadura do tabuleiro é cortada e pré-montada no estaleiro ou sobre troços de tabuleiro já executados é colocada na cofragem através de equipamentos de elevação integrados no próprio cimbra ou exteriores a este. A montagem das armaduras só é realizada directamente sobre a cofragem em circunstâncias excepcionais em que não seja possível o seu transporte e colocação, a opção por este procedimento introduz alterações importantes no decorrer da obra [10].

Nos cimbramentos inferiores, a colocação de armadura na cofragem é um processo simples dado que não existem nenhum elemento do cimbra acima da cota do tabuleiro. Logo é possível através da utilização de equipamentos de elevação exteriores ao cimbra localizados no solo ou em tramos da ponte já construídos transportar a armadura pré-fabricada do estaleiro ou de um troço de tabuleiro previamente construído para a cofragem.

Para os cimbramentos superiores, a colocação das armaduras pode ser executada com a utilização de uma ponte rolante para movimentação de materiais integrada no próprio cimbra. Mas apesar desta componente do cimbra, a movimentação e colocação de armaduras é dificultada pelos varões que suspendem a cofragem, o que implica que apenas se possa pré-fabricar a armadura das longarinas ou das almas nas vigas em caixão [4].



Fig.22 – Montagem da armadura num cimbra inferior [9]

2.3.1.4. Betonagem e aplicação do pré-esforço

Uma das etapas mais vitais e condicionantes do produto final de uma obra é a betonagem dado que a sua qualidade afectará a resistência, durabilidade e estética do tabuleiro. Um grande volume de betão é usado para cada betonagem, o que envolve várias equipas de operários (manobreadores de mangueiras, vibradores, espalhadores, etc.) durante várias horas seguidas. A betonagem apresenta diversas variantes podendo ser executada por bombagem ou por balde e o betão pode ser produzido numa central de betão instalada no estaleiro da obra ou no exterior sendo norma comum o transporte do betão por camiões betoneira até à frente de obra [10].

A betonagem é uma operação que, normalmente, ultrapassa a dezena de horas, verificando-se mesmo a presa do primeiro betão colocado e vibrado muito antes de terminada a betonagem. Assim é importante definir uma estratégia consistente para execução desta tarefa, como as referidas abaixo [4]:

- A betonagem é iniciada sobre o apoio da frente avançando simetricamente em duas frentes. Chegando ao fim da betonagem do vão em consola, é betonada a restante parte do tabuleiro;
- A betonagem é iniciada a partir da extremidade do cimbria em consola e avançando no sentido do apoio traseiro.

O primeiro processo de betonagem referido, tem como inconveniente implicar duas equipas de betonagem e o dobro do equipamento o que faz com que seja o menos adoptado mas, por outro lado, consegue menores variações de deformações do cimbria ao longo da betonagem reduzindo a variação das tensões com o início da presa do betão. O segundo processo provoca uma variação da rotação da secção sobre o apoio quando se efectua a betonagem entre os dois pilares o que pode induzir ao aparecimento de fissuração nesta zona o que afecta a durabilidade e qualidade do betão. É ainda importante referir que a betonagem termina na junta de betonagem do tramo anterior o que permite evitar potenciais patologias nesta secção.

Com o decorrer do tempo, o betão vai adquirindo resistência e melhorando as suas capacidades de maneira progressiva e lenta condicionado pela introdução de adjuvantes na sua composição. O pré-esforço está então dependente desse ganho de resistência e o momento da sua aplicação encontra-se estipulado no projecto específico do pré-esforço que é concebido com base em vários factores, tais como: a classe de resistência e composição do betão, o tipo de ancoragem a ser aplicada, etc. O pré-esforço implica uma capacidade resistente mínima que é, habitualmente, atingida entre as 48 e as 72 horas após a betonagem, é possível efectuar análises para comprovar esses valores através de ensaios de compressão de provetes do betão colocado no tabuleiro, terminada a aplicação do pré-esforço é possível avançar para um novo tramo a betonar [4].

2.3.1.5. Movimentação do cimbria

A capacidade de se movimentar ao longo dos vários tramos que são necessários betonar é uma das principais características deste equipamento.

O cimbria desloca-se para os seus novos apoios utilizando para isso um sistema de movimentação de macacos hidráulicos ou um guincho e fazendo uso de elementos nos seus apoios designados por bogies. O cimbria autolanzável ao deslocar-se para a sua próxima posição solicita os seus elementos mais extremos: o nariz dianteiro e o nariz traseiro. Os narizes são constituídos por vigas treliçadas de secção transversal triangular ou rectangular, mais esbeltas que as vigas principais e que são dimensionadas para suportar parte do peso próprio do cimbria e das cofragens e com um comprimento

pensado para garantir o equilíbrio estático durante a translação do cimbra. Os cimbres superiores possuem dois narizes quando os apoios são suportados por pilares, no caso de se apoiar na consola do ultimo tramo betonado os cimbres superiores apenas possuem um nariz [4].



Fig.23 – Consolas e bogies num cimbra autolanzável inferior [9]

Resumidamente faz-se a descrição do processo típico de execução de um tabuleiro com utilização de um cimbra autolanzável inferior [4], [10]:

- Após da betonagem, cura e tensionamento dos cabos, a estrutura é descida com auxílio de macacos hidráulicos nos pilares dianteiro e traseiro;
- As juntas no meio do sistema de vigas transversas são libertadas e as vigas principais são movidas transversalmente de modo a que as vigas transversais possam passar os pilares;
- O cimbra autolanzável está pronto para ser movimentado para a próxima posição de betonagem; sendo as duas vigas principais movidas separadamente;
- Após a operação de movimentação do cimbra, as duas vigas principais são movidas transversalmente e ligadas pelo sistema de vigas transversais;
- As vigas principais são elevadas para a posição de betonagem por macacos hidráulicos;
- A cofragem é ajustada através de macacos hidráulicos;
- Para pontes com lajes em caixão, depois da colocação das armaduras e cabos de pré-esforço no banzo inferior e almas, a cofragem interna é movimentada para a sua nova posição de betonagem;
- Quando a colocação de armaduras e cabos de pré-esforço está terminada, o cimbra autolanzável está pronto para a betonagem deste novo troço da estrutura.
- Durante o período de betonagem, a estrutura de suporte no antigo pilar traseiro é desmontada e reinstalada no novo pilar dianteiro.



Fig.24 – Afastamento das vigas principais do cimbra móvel para a sua movimentação separada [9]

Descreve-se agora o processo típico de execução de um tabuleiro com utilização de um cimbra autolanzável superior [4], [10]:

- Fecho das cofragens, colocação da armadura e betonagem;
- Aplicação do pré-esforço, tendo em consideração as resistências mínimas regulamentares do betão;
- Para uma suficiente altura livre, a cofragem é solta de um dos lados e roda sobre a outra extremidade, ficando toda de um dos lados do pilar e permitindo, assim, a passagem do restante equipamento sobre o pilar;
- Para uma insuficiente altura livre, a plataforma auxiliar deverá ser constituída por partes rígidas, que não colidam com os pilares, e por partes amovíveis que deslizam para cima das anteriores durante o movimento do cimbra superior;
- Avanço do cimbra e transporte do apoio a colocar sobre o pilar;
- Colocação do cimbra na posição de betonagem.

A capacidade de movimentação do cimbra implica que existam mecanismos que condicionem ou libertem graus de liberdade para que se proceda a execução das diversas tarefas deste processo construtivo. Assim de modo a garantir a segurança do cimbra, a libertação de graus de liberdade é efectuada através de meios mecânicos e sistemas estáticos de travamento.

Na fase de betonagem, os graus de liberdade têm de ser anulados de forma a garantir a estabilidade da estrutura. As inclinações longitudinais e transversais dos traineis de pontes e viadutos, normalmente, não permitem que o travamento do cimbra seja efectuado apenas pelo atrito entre a viga de sustentação e a viga de lançamento sendo essencial a utilização de tirante ligados aos pilares para conseguir a estabilidade longitudinal, a estabilidade transversal é assegurada por dois contraventamentos transversais em cada apoio.

2.3.2. APLICABILIDADE

O âmbito de utilização dos cimbres autolançáveis é, habitualmente, definido para pontes com vãos entre 40 e 60 metros. Bem como, a opção por uma solução de cimbres autolançáveis é, normalmente, efectuada quando esta permite uma maior economia e uma maior rapidez de execução em comparação com os elevados custos e prazos da solução de cimbra ao solo para grandes alturas do tabuleiro em relação ao solo ou em terrenos de difícil acesso, pouco resistentes e irregulares. Os cimbres móveis possibilitam prazos de construção muito curtos, pois permitem grandes ritmos de execução, sem grande envolvimento de mão-de-obra.

As características do cimbra autolançável fazem com este método construtivo seja o mais adequado para a execução de um tabuleiro de uma ponte, quando existem circunstâncias como [4], [5]:

- Tabuleiros contínuos com qualquer tipo de secção transversal;
- Elevados ritmos de execução, possibilitam prazos de construção curtos;
- Inexistência de actividades associadas ao processo construtivo no solo sob o tabuleiro, essencial em obras que afectam vias de comunicação;
- Pontes de alturas elevadas;
- Segurança para os trabalhadores oferecida pela estrutura do cimbra;
- Pontes de grande extensão com múltiplos tramos iguais.

São dois os factores que poderão inviabilizar a utilização do cimbra autolançável numa determinada obra:

- Elevado custo do equipamento;
- Dificuldades na reutilização do cimbra para outras pontes;
- Viadutos e pontes com raios de curvatura pequenos.

Como já foi referido anteriormente, este processo construtivo de pontes tem a particularidade de se dividir em duas variantes distintas, cada uma delas com características próprias que se poderão adequar ou não ao cenário da obra em causa. Assim, não basta analisar o processo construtivo com cimbra autolançável de uma perspectiva geral mas é também necessário avaliar os prós e contras de cada uma destas metodologias de uma forma individual.

A variante do cimbra autolançável superior tem como principais vantagens relativamente à solução com cimbres móveis inferiores [4], [5]:

- O facto de não existirem restrições à altura do cimbra;
- Tem a capacidade de efectuar todo o transporte de material com equipamento fixo ao próprio cimbra;
- Maior versatilidade perante a geometria da secção transversal do tabuleiro e dos pilares;
- O cimbra superior tem ainda uma montagem menos complexa, dado que esta se realiza sobre um dos encontros, local de mais fácil acesso por parte de equipamentos e trabalhadores.

Apresenta como principais desvantagens:

- Possuir uma cofragem suspensa, obrigando assim a uma segunda estrutura portante que tem de “abrir” para se dar o avanço do cimbra sobre os pilares, e que não colabora na capacidade resistente total do cimbra, nem quando se dá a betonagem e portanto o cimbra é mais solicitado;
- Necessidade de deixar negativos no tabuleiro, na intersecção deste com a estrutura metálica porticada;
- Obstrução do plano de trabalho por elementos que suspendem a cofragem.

O cimbra autolancável inferior possui como mais-valias em relação ao cimbra superior [4], [5]:

- A capacidade de permitir que a face superior do tabuleiro se mantenha quase totalmente livre, portanto possibilitando um acesso muito mais fácil à frente de trabalho por parte de operários, equipamentos e materiais;
- A movimentação do cimbra é mais rápida, dado que não é necessária a abertura total das cofragens para passar os pilares.

O cimbra inferior tem como principais complicações:

- A necessidade da estrutura portante sob o tabuleiro obrigar a dispor de gabarit não só suficiente para a sua montagem e movimento mas também de forma a atender ao funcionamento de vias de comunicação existentes e que é obrigatório manter a sua operacionalidade.
- O tabuleiro alarga-se para fora dos pilares, pelo que parte da estrutura portante do cimbra fica em consola e pode precisar de reforços importantes.
- A sua montagem não pode ser efectuada sobre um encontro e a sua colocação directamente no vão implica a utilização de equipamentos de grande capacidade;
- Ao contrário do cimbra superior a curvatura em planta pode ser condicionante para este processo construtivo, podendo mesmo impossibilitar a sua utilização.
- O primeiro tramo do tabuleiro é executado recorrendo a outro tipo de escoramento da cofragem, normalmente cimbra ao solo, devido à incompatibilidade entre o cimbra e o encontro.

2.4. DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS

2.4.1. DESCRIÇÃO

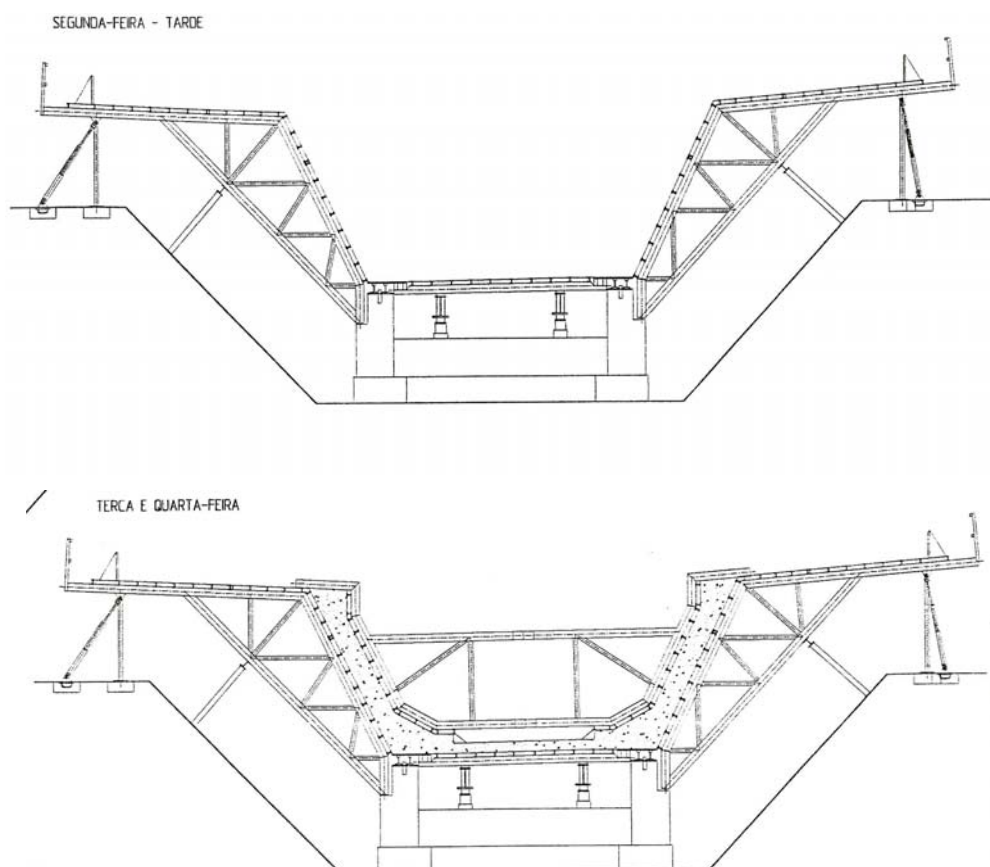
2.4.1.1. Fase de fabricação

Na área para montagem e lançamento dos segmentos da estrutura que constituem o tabuleiro que coincide com o encontro é executada uma plataforma de aterro e são construídas as infraestruturas necessárias à movimentação desses segmentos e que são, normalmente, vigas em betão armado nas quais se apoiarão os carris metálicos. Sobre estes carris metálicos será efectuada a movimentação com auxílio do sistema de empurre manobrado por pessoal especializado.

Em termos de sequência de trabalhos para um lançamento unilateral começa-se pela execução de um segmento que corresponde ao último vão da ponte a que se segue a montagem do nariz metálico e procede-se então ao lançamento deste conjunto, de seguida, são executados os segmentos correspondentes aos vãos restantes do mais afastado para o mais próximo do encontro. O comprimento

dos tramos extremos é, como já foi dito, o que determina o comprimento do primeiro elemento de tabuleiro a pré-fabricar tendo a preocupação de colocar as juntas de ligação entre tramos sucessivos, na sua posição final em secções transversais que se situam a $\frac{1}{4}$ ou $\frac{3}{4}$ dos vãos com momentos flectores nulos ou quase nulos. O nariz metálico é constituído, normalmente, por duas vigas principais em aço com alma cheia ou treliçada já tendo sido usados narizes em betão armado pré-esforçado e o seu comprimento situa-se entre 60 a 65% do vão da ponte [7].

Uma das principais características do método dos deslocamentos sucessivos é a solicitação por momentos positivos e negativos de todas as secções transversais do tabuleiro, daí o uso quase exclusivo de secções em caixão neste processo construtivo logo vamos resumir a descrição a este tipo de secção. A sua execução divide-se em duas etapas de betonagem, primeiro é betonada a laje inferior e as almas, na segunda etapa é betonada a laje do tabuleiro. São utilizados dois elementos de cofragem, a primeira cofragem para execução das almas e da laje inferior, onde a precisão é vital e é conseguida através da limpeza da superfície de deslizamento e da meticulosa regulação da cofragem para a direcção de lançamento. Esta cofragem é constituída pela parte inferior do tabuleiro e pelas faces internas e externas que definem a geometria das almas, esta cofragem tem um mecanismo que permite baixar os seus componentes das faces externas para reduzir o atrito durante a fase de empurre do tabuleiro. A cofragem utilizada na segunda fase para betonagem da laje de tabuleiro é interior, desmontável e móvel podendo ser utilizada várias vezes com um mínimo de custos após cada ciclo. O material que constitui a cofragem é o aço se for realizado um número elevado de ciclos para execução da obra, caso contrário, a opção mas lógica é a utilização de madeira revestida a plástico [5].



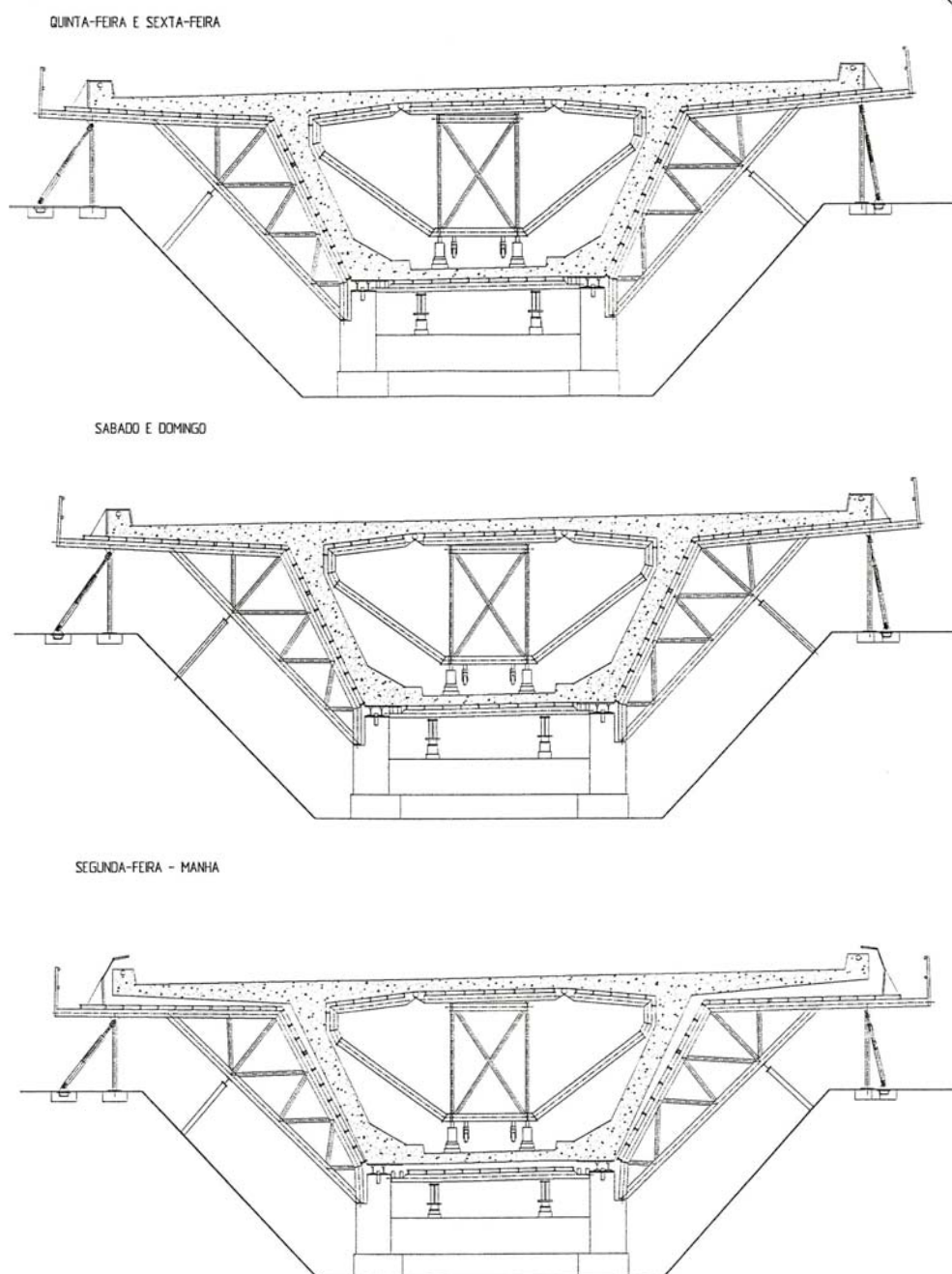


Fig.25 – Faseamento construtivo [9]

Na figura anterior são representadas as várias etapas de execução de um tramo de tabuleiro com a duração de uma semana, as tarefas distribuem-se pelos dias da seguinte forma [10]:

Segunda-feira tarde:

- Ajuste e limpeza da cofragem exterior.

Terça-feira e Quarta-feira:

- Colocação de armaduras, parcialmente pré-fabricadas para a laje inferior e almas;
- Ajuste da cofragem interior das almas;
- Betonagem da laje inferior e almas.

Quinta-feira e Sexta-feira:

- Colocação da cofragem da laje superior;
- Colocação da armadura na laje superior;
- Betonagem da laje superior.

Sábado e Domingo:

- Cura do betão.

Segunda-feira manhã:

- Remoção das cofragens;
- Aplicação do pré-esforço;
- Lançamento do segmento.

A pré-fabricação dos tramos do tabuleiro em viga caixão é, com base na betonagem, dividida em duas etapas que podem ser estabelecidas em função do tempo ou do espaço.

Com o tempo como variável é o espaço que é o elemento comum, ou seja, entre a betonagem da laje inferior e das almas e a betonagem da laje de tabuleiro, o tramo de tabuleiro que está a ser executado mantém a sua posição na área de pré-fabricação. O tempo é a variável porque na primeira semana é betonada a laje inferior e as almas e na segunda semana é betonada a laje de tabuleiro assim o empurre do tabuleiro é efectuado com intervalos de duas semanas para tramos com o comprimento igual ao de um vão.

Com o espaço como variável é o tempo que é o elemento comum, ou seja, existe dois espaços distintos com a dimensão de meio vão cada um. Onde duas equipas independentes durante um período de uma semana realizam na primeira zona a laje inferior e as almas e, em simultâneo, na segunda zona executa-se a laje de tabuleiro do troço que anteriormente se encontrava na primeira zona. Esta variante tem um funcionamento muito semelhante ao de uma linha de montagem, onde cada equipa desempenha sempre a mesma tarefa com as vantagens de produtividade que isso acarreta. O empurre do tabuleiro é efectuado com intervalos de uma semana mas apenas para tramos de comprimento igual a meio vão. Podemos concluir que ambos os métodos apresentam um rendimento semelhante produzindo um vão de tabuleiro a cada duas semanas [5], [7].

2.4.1.2. Fase de lançamento

Para a execução deste método construtivo podem-se colocar duas hipóteses: a solução de empurre traseiro com o equipamento a funcionar no topo posterior do segmento traseiro e outra de puxe, como indica o próprio nome trata-se de um processo onde unicamente se procede ao puxar dos diversos segmentos da estrutura do tabuleiro.

Após a solidarização dos elementos, o tabuleiro é deslocado por deslizamento sobre os seus pilares e encontros por acção de macacos hidráulicos fixos a um dos apoios, podendo o tabuleiro ser empurrado ou puxado.

O dispositivo utilizado para o empurre da ponte é, normalmente, fixo na frente do troço do tabuleiro que se acabou de construir, podendo o esforço necessário à translação do tabuleiro ser aplicado de duas maneiras diferentes, por tracção utilizando macacos hidráulicos e cabos ou barras, ou por aplicação directa utilizando um verdadeiro aparelho de empurre.

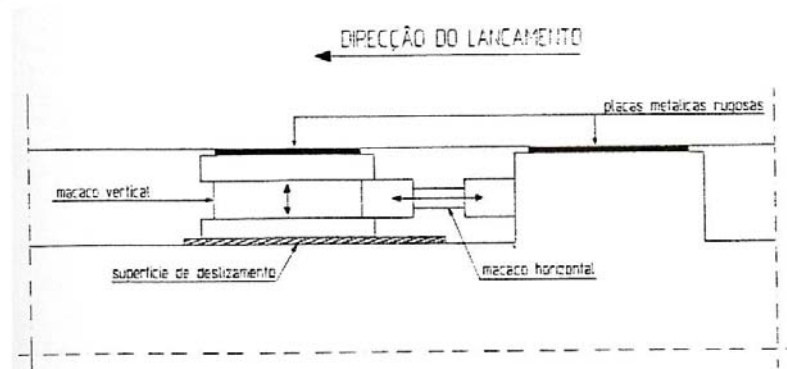


Fig.26 – Aparelho de empurre: macacos hidráulicos verticais e horizontais [9]

No método por tracção são fixas barras (ou cabos, no caso de esforços mais importantes) ao tabuleiro que puxam consigo este último quando traccionadas pelos macacos hidráulicos localizados no encontro em direcção ao qual o tabuleiro se desloca. Os macacos de força horizontal exercem a sua acção a partir da viga estribo do encontro, puxando cabos de pré-esforço que serão fixos à estrutura que constitui o tabuleiro através de peças especiais de fixação. Este método possui o inconveniente de necessitar de um conjunto de buracos para estabelecer a ligação cabos de tracção / tabuleiro.

No método por aplicação directa o aparelho de “empurre” é constituído por macacos horizontais e verticais. Os macacos verticais possuem no topo uma superfície rugosa e na base uma superfície deslizante, de modo, que quando accionados ficam presos ao tabuleiro no topo mas com a possibilidade de deslizar sobre a base sob acção dos macacos horizontais. Quando estes últimos chegam ao final do seu curso, os macacos verticais são desactivados e retornam juntamente com os horizontais à sua posição inicial ficando aptos a recomeçar novo ciclo [5], [7].

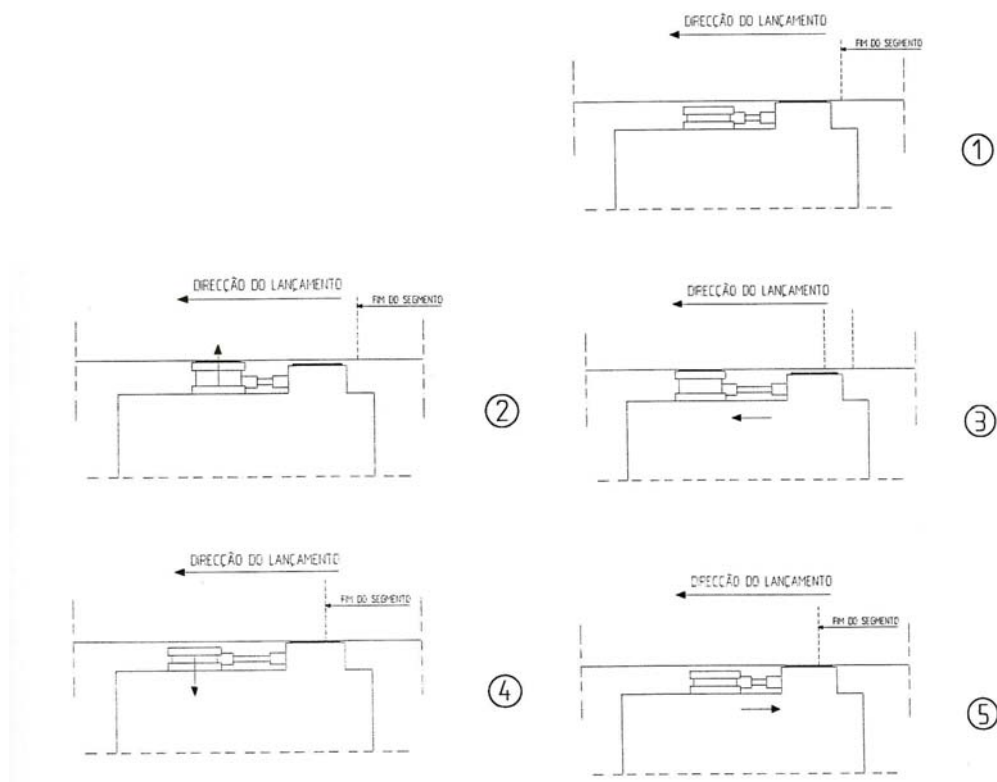


Fig.27 – Método de aplicação directa: etapas [9]

Para a operação de deslocamento do tabuleiro são essenciais os dispositivos de escorregamento que estabelecem a ligação entre o topo dos pilares e o tabuleiro, normalmente, estes dispositivos são constituídos por placas de neoprene revestidas a teflon colocadas debaixo do tabuleiro e que deslizam sobre placas de aço inoxidável fixas aos apoios. Cada dispositivo está apetrechado com guias laterais de modo a evitar o escorregamento lateral do tabuleiro e a possibilitar pequenas correcções de trajectória [10].

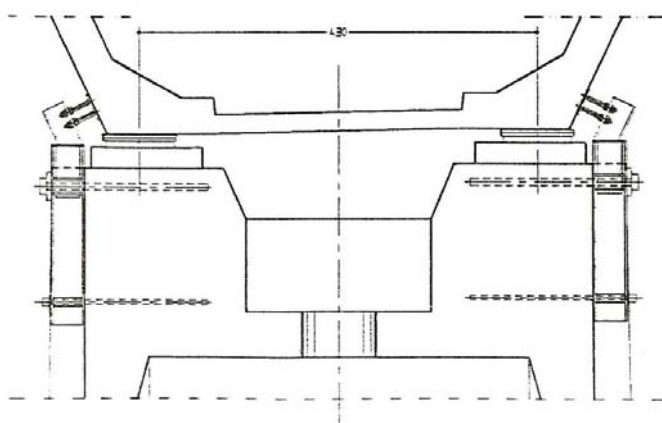


Fig.28 – Sistema de guiamento do tabuleiro [9]

Existem duas técnicas de lançamento que implicam diferentes dispositivos de escorregamento: o lançamento contínuo e o lançamento descontínuo. No caso do lançamento descontínuo existe apenas uma placa de escorregamento sobre cada apoio que é colocada no início do dispositivo sendo o tabuleiro empurrado até a placa chegar à outra extremidade do dispositivo. Nesta fase o tabuleiro tem que ser levantado e a placa, de novo, colocada no início do dispositivo. A amplitude de cada movimento estava assim condicionada pela largura do dispositivo de escorregamento e este pela largura do pilar. Actualmente, o processo mais utilizado é o lançamento contínuo, onde se utilizam várias placas de escorregamento sobre cada dispositivo, sempre que uma delas está a chegar ao fim do dispositivo, está a ser colocada outra no seu início. Esta técnica permite um movimento contínuo, evita o levantamento sistemático do tabuleiro e é independente da largura dos pilares.

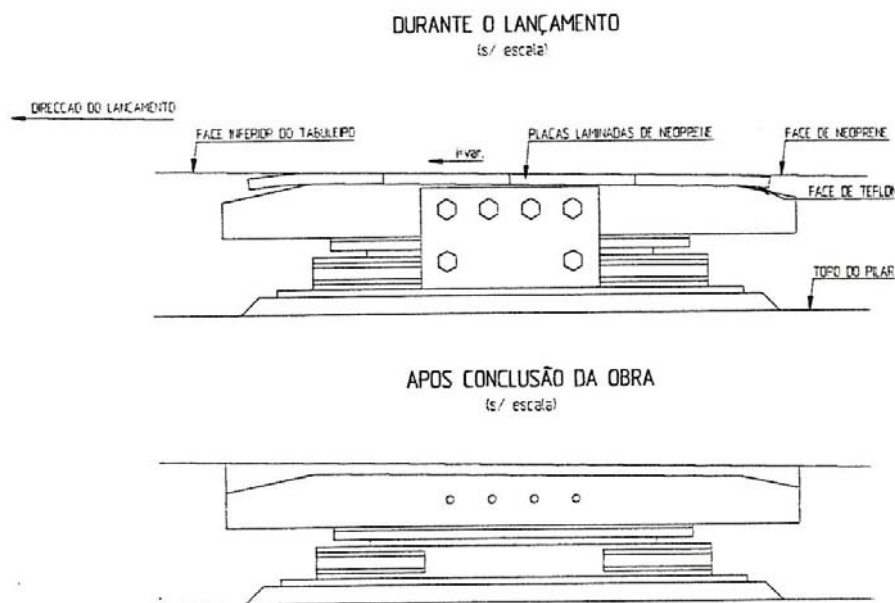


Fig.29 – Dispositivo de escorregamento [9]

Unicamente durante a fase de deslocamento desenvolvem-se importantes acções horizontais produto do atrito e que prejudicam principalmente os pilares e o encontro de onde a obra é lançada. Os esforços instalados nos pilares, nomeadamente, os momentos flectores na base podem ser reduzidos se o pilares forem atirantados durante a fase construtiva ou se os dispositivos de escorregamento forem colocados com uma certa excentricidade em relação ao eixo do pilar na direcção contrária à qual se processa o movimento.

Com o intuito de diminuir os custos associados ao pré-esforço provisório, é possível admitir-se tensões de tracção no betão durante a fase de deslocamento do tabuleiro. Tracções estas que podem produzir alguma fendilhação que deverá ser adequadamente quantificada de modo a não se perder o controlo geométrico da obra devido à perda de rigidez. Quando for atingida a posição final do tabuleiro, as fissuras deverão estar permanentemente fechadas [5], [7].

2.4.1.3. Aplicação do pré-esforço

A aplicação do pré-esforço neste método construtivo varia conforme o deslizamento seja unilateral ou bilateral. No caso do deslizamento unilateral durante o lançamento a linha média do pré-esforço deve ser rectilínea e localizada no centro de rigidez da secção, de modo, a produzir uma compressão uniforme em todos os pontos da secção. Após o final da obra a linha média do pré-esforço deve aproximar-se da fibra superior do tabuleiro sobre os apoios e da fibra inferior a meio vão utilizando-se para o efeito cabos ondulados ao longo de todo o tabuleiro ou cabos rectos interrompidos. O pré-esforço centrado é, normalmente, realizado através de cabos localizados horizontalmente nas faces superiores e inferiores do tabuleiro, podendo ser provisórios ou definitivos enquanto o pré-esforço excêntrico é colocado em cabos inclinados dispostos ao longo das almas.

No deslocamento bilateral a fase final deste método construtivo assemelha-se no vão central ao caso da construção por avanços sucessivos e o esquema de pré-esforço inclui cabos para a flexão e solidarização das consolas e ainda cabos provisórios para resistir aos esforços resultantes do deslocamento do tabuleiro.

A continuidade do pré-esforço nas juntas de construção pode ser garantida por intermédio de acopladores ou por sobreposição parcial dos cabos. A utilização dos acopladores diminui as perdas por atrito e evita os comprimentos excessivos devido às sobreposições. São contudo dispendiosos e a sua colocação em obra é muito delicada [5], [7].

2.4.2. APLICABILIDADE

O processo construtivo por deslocamentos sucessivos é mais correntemente utilizado para pontes em que os vãos variam entre 40 e 60 metros e com comprimentos superiores a 150 m, as características deste processo construtivo aconselham a sua aplicação em obras com particularidades como [1], [5], [7]:

- Pontes sobre terrenos acidentados e profundos;
- Prazos muito curtos de execução, através da construção em simultâneo dos pilares e do tabuleiro e/ou da utilização de lançamento bilateral;
- Dispensa a utilização do solo sob o tabuleiro, não existe o risco de queda de equipamentos e materiais;
- Inexistência da diminuição da altura livre sob o tabuleiro, importante em obras que afectam vias de comunicação;
- Área de trabalhos concentrada e com boas condições e equipamentos permite obter condições de segurança e qualidade muito próximas das encontradas numa unidade de pré-fabricação;
- O equipamento de lançamento é pouco dispendioso, ligeiro e facilmente adaptável e reutilizável noutras obras;
- A cofragem fixa num dos encontros com constantes reutilizações permite reduzir os custos das cofragens e dispensar a utilização de guias e cimbramentos móveis.

O método dos deslocamentos sucessivos tem também as suas limitações e nem sempre é a melhor opção para execução de uma ponte, sendo interessante constatar que algumas das suas mais-valias estão de certa forma associadas às suas limitações que de seguida enumero:

- Limitado a pontes rectas ou circulares em planta;
- A secção transversal do tabuleiro tem que ser constante, desaconselhável para vãos superiores a 60 m;
- O lançamento do tabuleiro implica bastante capacidade técnica do empreiteiro, dado que implica a análise de vários factores como força de translação, deslocamentos laterais, deformação dos pilares, etc;
- Preparação do terreno do encontro onde se localiza a cofragem fixa;
- Utilização de uma quantidade excessiva pré-esforço na fase construtiva, sendo apenas parte dessas armaduras aproveitada na estrutura final;
- Dispor num dos encontros ou nos dois, de uma área considerável para estabelecer a zona de trabalhos onde se localiza a cofragem fixa de dimensão próxima dos tramos a construir e todos os equipamentos associados a este processo;
- Tabuleiro e pilares pouco esbeltos.

2.5. AVANÇOS SUCESSIVOS

2.5.1. DESCRIÇÃO

2.5.1.1. Execução das aduelas

O método construtivo de avanços sucessivos é executado a partir dos apoios do tabuleiro através de aduelas construídas em consola e caracteriza-se por uma sucessão de ciclos repetitivos. Sendo utilizado um par de carrinhos de avanço que se deslocam na face superior da extremidade das consolas constituídos por cofragens suspensas e por uma estrutura metálica de suporte. A função da estrutura metálica é a de localização no espaço da aduela e de suporte da mesma até à cura do betão e aplicação do pré-esforço. A estabilidade dos carrinhos de avanço é, usualmente, assegurada por ancoragem da estrutura metálica na aduela anteriormente construída.

O arranque das consolas é efectuado através da construção de uma aduela sobre o pilar, tem uma execução diferente das outras aduelas pois não é possível proceder à colocação de equipamento móvel. Por isso, utilizam-se cofragens tradicionais apoiadas no solo, na fundação ou, no caso de pilares muito altos, no próprio pilar. De acordo com as características atípicas da aduela zero é normal a sua conclusão demorar várias semanas devido à execução dos diafragmas e à falta de mecanização do processo. A dimensão desta aduela é condicionada pela dimensão dos carrinhos de avanços e pelo seu esquema de montagem [5], [6].



Fig.30 – Execução da aduela zero [9]

As aduelas correntes têm cerca de 3 a 6 m de comprimento e a sua execução divide-se nas seguintes tarefas [10]:

- Colocação e calibração das cofragens;
- Montagem das armaduras passivas e das bainhas de pré-esforço;
- Betonagem;
- Colocação dos cabos de pré-esforço nas bainhas e tensionamento;
- Movimentação para a próxima aduela a betonar.

A colocação e calibração das cofragens são as tarefas que exigem maior rigor e precisão para que exista perfeita continuidade entre as várias aduelas que vão sendo executadas. Para isso é necessário avaliar as deformações do equipamento móvel como das sucessivas configurações da estrutura durante a sua construção para que se possa proceder às correcções das cofragens de modo a respeitar o que está previsto no projecto.

A montagem das armaduras passivas e das bainhas de pré-esforço é uma tarefa demorada devido a elevada concentração destas armaduras na estrutura. O processo habitual para a acelerar esta tarefa passa pela pré-montagem destas armaduras em estaleiro ou em troços da estrutura já concluídos sendo de seguida transportados para as cofragens para ser realizada a sua montagem definitiva. Esta técnica está limitada pelo acesso às cofragens pela parte superior da área de trabalho, com auxílio de gruas para o transporte das armaduras para esse local.

A betonagem de cada aduela corrente é dividida em três ou em duas fases, ou seja, com a execução simultânea das duas primeiras ou das duas últimas fases [10]:

- Betonagem do banzo inferior;
- Betonagem das almas;
- Betonagem do banzo superior.

Após a betonagem de cada aduela e antes da descofragem é necessário aplicar o pré-esforço para assegurar a solidarização com a parte já construída. Para se traccionar os cabos de pré-esforço é necessário que o betão atinja mínimos de resistência para que tenha capacidade de acomodar as forças introduzidas na estrutura pelo pré-esforço. A movimentação do equipamento para a nova posição de betonagem, após a aplicação do pré-esforço, é realizada porque a aduela ganha capacidade resistente para se suportar por si só sem o auxílio do equipamento.



Fig.31 – Método dos avanços sucessivos com carro de avanço: etapas [9]

Na figura anterior estão representadas algumas das etapas do método dos avanços sucessivos, por ordem de execução de trabalhos a começar no canto superior esquerdo temos:

- A primeira tarefa representada é a execução de uma aduela corrente e as ligações auxiliares de equilíbrio;
- A segunda é a tarefa que antecede a execução da aduela de fecho com a desmontagem de um dos dois carrinhos de avanço utilizados nas aduelas correntes;
- A terceira etapa é a execução da aduela de fecho;
- O último trabalho é a desmontagem do carrinho de avanço que executou a aduela de fecho.

Um ritmo normal de construção permite a conclusão de um ciclo de uma aduela em uma semana, com cinco dias úteis, com a utilização de um carro móvel [10]:

- Um dia para a traccionamento dos cabos de pré-esforço, descofragem e movimentação do carrinho de avanço;
- Dois dias para montagem das armadura passivas e das bainhas de pré-esforço,
- Um dia para betonagem;
- Três dias para a cura do betão.

Caso se utilizem duas frentes de trabalho, após a construção de cada consola o carrinho de avanço é desmontado e transportado para o pilar seguinte, iniciando um novo ciclo de construção.

O aumento do rendimento do método dos avanços sucessivos é possível através da implementação das seguintes medidas:

- Desimpedimento da zona superior das cofragens;
- Execução de aduelas de maior comprimento;
- Redução da betonagem de aduelas a duas fases.

O desimpedimento da zona superior das cofragens permite que se realize a pré-montagem das armaduras passivas e das bainhas de pré-esforço numa zona do estaleiro ou em troços do tabuleiro previamente construídos o que facilita e simplifica a montagem das armaduras em comparação com a sua realização directamente na cofragem.

A execução de aduelas de maior comprimento é uma solução que aumenta o rendimento do processo construtivo mas é preciso sempre analisar os custos e os pesos associados aos carrinhos de avanços necessários para a construção de aduelas com essas dimensões dado que poderão inviabilizar economicamente esta medida.

A redução da betonagem da aduela a duas fases, ou seja, o banzo superior é betonado separadamente dos dois outros elementos do caixão. Na primeira fase executa-se na totalidade a laje inferior e as almas e uma parte do banzo superior para a colocação dos cabos de pré-esforço. Após o traccionamento do pré-esforço e movimentado o carro móvel é betonada a restante parte da laje superior com a utilização de uma cofragem deslizante. As vantagens desta solução são a redução do peso de betão que os carrinhos de avanço têm que suportar o que permite uma diminuição no seu peso e no seu custo, bem como, a betonagem da laje superior do tabuleiro deixa de ser uma tarefa do caminho crítico. Por outro lado, o acesso ao carrinho de avanço é mais difícil [5], [6].

2.5.1.2. Aplicação do pré-esforço

O pré-esforço nas obras construídas pelo processo de avanços sucessivos é, normalmente, composto por duas famílias de cabos: cabos das consolas e cabos de solidarização.

Os cabos das consolas são colocados perto da laje superior do tabuleiro e vão sendo aplicados e tensionados no decorrer da obra de forma a resistirem ao aumento dos momentos negativos. O traçado destes cabos pode ser ondulado ao longo das almas o que permite a redução do esforço transversal devido às componentes verticais do pré-esforço ou ser rectilíneo ao longo da laje superior diminuindo as perdas por atrito dos cabos e facilitando a sua aplicação.

Os cabos de solidarização são colocados na laje inferior do tabuleiro ou na parte inferior das almas, perto do meio vão, servindo para estabelecer a continuidade entre as consolas e resistir aos momentos positivos que surgem devido aos efeitos deferidos e às cargas de utilização [5], [6].

2.5.2. APLICABILIDADE

O processo de avanços sucessivos com utilização de carrinhos de avanço tem aplicação para vãos com uma dimensão que pode variar entre os 60 a 300 m, as suas particularidades fazem com este método de execução de tabuleiro tenha aplicabilidade em diversos tipos de obras [1], [5], [6]:

- Pontes a grande altura, sobre cursos de água profundos ou sobre vias de circulação;
- Grande economia de cofragens devido à sua reutilização ao longo da obra;
- Procedimentos repetitivos e várias frentes de trabalho que conduzem a uma elevada rentabilidade;
- Ausência de cimbre e escoramentos, dispensando a utilização da zona sob o tabuleiro;
- Pequena redução da altura útil, importante quando a obra afecta vias de comunicação.

A construção de uma ponte através do métodos dos avanços sucessivos não deixa, como todos os métodos referidos anteriormente, de ter também as suas restrições e incompatibilidades e que poderão pôr em causa a sua aplicação em determinadas circunstâncias:

- Execução de elevado grau de dificuldade, por exemplo, nas operações de avanço da cofragem e no controlo geométrico;
- Grande capacidade técnica do empreiteiro.

2.6. DIAGRAMA BASE DE APLICABILIDADE DOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS

A criação do diagrama base de aplicabilidade dos processos construtivos surgiu da necessidade de apresentar e organizar a informação reunida nos pontos anteriores deste capítulo de uma forma mais clara. Dado que neste trabalho as características técnicas de cada processo construtivo são, como em maior parte dos trabalhos, apresentadas através de uma sumária enumeração de vantagens e desvantagens.

O diagrama base permite apresentar essa mesma informação de um modo muito mais intuitivo e com uma formulação muito mais próxima do raciocínio corrente na análise e ponderação dos processos construtivos. As características do diagrama possibilitam a referência dos critérios de escolha de cada um dos métodos mas também uma interligação entre os critérios dos vários métodos.

Com o diagrama base e as suas características conseguimos estabelecer uma rede de critérios de escolha dos processos construtivos, onde a não verificação de um determinado critério implica a dispensa do método construtivo ao qual esse estava relacionado e a necessidade da ponderação de novas soluções para a execução desse tabuleiro, resumindo, este processo é o caminho de decisão para a escolha de um método construtivo.

É muito importante assinalar que o diagrama base deste trabalho não pretende de alguma forma fazer um retrato exaustivo de todas as soluções construtivas existentes no mercado, pelo contrário, a sua abrangência resume-se aos quatro métodos de construção de tabuleiro betonados *in situ* que são analisados neste trabalho. E quando a solução para a execução de um determinado tabuleiro não passa por nenhum dos quatro processos construtivos essa situação é retratada por uma progressão no diagrama base até à célula “Outras soluções”.

Por fim, a utilização eficiente e responsável deste diagrama é indissociável da elaboração de um estudo técnico-económico detalhado sem o qual não é possível validar toda e qualquer decisão extraída da aplicação deste diagrama. Não é alheia a este facto a colocação das duas células “Necessidade de avaliação técnico-económica detalhada” logo no início do diagrama alertando para a sua necessidade a partir daquele ponto e outra no centro do diagrama sugerindo que todas as decisões centram-se na necessidade de um estudo técnico-económico.

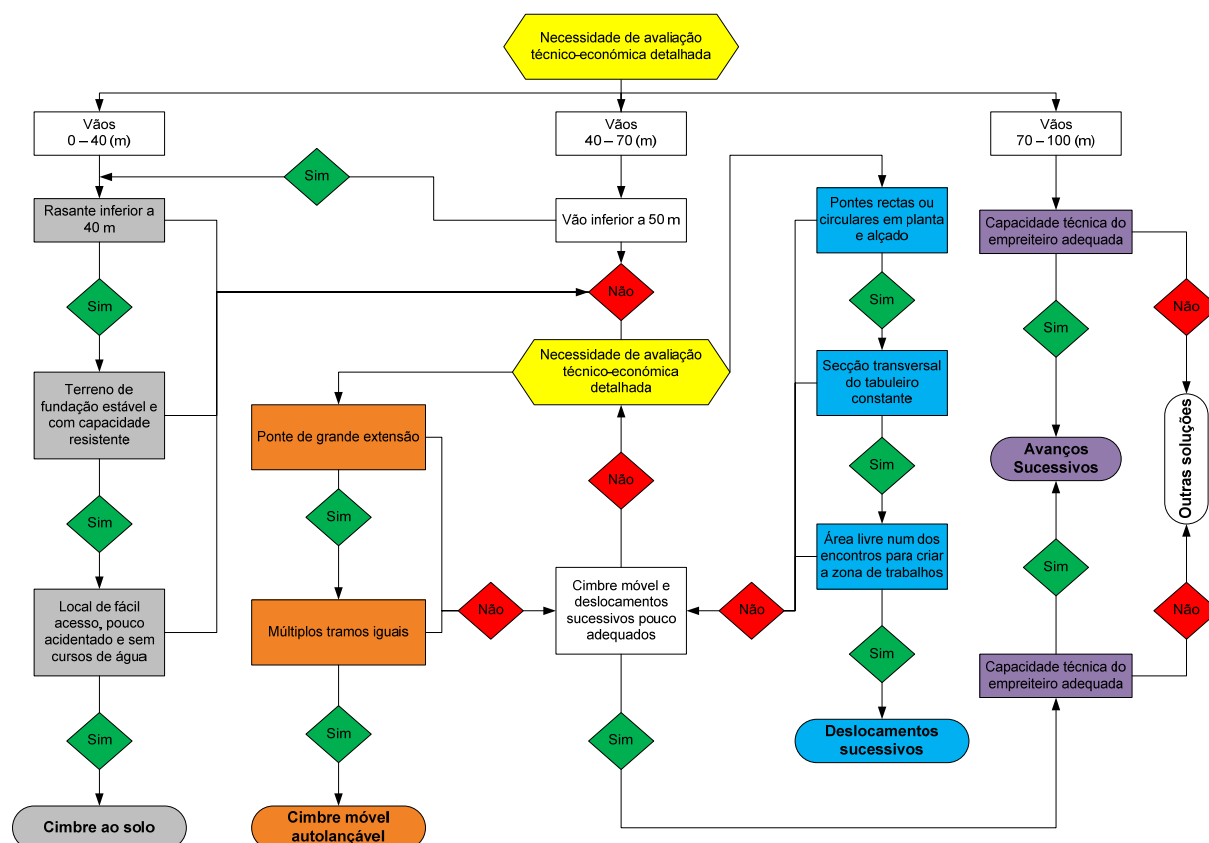


Fig.32 – Diagrama base de aplicabilidade dos processos construtivos

A escolha dos critérios de cada processo construtivo utilizados para construir o diagrama foi realizada seleccionando apenas os critérios que provocassem uma exclusão imediata do método. Assim de todas as particularidades técnicas dos métodos construtivos referidas nos pontos anteriores deste capítulo apenas foram consideradas as que a sua não verificação origina uma incompatibilidade técnica ou uma desvantagem económica que, de uma forma quase decisiva, inviabilizam a sua utilização na execução do tabuleiro.

O ponto de partida para a realização do diagrama base passa por escolher um parâmetro inicial que se caracterize por dois factores: ser comum a todos os métodos construtivos abordados pelo diagrama. E dado que será o primeiro critério de decisão do diagrama ter a capacidade de uma forma preliminar orientar a escolha do processo construtivo para um grupo restrito de hipóteses.

O parâmetro inicial escolhido foi a dimensão do vão tipo porque é, obviamente, comum a todos os processos construtivos e permite a orientação prévia da escolha com base nos seguintes grupos:

- De 0 a 40 m - cimbra ao solo;
- De 40 a 70 m - cimbra autolanzável ou deslocamentos sucessivos;
- De 70 a 100 m - avanços sucessivos.

Os grupos foram definidos com base no que a bibliografia refere como as soluções economicamente mais viáveis para esses intervalos de dimensão de vão tipo. Mas o diagrama base foi elaborado de modo a que apesar dessas orientações iniciais seja possível após a exclusão de um dos métodos reiniciar o processo de decisão abrangendo apenas os restantes processos construtivos.

Uma das principais preocupações na construção do diagrama foi a interligação de todos os métodos construtivos para que seja possível após a não verificação de um critério avançar para a análise dos restantes processos. Para além disso foi estabelecida uma hierarquização dos processos construtivos tendo por base a dimensão do vão tipo. Isto significa que quando se selecciona a categoria de vãos tipo em que se insere a ponte em estudo apenas são considerados os processos construtivos que fazem parte dessa e de categorias superiores e foi também estabelecido que após a exclusão de um processo construtivo o método seguinte a ser analisado é o com a solução mais económica imediatamente a seguir. Por exemplo uma ponte com o vão tipo superior a 50 metros são considerados no processo de decisão pela seguinte ordem os métodos cimbra autolanzável, deslocamentos sucessivos e avanços sucessivos e numa ponte com um vão tipo superior a 70 metros apenas se considera o método dos avanços sucessivos. Por fim refere-se que foi criada uma ligação para pontes com vãos inferiores a 50 metros dentro da categoria de vãos tipo de 40 a 70 metros para atender ao facto do intervalo de viabilidade do cimbra ao solo se estender até aos 50 metros.

3

ESTUDO ECONÓMICO

3.1. GENERALIDADES

O estudo económico desenvolvido neste trabalho tem como principal finalidade criar uma metodologia para a procura da solução mais vantajosa para cada um dos cenários analisados e em que o critério de escolha é a minimização do custo total associado ao processo construtivo.

Um estudo económico para ser credível e fiável necessita de reunir e organizar a maior quantidade possível de informação sobre o mercado em que se insere por isso a elaboração deste estudo implicou o contacto com técnicos e empresas do sector da construção para se conhecerem as estruturas de custos e os custos unitários associados a cada um dos processos construtivos.

O estudo económico divide-se em duas fases: a primeira fase é constituída pela elaboração das estruturas de custos com os custos unitários de cada tarefa e tem como objectivo a obtenção do custo total do processo construtivo para cada um dos cenários previstos.

Para além disso, foi ainda necessário estabelecer para as várias parcelas das estruturas de custos regras de variação das quantidades em função da dimensão do vão para que fosse possível determinar as quantidades envolvidas em cada um dos cenários avaliados.

Os cenários previstos no estudo são estabelecidos com base em dois parâmetros, a dimensão do vão e o número de vãos sendo a dimensão do vão dividida nos seguintes intervalos: 30 a 40 m, 40 a 50 m, 50 a 60 m, 60 a 70 m e 70 a 100 m; o número de vãos é composto por quatro grupos: 4, 8, 14 e 20 vãos.

A segunda fase do estudo é a etapa onde se extraem as conclusões das comparações dos valores calculados na primeira fase e consequentemente qual o melhor processo construtivo para cada um dos cenários. Mas para ser possível estabelecer as comparações necessárias para a elaboração desta segunda fase foi preciso converter os valores para uma unidade comum e isso foi conseguindo com a redução de todos os valores ao custo por metro quadrado de tabuleiro construído.

Nesta fase analisa-se ainda a evolução dos custos de cada processo construtivo em função do aumento da dimensão do vão, como também, em função do aumento do número de vãos, sendo possível avaliar qual dos factores em que medida produz maior alteração nos custos associados a cada método construtivo.

A realização do estudo económico de processos construtivos é descrita nas páginas seguintes com a apresentação dos resultados obtidos nas diversas etapas. Mas é também importante referir as dificuldades associadas ao estudo económico e a forma como estas foram resolvidas ou minimizadas através de pressupostos estabelecidos neste trabalho. Expõe-se em seguidas as principais dificuldades encaradas a quando da elaboração deste estudo:

- Recolha de informação;
- Data da informação;
- Processo complexo com múltiplas variáveis;
- Factor de escala;
- Prazo da execução da ponte;
- Estaleiro.

A primeira dificuldade associada ao estudo económico surgiu quando foi necessário recolher a informação essencial para realizar a análise dos vários métodos construtivos. Dado que não existe qualquer tipo de informação oficial sobre este tipo de obras e os encargos envolvidos, para além disso, as fontes mais fidedignas de informação são as empresas construtoras que possuem as suas estruturas de custos, custos unitários e rendimentos mas todos esses dados são em muitos casos confidenciais e, consequentemente, facultados com muita dificuldade. Outra fonte de informação foram as reuniões e os contactos com engenheiros e técnicos experientes mas grande parte desses dados têm por base o empirismo.

A data de informação recolhida foi outro obstáculo que foi necessário ultrapassar porque os dados utilizados são provenientes de datas diferentes o que devido à inflação pode provocar uma discrepância na avaliação dos custos. Como uma grande fatia da informação recolhida pertencia a um intervalo de tempo de dois anos e a informação mais antiga era de 2004 considerou-se que os vários encargos poderiam ser comparados entre si sem qualquer tipo de actualização.

O estudo económico dos processos construtivos aborda o mercado da construção de pontes e como já foi referido ao longo deste trabalho essa é uma realidade influenciada por inúmeras variáveis. Com base nisto, foi necessário definir a partir desse grupo de variáveis quais as que seria mais importante e interessante estudar porque não seria possível avaliar a influência de todas as variáveis. A escolha dessas variáveis neste trabalho recaiu no número e a dimensão do vão tipo dado que são dois factores facilmente identificáveis em todas as pontes e que se distinguem como duas das variáveis com mais influência na escolha do processo construtivo.

O factor de escala é a variação dos custos unitários dos vários encargos associados a um método construtivo provocada pela maior ou menor quantidade desse elemento na execução da ponte, isto é, para maiores quantidades de um determinado elemento o seu custo unitário desce devido ao aumento das margens de lucro dos fornecedores e/ou à maior rentabilização dos meios colocados em obra. Por exemplo, no caso dos encargos associados ao pré-esforço o seu custo unitário diminui com o aumento das quantidades aplicadas em obra devido a factores como a rentabilização do equipamento de tensionamento dos cabos. O factor de escala neste trabalho foi considerado igual para todos os cenários, ou seja, uma das variáveis que não foi analisada neste estudo.

Outra das inúmeras variáveis que afecta o estudo dos processos construtivos é o prazo de execução da ponte mas que não foi analisado e optou-se por considerar para os diversos cenários que os materiais, equipamentos e mão-de-obra mobilizados eram os adequados para a realização da obra dentro de prazos de execução realistas e comuns na indústria da construção.

Por fim, no estudo económico decidiu-se por não considerar os custos associados à montagem, operação e desmontagem do estaleiro porque apesar de ter sido possível reunir a informação de que de uma forma geral o seu custo se aproximaria dos 20% do custo total do processo construtivo. Não se obteve informação específica de cada um dos processos construtivos relativamente aos encargos de estaleiro.

3.2. ENCARGOS COMUNS A TODOS OS PROCESSOS CONSTRUTIVOS

Neste ponto apresentam-se as considerações utilizadas neste trabalho para determinar as quantidades inerentes aos encargos que são comuns a todos os processos construtivos.

Os encargos que são transversais a todos os métodos são os seguintes: o aço das armaduras passivas, o aço de pré-esforço, o betão e as cofragens, ou seja, os materiais que constituem o tabuleiro e as cofragens necessárias para a sua execução.

Naturalmente estes valores aplicam-se para tabuleiro com uma largura tipo de 12 a 14 metros tendo fundamentação essencialmente em obras rodoviárias.

3.2.1. BETÃO

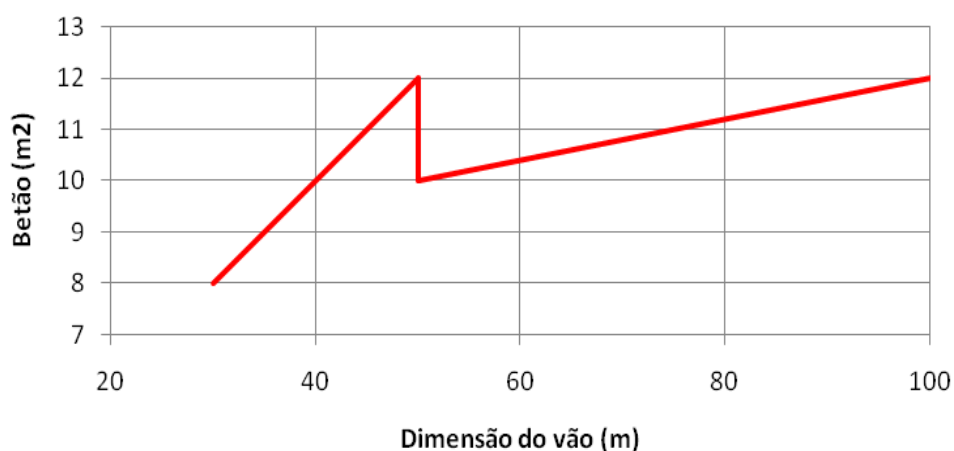


Fig.33 – Curva simplificada da variação da quantidade de betão da secção transversal em função do vão

A quantidade de betão na secção transversal do tabuleiro para os vários métodos construtivos foi determinada com base neste gráfico que foi fundamentado em valores obtidos em registos de uma série de obras já realizadas, bem como, com as sugestões de técnicos experimentados [10].

Os valores retirados deste gráfico permitem-nos calcular a quantidade de betão necessária para a execução do tabuleiro nos vários cenários, pois cada cenário é composto por um número de vãos com uma determinada dimensão, onde o seu comprimento é multiplicado pelo valor extraído deste gráfico obtendo-se assim a quantidade de betão usada para construir esse tabuleiro.

3.2.2. AÇO PARA ARMADURAS PASSIVAS

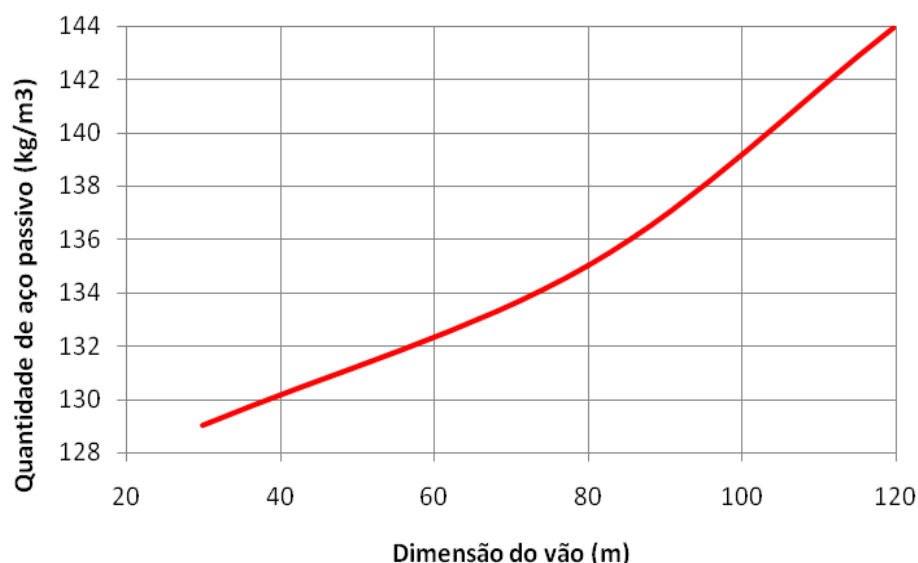


Fig.34 – Curva simplificada da variação da quantidade de aço para armaduras passivas em função do vão

O gráfico que traduz a variação da quantidade do aço para armaduras passivas em função da dimensão do vão foi estabelecido com base na recolha dos valores de peso do aço por metro cúbico de betão do tabuleiro para um conjunto de obras já realizadas [8], [9].

A forma como variam as quantidades de aço para armaduras passivas é traduzida neste trabalho por uma função polinomial de segundo grau obtida a partir de técnicas de aproximação dos valores das várias obras consideradas. O valor inicial do gráfico é para uma dimensão de vão de 30 metros dado que é o primeiro valor com interesse para o trabalho e determina-se uma quantidade de aço passivo de 129 quilogramas por metro cúbico de betão do tabuleiro.

A evolução da quantidade de aço passivo é traduzida por este gráfico e os valores retirados permitem obter as quantidades totais de aço passivo para cada cenário multiplicando estes valores pelas quantidades de betão utilizadas e obtidas anteriormente.

A influência das quantidades de betão das secções transversais dos vários cenários no cálculo das quantidades de armadura passiva faz com que sejam considerados determinados factores que não são referidos na elaboração deste gráfico mas têm interferência nas quantidades de aço factores como o peso próprio do tabuleiro e a transição entre a laje vigada e a viga em caixão passam assim a ser considerados.

3.2.3. AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO

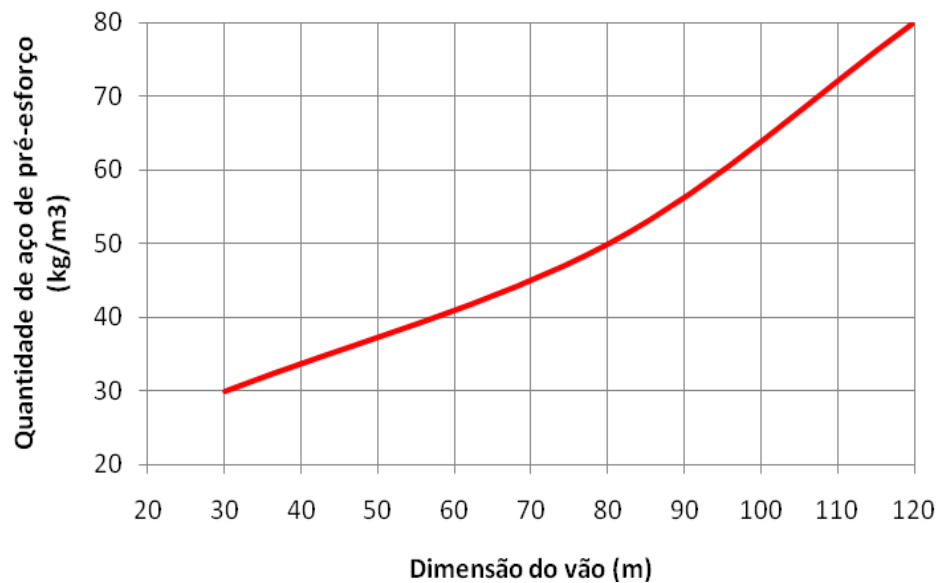


Fig.35 – Curva simplificada da variação da quantidade de aço para pré-esforço em função do vão

A variação da quantidade do aço para pré-esforço e o seu gráfico foram determinados de um modo semelhante ao utilizado no aço para armaduras passivas. Também neste parâmetro o gráfico foi construído através da compilação de valores de peso do aço de pré-esforço por metro cúbico de betão de tabuleiro e a sua evolução é traçada em função da dimensão do vão [8], [9].

A linha de tendência que melhor caracteriza e aproxima as quantidades de aço para pré-esforço por metro cúbico de tabuleiro das várias obras consideradas é, também neste caso, uma função polinomial de segundo grau. De igual modo, o valor inicial do gráfico é para uma dimensão de vão de 30 metros com 30 quilogramas de aço pré-esforço por metro cúbico de betão de tabuleiro.

No trabalho, a quantidade de aço de pré-esforço total para cada cenário é obtida com base na quantidade de betão utilizado no tabuleiro multiplicando esse valor pelo valor obtido a partir deste gráfico.

Como os valores das quantidades de aço de pré-esforço são determinadas com a influência das quantidades de betão da secção transversal dos vários cenários estamos a considerar de uma forma indirecta factores como o peso próprio do tabuleiro e a transição de laje vigada para viga em caixão no cálculo das quantidades de aço de pré-esforço e que assim a sua importância passa a ser considerada. Esta importância é facilmente justificada se tivermos em atenção a preponderância da carga do peso próprio no projecto de uma ponte.

3.2.4. COFRAGENS

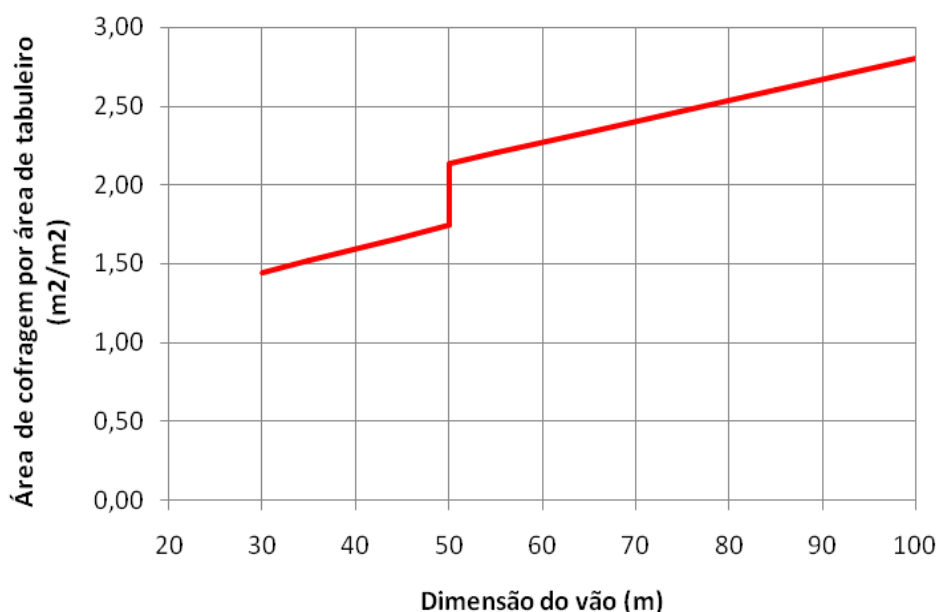


Fig.36 – Curva simplificada da variação da área de cofragem em função do vão

A contabilização das quantidades de cofragem necessárias para execução do tabuleiro também levou à definição de um gráfico que representa-se essa evolução para as várias dimensões de vão para isso utilizou-se, essencialmente, as sugestões e conhecimentos de técnicos experientes contactados durante a realização do trabalho [10].

Considera-se os 50 metros de cofragem como o ponto de transição entre a laje vigada e a viga em caixão. Por isso verifica-se um acréscimo de cofragem neste ponto devido ao facto de as vigas em caixão implicarem a utilização de cofragem interna para a sua execução.

A utilização no trabalho dos valores retirados deste gráfico é feita da seguinte forma, para cada uma das dimensões dos vãos é possível encontrar a correspondente quantidade de cofragem por metro quadrado de tabuleiro com esse valor e conhecendo a dimensão e número de vãos associados a cada cenário podemos determinar a quantidade de cofragem necessária.

As circunstâncias do cálculo do custo das cofragens variam em função do método construtivo que estamos a analisar porque é possível proceder-se à reutilização das cofragens, reduzindo a sua quantidade e amortizando o seu custo, bem como, o seu custo pode já estar incluído noutras parcelas do método construtivo em causa, por exemplo, em equipamentos como o cimb্রে autolançável ou os carrinhos de avanço.

3.3. CIMBRE AO SOLO

O cimbra ao solo é o único dos quatro métodos construtivos abrangidos por este estudo económico que está dependente da altura da rasante do tabuleiro porque devido às suas características é apoiado no solo, o que faz com que a sua dimensão seja proporcional à altura a que passa a rasante da ponte. Como a influência deste factor é importante e decisiva na avaliação dos custos procedeu-se à divisão deste método construtivo em subcategorias de altura do cimbra, de 0 a 15 metros, de 15 a 30 metros e de 30 a 45 metros de altura, integrados no estudo económico como se tratassem de processos construtivos distintos.

3.3.1. ESTRUTURA DE CUSTOS

A estrutura de custos do método construtivo cimbra ao solo é comum às suas três variantes e é a seguinte [9], [10]:

- Cofragem para betão à vista, incluindo reaplicações;
- Betão, incluído fornecimento e colocação;
- Aço para armaduras passivas, incluindo fornecimento e montagem;
- Aço de alta resistência para pré-esforço, incluindo fornecimento e montagem;
- Aluguer do escoramento;
- Grua móvel para carga e descarga;
- Servente para carga e descarga;
- Serralheiro para montagem e desmontagem;
- Ajudante de serralheiro para montagem e desmontagem;
- Serralheiro para operações intercalares;
- Oficial de carpinteiro para operações intercalares;
- Tratamento do solo.

A cofragem para betão à vista e as suas reaplicações têm um custo unitário de 24,78 unidades monetárias por metro quadrado de cofragem, as suas quantidades foram determinadas por um procedimento já descrito anteriormente. Considerando a capacidade de reaplicação das cofragens apenas se contabilizou uma área de cofragem para execução de metade do tabuleiro, sendo o restante tabuleiro executado com a reaplicação dessas mesmas cofragens.

O custo unitário do betão, incluindo fornecimento e colocação é de 81,5 unidades monetárias por metro cúbico, tendo sido determinado a partir dos custos de três tipos de betão diferentes e correntemente utilizados em obras, C25/30, C30/37 e C40/50, de modo a não limitar o estudo a um tipo de betão específico. O cálculo das quantidades de betão já foi descrito anteriormente neste trabalho.

O aço para armaduras passivas incluindo fornecimento e montagem, tem um custo unitário semelhante ao previsto para o aço A500 esta opção é justificada por este ser o aço mais utilizado para a execução do tabuleiro nas obras que serviram de base para a elaboração deste trabalho. O custo unitário é de 0,92 unidades monetárias por quilograma de aço e o procedimento para determinar as suas quantidades já foi descrito neste trabalho.

O aço para pré-esforço, incluindo fornecimento e montagem, tem um custo unitário de 3,5 unidades monetárias por quilograma de aço sendo este valor obtido a partir da média dos custos unitários das várias obras utilizadas para análise. Como nas parcelas anteriores, também neste caso a forma de determinação das quantidades do material já foi descrita anteriormente.

O escoramento ao solo é o principal elemento caracterizador deste método construtivo, a quando da sua utilização é prática corrente no sector da construção, o seu aluguer para a execução de um tabuleiro por isso esta parcela constitui o custo do seu aluguer e não da aquisição do equipamento por parte da empresa construtora. O aluguer do escoramento é contabilizado com base em dois factores, o volume do cimbre alugado e o número de dias de aluguer sendo que o custo unitário estabelecido foi de 0,06 unidades monetárias por metro cúbico de escoramento por dia de aluguer. O volume do escoramento é determinado considerando as seguintes configurações: para 4 vãos utiliza-se um conjunto de escoramento de dimensão igual a um vão, para 8 vãos utiliza-se dois conjuntos de escoramentos e para 14 e 20 vãos utiliza-se três conjuntos de escoramentos cada um com dimensão igual a um vão. As restantes dimensões são definidas da seguinte forma: altura da rasante e largura do tabuleiro. O número de dias de aluguer foi calculado com base na proporção de 0,003 dias por metro cúbico de escoramento, valor obtido a partir das várias obras e que procura traduzir a maior demora na aplicação de cofragens, armaduras e betonagens em cimbres de maior dimensão.

A maior parte das quantidades seguintes é determinada em função do metro cúbico de escoramento de tabuleiro, dado que as tarefas de carga, montagem, etc., associadas ao escoramento tornam-se mais demoradas com o crescimento da dimensão do cimbre.

A carga e descarga do cimbre ao solo quando é transportado para a obra implica a utilização de dois recursos, a grua móvel e o servente. O custo unitário da grua móvel é de 54,22 unidades monetárias por hora de trabalho, tendo se considerado 0,06 horas por metro cúbico de escoramento, este valor já considera as horas para as duas operações, a carga e a descarga. O servente tem um custo unitário de 5,5 unidades monetárias por hora de trabalho e a quantidade de horas necessárias para a carga e descarga foi obtida a partir de razão de 0,12 horas por metro cúbico de escoramento.

A montagem e desmontagem do cimbre constitui as operações de montagem do cimbre quando este chega pela primeira vez à obra e a operação de desmontagem definitiva quando o cimbre deixa de ser necessário para a conclusão da empreitada. Os recursos implicados nestas tarefas são o serralheiro e o ajudante de serralheiro, o serralheiro tem um custo unitário de 11 unidades monetárias por hora e a quantidade de trabalho deste recurso é calculada a partir de uma relação de 0,0587 horas por metro cúbico de escoramento, o ajudante de serralheiro tem um custo unitário de 6 unidades monetárias por horas e, também, apresenta uma relação de 0,0587 horas por metro cúbico de escoramento em ambos os recursos encontram-se contabilizadas as horas para as duas tarefas montagem e a posterior desmontagem.

As operações intercalares são a parcela que reúne os recursos necessários para a reutilização do escoramento na execução de um novo tramo dentro da mesma obra. Considera-se um número de operações intercalares dependente do número de conjuntos de escoramento disponíveis em obra e do número de vãos a executar e os recursos utilizados são o serralheiro, para as operações associadas com o escoramento, e o oficial de carpinteiro, para as operações de montagem e calibração da cofragem no cimbre. Em cada operação intercalar o serralheiro tem um custo unitário de 11 unidades monetárias e um rendimento de 0,025 horas por metro cúbico de escoramento, o oficial de carpinteiro tem um custo unitário de 8 unidades monetárias e um rendimento de 0,05 horas por metro cúbico de escoramento.

3.3.2. RESULTADOS

O método construtivo de cimbre ao solo foi dividido em três variantes que traduzem diferentes intervalos para a altura do cimbre assim são apresentados três quadros para cada uma das seguintes categorias: de 0 a 15 metros, de 15 a 30 metros e de 30 a 45 metros de altura. Os cimbres ao solo são, normalmente associados a uma viabilidade económica para vãos entre 30 e 50 metros, neste trabalho procurou-se avaliar se esses conceitos eram válidos através da análise de cada uma das três variantes

nos seguintes intervalos de dimensão de vão: 30 a 40 metros, 40 a 50 metros. Os resultados correspondentes a cada uma dessas variantes são apresentados em quadros com os vários cenários de dimensão de vão e números de vãos, bem como, são expostos em forma de intervalo com o intuito de abranger as flutuações habituais, consideradas neste trabalho próximas de 5%, deste tipo de recursos e que, consequentemente, afectam os custos totais dos métodos construtivos.

Em seguida expõe-se o quadro onde se encontra estipulados os custos unitários associados a todos os encargos relativos a este método construtivo e comuns às três variantes:

Quadro 2 – Quadro dos custos unitários para o cimbra ao solo [9], [10]

Tipo de custo	Unidades	Custo unitário
Materiais		
Cofragem	m ²	24,78
Betão	m ³	81,5
Aço passivo	kg	0,92
Aço pré-esforço	kg	3,5
Equipamentos		
Escoramento	m ³ /dia	0,06
Carga Descarga		
Grua móvel	hora	54,22
Servente	hora	5,5
Montagem Desmontagem		
Serralheiro	hora	11
Ajudante Serralheiro	hora	6
Operações Intercalares		
Serralheiro	hora	11
Oficial de carpinteiro	hora	8

3.3.2.1. Cimbra ao solo de 0 a 15 metros de altura

O cálculo da estrutura de custos é representado no quadro seguinte, os valores apresentados no quadro são os encargos relativos em unidades monetárias por metro quadrado de tabuleiro permitindo assim que seja possível proceder à comparação entre os vários resultados:

Quadro 3 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura até 15 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	9,87	9,87	8,46	5,92
Betão	44,60	44,60	44,60	44,60
Aço passivo	65,18	65,18	65,18	65,18
Aço pré-esforço	59,47	59,47	59,47	59,47
Equipamentos				
Escoramento	7,61	15,21	19,56	13,69
Carga Descarga				
Grua móvel	10,85	10,85	9,30	6,51
Servente	2,54	2,54	2,18	1,53
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	2,42	2,42	2,08	1,45
Ajudante Serralheiro	1,32	1,32	1,13	0,79
Operações Intercalares				
Serralheiro	3,07	3,07	3,51	3,68
Oficial de carpinteiro	4,46	4,46	5,10	5,35
Total	211,38	218,99	220,55	208,17

Representam-se agora os valores para um cimbra ao solo com uma altura entre 0 e 15 metros utilizado para executar um tabuleiro com um vão entre 40 e 50 metros:

Quadro 4 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura até 15 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	10,78	10,78	9,24	6,47
Betão	53,52	53,52	53,52	53,52
Aço passivo	78,71	78,71	78,71	78,71
Aço pré-esforço	76,94	76,94	76,94	76,94
Equipamentos				
Escoramento	9,51	19,02	24,45	17,11
Carga Descarga				
Grua móvel	10,85	10,85	9,30	6,51
Servente	2,54	2,54	2,18	1,53
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	2,42	2,42	2,08	1,45
Ajudante Serralheiro	1,32	1,32	1,13	0,79
Operações Intercalares				
Serralheiro	3,07	3,07	3,51	3,68
Oficial de carpinteiro	4,46	4,46	5,10	5,35
Total	254,13	263,64	266,16	252,07

Os intervalos dos custos totais para o cimbra ao solo de 0 a 15 metros de altura para as várias combinações de dimensões de vãos com números de vãos são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 5 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo até 15 metros de altura

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	206,1 – 216,67	213,51 – 224,46	215,04 – 226,07	202,97 – 213,38
40 – 50	247,78 – 260,48	257,05 – 270,23	259,5 – 272,81	245,77 – 258,38
50 – 60	-	-	-	-
60 – 70	-	-	-	-
70 – 100	-	-	-	-

3.3.2.2. Cimbra ao solo de 15 a 30 metros de altura

Os valores referentes à estrutura de custos de um cimbra ao solo com uma altura de 15 a 30 metros para a execução de uma ponte com vãos de dimensão entre 30 e 40 metros são os seguintes:

Quadro 6 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 15 e 30 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	9,87	9,87	8,46	5,92
Betão	44,60	44,60	44,60	44,60
Aço passivo	65,18	65,18	65,18	65,18
Aço pré-esforço	59,47	59,47	59,47	59,47
Equipamentos				
Escoramento	30,43	60,85	78,24	54,77
Carga Descarga				
Grua móvel	21,70	21,70	18,60	13,02
Servente	5,09	5,09	4,36	3,05
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	4,84	4,84	4,15	2,91
Ajudante Serralheiro	2,64	2,64	2,26	1,58
Operações Intercalares				
Serralheiro	6,13	6,13	7,01	7,36
Oficial de carpinteiro	8,92	8,92	10,20	10,71
Total	258,86	289,29	302,52	268,56

Neste quadro são expostos os custos relativos da execução de uma ponte com um vão de dimensão entre 40 e 50 metros com a tecnologia do cimbra ao solo com uma altura entre 15 e 30 metros:

Quadro 7 – Quadro dos custos relativos para um cimbra ao solo com uma altura entre 15 e 30 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	10,78	10,78	9,24	6,47
Betão	53,52	53,52	53,52	53,52
Aço passivo	78,71	78,71	78,71	78,71
Aço pré-esforço	76,94	76,94	76,94	76,94
Equipamentos				
Escoramento	38,03	76,06	97,80	68,46
Carga Descarga				
Grua móvel	21,70	21,70	18,60	13,02
Servente	5,09	5,09	4,36	3,05
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	4,84	4,84	4,15	2,91
Ajudante Serralheiro	2,64	2,64	2,26	1,58
Operações Intercalares				
Serralheiro	6,13	6,13	7,01	7,36
Oficial de carpinteiro	8,92	8,92	10,20	10,71
Total	307,32	345,35	362,80	322,73

Os intervalos dos custos totais para o cimbra ao solo de 15 a 30 metros de altura para as várias combinações de dimensões de vãos com números de vãos são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 8 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo de 15 a 30 metros de altura

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	252,39 – 265,34	282,06 – 296,52	294,96 – 310,09	261,85 – 275,28
40 – 50	299,63 – 315	336,72 – 353,98	353,73 – 371,87	314,66 – 330,8
50 – 60	-	-	-	-
60 – 70	-	-	-	-
70 – 100	-	-	-	-

3.3.2.3. Cimbra ao solo de 30 a 45 metros de altura

Os custos relativos para a utilização de um cimbra ao solo com 30 a 45 metros de altura para construção de um tabuleiro com vãos de dimensão entre 30 e 40 metros são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 9 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 30 e 45 metros para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	9,87	9,87	8,46	5,92
Betão	44,60	44,60	44,60	44,60
Aço passivo	65,18	65,18	65,18	65,18
Aço pré-esforço	59,47	59,47	59,47	59,47
Equipamentos				
Escoramento	68,46	136,92	176,04	123,22
Carga Descarga				
Grua móvel	32,55	32,55	27,90	19,53
Servente	7,63	7,63	6,54	4,58
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	7,26	7,26	6,23	4,36
Ajudante Serralheiro	3,96	3,96	3,40	2,38
Operações Intercalares				
Serralheiro	9,20	9,20	10,52	11,04
Oficial de carpinteiro	13,38	13,38	15,30	16,06
Total	321,56	390,02	423,61	356,33

Para a execução de um tabuleiro com vãos pertencentes ao intervalo de 40 a 50 metros e utilizando um cimbra ao solo com uma altura entre 30 e 45 metros, os custos relativos que constituem a estrutura de custos são os seguintes:

Quadro 10 – Quadro dos custos relativos para o cimbra ao solo com uma altura entre 30 e 45 metros para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	10,78	10,78	9,24	6,47
Betão	53,52	53,52	53,52	53,52
Aço passivo	78,71	78,71	78,71	78,71
Aço pré-esforço	76,94	76,94	76,94	76,94
Equipamentos				
Escoramento	85,57	171,15	220,04	154,03
Carga Descarga				
Grua móvel	32,55	32,55	27,90	19,53
Servente	7,63	7,63	6,54	4,58
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	7,26	7,26	6,23	4,36
Ajudante Serralheiro	3,96	3,96	3,40	2,38
Operações Intercalares				
Serralheiro	9,20	9,20	10,52	11,04
Oficial de carpinteiro	13,38	13,38	15,30	16,06
Total	379,52	465,09	508,33	427,62

Os intervalos dos custos totais para o cimbra ao solo de 30 a 45 metros de altura para as várias combinações de dimensões de vãos com números de vãos são apresentados no quadro seguinte:

Quadro 11 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra ao solo de 30 a 45 metros de altura

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	313,52 – 329,6	380,27 – 399,77	413,02 – 434,20	347,43 – 365,24
40 – 50	370,03 – 389,01	453,47 – 476,72	495,63 – 521,04	416,93 – 438,31
50 – 60	-	-	-	-
60 – 70	-	-	-	-
70 – 100	-	-	-	-

3.4. CIMBRE AUTOLANÇÁVEL

O cimbra autolançável pode apresentar duas configurações distintas conforme a sua estrutura portante se encontre a um cota superior ou inferior em relação ao tabuleiro, ao contrário, do que se realizou com o cimbra ao solo neste caso não serão avaliadas as duas variantes separadamente optando-se antes por considerar para análise um custo médio entre as duas soluções dado que a informação relativa à solução do cimbra autolançável superior foi escassa não permitindo desenvolver um estudo credível. Neste trabalho considera-se que com apenas um cimbra autolançável é possível executar todos os cenários previstos neste trabalho, porque de acordo com o que foi possível apurar é habitual a utilização de um segundo cimbra apenas quando o número de vãos ultrapassa os 24 [10].

3.4.1. ESTRUTURA DE CUSTOS

A estrutura de custos para implementação do método construtivo do cimbra autolançável é a seguinte [8], [9]:

- Betão, incluindo fornecimento e colocação;
- Aço para armaduras passivas, incluindo fornecimento e montagem;
- Aço de alta resistência para pré-esforço, incluindo fornecimento e montagem;
- Custo / amortização de cimbra autolançável;
- Grua móvel para carga e descarga;
- Servente para carga e descarga;
- Serralheiro para montagem e desmontagem;
- Ajudante de serralheiro para montagem e desmontagem;
- Grua móvel para montagem e desmontagem;
- Operação do cimbra autolançável.

O betão, o aço para armaduras passivas e o aço para pré-esforço mantém os custos unitários dado que esse valor em nada está relacionado com o método construtivo utilizado e não seria possível uniformizar o estudo se isso não se manter também as suas quantidades são determinadas com os procedimentos já descritos e utilizados anteriormente.

As cofragens não fazem parte da estrutura de custos para este método construtivo porque o seu custo encontra-se incluído no custo do cimbra autolanzável.

O custo de um cimbra autolanzável está intimamente ligado com a dimensão do vão do tabuleiro que o equipamento vai executar porque a estrutura do cimbra móvel é dimensionada para suportar o peso próprio da estrutura metálica, bem como, o peso do betão fresco e sem qualquer capacidade resistente sendo ambos os factores proporcionais à dimensão do vão, consequentemente o custo do equipamento também o será. Mais uma vez para se obter uma fórmula para o cálculo de um custo em função da dimensão do vão procedeu-se á recolha de informação sobre o custo dos cimbres móveis e dos vãos por eles executados em obras já concluídas tendo sido possível a partir desses valores estabelecer o seguinte gráfico.

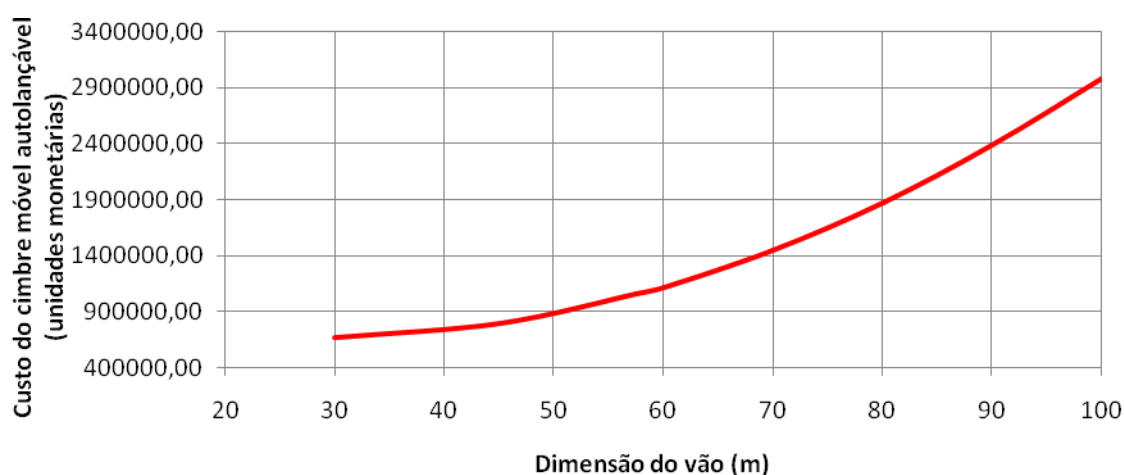


Fig.37 – Curva simplificada da variação do custo amortizado por obra de um cimbra autolanzável em função do vão

O custo de um cimbra autolanzável é caracterizado pelo gráfico anterior e com o auxílio de técnicas de aproximação dos valores foi possível obter uma função polinomial de segundo grau para ser utilizada no trabalho para gerar os valores dos cimbra móveis para as dimensões de vão dos vários cenários. A taxa de amortização do cimbra móvel estabelecida para o trabalho foi de 60 %, dado que as possibilidades de reutilização são, normalmente, escassas e os encargos associados à alteração do cimbra móvel para essa reutilização são elevados [8]. Naturalmente estes valores aplicam-se para tabuleiro com uma largura tipo de 12 a 14 metros tendo fundamentação essencialmente em obras rodoviárias.

As operações de carga e descarga do cimbra utilizam dois recursos da obra, a grua móvel e o servente, a grua móvel tem um custo unitário de 54,22 unidades monetárias por hora e a sua quantidade é determinada com base na relação de 4,125 horas por metro de vão. Esta quantidade e as seguintes são

estabelecidas em função da dimensão do vão porque é este factor que condiciona a dimensão e a complexidade do cimbre móvel e, naturalmente, todas os encargos associadas ao cimbre e às suas dimensões. Assim, a quantidade de trabalho do servente obtida usando a proporção 8,25 horas por metro de vão e o seu custo unitário é de 5,5 unidades monetárias por hora de trabalho.

Considera-se que com apenas um cimbre autolançável é possível executar todos os cenários de número de vãos significando isto que apenas se considera um cimbre em obra e logo apenas uma operação de montagem e uma de desmontagem. Os recursos envolvidos na montagem são os seguintes serralheiro, ajudante de serralheiro e grua móvel, o serralheiro tem um custo unitário de 11 unidades monetárias por hora, o ajudante de serralheiro tem um custo unitário de 6 unidades monetárias por hora e a grua móvel tem um custo de 54,22 unidades monetárias por hora, estes custos são iguais para a operação de desmontagem.

As quantidades na montagem são superiores às da desmontagem devido à maior precisão das tarefas para calibrar o cimbre e as cofragens para a execução do tabuleiro, preocupações que desaparecem na desmontagem. As quantidades na montagem são as seguintes: o serralheiro tem um rendimento de 41,25 horas por metro de vão e na desmontagem o seu rendimento é de 27,5 horas por metro de vão. O ajudante de serralheiro tem as quantidades definidas para a montagem em 41,25 horas por metro de vão e na desmontagem em 27,5 horas por metro de vão. Por fim a grua móvel com um volume de trabalho calculado para a montagem em 82,5 horas por metro de vão e na desmontagem em 55 horas por metro de vão.

A operação do cimbre autolançável engloba os encargos relacionados com a equipa responsável pelo funcionamento e movimentação do cimbre autolançável. Este encargo foi definido em função da dimensão e número de vãos porque a dimensão do vão influencia a dimensão e complexidade do cimbre e o número de vãos está directamente relacionado com o número de movimentações a efectuar. Considerou-se que a equipa é constituída: por 10 operários para um vão tipo de 40 metros, por 12 operários para um vão tipo de 60 metros e por 14 operários para um vão tipo de 70 metros. Cada operário tem um custo unitário de 20 unidades monetárias por hora e o seu rendimento é de 5,55 horas por metro de vão tipo em cada um dos vãos a construir, ou seja, este rendimento refere-se à execução de apenas um vão para a obtenção do encargo total é necessário multiplicar pelo número de vãos a construir.

3.4.2. RESULTADOS

Os resultados dos custos para o cimbre autolançável foram calculados para os cinco intervalos de dimensão de vão: 30 a 40 metros, 40 a 50 metros, 50 a 60 metros e 60 a 70 metros.

Quadro 12 – Quadro dos custos amortizados para o cimbre autolançável [8], [9]

Dimensão do vão	Cimbre Autolançável
30 – 40	721400
40 – 50	875050
50 – 60	1118020
60 – 70	1450310
70 – 100	-

No quadro anterior são expostos os custos amortizados dos encargos associados ao cimbra autolanzável e no quadro seguinte são apresentados os custos unitários e as respectivas unidades de todos os encargos que constituem a estrutura de custo do cimbra autolanzável:

Quadro 13 – Quadro dos custos unitários para o cimbra autolanzável [8], [9]

Tipo de custo	Unidades	Custo unitário
Materiais		
Betão	m ³	81,5
Aço passivo	kg	0,92
Aço pré-esforço	kg	3,5
Equipamentos		
Cimbra autolanzável	un	Quadro 12
Carga Descarga		
Grua móvel	hora	54,22
Servente	hora	5,5
Montagem		
Serralheiro	hora	11
Ajudante Serralheiro	hora	6
Grua móvel	hora	54,22
Desmontagem		
Serralheiro	hora	11
Oficial de carpinteiro	hora	8
Grua móvel	hora	54,22
Operação		
Operário	hora	20

A opção por um cimbre autolançável como método construtivo para a construção de uma ponte com vãos de dimensão entre 30 e 40 metros tem os seguintes encargos por metro quadrado de tabuleiro:

Quadro 14 – Quadro dos custos relativos para o cimbre autolançável para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	44,60	44,60	44,60	44,60
Aço passivo	65,18	65,18	65,18	65,18
Aço pré-esforço	59,47	59,47	59,47	59,47
Equipamentos				
Cimbre autolançável	246,72	123,36	70,49	49,34
Carga Descarga				
Grua móvel	3,06	1,53	0,87	0,61
Servente	0,62	0,31	0,18	0,12
Montagem				
Serralheiro	6,21	3,10	1,77	1,24
Ajudante Serralheiro	3,39	1,69	0,97	0,68
Grua móvel	61,19	30,60	17,48	12,24
Desmontagem				
Serralheiro	4,14	2,07	1,18	0,83
Oficial de carpinteiro	2,26	1,13	0,64	0,45
Grua móvel	40,79	20,40	11,66	8,16
Operação				
Operário	60,80	60,80	60,80	60,80
Total	598,42	414,23	335,29	303,72

Para vãos de dimensão entre 40 e 50 metros o cimbra autolançável tem os seguintes custos relativos na execução de uma ponte:

Quadro 15 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolançável para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	53,52	53,52	53,52	53,52
Aço passivo	78,71	78,71	78,71	78,71
Aço pré-esforço	76,94	76,94	76,94	76,94
Equipamentos				
Cimbra autolançável	239,41	119,71	68,40	47,88
Carga Descarga				
Grua móvel	3,06	1,53	0,87	0,61
Servente	0,62	0,31	0,18	0,12
Montagem				
Serralheiro	6,21	3,10	1,77	1,24
Ajudante Serralheiro	3,39	1,69	0,97	0,68
Grua móvel	61,19	30,60	17,48	12,24
Desmontagem				
Serralheiro	4,14	2,07	1,18	0,83
Oficial de carpinteiro	2,26	1,13	0,64	0,45
Grua móvel	40,79	20,40	11,66	8,16
Operação				
Operário	60,80	60,80	60,80	60,80
Total	631,04	450,51	373,14	342,19

As pontes com vãos de dimensão entre 50 e 60 metros são um cenário em que a utilização de um cimbra autolanzável acarreta os seguintes encargos:

Quadro 16 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolanzável para uma dimensão de vão entre 50 e 60 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	46,38	46,38	46,38	46,38
Aço passivo	68,75	68,75	68,75	68,75
Aço pré-esforço	72,72	72,72	72,72	72,72
Equipamentos				
Cimbra autolanzável	254,91	127,45	72,83	50,98
Carga Descarga				
Grua móvel	3,06	1,53	0,87	0,61
Servente	0,62	0,31	0,18	0,12
Montagem				
Serralheiro	6,21	3,10	1,77	1,24
Ajudante Serralheiro	3,39	1,69	0,97	0,68
Grua móvel	61,19	30,60	17,48	12,24
Desmontagem				
Serralheiro	4,14	2,07	1,18	0,83
Oficial de carpinteiro	2,26	1,13	0,64	0,45
Grua móvel	40,79	20,40	11,66	8,16
Operação				
Operário	72,96	72,96	72,96	72,96
Total	637,38	449,09	368,40	336,13

As pontes com vãos de dimensão entre 60 e 70 metros são um intervalo de vãos tipo onde a utilização de um cimbra autolanzável já não tem uma viabilidade económica tão clara como anteriormente:

Quadro 17 – Quadro dos custos relativos para o cimbra autolanzável para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	48,16	48,16	48,16	48,16
Aço passivo	72,06	72,06	72,06	72,06
Aço pré-esforço	83,03	83,03	83,03	83,03
Equipamentos				
Cimbra autolanzável	283,43	141,71	80,98	56,69
Carga Descarga				
Grua móvel	3,06	1,53	0,87	0,61
Servente	0,62	0,31	0,18	0,12
Montagem				
Serralheiro	6,21	3,10	1,77	1,24
Ajudante Serralheiro	3,39	1,69	0,97	0,68
Grua móvel	61,19	30,60	17,48	12,24
Desmontagem				
Serralheiro	4,14	2,07	1,18	0,83
Oficial de carpinteiro	2,26	1,13	0,64	0,45
Grua móvel	40,79	20,40	11,66	8,16
Operação				
Operário	85,12	85,12	85,12	85,12
Total	693,46	490,91	404,11	369,39

Os intervalos em que se inserem os valores totais da aplicação do método construtivo de cimbra autolancável em cada uma das diferentes configurações de ponte analisadas e definidos para antever as variações (5%) dos vários custos que compõe o custo final são expostos no quadro seguinte:

Quadro 18 – Intervalos dos custos relativos totais para o cimbra autolancável

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	583,46 – 613,38	403,88 – 424,59	326,91 – 343,68	296,13 – 311,31
40 – 50	615,27 – 646,82	439,25 – 461,77	363,81 – 382,47	333,63 – 350,74
50 – 60	621,44 – 653,31	437,87 – 460,32	359,19 – 377,61	327,72 – 344,53
60 – 70	676,12 – 710,79	478,64 – 503,19	394,01 – 414,21	360,15 – 378,62
70 – 100	-	-	-	-

3.5. DESLOCAMENTOS SUCESSIVOS

O método dos deslocamentos sucessivos é o menos comum e menos utilizado no panorama nacional de obras públicas, de todos os processos construtivos que são abrangidos pelo estudo económico, devido a esse facto o volume de dados e informações recolhidos foi bastante inferior em comparação com os outros métodos. O método dos deslocamentos sucessivos analisado neste estudo económico é caracterizado por um lançamento unilateral, porque a utilização de lançamento bilateral só é ponderada em pontes com um número de vãos superior a 30 [10].

3.5.1. ESTRUTURA DE CUSTOS

A estrutura de custos associada o processo construtivo por deslocamentos sucessivos é constituída pelos seguintes elementos [9], [10]:

- Cofragem para betão à vista, incluindo reaplicações;
- Betão, incluindo fornecimento e colocação;
- Aço para armaduras passivas, incluindo fornecimento e montagem;
- Aço de alta resistência para pré-esforço, incluindo fornecimento e montagem;
- Camada de tout-venant para o parque de montagem;
- Retroescavadora para criação do parque de montagem;
- Oficial carpinteiro para criação do parque de montagem;
- Servente para criação do parque de montagem;
- Betão para vigamento;
- Perfis metálicos para colocar sobre o vigamento;
- Placas PTFE;
- Servente para colocação das placas PTFE;
- Estrutura de guiamento;

- Sistema de empurre;
- Nariz metálico;
- Serralheiro para montagem do nariz metálico;
- Servente para montagem do nariz metálico;
- Operação.

O aço para armaduras passivas mantém os valores e os processos de cálculo referidos para os processos construtivos anteriores. Com a exceção dos aços de alta resistência para pré-esforço em que se considera um acréscimo de 50% nas suas quantidades e do betão com um acréscimo de 20% modo a representar o uso excessivo de pré-esforço e de betão que é característico deste processo construtivo.

Por outro lado, a cofragem apesar de manter o seu custo unitário, a forma como a sua quantidade é determinada é diferente devido às características únicas do processo construtivo. Neste trabalho, as tarefas que constituem a fabricação dos tramos de tabuleiro definem-se da seguinte maneira, considera-se uma zona de trabalho sobre um dos encontros com um comprimento de fabricação igual ao do vão do tabuleiro onde se produz as almas, a laje inferior e a laje de tabuleiro, logo o comprimento de cofragem necessário para executar toda a ponte por este método é igual a um vão tipo.

O processo dos deslocamentos sucessivos, como já foi referido, implica a construção sobre um dos encontros de uma zona de trabalho ou parque de montagem, para isso é necessário mobilizar os seguintes recursos uma camada de tout-venant, uma retroescavadora, oficial carpinteiro, servente, betão para realizar o vigamento e perfis metálicos para o vigamento. O vigamento é um maciço de betão que serve de suporte à cofragem e consequentemente aos tramos de tabuleiro executados no encontro, sobre o vigamento existem perfis metálicos onde os tramos de tabuleiro estão apoiados e sobre os quais deslizam, enquanto estão na zona de trabalhos, quando são empurrados pelo sistema de macacos hidráulicos.

A camada de tout-venant é utilizada para regularizar a superfície do encontro onde se vai localizar o estaleiro e a zona de trabalho da obra, o seu custo é de 18,7 unidades monetárias por metro cúbico e a sua quantidade é calculada de acordo com as dimensões do tabuleiro a executar, tendo sido definida uma espessura de 0,25 metros para a camada.

A retroescavadora utilizada para auxiliar as tarefas de criação da área de fabricação tem um custo de 14,47 unidades monetárias por hora e a sua quantidade está dependente da área da zona de fabricação com um rendimento de 0,204 horas por metro quadrado da zona de fabricação dos tramos de tabuleiro.

O oficial de carpinteiro tem como tarefa a execução das cofragens para betonagem do vigamento, que por sua vez, serve de suporte às cofragens onde é executado o tabuleiro, tem um custo unitário de 8 unidades monetárias por hora e a sua quantidade de trabalho é definida com neste valor 0,367 horas por metro quadrado da área de vigamento. O custo associado ao servente é calculado com base nos mesmos pressupostos com um custo unitário de 5,5 unidades monetárias por hora e com um rendimento de 0,204 horas por metro quadrado de área de vigamento.

O betão para execução do vigamento, como já foi referido, tem um custo unitário de 81,5 unidades monetárias por metro cúbico e a sua quantidade é neste caso determinada a partir do volume do vigamento.

Os perfis metálicos do vigamento tem um custo unitário de 0,75 unidades monetárias por metro linear e a sua quantidade é igual a quatro vezes o comprimento do vão do tabuleiro, dado que o tramo em

execução na zona de trabalhos tem um comprimento igual ao vão com dois apoios no vigamento e que existe dois perfis por apoio.

As placas PTFE são o material que permite o deslizamento do tabuleiro sobre os pilares, reduzindo o atrito entre essas duas superfícies, tendo assim uma grande importância para a execução através deste método construtivo. O custo unitário das placas PTFE é de 100 unidades monetárias e as suas quantidades foram obtidas com base no critério de que são precisas 3 placas PTFE por cada pilar ou encontro da ponte. É necessário ainda contabilizar o recurso servente associado à colocação das placas PTFE com um custo unitário de 5,5 unidade monetárias por hora com o seguinte rendimento de 140 horas por vão, este valor já contabiliza todos os lançamentos de tabuleiro por isso é estipulado em função do número de vãos da ponte.

O sistema de guiamento é a estrutura metálica associada a cada apoio do tabuleiro que impede que este tenha deslocamentos transversais. O seu custo é de 63333 unidades monetárias por pilar, o seu valor depende, naturalmente, do número de pilares pois a instalação deste sistema é necessária em cada um desses apoios, a taxa de amortização deste equipamento foi estipulada em 50 %.

O sistema de empurre constituído por um grupo de macacos hidráulicos tem uma fórmula de custo de 1000 unidades monetárias por metro de comprimento total de tabuleiro, dado que o sistema de empurre tem que ser capaz, na situação mais desfavorável, de empurrar a extensão total do tabuleiro da ponte que está a ser executada, logo o seu custo foi associado a esse valor.

O nariz metálico é uma estrutura em que a sua dimensão e capacidade resistente estão directamente associadas com a dimensão do vão, naturalmente também o seu custo. Com um custo definido por 3750 unidades monetárias por metro de vão, o encargo desta estrutura metálica é assim proporcional à dimensão do vão e tem uma taxa de amortização de 50%. Existem ainda operações associadas à colocação e ligação do nariz metálico ao tabuleiro executadas por um serralheiro e um servente. O serralheiro tem um custo unitário de 11 unidades monetárias por hora e com um rendimento de 3,6 horas por metro de vão. O servente tem um custo unitário de 5,5 unidades monetárias por hora e um rendimento, também, de 3,6 horas por metro de vão.

Os encargos de operação estão essencialmente relacionados com a fase de lançamento do tabuleiro e foram determinados com base na dimensão e número de vãos com um rendimento da equipa de operários igual a 18,75 horas por metro de vão em cada lançamento do tabuleiro e o seu custo unitário é de 20 unidades monetários por hora.

3.5.2. RESULTADOS

O estudo económico do método dos deslocamentos sucessivos abrangeu os intervalos em que é, normalmente aceite a sua viabilidade económica: de 30 a 40 metros, de 40 a 50 metros, 50 a 60 metros e de 60 a 70 metros

Os custos unitários do sistema de guiamento e do sistema de empurre são apresentados em quadros próprios devido aos critérios utilizados para os calcular. O sistema de guiamento como já foi referido está dependente do número de pilares e, consequentemente do número de vãos, logo o seu custo unitário varia em função do número de vãos, dado que se faz a representação dos valores da estrutura de custos em quadros com colunas para cada uma das categorias do número de vãos é preciso apresentar separadamente os custos unitários do sistema de guiamento:

Quadro 19 – Custos unitários amortizados para o sistema de guiamento [9], [10]

Número de vãos	4	8	14	20
(unidades monetárias)				
Sistema de guiamento	190000	380000	665000	950000

Uma situação semelhante verifica-se para o sistema de empurre, como este equipamento tem o seu custo estabelecido com base na quantidade total de tabuleiro que é necessário empurrar, ou seja, o seu custo é influenciado pela dimensão dos vãos como pelo número de vãos que constitui a ponte. Assim o seu valor unitário não é fixo para nenhuma das variantes, número de vãos e dimensão do vão, em que se baseia este trabalho, adquirindo para cada um dos cenários analisados um valor diferente.

Quadro 20 – Custos unitários amortizados para o sistema de empurre [9], [10]

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias)				
30 – 40	160000	320000	560000	800000
40 – 50	200000	400000	700000	1000000
50 – 60	240000	480000	840000	1200000
60 – 70	280000	560000	980000	1400000
70 – 100	-	-	-	-

Os custos unitários amortizados do nariz metálico são também variáveis em função da dimensão do vão tipo pois a estrutura metálica que o constitui tem que ser mais robusta com o crescimento do comprimento do vão:

Quadro 21 – Custos unitários amortizados para o nariz metálico [9], [10]

Dimensão do vão tipo	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70
(unidades monetárias)				
Nariz metálico	150000	187500	225000	262500

Os resultados seguintes referem-se aos custos unitários para o método dos deslocamentos sucessivos [9], [10]:

Quadro 22 – Quadro dos custos unitários para os deslocamentos sucessivos

Tipo de custo	Unidades	Custo unitário
Materiais		
Cofragem	m ²	24,78
Betão	m ³	81,5
Aço passivo	kg	0,92
Aço pré-esforço	kg	3,5
Zona de fabricação		
Tout-venant	m ³	18,7
Retroescavadora	hora	14,47
Oficial carpinteiro	hora	8
Servente	hora	5,5
Vigamento		
Betão	m ³	81,5
Perfis metálicos	ml	0,75
Placas PTFE	un	100
Servente - PTFE	hora	5,5
Equipamentos		
Sistema guiamento	un	Quadro 19
Sistema de empurre	un	Quadro 20
Montagem		
Nariz metálico	un	Quadro 21
Serralheiro	hora	11
Servente	hora	5,5
Operação		
Operário	hora	20

O método dos deslocamentos sucessivos aplicado a pontes com vãos entre 30 e 40 metros tem os seguintes custos relativos:

Quadro 23 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 30 e 40 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	9,87	4,93	2,82	1,97
Betão	53,52	53,52	53,52	53,52
Aço passivo	78,22	78,22	78,22	78,22
Aço pré-esforço	107,04	107,04	107,04	107,04
Zona de fabricação				
Tout-venant	2,56	1,28	0,73	0,51
Retroescavadora	0,40	0,20	0,12	0,08
Oficial carpinteiro	0,40	0,20	0,11	0,08
Servente	0,15	0,08	0,04	0,03
Vigamento				
Betão	6,79	3,40	1,94	1,36
Perfis metálicos	0,04	0,02	0,01	0,01
Placas PTFE	0,51	0,51	0,51	0,51
Servente - PTFE	1,05	1,05	1,05	1,05
Equipamentos				
Sistema guiamento	64,98	64,98	64,98	64,98
Sistema de empurre	54,72	54,72	54,72	54,72
Montagem				
Nariz metálico	51,30	25,65	14,66	10,26
Serralheiro	0,54	0,27	0,15	0,11
Servente	0,27	0,14	0,08	0,05
Operação				
Operários	20,52	20,52	20,52	20,52
Total	452,89	416,72	401,23	395,03

Para a construção de uma ponte com vãos entre 40 e 50 metros os custos relativos para aplicação do método dos deslocamentos sucessivos são os seguintes:

Quadro 24 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 40 e 50 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	10,78	5,39	2,36	2,16
Betão	64,22	64,22	64,22	64,22
Aço passivo	94,46	94,46	94,46	94,46
Aço pré-esforço	138,50	138,50	138,50	138,50
Zona de fabricação				
Tout-venant	2,56	1,28	0,73	0,51
Retroescavadora	0,40	0,20	0,12	0,08
Oficial carpinteiro	0,40	0,20	0,11	0,08
Servente	0,15	0,08	0,04	0,03
Vigamento				
Betão	6,79	3,40	1,94	1,36
Perfis metálicos	0,04	0,02	0,01	0,01
Placas PTFE	0,41	0,41	0,41	0,41
Servente - PTFE	0,84	0,84	0,84	0,84
Equipamentos				
Sistema guiamento	51,98	51,98	51,98	51,98
Sistema de empurre	54,72	54,72	54,72	54,72
Montagem				
Nariz metálico	51,30	25,65	14,66	10,26
Serralheiro	0,54	0,27	0,15	0,11
Servente	0,27	0,14	0,08	0,05
Operação				
Operários	20,52	20,52	20,52	20,52
Total	498,90	462,28	445,86	440,30

A estrutura de custos do método dos deslocamentos sucessivos gera os seguintes valores para uma ponte com vãos entre 50 e 60 metros:

Quadro 25 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 50 e 60 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	14,04	7,02	4,01	2,81
Betão	55,66	55,66	55,66	55,66
Aço passivo	82,50	82,50	82,50	82,50
Aço pré-esforço	130,90	130,90	130,90	130,90
Zona de fabricação				
Tout-venant	2,56	1,28	0,73	0,51
Retroescavadora	0,40	0,20	0,12	0,08
Oficial carpinteiro	0,40	0,20	0,11	0,08
Servente	0,15	0,08	0,04	0,03
Vigamento				
Betão	6,79	3,40	1,94	1,36
Perfis metálicos	0,04	0,02	0,01	0,01
Placas PTFE	0,34	0,34	0,34	0,34
Servente - PTFE	0,70	0,70	0,70	0,70
Equipamentos				
Sistema guiamento	43,32	43,32	43,32	43,32
Sistema de empurre	54,72	54,72	54,72	54,72
Montagem				
Nariz metálico	51,30	25,65	14,66	10,26
Serralheiro	0,54	0,27	0,15	0,11
Servente	0,27	0,14	0,08	0,05
Operação				
Operários	20,52	20,52	20,52	20,52
Total	465,16	426,91	410,52	403,96

A estrutura de custos do método dos deslocamentos sucessivos gera os seguintes valores para uma ponte com vãos entre 60 e 70 metros:

Quadro 26 – Quadro dos custos relativos para os deslocamentos sucessivos para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Cofragem	14,87	7,43	4,25	2,97
Betão	57,80	57,80	57,80	57,80
Aço passivo	86,47	86,47	86,47	86,47
Aço pré-esforço	149,45	149,45	149,45	149,45
Zona de fabricação				
Tout-venant	2,56	1,28	0,73	0,51
Retroescavadora	0,40	0,20	0,12	0,08
Oficial carpinteiro	0,40	0,20	0,11	0,08
Servente	0,15	0,08	0,04	0,03
Vigamento				
Betão	6,79	3,40	1,94	1,36
Perfis metálicos	0,04	0,02	0,01	0,01
Placas PTFE	0,29	0,29	0,29	0,29
Servente - PTFE	0,60	0,60	0,60	0,60
Equipamentos				
Sistema guiamento	37,13	37,13	37,13	37,13
Sistema de empurre	54,72	54,72	54,72	54,72
Montagem				
Nariz metálico	51,30	25,65	14,66	10,26
Serralheiro	0,54	0,27	0,15	0,11
Servente	0,27	0,14	0,08	0,05
Operação				
Operários	20,52	20,52	20,52	20,52
Total	484,31	445,65	429,08	422,45

No quadro seguinte, apresentam-se os intervalos de variação dos custos totais de cada um dos cenários explorados neste trabalho tendo em consideração uma variação de 5%, com base em duas variáveis o número de vãos e a dimensão do vão:

Quadro 27 – Intervalos dos custos relativos totais para os deslocamentos sucessivos

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	441,57 – 464,21	406,31 – 427,14	391,19 – 411,26	385,15 – 404,9
40 – 50	486,43 – 511,37	450,72 – 473,83	434,71 – 457,01	429,29 – 451,31
50 – 60	453,54 – 476,79	416,24 – 437,59	400,26 – 420,78	393,86 – 414,06
60 – 70	472,20 – 496,42	434,51 – 456,79	418,35 – 439,80	411,89 – 433,01
70 – 100	-	-	-	-

3.6. AVANÇOS SUCESSIVOS

O equipamento principal do método dos avanços sucessivos neste trabalho é o carro de avanço porque é o equipamento mais correntemente utilizado a nível nacional para esta técnica construtiva. Na elaboração da parte do estudo económico sobre os avanços sucessivos considerou-se que para a execução e fecho de um vão são utilizados dois carros de avanços e que o custo das cofragens e de operação está integrado no custo total do carrinho de avanço, são ambos os critérios baseados no que é prática comum na construção de pontes.

3.6.1. ESTRUTURA DE CUSTOS

A estrutura de custos para o método dos avanços sucessivos é constituída pelas seguintes parcelas de materiais, equipamentos e mão-de-obra [9], [10]:

- Betão incluindo fornecimento e colocação;
- Aço para armaduras passivas, incluindo fornecimento e montagem;
- Aço de alta resistência para pré-esforço, incluindo fornecimento e montagem;
- Custo / amortização do carro de avanço;
- Grua móvel para carga e descarga;
- Servente para carga e descarga;
- Serralheiro para montagem e desmontagem;
- Ajudante de serralheiro para montagem e desmontagem;
- Aduela zero.

O betão, o aço para armaduras passivas e o aço de alta resistência têm as suas quantidades e custos estimados de acordo com os pressupostos já utilizados e comuns a todos os métodos construtivos.

O custo dos carros de avanço utilizados nos vários cenários analisados neste estudo é baseado num gráfico estabelecido a partir da recolha de informação sobre o valor dos carros de avanço e da dimensão dos vãos dos tabuleiros executados com a sua utilização. O gráfico seguinte representa o comportamento do custo dos carros de avanço com o crescimento da dimensão do vão [9], [10].

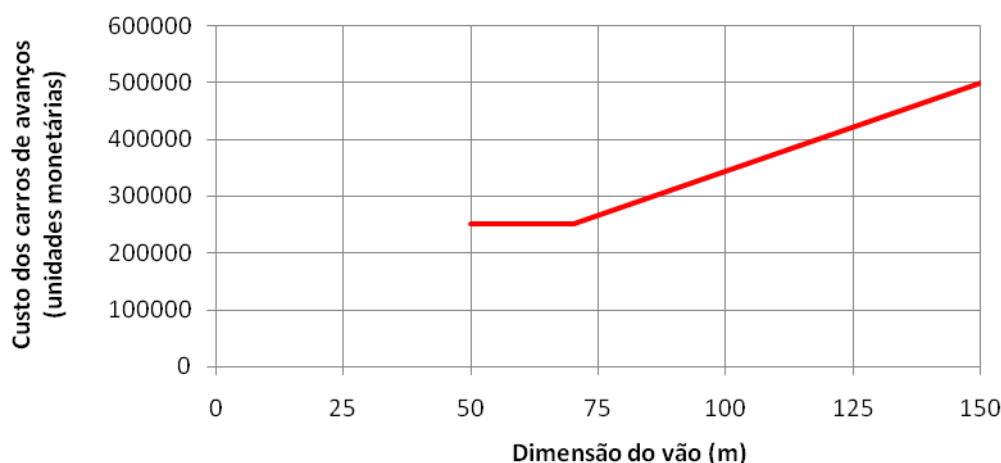


Fig.38 – Curva simplificada da variação do custo sem amortização de um carro de avanço em função do vão

Analisando o gráfico podemos observar que o custo de um carro de avanço tem um encargo constante no intervalo de dimensão do vão de 30 a 70 metros para um valor de 250000 unidades monetárias, para valores de vão superiores a 70 metros a custo tem um crescimento linear atingindo um valor de 500000 unidades monetárias para uma dimensão de vão de 150 metros. Considerou-se ainda que para cada cenário são mobilizados um número de carrinhos igual ao número de vãos a executar, ou seja, como são precisos dois carrinhos de avanços para a execução de um vão isto significa que apenas se executa metade do tabuleiro sendo necessário desmontar e montar os carrinhos para executar a restante metade da ponte. A taxa de amortização deste equipamento é de 50% acrescida de 15% para contabilizar os encargos referentes à operação de cada carro de avanço. Naturalmente estes valores aplicam-se para tabuleiro com uma largura tipo de 12 a 14 metros tendo fundamentação essencialmente em obras rodoviárias.

As tarefas de carga e descarga dos carros de avanço quando chegam à obra ou vão ser enviados de volta para o estaleiro geral quando a obra esta concluída envolvem dois recursos, a grua móvel e o servente. A grua móvel tem um custo unitário de 54,22 unidades monetárias por hora com um rendimento de 20 horas por carro de avanço, o servente tem um custo unitário de 5,5 unidades monetárias por hora e um rendimento de 40 horas por carro de avanço, ambos os rendimentos contabilizam as horas necessárias tanto para a carga como para a descarga.

As operações de montagem e desmontagem dos carrinhos de avanços, já referidas, necessitam da mobilização de dois recursos, o serralheiro e o ajudante de serralheiro. O serralheiro tem um custo unitário de 11 unidades monetárias por hora e com um rendimento de 55 horas por montagem/desmontagem por carro de avanço, ou seja, são 110 horas para a montagem e desmontagem de um carro de avanço. Dado que para a execução de um vão são necessários dois carros de avanços, então a quantidade de trabalho do serralheiro é de 110 horas mais 110 horas por vão, ou melhor, 220

horas por vão. Este raciocínio é também válido para o ajudante do serralheiro com um custo unitário de 6 unidades monetárias por hora e um rendimento de 110 horas por montagem/desmontagem por carro de avanço, logo, temos 440 horas por vão. Os encargos relacionados com a construção da aduela zero foram contabilizados estabelecendo um custo médio para esses encargos de 60000 unidades monetárias por cada aduela zero construída na execução do tabuleiro.

3.6.2. RESULTADOS

Os quadros seguintes expõem as unidades e os custos unitários de cada um dos encargos que compõe a estrutura de custos que caracteriza o método dos avanços sucessivos [9], [10]:

Quadro 28 – Quadro dos custos para o carro de avanço

Dimensão do vão	Carro de avanço
60 – 70	250000
70 – 100	310000

Quadro 29 – Quadro dos custos unitários para os avanços sucessivos

Tipo de custo	Unidades	Custo unitário
Materiais		
Betão	m ³	81,5
Aço passivo	kg	0,92
Aço pré-esforço	kg	3,5
Equipamentos		
Carro de avanço	un	250000
Aduela zero		
Custo	un	60000
Carga Descarga		
Grua móvel	hora	54,22
Servente	hora	5,5
Montagem Desmontagem		
Serralheiro	hora	11
Ajudante Serralheiro	hora	6

O método dos avanços sucessivos e os seus carros de avanço executam um tabuleiro com vãos entre 60 e 70 metros com custos relativos discriminados no quadro seguinte:

Quadro 30 – Quadro dos custos relativos para os avanços sucessivos para uma dimensão de vão entre 60 e 70 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	48,16	48,16	48,16	48,16
Aço passivo	72,06	72,06	72,06	72,06
Aço pré-esforço	83,03	83,03	83,03	83,03
Equipamentos				
Carro de avanço	254,06	254,06	145,17	101,62
Aduela zero				
Custo	35,18	41,04	43,55	44,56
Carga Descarga				
Grua móvel	2,20	2,20	1,26	0,88
Servente	0,45	0,45	0,26	0,18
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	1,89	1,89	1,89	1,89
Ajudante Serralheiro	2,06	2,06	2,06	2,06
Total	499,09	504,95	397,45	354,45

Por fim é analisado o intervalo de vãos onde o método dos avanços sucessivos é, normalmente, a solução mais vantajosa do ponto de vista económico. No quadro seguinte expõem-se os custos relativos para o método dos deslocamentos sucessivos para pontes com vãos entre 70 e 100 metros:

Quadro 31 – Quadro dos custos relativos para o método dos avanços sucessivos para uma dimensão de vão entre 70 e 100 metros

Tipo de custo	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
(unidades monetárias / m ² de tabuleiro)				
Materiais				
Betão	51,73	51,73	51,73	51,73
Aço passivo	79,17	79,17	79,17	79,17
Aço pré-esforço	109,30	109,30	109,30	109,30
Equipamentos				
Carro de avanço	245,02	245,02	140,01	98,01
Aduela zero				
Custo	27,36	31,92	33,87	34,66
Carga Descarga				
Grua móvel	1,71	1,71	0,98	0,69
Servente	0,35	0,35	0,20	0,14
Montagem Desmontagem				
Serralheiro	1,47	1,47	1,47	1,47
Ajudante Serralheiro	1,61	1,61	1,61	1,61
Total	517,73	522,29	418,35	376,78

Os intervalos dos custos totais da aplicação do método dos avanços sucessivos são expostos tendo em consideração uma variação de 5% dos valores obtidos de modo a abranger as oscilações de algumas parcelas que compõe a estrutura de custos, o quadro seguinte dispõe esses intervalos em função do número de vãos e dimensão do vão:

Quadro 32 – Intervalos dos custos relativos totais para os avanços sucessivos

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	-	-	-	-
40 – 50	-	-	-	-
50 – 60	-	-	-	-
60 – 70	486,61 – 511,57	492,33 – 517, 58	387,51 – 407,38	345,58 – 363,31
70 – 100	504,79 – 530,67	509,23 – 535,35	407,89 – 428,81	367,36 – 386,19

3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo de análise de resultados é realizada a comparação e discussão dos valores obtidos para os quatro processos construtivos com o objectivo de definir para cada um dos cenários analisados qual o processo construtivo com melhores argumentos económicos. Afinal a principal justificação para a elaboração de um estudo económico é a procura de uma solução capaz de satisfazer as pretensões de um determinado projecto ao mais baixo custo possível sem comprometer parâmetros como a qualidade, o prazo e a segurança.

A definição de qual a solução economicamente mais vantajosa é, sem dúvida, a resposta fundamental que se pretende encontrar quando se desenvolve um estudo económico mas para a compreensão do funcionamento do mercado em que se inserem as técnicas construtivas analisadas, isso não basta. Um estudo económico não se limita à procura das respostas, porque é também sua competência encontrar os factores e as causas que sustentam essas conclusões, e que são de igual ou maior importância, já que poderão permitir a correcção e aperfeiçoamento dos critérios que prejudiquem a atractividade económica de um determinado processo construtivo.

A procura do processo construtivo economicamente mais vantajoso é, como já foi dito, o objectivo principal e ao qual o estudo económico tem que dar resposta. Mas antes de se definir qual é o sistema construtivo que possui melhores condições para executar o tabuleiro de uma ponte com o mais baixo encargo total é importante perceber qual a evolução e sensibilidade de cada processo às duas variáveis em que o estudo se baseia, dimensão do vão e número de vãos. De modo a não dispersar a informação e a obter conclusões objectivas, optou-se por fazer esta análise utilizando os valores dos custos médios relativos, ou seja, por exemplo, na pesquisa para a dimensão do vão cada um dos valores do custo total

é calculado a partir da média de todos os custos totais por número de vão associados a essa dimensão de vão, verifica-se o inverso quando a pesquisa é baseada no número de vãos.

3.7.1. NÚMERO DE VÃOS

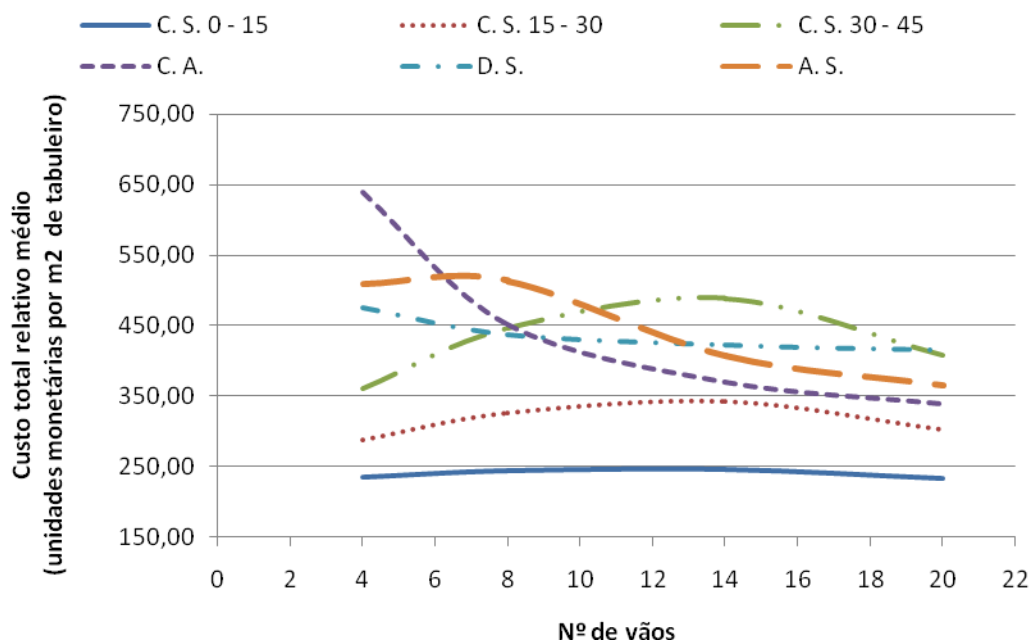


Fig.39 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais médios em função do número de vãos

As três variantes de cimbra ao solo têm um crescimento com o aumento do número de vãos, com a particularidade que o aumento da altura do cimbra provoca um crescimento mais acelerado dos custos totais. Se considerarmos apenas o cimbra ao solo em termos absolutos, ou seja, quando as três variantes são em conjunto as soluções mais baratas, verifica-se que a sua utilização é a mais barata para pontes até 8 vãos, os cimbres ao solo são a solução óptima para pontes com um número reduzido de vãos e de rasante baixa. Para pontes com uma altura até 30 metros verificamos que o cimbra ao solo é o processo construtivo que apresenta os encargos mais baixos para qualquer número de vãos.

A variação dos encargos do cimbra ao solo são essencialmente influenciados pela dimensão e o aluguer do escoramento. O crescimento, na fase inicial, é mais acentuado nos cimbres com maior altura porque estes possuem maiores volumes de escoramento logo maiores encargos de operação e aluguer pois implicam encargos mais elevados de descarga, montagem, desmontagem e carga, bem como, mais dias para concluir as tarefas de execução do tabuleiro. A redução dos encargos a partir dos 14 vãos está associada com o facto de se optar por aumentar o prazo de execução em detrimento de se aumentar a quantidade de equipamentos.

O cimbra autolançável é o que apresenta um custo médio inicial mais alto mas, por outro lado, é também o processo que possui uma queda mais acentuada do custo total com o aumento do número de vãos, constituindo-se como o método construtivo mais sensível à variação do número de vãos. É o método mais económico a partir das pontes com 10 ou mais vãos sem condicionamentos de altura do tabuleiro porque para pontes com menos de 30 metros de altura o cimbra ao solo consegue ser mais barato. Os encargos do equipamento cimbra autolançável são a parcela com mais peso no custo total

do método construtivo por isso influenciam a queda do custo total através da rentabilização do investimento efectuado na aquisição do cimbra autolanzável com a distribuição desse encargo pelo número de vãos a construir.

O método dos deslocamentos sucessivos, tal como o cimbra autolanzável, exhibe um decréscimo nos custos totais com o aumento do número de vãos mas de uma forma menos acentuada. A sua viabilidade económica resume-se a um intervalo entre 7 e 9 vãos em que os deslocamentos sucessivos são o método com os encargos mais baixos sem limitações da altura da rasante. A variação dos encargos totais dos deslocamentos sucessivos é ligeira principalmente justificada com o facto de o encargo do nariz metálico ser apenas dependente da dimensão do vão e da amortização do encargo com as cofragens ser amortizado com o aumento do número de vãos.

Os custos totais médios para os valores iniciais de números de vãos do método dos avanços sucessivos são dos mais altos dos quatro processos analisados. Decrescem a partir dos 8 vãos devido ao facto de considerar um aumento do prazo de execução mantendo a mesma quantidade equipamentos em obra mas apesar disso os encargos dos avanços sucessivos continuam a não ser competitivos.

3.7.2. DIMENSÃO DO VÃO

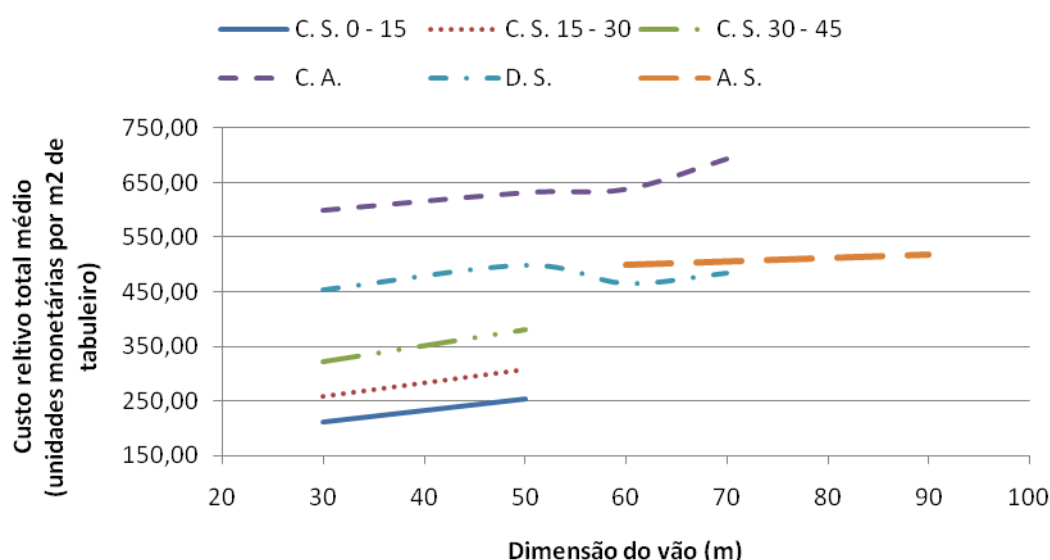


Fig.40 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 4 vãos

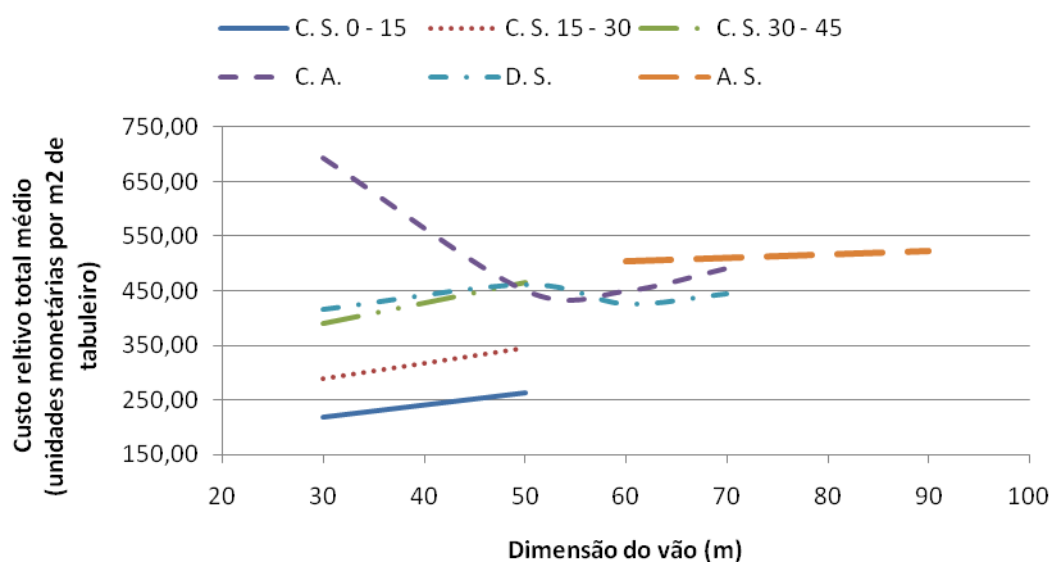


Fig.41 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 8 vãos

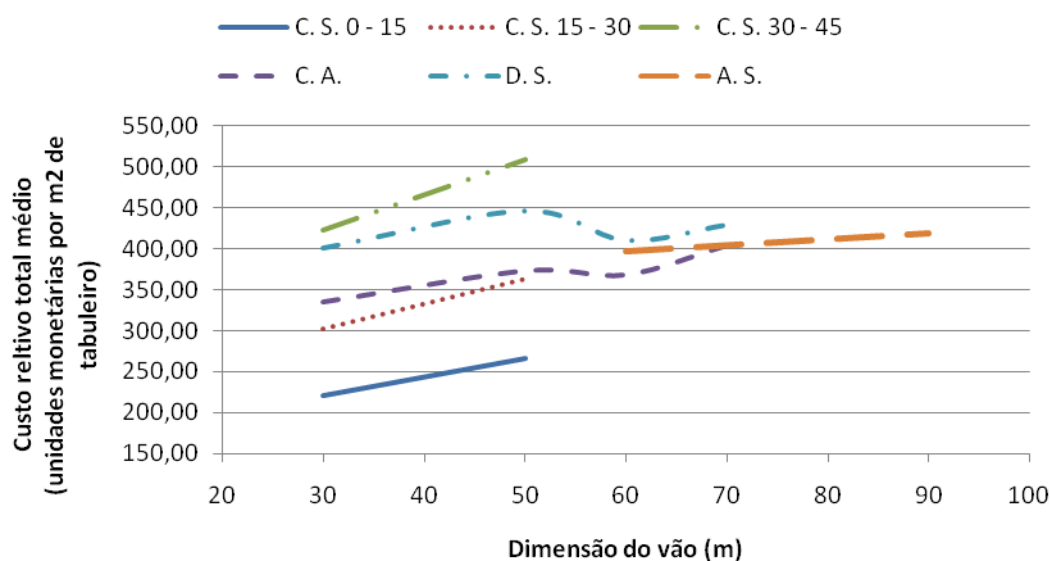


Fig.42 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 14 vãos

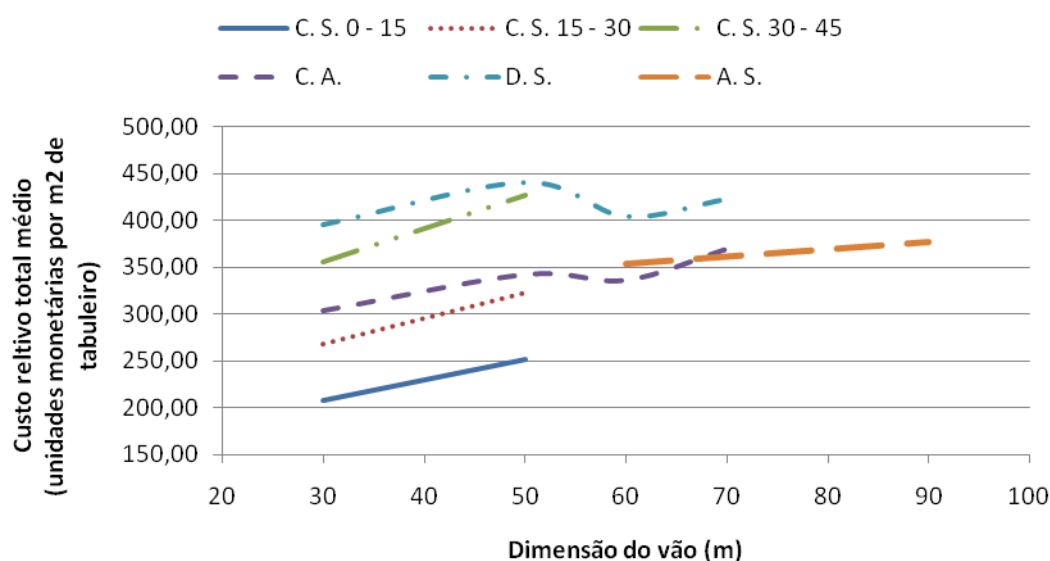


Fig.43 – Curvas simplificadas da variação dos custos totais para pontes com 20 vãos

O cimbra ao solo exhibe os custos totais médios mais baixos para pontes até ao intervalo entre 50 e 60 metros de vãos logo este método é o mais barato para pontes com vãos tipo até 50 metros e limitadas a uma altura de 45 metros. O crescimento dos custos médios do cimbra ao solo com o aumento do vão justifica-se essencialmente com o aumento dos encargos com os materiais dado que este apesar de apresentarem um custo relativo constante em relação ao número de vãos. Por outro lado, têm um crescimento devido ao aumento dos esforços com o aumento da dimensão do tabuleiro porque com maiores comprimentos é preciso maior capacidade resistente obtida através de uma maior quantidade materiais.

O cimbra autolançável tem um crescimento dos custos até ao 50 metros de vão, com a mudança da tipologia das secções transversais, de laje vigada para viga em caixão, o seu custo desce no intervalo de 50 a 60 metros de vão para voltar novamente a subir de uma forma mais acentuada após esse intervalo. Numa avaliação, puramente, baseada nas dimensões de vãos o cimbra autolançável é a solução mais económica no intervalo de 50 a 55 metros de vão. O comportamento do método do cimbra autolançável é justificado principalmente devido a dois encargos: o equipamento cimbra autolançável e os materiais. Os materiais influenciam o processo construtivo da mesma forma como o fazem no cimbra ao solo. E o equipamento cimbra autolançável provoca um crescimento no custos totais devido ao aumento do custo da sua aquisição com o aumento da dimensão do vão.

O método dos deslocamentos sucessivos tem um percurso semelhante ao do cimbra autolançável, com um crescimento até ao vão de 50 metros, uma quebra entre 50 e 60 metros de vão seguida, novamente de um crescimento, mais acentuado ao da primeira fase. Na variação dos custos totais em função da dimensão do vão, o método dos deslocamentos sucessivos é o mais económico para o intervalo de 55 a 70 metros de vão. O comportamento dos deslocamentos sucessivos é semelhante ao do cimbra autolançável mas com uma quebra mais acentuada no intervalo entre 50 e 60 metros de vão onde se faz a transição entre laje vigada e viga em caixão. Existe ainda a redução dos encargos do sistema de guiamento que depende do número de pilares e, conseqüentemente, do número de vãos e é independente da dimensão do vão.

Por fim, o método dos avanços sucessivos, apenas analisado a partir do intervalo de 60 a 70 metros de vão, dado que a sua utilização para vãos de dimensões inferiores é rara ou inexistente, apresenta um crescimento dos custos totais médios. Dos três métodos construtivos analisados para vãos superiores a 60 metros, os avanços sucessivos apresentam a par do cimbra autolançável os custos totais iniciais mais elevados devido à sua pouca compatibilidade com vãos de pequenas dimensões. Mas porque o seu crescimento é menos acelerado que o dos dois outros métodos a partir de vãos com dimensões superiores a 70 metros, o método dos avanços sucessivos é a solução de custos mais baixos. Isto é justificado com o facto de apesar do aumento dos encargos do carro de avanço com o aumento da dimensão do vão esse aumento é amortizado pelo aumento da quantidade de tabuleiro produzida para essa dimensão de vão tipo.

3.7.3. PROCESSO CONSTRUTIVO MAIS ECONÓMICO

A crítica dos resultados do estudo económico resumiu-se até aqui a uma avaliação em separado das duas variáveis que originaram as várias configurações de pontes. O próximo passo é a investigação de quais os processos construtivos economicamente mais favoráveis em cada uma das situações incluídas no estudo com base na consideração em simultâneo da dimensão e número de vãos da ponte.

Os custos totais dos processos construtivos foram calculados e organizados de acordo com os cenários correspondentes para que fosse possível fazer uma comparação simples e directa dos vários resultados com essa comparação baseada exclusivamente no custo total de cada um dos quatro processos construtivos, determina-se para cada um dos cenários qual o método construtivo economicamente mais vantajoso sendo apresentados no quadro seguinte os resultados:

Quadro 33 – Quadro dos processos construtivos mais económicos

Dimensão do vão	4 vãos	8 vãos	14 vãos	20 vãos
30 – 40	Cimbra ao solo	Cimbra ao solo	Cimbra autolançável	Cimbra autolançável
40 – 50	Cimbra ao solo	Cimbra autolançável	Cimbra autolançável	Cimbra autolançável
50 – 60	Deslocamentos sucessivos	Deslocamentos sucessivos	Cimbra autolançável	Cimbra autolançável
60 – 70	Deslocamentos sucessivos	Deslocamentos sucessivos	Avanços sucessivos	Avanços sucessivos
70 – 100	Avanços sucessivos	Avanços sucessivos	Avanços sucessivos	Avanços sucessivos

O cimbra ao solo tem um claro domínio dos cenários que surgem da combinação de um número reduzido de vãos e de uma pequena dimensão de vãos o que seria de esperar tendo em consideração as principais características deste método.

Continuando nos cenários com um número reduzido de vãos, onde existe uma maior alternância do processo construtivo mais viável, verificamos que os deslocamentos sucessivos são a solução para

vãos com dimensões entre 50 e 70 metros para pontes até 8 vãos. Os deslocamentos sucessivos são o método construtivo que dá melhor resposta a pontes com dimensão e número de vãos médios.

O cimbra autolanzável é o processo construtivo que domina as pontes com um número elevado de vãos, 14 e 20 vãos, apenas perdendo viabilidade económica para vãos entre 60 e 70 metros.

A partir dos 70 metros de vão são os avanços sucessivos que se constituem como a solução mais económica porque nenhum outro método analisado consegue executar pontes com vãos dessa dimensão. E ainda são a solução mais económica para vãos entre 60 e 70 metros em pontes com 14 ou mais vãos, isso deve-se em grande parte ao facto de se considerar um aumento do prazo de execução a partir dos 8 vãos porque não se aumenta a quantidade de carros de avanço em obra, este pressuposto procura retratar a opção mais comum quando se utiliza este método para a execução de uma ponte com mais de 8 vãos.

Na avaliação geral do quadro, é importante avaliar as suas posições extremas, os cantos, onde o número e dimensão do vão atingem todas as combinações possíveis de valores máximos e mínimos. Começando pelo canto superior esquerdo temos o cimbra ao solo, o processo construtivo que melhor resposta dá à combinação de valores mínimos das duas variáveis, ou seja, vãos de dimensões reduzidas e em pequeno número, sempre com utilização limitada pela altura da rasante. No canto inferior esquerdo temos o método dos avanços sucessivos, como a melhor solução para um cenário de dimensão de vão máxima e um número de vãos mínimo, já justificado anteriormente pela sua característica de ser o único processo construtivo deste estudo capaz de construir pontes com vãos dessas dimensões. No canto superior direito, temos o inverso da situação anterior, dimensão de vão mínima e número de vãos máximo, com a solução óptima a ser o cimbra autolanzável, dado que apresenta uma redução acentuada dos custos totais com o aumento do número de vãos. Para terminar temos o canto inferior direito, onde coincidem os dois máximos, máxima dimensão de vão e máximo número de vãos com a opção mais barata a ser, mais uma vez, os avanços sucessivos.

4

CONCLUSÃO

4.1. CONCLUSÃO

O trabalho foi constituído por duas fases principais: a recolha e organização de informação sobre os processos construtivos de tabuleiros betonados *in situ* mais correntes no panorama da construção de obras públicas em Portugal e numa segunda fase a elaboração de um estudo económico desses mesmos processos construtivos.

A primeira fase, recolha e organização de informação sobre os processos construtivos, foi a que apresentou um maior número de dificuldades. Os obstáculos começaram logo na recolha de dados porque não existe uma entidade que possua dados oficiais relativos a este tema e as principais fontes de informação foram as empresas construtoras onde grande parte dos dados são confidenciais e por isso partilhados com muita dificuldade. Por fim, os engenheiros e técnicos experientes com muito do conhecimento baseado no empirismo.

O estudo económico dos processos construtivos têm um vasto grupo de variáveis que influenciam os encargos dos métodos por isso outra das dificuldades foi a selecção de quais as variáveis que seriam consideradas neste estudo pois considerá-las todas inviabilizaria a realização deste estudo. A escolha recaiu no número de vãos e na dimensão do vão tipo e com base nos resultados obtidos é possível concluir que apesar de se reconhecer que existem outras variáveis importantes, as duas variáveis escolhidas são das mais importantes e influentes nos custos dos processos construtivos. De fora da análise ficaram importantes variáveis como o factor de escala, prazo de execução e os encargos do estaleiro que foram consideradas constantes para todas as categorias de pontes avaliadas.

A conclusão principal deste trabalho são as variações de cada um dos métodos construtivos perante os diferentes cenários de número e dimensão do vão tipo e que permitem a quem consultar este trabalho perceber como cada um dos processos construtivos se comporta em função destas duas variáveis e, de uma forma geral, qual a solução mais económica para uma determinada conjugação desses dois parâmetros.

Este trabalho conclui que para um valor reduzido de número de vãos e de dimensão de vão tipo o cimbreiro ao solo é a solução mais económica mas com condicionamentos de altura da rasante. O cimbreiro autolancável é a solução mais económica para pontes com um número elevado de vãos e dimensão do vão tipo até 60 metros. Os deslocamentos sucessivos têm uma aplicação economicamente favorável para pontes com características médias de número e dimensão de vão, ou seja, pontes até 8 vãos com um vão tipo entre 50 e 70 metros. Os avanços sucessivos são método construtivo mais vantajoso para pontes com dimensão de vão tipo superior a 70 metros.

A realização do estudo económico permitiu concluir para além de todos os valores determinados que a execução de uma ponte é uma empreitada condicionada por múltiplas variáveis muito próprias e características da obra em si mas também do local, mão-de-obra e técnicas envolvidas e por isso é indispensável elaborar uma análise técnico-económica pormenorizada. Apesar disso é possível estabelecer conceitos gerais de aplicabilidade económica dos métodos construtivos como os que foram apresentados e validados neste trabalho.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os desenvolvimentos futuros deste trabalho poderão passar pelo alargamento do estudo económico a outros processos construtivos, como a pré-fabricação, de modo a abranger um espaço mais amplo do mercado da construção de obras públicas que, consequentemente, poderão conduzir a soluções mais vantajosas que as encontradas até aqui.

Um aperfeiçoamento deste trabalho poderá caracterizar-se por um aumento da quantidade e qualidade das informações recolhidas com o intuito de melhorar e aumentar a precisão das curvas simplificadas e dos encargos totais de cada método construtivo apresentados ao longo deste trabalho.

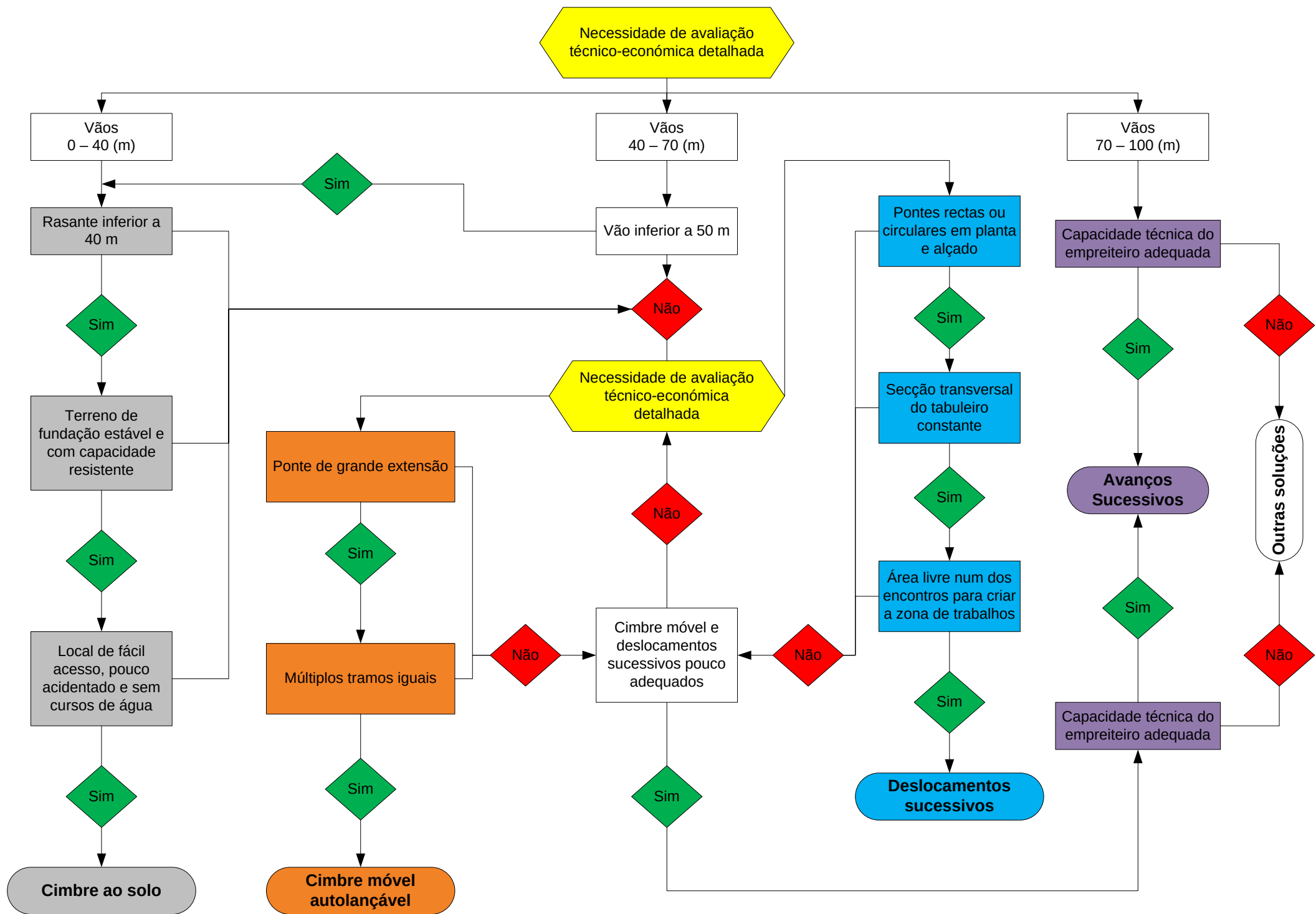
Uma outra alternativa para a expansão deste trabalho poderá ser a elaboração de uma base de dados de custos unitários e rendimentos associada a um programa de computador capaz de gerar orçamentos dos vários processos construtivos a partir das características da ponte a construir.

Por fim, seria também interessante decompor os encargos totais de cada um dos métodos construtivos nas seguintes categorias: materiais, equipamentos e mão-de-obra. Com o objectivo de analisar e quantificar a influência da cada uma dessas categorias no valor e variação do custo total de cada um dos processos construtivos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adão da Fonseca, A. *Construção de Pontes – Métodos e Tecnologias*. FEUP, Porto, 1992.
- [2] Pacheco, P., Adão da Fonseca, A. *Pontes e Estruturas de Grande Vão – Processos Construtivos*. FEUP, Porto, 2004.
- [3] Reis, A.J. *Pontes*. IST, Lisboa, 2002.
- [4] André, A. *Estudo Experimental da Aplicação de Pré-esforço Orgânico num Cimbra Autolanzável em Modelo Reduzido*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2004.
- [5] Ferraz, M. *Um Modelo de Análise para o Estudo de Pontes como Estruturas Evolutivas*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2001.
- [6] Moás, L. *Análise do Tabuleiro de Pontes Construídas pelo Método das Avanços Sucessivos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1994.
- [7] Bernardo, F. *Processo Construtivo e Análise Diferida de Pontes Construídas por Deslocamentos Sucessivos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1999.
- [8] Dados fornecidos por BERD S. A. – Bridge Engineering Research and Design
- [9] Dados confidenciais fornecidos por empreiteiros
- [10] Dados obtidos através do contacto e reuniões com engenheiros e técnicos experientes
- [11] Google (<http://images.google.pt>).

ANEXO



Dimensão dos vãos 30 - 40 m	Nº de vãos							
	4		8		14		20	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Cimbre ao solo Altura: 0 - 15 m	206,10	216,67	213,51	224,46	215,04	226,07	202,97	213,38
Cimbre ao solo Altura: 15 - 30 m	252,39	265,34	282,06	296,52	294,96	310,09	261,85	275,28
Cimbre ao solo Altura: 30 - 45 m	313,52	329,60	380,27	399,77	413,02	434,20	347,43	365,24
Cimbre móvel autolanzável	583,46	613,38	403,88	424,59	326,91	343,68	296,13	311,31
Deslocamentos sucessivos	441,57	464,21	406,31	427,14	391,19	411,26	385,15	404,90
Avanços sucessivos (carrinho de avanço)								

Dimensão dos vãos 40 - 50 m	Nº de vãos							
	4		8		14		20	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Cimbre ao solo Altura: 0 - 15 m	247,78	260,48	257,05	270,23	259,50	272,81	245,77	258,38
Cimbre ao solo Altura: 15 - 30 m	299,63	315,00	336,72	353,98	353,73	371,87	314,66	330,80
Cimbre ao solo Altura: 30 - 45 m	370,03	389,01	453,47	476,72	495,63	521,04	416,93	438,31
Cimbre móvel autolanzável	615,27	646,82	439,25	461,77	363,81	382,47	333,63	350,74
Deslocamentos sucessivos	486,43	511,37	450,72	473,83	434,71	457,01	429,29	451,31
Avanços sucessivos (carrinho de avanço)								

Dimensão dos vãos 50 - 60 m	Nº de vãos							
	4		8		14		20	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Cimbre ao solo Altura: 0 - 15 m								
Cimbre ao solo Altura: 15 - 30 m								
Cimbre ao solo Altura: 30 - 45 m								
Cimbre móvel autolanzável	621,44	653,31	437,87	460,32	359,19	377,61	327,72	344,53
Deslocamentos sucessivos	453,54	476,79	416,24	437,59	400,26	420,78	393,86	414,06
Avanços sucessivos (carrinho de avanço)								

Dimensão dos vãos 60 - 70 m	Nº de vãos							
	4		8		14		20	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Cimbre ao solo Altura: 0 - 15 m								
Cimbre ao solo Altura: 15 - 30 m								
Cimbre ao solo Altura: 30 - 45 m								
Cimbre móvel autolanzável	676,12	710,79	478,64	503,19	394,01	414,21	360,15	378,62
Deslocamentos sucessivos	472,20	496,42	434,51	456,79	418,35	439,80	411,89	433,01
Avanços sucessivos (carrinho de avanço)	486,61	511,57	492,33	517,58	387,51	407,38	345,58	363,31

Dimensão dos vãos 70 - 100 m	Nº de vãos							
	4		8		14		20	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Cimbre ao solo Altura: 0 - 15 m								
Cimbre ao solo Altura: 15 - 30 m								
Cimbre ao solo Altura: 30 - 45 m								
Cimbre móvel autolanzável								
Deslocamentos sucessivos								
Avanços sucessivos (carrinho de avanço)	504,79	530,67	509,23	535,35	407,89	428,81	367,36	386,19