



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
GUSTAVO HENRIQUE GRIZOTTI

**ANÁLISE DO MÉTODO CONSTRUTIVO POR BALANÇOS SUCESSIVOS
APLICADO A CONSTRUÇÃO DE PONTES**

LAGES
2020

GUSTAVO HENRIQUE GRIZOTTI

**ANÁLISE DO MÉTODO CONSTRUTIVO POR BALANÇOS SUCESSIVOS
APLICADO A CONSTRUÇÃO DE PONTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário Facvest - Unifacvest, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

LAGES

2020

GUSTAVO HENRIQUE GRIZOTTI

**ANÁLISE DO MÉTODO CONSTRUTIVO POR BALANÇOS SUCESSIVOS
APLICADO A CONSTRUÇÃO DE PONTES**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Supervisor pedagógico do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Facvest – Unifacvest.

Nota: 10

Aldori Batista dos Anjos

Presidente da Banca Examinadora de TCC, Professor, Orientador e Coordenador do
Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Facvest – Unifacvest

Lages, 27 de novembro de 2020

RESUMO

A técnica “balanço sucessivo” é um método construtivo de Obras de Arte Especiais, sua ideia construtiva é caracterizada em construir vãos por partes através de elementos estruturais denominadas de aduelas que podem ser pré-moldadas ou moldadas no local. Seu processo construtivo segue raciocínio de uma construção segmentar, as aduelas são executadas em sequência, sobrepostas simultaneamente em sentidos contrários do eixo de apoio. O objetivo deste trabalho foi apresentar e informar todo o mecanismo que constitui a técnica por balanço sucessivo, dentre os principais assuntos: origem e evolução, aplicação em construção de pontes, vantagens e desvantagens e tecnologia da protensão às pontes. Para isto, foi elaborado uma revisão bibliográfica com base em materiais científicos, que apresentaram e/ou estudaram sobre o método construtivo por balanço sucessivo. Desta maneira, pode-se concluir que desde o surgimento desta técnica construtiva, pontes sobre grandes leitos aquáticos construídas em concreto protendido utilizam esta técnica porque apresenta excelente aspecto técnico e econômico.

Palavras-chave: Balanço Sucessivo. Aduelas. Construção Segmentar.

ABRIDGEMENT

The “successive balance” technique is a constructive method of Special Works of Art, its constructive idea is characterized by building spans in parts through previous elements called staves that can be pre-molded or molded at the place. Its construction process follows a segmental construction logic, the staves are executed in sequence, simultaneously superimposed in opposite directions from the support axis. The objective of this assignment was to lodge and inform the whole mechanism that builds the successive balance technique, among the main subjects: origin and evolution, application in bridges constructions, advantages and disadvantages and technology of prestressing bridges. For this, a bibliographic review was elaborated based on scientific materials, which dissipated and/or studied on the construction method by successive balance. Thus, it might be realized that since the introduction of this constructive technique, bridges over large aquatic beds built in prestressed concrete use this technique because it presents an excellent technical and economic aspect.

Keywords: Successive Balance. Staves. Construction Segment.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente meus agradecimentos vão para meus pais e irmã, Girlei, Viviane e Ane Luisy, que sempre me proporcionaram um suporte, tanto financeiro como emocional para que eu pudesse concluir o curso de engenharia civil.

Ao decorrer desta minha jornada acadêmica pude conhecer pessoas incríveis, algumas que mantenho contato até hoje e outras que não tenho mais qualquer tipo de contato, mas que de alguma forma, em algum instante desta jornada contribuí para que eu se chegasse na reta final. Em especial, fica meu eterno agradecimento aos grandes amigos: Alessandro, Suélen, Júlio, Magna, Gabriel e Karina.

Agradeço também a todos professores que foram mentores de disciplinas do curso de Engenharia Civil da Unifacvest durante estes últimos 5 anos. Ambos foram a base para que eu pudesse chegar até o final com todo o aprendizado adquirido nesse tempo. Em especial, aos professores que marcaram muito, ambos com uma dedicação enorme em passar o seu conhecimento da forma mais simples possível: Mônica, Caetano, Chiquinho, Arlindo, Nilva, Afonso, Samuel e Nicolas.

Não poderia deixar de fazer outro agradecimento ao professor Nicolas, pois o interesse pela temática deste trabalho de conclusão de curso surgiu em uma de suas aulas. Muito obrigado por tratar sobre o assunto em aula, estava ansioso em ter a matéria de pontes e ferrovias, pois é a área que pretendo me especializar e trabalhar futuramente.

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, Clemente, que teve o desejo de ter um Engenheiro Civil na família.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E UNIDADES DE MEDIDA

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte;

OAE – Obras de Arte Especiais;

IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto;

f_{ck} – Feature Compression Know (resistência característica do concreto à compressão);

MPa – Mega Pascal;

m – Metro;

m^3 – Metro Cúbico.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Ponte Herval sobre o rio do Peixe.
- Figura 02 – Perfil longitudinal da ponte Herval.
- Figura 03 – Execução do vão da ponte Herval.
- Figura 04 – Ponte Choisy-le-Roi.
- Figura 05 – Construção da ponte sobre o rio Niterói.
- Figura 06 – Perspectiva transversal de uma aduela.
- Figura 07 – Esquema geral da construção por balanços sucessivos.
- Figura 08 – Ação da protensão em aduelas.
- Figura 09 – Execução de aduelas moldadas no local.
- Figura 10 – Fluxograma de fases em respectivos dias de execução.
- Figura 11 – Vãos em fase construtiva com uso de aduelas pré-moldadas.
- Figura 12 – Vão central da ponte Wadi Leban.
- Figura 13 – Processo construtivo com recurso de tirantes definitivos.
- Figura 14 – Sistema short-line.
- Figura 15 – Sistema long-line.
- Figura 16 – Pátio de pré-moldados.
- Figura 17 – Vista de uma lançadeira treliçada.
- Figura 18 – Lançamento de aduela pré-moldada por meio de grua.
- Figura 19 – Alteração do alinhamento vertical do tabuleiro sob desvio da cota do pilar.
- Figura 20 – Alteração do alinhamento devido ao desvio na geometria da aduela de disparo.
- Figura 21 – Vão construído pela união de blocos pré-moldados através de prontesão.
- Figura 22 – Esquema de protensão pré-tracionada.
- Figura 23 – Esquema de protensão pós-tracionada.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01 – Relação água/cimento, classe e consumo de cimento.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 METODOLOGIA.....	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
4.1 CONSTRUÇÃO DE PONTES PELO MÉTODO BALANÇOS SUCESSIVOS.....	14
4.1.1 Histórico.....	14
4.1.2 Caracterização.....	18
4.1.3 Vantagens e desvantagens.....	19
4.1.4 Aduelas moldadas no local.....	20
4.1.5 Aduelas pré-moldadas.....	22
4.1.6 Lançamento de aduelas.....	26
4.1.7 Geometria.....	27
4.1.8 Concreto e qualidade.....	29
4.1.9 Protensão.....	30
4.1.9.1 Protensão pré-tracionada.....	32
4.1.9.2 Protensão pós-tracionada.....	33
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Dos tempos mais remotos da humanidade, quando o homem utilizava recursos primitivos da natureza como pedra, madeira, vegetação, entre outros materiais a seu favor para ultrapassar obstáculos geológicos da natureza, até os tempos atuais, onde as estruturas da construção civil desafiam a imaginação humana em busca de limitações e de estética excêntrica de ludibriar os olhos aos grandes vãos dos gigantes da engenharia, as pontes. (VITÓRIO, 2002).

O avanço tecnológico e a capacitação profissional possibilitaram a ousadia de construir vãos extremamente maiores. Com isso, a indústria da construção civil começou a atender os principais requisitos de mercado, buscando a redução do cronograma de execução juntamente com o aumento de qualidade dentro do canteiro de obras, impulsionando assim, ao decorrer dos anos o desenvolvimento de inúmeras novas técnicas no emprego de estruturas de pontes. (PAIXÃO, 2015; VITÓRIO, 2002).

De acordo com DNIT (2014, p. 4), “A escolha do método executivo de uma ponte passa, a princípio, pelo aspecto técnico, buscando a solução ideal para a situação geográfica existente. Ao mesmo tempo, é preciso enquadrar-se a uma realidade econômica que torne o projeto viável.”

Atualmente o sistema estrutural mais utilizado nas construções de grandes pontes sobre leitos aquáticos é a execução de aduelas ou conhecidas também como “viga-caixão”, junto com o método construtivo por balanços sucessivos garantem eficiência ao ponto de vista técnico e econômico. (PAIXÃO, 2015).

Assim, o atual estudo é direcionado ao método construtivo por balanços sucessivos que se encontra presente em diversos países do mundo por apresentar inúmeras vantagens econômicas comparada aos demais meios construtivos de pontes. O curioso fato é de que o método foi estruturado por um brasileiro, e que ao decorrer dos anos serviu de base para experimentos de outros engenheiros estrangeiros em prol de melhorias à técnica, tornando-a cada vez mais eficaz. Portanto, a temática merece destaque em ambientes acadêmicos por ter sido estruturado no Brasil, sendo assim, uma justificativa plausível à realização deste estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Dar conhecimento sobre o método construtivo por balanços sucessivos, propondo ao leitor o entendimento de tudo que se aplica a técnica construtiva em estudo.

2.2 Objetivos específicos

- Evidenciar a caracterização geral do método construtivo por balanços sucessivos;
- Investigar a origem e evolução do método construtivo por balanços sucessivos;
- Apresentar as vantagens e desvantagens do método construtivo por balanços sucessivos;
- Informar a tecnologia do concreto protendido às pontes.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido através de uma revisão bibliográfica, baseada em materiais científicos. Utilizou-se livros, monografias, artigos, teses, dissertações, sites, entre outras fontes, nas quais seus conteúdos foram relevantes à pesquisa sobre o método construtivo por balanços sucessivos. Para tanto, o estudo seguiu a lógica das etapas apresentadas por Gil (2002).

- Escolha do tema: baseando-se em uma área de interesse, refletir sobre diferentes temas, então quais são os mais instigantes e interessantes ou que já se tem um bom conhecimento para se aprofundar e pesquisar, e por fim delimitar mais o assunto;
- Levantamento bibliográfico preliminar: realizar um estudo exploratório nos materiais bibliográficos para possibilitar maior delimitação do assunto desejado e finalmente definir o problema;
- Formulação do problema: expor de forma clara, concisa e objetiva qual é a ideia na qual se pretende realizar o estudo sobre;
- Busca das fontes: identificar as fontes capazes de fornecer as respostas adequadas à solução do problema proposto, sendo fundamental obter informações e a apreciação crítica do orientador e se possível de especialistas do tema. Localizá-las e obtê-las;
- Leitura do material: identificar e analisar a consistência das informações e dos dados fornecidos pelos autores, estabelecer relações entre eles com o problema proposto;
- Construção lógica do trabalho: estruturar logicamente as ideias com vista em atender aos objetivos ou testar as hipóteses formuladas no início da pesquisa.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho trata-se de um estudo analítico baseado em fontes bibliográficas sobre uma tecnologia construtiva de OAE conhecida como “balanço sucessivo” ou “avanço progressivo”. O enfoque deste trabalho é direcionado a construção de pontes, tendo em vista que o método construtivo também se aplica a construção de viadutos.

4.1 CONSTRUÇÃO DE PONTES PELO MÉTODO BALANÇOS SUCESSIVOS

Neste tópico único, apresentam-se em subtítulos a pesquisa analítica que constitui o método construtivo por balanços sucessivos aplicado a construção de pontes.

4.1.1 Histórico

A técnica por balanços sucessivos teve sua primeira aplicação em 1930, planejada e executada por Emílio Henrique Baumgart, engenheiro brasileiro que foi responsável pela primeira construção de uma ponte pelo método de segmentos no mundo. A ponte serviu de travessia sobre o rio do Peixe localizada em Joaçaba, Santa Catarina. (LIMA, 2011).

Figura 01 – Ponte Herval sobre o rio do Peixe.



Fonte: (THOMAZ, 2010, p. 10).

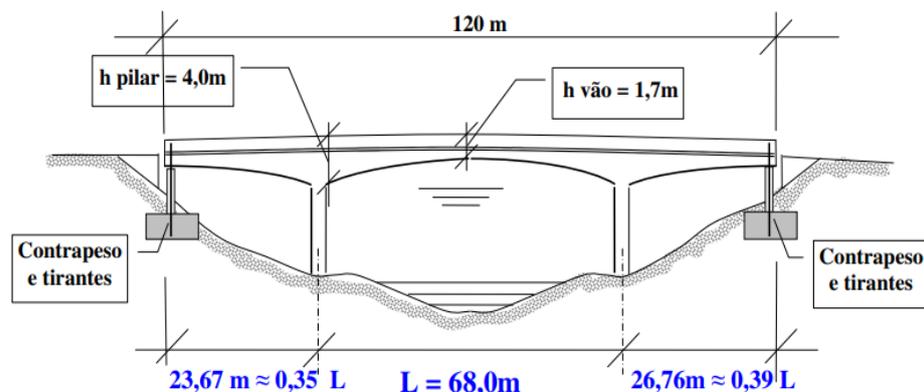
A fins históricos e de reconhecimento, a ponte sobre o rio do Peixe, conforme Thomaz (2010, p. 30):

[...] é reconhecida mundialmente como a primeira ponte de concreto construída em balanços sucessivos, sem escoramentos apoiados no terreno. Esse método construtivo não foi, no entanto, patenteado pelo Eng. Emilio H. Baumgart. Sendo essa obra a pioneira, não foram aceitos, por isso, outros pedidos de patente de método de construção em balanços sucessivos.

A ponte do Herval foi construída em concreto armado e possuía 68 m de vão livre, na época foi considerada a ponte com viga reta mais longa do mundo. O método construtivo por balanços sucessivos foi adotado na construção da ponte porque o rio apresentava históricos de enchentes repentinas, chegando a alcançar 11 m do nível da água em uma só noite. (FONSECA, 2015).

Mediante a ocasião, a técnica construtiva por balanços sucessivos compreendia à situação, por não necessitar da utilização de escoras, concretizando assim, o modelo construtivo de Emílio H. Baumgart. (FONSECA, 2015).

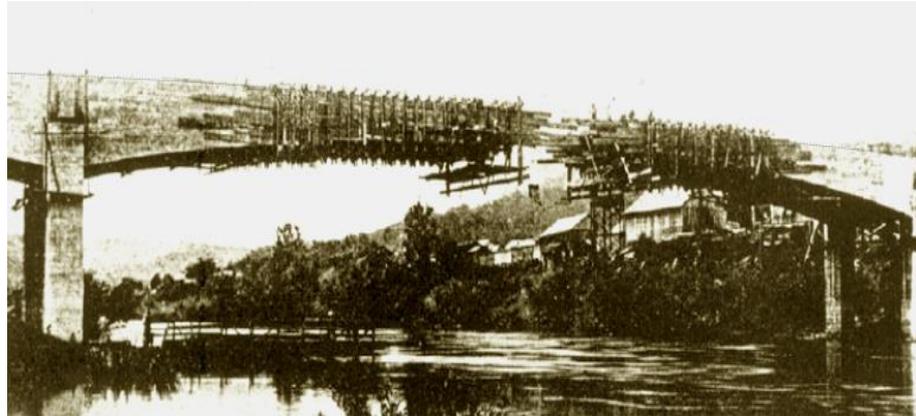
Figura 02 – Perfil longitudinal da ponte Herval.



Fonte: (THOMAZ, 2010, p. 2).

Para a construção do vão central da ponte Herval, foi separado em setores de concretagem, entre os pilares centrais, eram construídos segmentos, onde cada segmento era concretado, e após a cura do concreto, a fôrma autoportante apoiava-se na própria estrutura já concretada, e assim, sucessivamente, era feita a execução dos próximos trechos até concluir o vão total da ponte. (FONSECA, 2015).

Figura 03 – Execução do vão da ponte Herval.



Fonte: (THOMAZ, 2010, p. 5).

Após a construção da ponte Herval, a técnica por balanços sucessivos começou a ser adotado em construções de outras pontes em diferentes países. No entanto, com dificuldades ocasionadas pelos momentos fletores decorrentes dessa técnica, era preciso uma grande quantia de armadura passiva, que mesmo assim, não foram suficientes para retardar ou eliminar fissuras que apareciam de forma natural no banzo tracionado da estrutura. (FONSECA, 2015).

Estas dificuldades foram superadas com a aplicação do protendido às pontes construídas em balanços sucessivos com aduelas moldadas no local, trinta anos após, na década de cinquenta, pelo engenheiro alemão *Ulrich Finsterwalder*, com a construção da ponte sobre o rio *Lahn*, na Alemanha. A utilização da protensão possibilitou eliminar tensões normais de tração e fissuras nas estruturas, aperfeiçoando a ideia de Emílio H. Baumgart, tornando-se a mais nova tecnologia construtiva de pontes da época. (FONSECA, 2015).

Anos mais tarde, na década de sessenta, na França originou-se a construção de pontes por balanços sucessivos com aduelas pré-moldadas pelo engenheiro *Jean Muller*, responsável pela construção da ponte *Choisy-le-Roi* sobre o rio *Sena*, considerada a primeira a ser erguida utilizando seção caixão e epóxi entre as juntas. O desenvolvimento desta técnica com pré-moldados possibilitou reduções gradativas no prazo de execução de obras. (PALIGA, 2015; SOUSA, 2013).

Figura 04 – Ponte *Choisy-le-Roi*.



Fonte: *Jacques Mossot*. (STRUCTURAE, 1998).

Disponível em: <<https://structurae.net/en/media/3941>>.

Atualmente, a técnica por balanços sucessivos é bastante difundida no mundo, com fortes influências nos Estados Unidos da América, Ásia, França e Espanha. No Brasil, apesar de existir uma boa quantidade de obras construídas por este método construtivo não é o tipo mais usual no que se diz a respeito às construções de pontes no país. (FRANÇA, 2011; SOUSA, 2013).

Sendo assim, no Brasil, a ponte segmentar de maior destaque é a ponte Presidente Costa e Silva, mais conhecida como a ponte rio Niterói, construída nos anos setenta, foi a primeira ponte do país a ser construída com a tecnologia de protensão às pontes junto com a técnica construtiva por balanços sucessivos, seus trechos foram executados com aduelas pré-moldadas e moldadas no local. Com aproximadamente 14 quilômetros de extensão, a ponte liga a baía de Guanabara com as cidades de Niterói e Rio de Janeiro. (PALIGA, 2015; PERLINGEIRO, 2006).

Figura 05 – Construção da ponte sobre o rio Niterói.

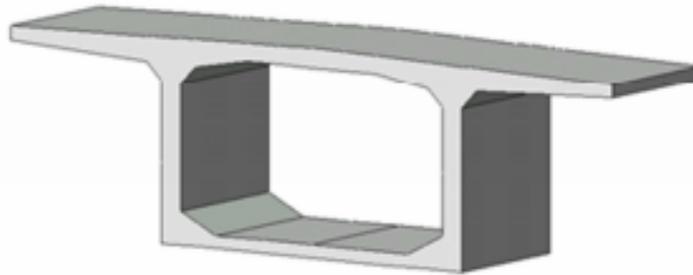


Fonte: (PERLINGEIRO, 2006, p. 9).

4.1.2 Caracterização

A ideia construtiva através de balanços sucessivos ou “avanços progressivos”, é caracterizada pela execução de aduelas ou conhecidas também como “viga de seção celular tipo caixão”, que compreendem comprimentos variáveis de 3 a 10 m. (PAIXÃO, 2015; PALIGA, 2015).

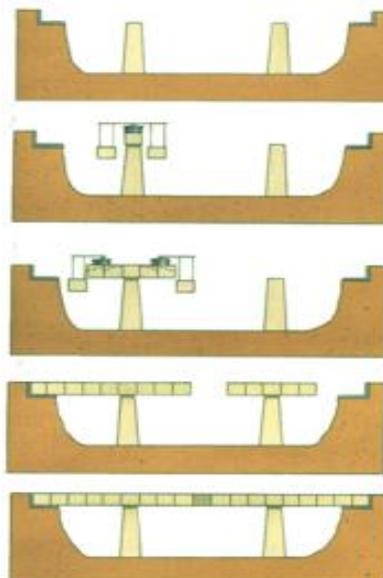
Figura 06 – Perspectiva transversal de uma aduela.



Fonte: (FONSECA, 2015, p. 71).

O processo construtivo por balanços sucessivos dá-se pela execução do vão em segmentos, através de aduelas pré-moldadas ou moldadas no local, sua superestrutura é formada a partir de um apoio central, de aduela a aduela são sobrepostas, suspensas em balanço equilibrado simetricamente pelo avanço simultâneo entre dois vãos vizinhos até alcançar as demais proximidades de apoio. (PAIXÃO, 2015).

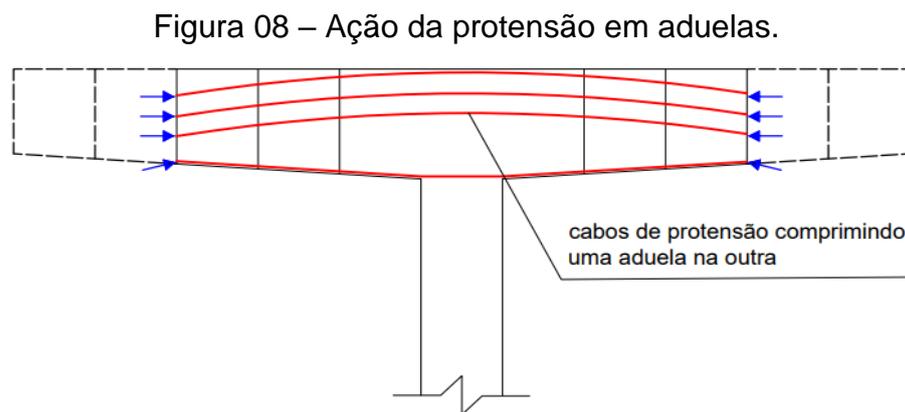
Figura 07 – Esquema geral da construção por balanços sucessivos.



Fonte: (PALIGA, 2015, p. 23).

Após a etapa de agrupamento de uma aduela na outra, tanto no sistema de pré-moldados ou moldados no local, é feito o processo de protensão, que consiste em comprimir as aduelas uma das outras. (PAIXÃO, 2015).

Essa força de comprimir a superestrutura só é possível através de cabos de aço tracionados que passam pelos dutos vazados das aduelas, assim como exemplificado na figura abaixo. (PAIXÃO, 2015).



Fonte: Adaptado pelo autor. (SILVA, 2020, p. 3).

Sua aplicação construtiva é bastante aconselhável para OAE de grande porte que se propõe vencer vãos acima de 30 m, e até extraordinários 450 m de vão livre, podendo haver auxílio de outros elementos estruturais, nesse caso, é bastante comum a utilização de tirantes definitivos. (FRANÇA, 2011; TARRACATA, 2009).

4.1.3 Vantagens e desvantagens

Como todo método construtivo apresenta vantagens e desvantagens ao seu meio de aplicação. Abaixo segue um resumo geral, abordando pontos positivos e negativos da tecnologia por balanços sucessivos com seus dois meios executivos de sua superestrutura, sendo elas: aduelas moldadas no local e aduelas pré-moldadas.

Algumas das vantagens do método construtivo por balanços sucessivos aplicado a construções de pontes, de acordo com França (2015) e Perlingeiro (2006) são:

- Indicado em casos de pilares altos (maiores que 20 m) onde o escoramento acaba sendo inviável;

- Aumento do conforto do motorista por não ter juntas de dilatação;
- Redução da quantidade de pilares por propor vãos de larga extensão;
- Menor prazo de construção comparado a outros métodos construtivos;
- Propõe visual mais atrativo, por se tratar de uma estrutura mais esbelta;
- Limita o excesso em fôrmas de aduelas, quando pré-moldadas;
- Ausência de cimbramento, quando a aduela é pré-moldada;
- Maior rendimento da mão-de-obra, quando a aduela é pré-moldada.

Algumas das desvantagens do método construtivo por balanços sucessivos, conforme com Lima (2011) e Perlingeiro (2006) são:

- Há necessidade de um auto controle geométrico durante a construção;
- Esteticamente pode haver diferença de cor no concreto entre as aduelas na estrutural total;
- Há dificuldades em posicionar os cabos de protensão e acrescentar a nata de concreto pela bainha;
- As aduelas pré-moldadas são peças extremamente pesadas cotejado as de estruturas compostas, sendo preciso equipamentos específicos para transportar até o local de aplicação;
- Grande número de tarefas realizadas fora do local de obra, exceto com aduelas pré-moldadas pois o número de tarefas é reduzido comparada com aduelas moldadas no local.

4.1.4 Aduelas moldadas no local

A tecnologia de tabuleiros constituído por aduelas moldadas no local com emprego de protendido às pontes teve sua primeira aplicação no início da década de cinquenta na Alemanha, com a construção da ponte sobre o rio *Lahn*. (PALIGA, 2015).

Seu conceito construtivo dá-se através de cimbramentos metálicos, fixados no apoio de disparo ou em trechos já construídos, concretam-se as aduelas, e após o concreto atingir a resistência estipulada, aplica-se os cabos de protensão. Independente da técnica ser pré-moldada ou não, as aduelas de disparo sempre serão concretadas no local acima do pilar de sustentação. (PALIGA, 2015).

A execução deste meio construtivo, como mostra a figura 09, é caracterizada pela concretagem da aduela no local do por meio dos cimbramentos e fôrmas auto deslizantes, que ao decorrer da execução anterior, dá-se continuidade aos demais segmentos. É importante salientar a importância da execução de dois vãos simultaneamente em lados contrários, que serve para manter o equilíbrio da estrutura geral. (PERLINGEIRO, 2006).

Figura 09 – Execução de aduelas moldadas no local.



Fonte: (LIMA, 2011, p. 9).

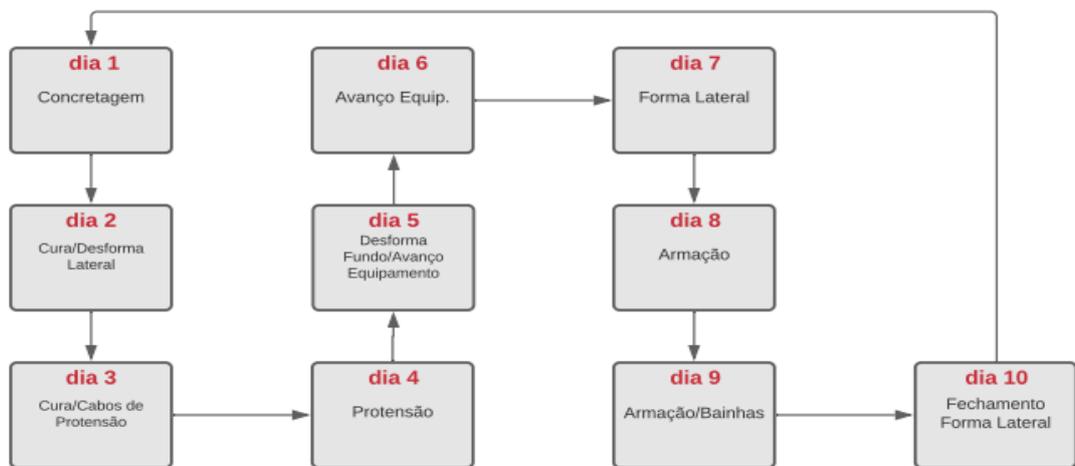
O método apresenta um fator favorável para superestruturas que tenham alta complexidade geométrica (alinhamento variáveis em planta e perfil, curvaturas de raio reduzido e aduelas de geometria variável), pois as cotas angulares e níveis das fôrmas podem ser facilmente ajustadas tendo como gabarito a aduela anterior. (TARRATACA, 2009).

Outro fator favorável para este tipo de construção no local, é que permite executar aduelas de larguras maiores comparada com aduelas pré-moldadas, justamente por não necessitarem de transporte. (LIMA, 2011).

O ciclo médio de execução de uma aduela é de 5 a 10 dias. O concreto deve atingir alta resistência inicial em poucos dias para ser submetida a protensão pré-tensionada. A etapa de protensão, normalmente varia de 2 a 4 dias, com a aduela protendida é possível fazer o deslocamento do cimbramento para executar a próxima aduela. (FONSECA, 2015; REZENDE, 2007).

O fluxograma abaixo, esquematizado por Rezende (2007), ilustra o processo construtivo em etapas da execução de aduelas moldadas no local.

Figura 10 – Fluxograma de fases em respectivos dias de execução.



Fonte: Adaptado pelo autor. (REZENDE, 2007, p. 6).

4.1.5 Aduelas pré-moldadas

A construção de pontes com tabuleiros com aduelas pré-moldadas deu-se início na França, durante a década de sessenta, com a construção da ponte *Choisy-le-Roi*. Desde então, dos últimos quarenta anos, esta tecnologia construtiva ainda é a mais utilizada em construções de pontes de grande extensão, pois apresenta excelente grau de rendimento. (DONG *et al.*, 2008; TARRATACA, 2009).

Esse rendimento dá-se pelo fator econômico e pelo prazo de execução da obra, com a utilização de aduelas pré-moldadas é possível executar superestruturas em menos períodos e com menor mão-de-obra comparada com a execução de aduelas moldadas no local. A tecnologia por balanço sucessivo com aduelas pré-moldadas permite construir vãos na ordem dos 100 m em 7 a 12 dias. (LIMA, 2011; SOUSA, 2013; TARRATACA, 2009).

A execução deste meio construtivo, ilustrado na figura 11, é caracterizada pela colocação ordenada das aduelas pré-moldadas. Na ligação dos segmentos, as aduelas são agrupadas face a face entre as superfícies a serem ligadas por uma cola polimerizável a base de resina epóxi, e depois são submetidas ao processo de protensão pós-tracionada. (PAIXÃO, 2015).

Figura 11 – Vãos em fase construtiva com uso de aduelas pré-moldadas.



Fonte: *Paul-Emile Durand*. (STRUCTURAE, 1998).

Disponível em: <<https://structurae.net/en/media/177590>>.

O considerado vão econômico de uma ponte está entre os 150 a 450 m. Normalmente, uma ponte construída por esta tecnologia de aduelas pré-moldadas por balanços sucessivos, tem como vão central, um vão econômico. (SOUSA, 2013; TARRACATA, 2009).

Figura 12 – Vão central da ponte *Wadi Leban*.



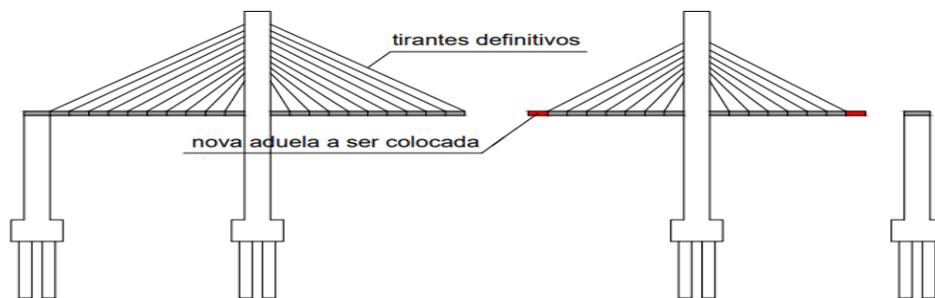
Fonte: *Adrian Peret*. (STRUCTURAE, 1998).

Disponível em: <<https://structurae.net/en/media/156818>>.

Com esta tecnologia construtiva com aduelas pré-moldadas é possível vencer vãos acima de 400 m de comprimento, isto só é possível com o auxílio de tirantes definitivos ou conhecidos também como “estais”. (TARRACATA, 2009).

O emprego de tirantes definitivos em pontes, como ilustra a figura 13, inicia-se com a execução do tabuleiro após a construção de uma torre-suporte. As aduelas vão sendo executadas pelo método balanço sucessivo e após sua colocação é fixado os cabos de suspensão na aduela até a torre-suporte. O sistema acomoda todas as aduelas na sua posição final até o vão estar completo. (SOUSA, 2013).

Figura 13 – Processo construtivo com recurso de tirantes definitivos.



Fonte: Adaptado pelo autor. (SOUSA, 2013, p. 15).

Referente ao meio de fabricação, as aduelas pré-moldadas são construídas próximos a obra, propondo um melhor controle de qualidade e agilidade quanto a sua produtividade. Os meios de fabricação de aduelas pré-moldadas são em sistemas *short-line* ou *long-line*. (LIMA, 2011; PERLINGEIRO, 2006).

O sistema *short-line*, descrito por Almeida (2000 apud PERLINGEIRO, 2006, p. 15):

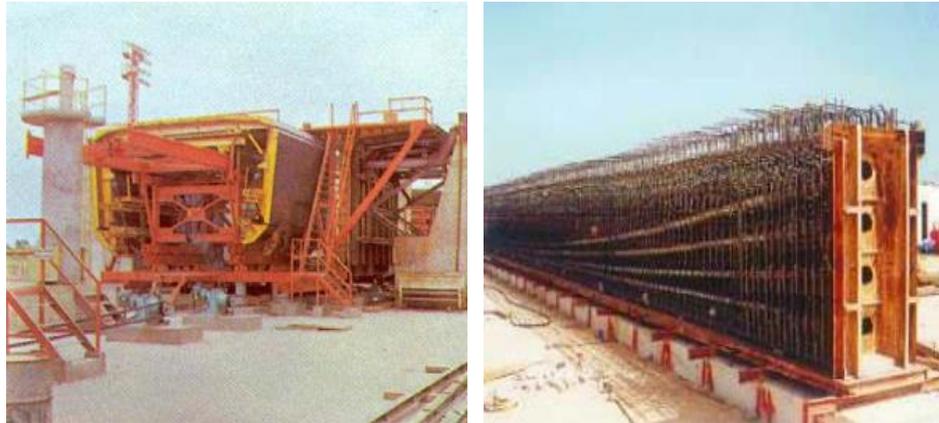
Utiliza-se uma única forma metálica com comprimento fixo, contemplando todas as peculiaridades da geometria das obras em planta e em perfil, torna-se sofisticada e de custo elevado – o que só se justifica em pontes muito extensas. Cada aduela é moldada contra a anteriormente executada de forma a permitir o perfeito acoplamento e evitar, portanto, a quebra de cantos devido à concentração de tensões oriundas da protensão. Não são necessárias grandes áreas de trabalho quando se faz a opção pelo uso desta técnica.

O sistema *long-line*, descrito por Almeida (2000 apud PERLINGEIRO, 2006, p. 15):

O canteiro de moldagem deve ter dimensões maiores, pois nesse sistema as aduelas são produzidas sobre um berço longo que reproduz um trecho da ponte (normalmente um vão da obra), podendo ser reaproveitada para vãos

análogos. Para a garantia do perfeito acoplamento das aduelas concreta-se alternadamente, isto é, primeiro as aduelas pares e depois as ímpares de modo que as primeiras sirvam de forma para as últimas. Esse sistema é mais apropriado e econômico para pontes menos extensas, pois permite a utilização de forma de madeirite plastificado, sendo preferencialmente aplicado em pontes de eixo reto ou com curvatura constante.

Figura 14 – Sistema *short-line*. Figura 15 – Sistema *long-line*.



Fonte: (PERLINGEIRO, 2006, p. 14).

Após sua fabricação, quando a aduela atingir a resistência mínima para ser transportada (maior ou igual a 70% do f_{ck} de projeto), a mesma é armazenada em um espaço onde fará seu processo final de cura. (SOUSA, 2013).

O espaço para armazenamento das aduelas precisa ser devidamente dimensionado de modo que não haja possíveis atrasos no cronograma da obra pois o tempo de instalação das adulas é menor do que o tempo de sua fabricação, busca-se também dimensionar um espaço adicional para manobrar veículos que transitam entre as peças. (SOUSA, 2013).

Figura 16 – Pátio de pré-moldados.



Fonte: (SOUSA, 2013, p. 24).

Lima (2011, p. 21), cita que: “[...]. O adequado é utilizar aduelas com comprimento de 3 a 4 m, pois é mais econômico quanto à utilização das fôrmas e no caso de aduelas pré-fabricadas limita-se o preso próprio das mesmas, não havendo necessidade de equipamentos especiais para içamento, reduzindo o custo.”

4.1.6 Lançamento de aduelas

Quanto ao lançamento das aduelas pré-moldadas, o carregamento pode ser feito por meio de lançadeiras com sistema de rolamento que permite o deslocamento das aduelas até o local desejado. Nesse sistema as aduelas podem ser recebidas pela lançadeira a partir do tabuleiro já construído, sendo muito útil em casos onde o meio de construção tem difícil acesso. (SOUSA, 2013; TARRATACA, 2009).

As lançadeiras treliçadas têm um alto rendimento de operação em variados tamanhos de vãos, entre 60 e 110 m, podem operar também em vãos que tenham um pequeno grau de curvatura. Apesar de ser um sistema um tanto complexo, esse recurso se torna o método de içamento mais eficiente por conseguir içar duas peças pré-moldadas ao mesmo tempo. O equipamento junto com uma boa operação atinge uma margem de montagem de 16 aduelas por dia. (SOUSA, 2013; TARRATACA, 2009).

Figura 17 – Vista de uma lançadeira treliçada.



Fonte: (TARRATACA, 2009, p. 66).

Outro meio de lançamento de aduelas pré-moldadas é com o recurso de guas. Nessa solução construtiva a grua eleva a aduela individualmente ao local desejado. O procedimento não tem a mesma agilidade e desempenho do que uma lançadeira, mas favorece um baixo investimento no processo de colocação de aduelas. O içamento por guas é viável onde o local de aplicação tem fácil acesso, como exemplificado na figura 18. (SOUSA, 2013; TARRATACA, 2009).

Figura 18 – Lançamento de aduela pré-moldada por meio de grua.



Fonte: (SOUSA, 2013, p. 10).

Com isto, deve-se dispor de equipamentos altamente calibrados para o carregamento das aduelas. O transporte e a colocação exigem cuidados especiais pois o peso próprio das aduelas varia de 50 a 150 toneladas. (TARRATACA, 2009).

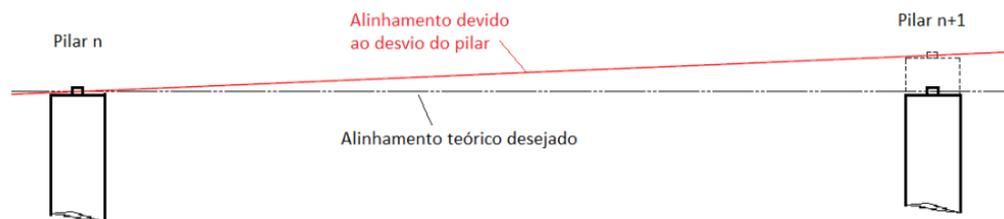
4.1.7 Geometria

Para que seja possível alcançar uma superestrutura corretamente alinhada é indispensável um estudo geométrico durante toda a fase de execução da ponte. Os desvios geométricos podem aparecer por inúmeros motivos e em diferentes fases da construção da obra. (SOUSA, 2013).

O controle geométrico de uma ponte é feito topograficamente através de recursos computacionais baseados em dados do traçado teórico da ponte e da geometria da aduela fabricada anteriormente. (SOUSA, 2013).

Um dos eventuais desvios que interferem na geometria do tabuleiro é a cota de um pilar abaixo da cota desejado, causando desalinhamento vertical de todo tabuleiro. (SOUSA, 2013).

Figura 19 – Alteração do alinhamento vertical do tabuleiro sob desvio da cota do pilar.

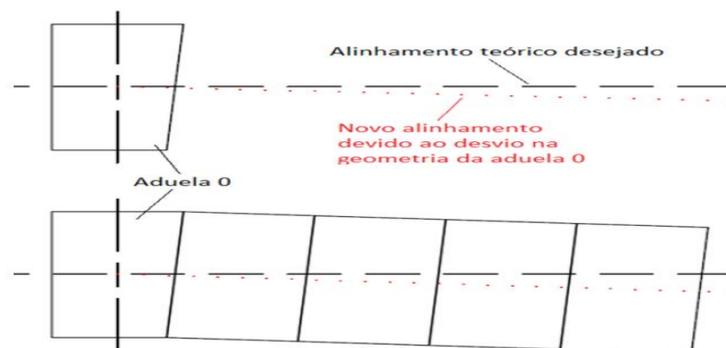


Fonte: (SOUZA, 2013, p. 50).

Outro erro de desvio geométrico que pode ocorrer é durante a fabricação das aduelas, as fôrmas devem estar devidamente alinhadas e bem travadas, de modo que o concreto não faça a fôrma “estourar”, caso ocorra e não seja corrigido antes de sua colocação, o alinhamento não estará em conformidade com o alinhamento da aduela anterior. Um desnível de poucos milímetros reflete desvios significantes nos demais segmentos do vão ponte. (SOUSA, 2013).

Outro tipo de desvio, pode ocorrer na execução da primeira aduela sobre o pilar, chamada de “arranque” ou “disparo”, é fundamental para a geometria linear do tabuleiro que a aduela esteja ajustada o mais próximo da posição de projeto. A não ocorrência do alinhamento de projeto pode causar desvios significantes em planta do tabuleiro, como exemplificado na figura 20. (SOUSA, 2013).

Figura 20 – Alteração do alinhamento devido ao desvio na geometria da aduela de disparo.



FONTE: (SOUSA, 2013, p. 51).

4.1.8 Concreto e qualidade

Estruturas compostas por concreto protendido exige uma série de fatores de controle de qualidade. O f_{ck} , por exemplo, deve beirar em aproximadamente 30 e 50 MPa, que resulta em elementos estruturais mais esbeltos. No caso de aduelas pré-moldadas para pontes a resistência deve ultrapassar a marca dos 40 MPa. (BASTOS, 2018).

Algumas das vantagens em utilizar o concreto protendido, de acordo com Bastos (2018) são:

- Permitem a redução das dimensões das peças, diminuindo o peso próprio.
- Possuem maiores módulos de elasticidades, o que diminui as deformações imediatas, a fluência e a retração, ou seja, as flechas e as perdas de protensão são menores;
- Geralmente são mais impermeáveis, o que é importante para diminuir a possibilidade de corrosão da armadura de protensão, que, por estar sob tensões muito elevadas, são mais suscetíveis à corrosão.

A utilização do cimento CP V ARI é bastante utilizada na confecção de concreto para execução de aduelas, tanto nas pré-moldadas quanto nas moldadas no local, pois permite a aplicação de trações em um curto período, justamente porque a ação do cimento CP V ARI fornece uma excelente resistência inicial, aproximadamente 70% do f_{ck} em 12 horas. Em vista que, as aduelas moldadas no local necessitam de uma alta resistência inicial para ser aplicado a força de protensão. E as aduelas pré-moldadas, necessitam também de uma alta resistência inicial para ser transportada até a central de armazenagem. (BASTOS, 2018; SOUSA, 2013).

O traço do concreto também deve atender exigências descritas pela ABNT NBR 12655 de 2015. A tabela 01, classifica a relação água/cimento, classe de concreto e consumo de cimento por m^3 de concreto.

Tabela 01 – Relação água/cimento, classe e consumo de cimento.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	Concreto armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	Concreto protendido	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	Concreto armado	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	Concreto protendido	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento por m ³ de concreto (kg/m ³)	Concreto armado e protendido	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

Fonte: Adaptado, (ABNT NBR 12655:2015, p. 12).

Observado a tabela, como trata-se de peças em concreto protendido e classe de agressividade IV (classificado em um ambiente favorável a respingos de maré), a relação água/cimento deve ser menor/igual a 0,45. A resistência característica do concreto deve ser maior/igual do que 40 MPa e o consumo de cimento Portland deve ser maior/igual a 360kg por m³.

4.1.9 Protensão

A origem do protendido, deu-se atrás de observações do comportamento de barris de vinho e de rodas de bicicleta. Duarte em sua entrevista para IBRACON (2015, p. 21), explica:

“O protendido veio de uma origem remota: os conceitos de barril de vinho e da roda de bicicleta. O que é o barril de vinho? São várias tiras de madeira, uma ajustada na outra. Se elas fossem coladas, o barril se abriria ao ser preenchido. Para que isso não aconteça, empurra-se contra o barril uma fita metálica de menor diâmetro que o maior diâmetro do barril, que, ao ser forçada contra o barril, estica e, assim, comprime uma peça na outra. Este é o conceito por trás da protensão: uma interação entre os materiais, aproveitando-se das melhores propriedades de cada material (do aço, a tração; da madeira, a compressão).”

Sabe-se que o concreto é um material resistente às tensões de compressão, porém sua resistência a tração fica na ordem de 10% da resistência à compressão. A protensão em peças de concreto armado surgiu no intuito de diminuir as tensões de tração. (PFEIL, 1984).

O processo de protensão entende-se como a aplicação de tensões prévias ao concreto, essas tensões são capazes de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob diversos tipos de carregamento. (PFEIL, 1984; SILVA, 2020).

Segundo Pfeil (1984), algumas das vantagens da utilização do protendido no concreto:

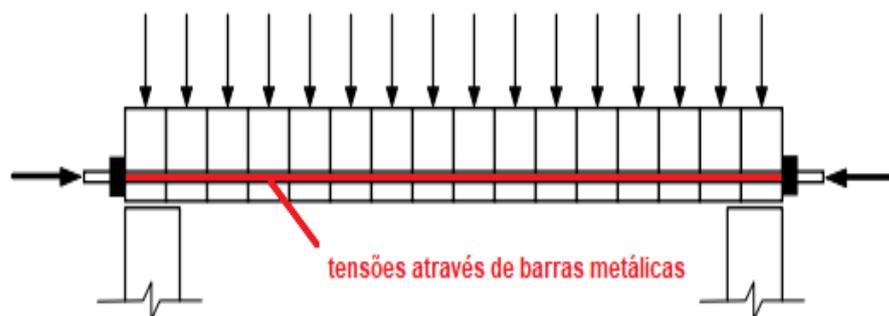
- Reduz a incidência de fissuras;
- Reduz a quantidades necessárias de concreto e de aço, devido ao emprego eficiente de matérias de maior resistência;
- Permite vencer vãos maiores do que as de concreto armado convencional.

Em sua mesma entrevista para IBRACON (2015, p. 22.), Duarte questiona:

“Qual é a grande vantagem do concreto protendido? É vencer grandes vãos, como o de pontes e viadutos. Dessa forma, de 1928 a 1935, Freyssenet desenvolveu um sistema construtivo de concreto protendido para pontes e viadutos [...]. Além do aço para protensão, Freyssenet elaborou a bainha por onde esse aço passaria e poderia ser alongado e as ancoragens de argamassa para segurar essas cordoalhas de aço em suas pontas. Com o fim de Segunda Guerra Mundial, a Europa e, principalmente, França e Alemanha, tiveram que ser reconstruídas, principalmente suas pontes e viadutos. Com isso, França e Alemanha assumiram o protagonismo desde então quanto à tecnologia do concreto protendido para pontes e viadutos, com os sistemas alemães e franceses espalhando-se pelo mundo.”

Perante o questionamento, a ideia de protensão às pontes, é a submissão da estrutura de concreto armado às forças de compressão, fornecidas pelas barras metálicas, chamadas de “cordoalhas”. (VERÍSSIMO *et al.*, 1998).

Figura 21 – Vão construído pela união de blocos pré-moldados através de protensão.



Fonte: Adaptado, (VERÍSSIMO *et al.*, 1998, p. 2).

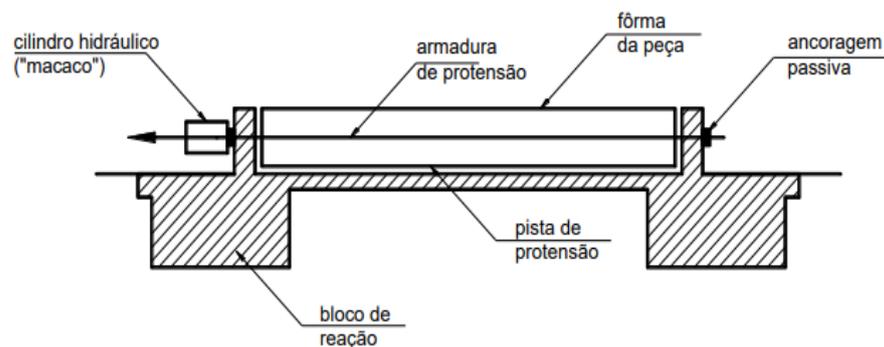
No entanto, existem duas formas de aplicar a força de protensão em peças de concreto, os dois processos entendem-se como protensão pré-tracionada e pós-tracionado, ambas serão discutidas nos sub assuntos abaixo para melhor entendimento.

4.1.9.1 Protensão pré-tracionada

No processo de protensão pré-tracionada, a cordoalha tem uma de suas extremidades ancorada, e na outra extremidade é aplicada uma força de tração através de equipamentos hidráulicos, a força de tração deve ser menor que a tensão limite elástico do aço. (CARVALHO, 2012; BASTOS, 2018).

Após a cordoalha estiver estirada, é feita a concretagem da peça, ficando em repouso até o concreto atingir a resistência estipulado em projeto, concluída a etapa anterior, o aço de protensão é desprendido da ancoragem, e como o aço é um material elástico que tende voltar ao seu estado inicial, esta força de elasticidade aplica uma tensão que comprime toda seção transversal da peça concretada. (CARVALHO, 2012; BASTOS, 2018).

Figura 22 – Esquema de protensão pré-tracionada.



Fonte: (BASTOS, 2018, p. 9).

Em suas notas de aula, Bastos (2018, p. 10) afirma: “A transferência da força de protensão da armadura para a peça ocorre devido à aderência entre o concreto e a armadura, sendo este processo também chamado “concreto protendido com aderência inicial”.”

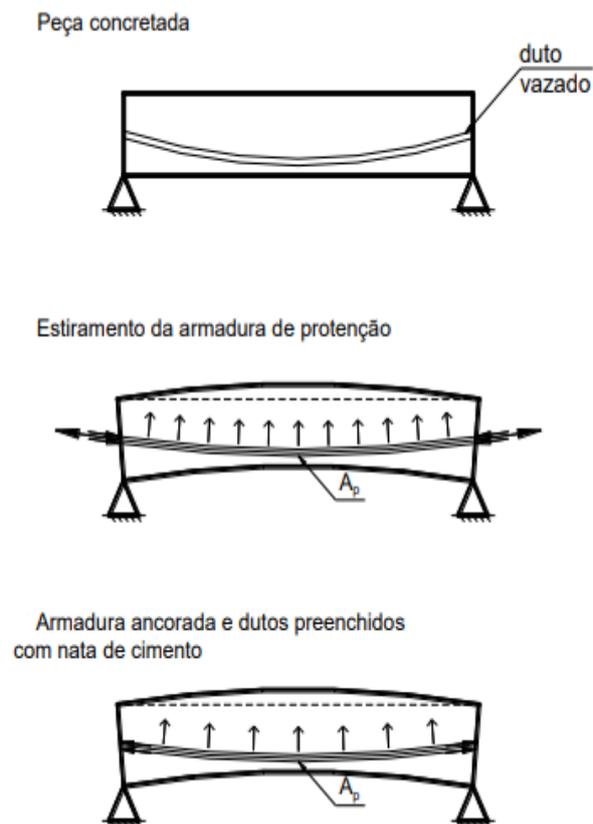
Este processo de protensão é utilizado na construção de pontes com aduelas moldadas no local.

4.1.9.2 Protensão pós-tracionada

Já no processo de protensão pós-tracionada, a peça não recebe qualquer tipo de força-tração antes de sua fabricação, sua estrutura é concretada com uma espécie de duto vazado ou conhecida como “bainhas”, que é um canal onde passa o aço de protensão, conhecido como “cordoalhas”. (BASTOS, 2018).

Assim que a peça concretada for posta em seu local de aplicação, a armadura de protensão é introduzida pela bainha, e uma das suas extremidades é feita a ancoragem, e na outra extremidade é feita o estiramento do aço. Na sequência, a bainha é preenchida por uma nata de concreto, que é responsável por fazer a aderência da armadura com a peça já concretada. (BASTOS, 2018).

Figura 23 – Esquema de protensão pós-tracionada.



Fonte: (BASTOS, 2018, p. 13).

Este processo de protensão é utilizado na construção de pontes com aduelas pré-moldadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica construtiva por balanços sucessivos trouxe discussões acerca, através de uma análise desenvolvida em diversos tópicos. No entanto, a principal discussão a ser comentada deste trabalho é sobre seus dois meios de aplicação de sua superestrutura.

Levando em consideração os seguintes pontos: controle de qualidade, produtividade e economia em construções de pontes, superestruturas em aduelas pré-moldadas têm vantagens acima das pontes constituídas por aduelas moldadas no local. Tendo em vista que o emprego de aduelas moldadas no local é necessário na execução de aduelas de disparo e em pontes que tenham um certo grau de curvatura.

Em escala mundial, nota-se a preferência em relação a este meio de superestrutura, aduelas pré-moldadas propõe uma obra mais rápida de ser construída, e quanto maior a rapidez de construção, maior será a economia. Também no quesito controle de qualidade torna-se mais viável, caso haja necessidade de condenar, reforçar ou extrair contraprovas de alguma aduela pré-moldada que apresente no diagnóstico de qualidade um baixo f_{ck} .

De modo geral, nos últimos quarenta anos, se vê a vasta inclusão desta técnica construtiva segmentar no mundo. Confirmando então, a eficiência desta tecnologia conhecida como balanço sucessivo que é bastante aplicada em construções de pontes pelo mundo.

Questiona-se que o sistema construtivo citado só se torna viável para pontes de larga extensão, o vão principal da ponte, se houver, deve vencer 150 metros ou mais, e que os vãos secundários vençam no mínimo 50 metros. Estas seriam as condições ideais para se aplicar o método construtivo por balanços sucessivos, pois a técnica exige o emprego de concreto protendido que traz altos custos por se tratar de uma tecnologia que necessita de mão-de-obra e equipamentos especializados.

E fica a sugestiva, dar-se continuidade a temática ampliando mais conhecimento na linha de pesquisa sobre estudos e desenvolvimentos de sistemas estruturais, trazendo quantitativos numéricos de cálculos e comportamento estrutural direcionado a superestruturas construídas em aduelas pré-moldadas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2015: Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, S. S. P. **Disciplina: 2139 – concreto protendido. Notas de aula**. UNESP. Bauru, São Paulo, 2018.
- CARVALHO, R. C. **Estruturas em concreto protendido – pré-tração, pós-tensão, cálculo e detalhamento**. Editora Pini. São Paulo, 2012.
- DNIT. **Anteprojeto**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília, 2014.
- DONG, X. HUICHI, L. CHAO, L. **Precast segmental design and construction in China**. Dept. of Bridge Engineering. Tongji University. Shanghai, China, 2008.
- FONSECA, F. M. **Análise de pontes construídas em balanços sucessivos**. Escola Politécnica, UFRJ. Rio de Janeiro, 2015.
- FRANÇA, A. L. V. F. **Métodos executivos de obras de arte especiais: estudo de caso em construção em meio urbano**. Escola Politécnica, UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Edição. São Paulo, 2002.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO – IBRACON. **Concreto protendido – aplicando a protensão em pontes, pisos e reservatórios e edificações**. Revista IBRACON. São Paulo, 2015.
- LIMA, V. S. **Projeto de superestruturas de pontes de concreto protendido aplicando a técnica de balanços progressivos**. UFSCar. São Carlos, 2011.
- PAIXÃO, O. R. **Análise mecânica e estrutural de balanços sucessivos aplicados à construção de pontes**. PUC/RJ. Rio de Janeiro, 2015.

PALIGA, A. R. **Modelagem tridimensional de estruturas compostas por aduelas pré-moldadas de concreto com protensão externa, através do método dos elementos finitos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Rio Grande do Sul, 2015.

PERLINGEIRO, L. P. S. M. **Modelo para análise de estruturas de pontes segmentadas de concreto com protensão externa**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

PFEIL, W. **Concreto protendido vol.1** – Introdução. 2ª. Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. Rio de Janeiro, 1984.

REZENDE, P. M. **O processo de balanços sucessivos em aduelas pré-fabricadas de concreto na construção de pontes e viadutos**. II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Associação Brasileira de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, Q. W. **Concreto protendido** – Conceito básico de protensão, aspectos gerais e históricos sobre a disciplina. UFAM. Manaus, 2020.

SOUSA, P. M. R. **Controlo geométrico de tabuleiros de pontes construídas tramo a tramo com aduelas**. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013.

STRUCTURAE. **International Database and Gallery of Structures**. (EN). 1998. Disponível em: <<https://structurae.net/en>>. Acesso em: 09 de novembro de 2020.

TARRATACA, T. J, S. **Construção de pontes com aduelas pré-fabricadas**. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2009.

THOMAZ, E. C. S. **Notas de aula. Pontes em balanço sucessivo – Ponte em balanços sucessivos** – Eng. Emílio Baumgart. IME – Instituto Militar de Engenharia. 2010. Disponível em: <www.ime.eb.br>. Acesso: em 26 de março de 2020.

VERÍSSIMO, S. G. JUNIOR, C. L. M. K. **Concreto protendido: Fundamentos básicos**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 1998.

VITÓRIO, J. A. P. **Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão**. CREA/PE. Recife, 2002.