

Estudos de Montagem de Pontes Estaiadas com Determinação das Forças a serem aplicadas aos Estais

Erection study of cable stayed bridges with determination of the forces to be applied to the stay cables

André Esteves Ferreira de Almeida (1); Benjamin Ernani Diaz (2)

(1) *Engenheiro Civil, Arte Pontes*

(2) *Prof. Emérito, Dr.-Ing. SEBED
andreefalmeida@gmail.com*

Resumo

Uma das fases mais importantes de um projeto de ponte estaiada trata do estudo da montagem destas pontes. O método que é proposto para esta determinação é começar o estudo com as forças finais do projeto consideradas inicialmente provisórias nos estais. Em seguida deve-se efetuar a análise de uma desmontagem da viga de rigidez, determinando nestas fases as forças a serem instaladas em cada estai para cada aduela removida. O estudo da montagem é feito inicialmente sem a consideração de fluência e retração. Os esforços obtidos na análise final de montagem precisam ser exatamente os mesmos previstos na relação das forças consideradas provisórias dos estais. Em seguida deve ser feita a montagem considerando a retração e fluência o que irá modificar as forças (provisórias) inicialmente previstas (não será abordado neste artigo). Para permitir a análise de montagem e desmontagem é necessário que seja criado um modelo da viga de rigidez e dos estais com elementos considerados fantasmas. Isto é necessário para que o modelo seja definido inteiramente de início para que seja possível acrescentar ou eliminar as aduelas de forma consistente de modo a que a deformada da viga de rigidez seja contínua e definida geometricamente de forma matemática. Um exemplo de uma montagem de uma ponte estaiada é mostrada no trabalho.

Palavras-Chave: Ponte Estaiada; Análise estrutural, Etapas Construtivas, Balanços Sucessivos

Abstract

The design phase considering the construction stages of a bridge is very important. The initial phase of this investigation is to study the final forces of the structures after erection, which can be perhaps preliminary as shown herein. The study begins with the theoretical analysis of the disassembling of the bridge stiffening beam. The stay forces during the disassembling of each segment are recorded to be applied later in the erection phase. The erection study is made initially without consideration of concrete shrinkage and creep. The internal forces obtained in this erection phase must be the same as the forces determined in the analysis of the bridge disassembling. A new rheological analysis is performed considering at this time the concrete shrinkage and the creep. This last analysis will change the final forces initially determined (will not be covered in this article). In order to investigate the disassembling and assembling of the bridge it is necessary to consider a special structural element during the erection analysis called ghost structure. This is necessary to define the structure at the analysis beginning with very small stiffness properties, which are modified during the erection analysis allowing the proper definition of the real geometrical position of the stiffening beam. A case study is presented for an actual constructed roadway bridge.

Keywords: Stayed Bridge, Structural Analysis, Staged Construction, Cantilever construction.

1 Introdução

O projeto e a construção de pontes estaiadas apresentam uma série de desafios para os engenheiros envolvidos. Devido à grande complexidade da estrutura, dos elementos estruturais e dos processos construtivos, uma série de procedimentos para análise e dimensionamento vêm sendo desenvolvidos e aprimorados.

Especialmente no caso de pontes estaiadas, onde os componentes apresentam grande esbeltez e sensibilidade a efeitos de segunda ordem, a modelagem matemática para avaliação das fases construtivas e para a determinação da geometria final torna-se a preocupação central do projeto e execução desse tipo de estrutura.

Embora uma ponte estaiada também apresente desafios no dimensionamento de suas peças, é na determinação das forças iniciais nos cabos e das contra-flechas para obtenção da geometria final da ponte que se encontram as maiores dificuldades do ponto de vista técnico e onde são cometidos os maiores erros.

A simulação das etapas construtivas pode ser efetuada com auxílio dos programas de análise modernos. Porém, devido à grande complexidade desse tipo de estrutura, e da grande diversidade de efeitos não lineares, o processo de modelagem da estrutura, em todas as suas fases de construção, demanda grande trabalho e conhecimento de técnicas específicas para solução de diversos problemas.

Entre esses problemas podemos citar a determinação das forças de trabalho dos estais, objetivando uma melhor distribuição de esforços na estrutura, a introdução de forças nos elementos durante a construção, a modelagem de apoios provisórios e de efeitos reológicos que não apenas provocam redistribuição de esforços na estrutura, como também influenciam decididamente a geometria da estrutura.

Além disso, deve-se destacar também que os softwares comerciais de análise não foram desenvolvidos especificamente para a modelagem desse tipo de estrutura. Esses programas possuem a vantagem de disponibilizar módulo de etapas construtivas, que permitem o cálculo dos diversos modelos parciais por meio de comandos que devem ser fornecidos de acordo com a sequência construtiva da estrutura. A consideração dos efeitos reológicos também é possível nesse tipo de análise, desde que as datas de execução de cada procedimento sejam fornecidas.

Esse trabalho tem como objetivo expor as técnicas utilizadas na modelagem em elementos finitos de pontes estaiadas, levando em conta as fases construtivas e objetivando a determinação das forças iniciais a serem introduzidas nos estais, que são fornecidas ao pessoal de campo, para que seja atingida a distribuição de esforços e a geometria final desejada.

Essas técnicas serão aplicadas ao projeto da ponte Cardeal Dom Eugênio Sales como um exemplo de aplicação dos conceitos apresentados. O projeto é da firma italiana "Studio de Miranda Associati - Ingegneria Strutturale". Serão tomadas como base as forças finais nos estais fornecidas pelo projetista para determinação das suas forças iniciais. Não será avaliada, no presente artigo, a influência dos efeitos dependentes do tempo no concreto (fluência, retração, variação do módulo de elasticidade) na determinação das forças iniciais nas fases construtivas e na distribuição final de esforços no tabuleiro dessa ponte estaiada construída pelo método dos balanços sucessivos.

2 Metodologia para análise de pontes estaiadas com consideração do sistema construtivo

2.1 Conceitos gerais

O projeto de pontes estaiadas deve conter uma detalhada análise das fases construtivas durante o processo de montagem. Isso se deve, primeiramente, à necessidade de determinação das forças iniciais nos cabos a serem aplicadas em cada fase. Sendo esse tipo de estrutura altamente hiperestática, as forças iniciais não podem ser obtidas por métodos diretos, uma vez que a aplicação de força em um dos cabos altera a distribuição de força nos demais cabos. O ideal é que cada cabo seja protendido apenas uma vez, atingindo sua força de trabalho ao final do processo.

Existem duas estratégias possíveis para aplicação das forças nos estais durante as etapas construtivas. São elas:

- Introdução das forças definitivas: São aplicadas forças que não precisarão ser reajustadas. Essas forças vão sendo alteradas, paulatinamente, à medida que a estrutura vai sendo construída, até atingir a força desejada ao término da construção;
- Forças provisórias para fase de montagem e posterior balanceamento: São introduzidas forças visando especialmente as etapas construtivas. Após o término da construção e instalação de toda a carga permanente, deve ser efetuada a reprotensão de todos os estais em um processo chamado balanceamento.

O presente trabalho aborda o processo de introdução de forças definitivas, primeiramente, por ser o mais difundido e interessante do ponto de vista econômico, como também por requerer procedimentos mais complexos e abrangentes durante as etapas de análise.

A análise se inicia pela determinação do modelo numérico utilizado para a simulação do comportamento da estrutura. Inicialmente, carrega-se o modelo com as forças de serviço nos estais, que devem ser definidas anteriormente, e então, progressivamente, desmonta-se a estrutura mediante remoção de elementos e carregamentos obtendo-se, assim, as forças que devem ser introduzidas em cada etapa do processo de montagem. Apresenta-se, a seguir, todos esses procedimentos de maneira mais detalhada.

2.2 Definição do modelo ideal

Devido à grande complexidade das estruturas de pontes estaiadas, da relevância de muitos comportamentos não-lineares e do elevado número de etapas de análise, o modelo deve ser o mais simples possível para poupar capacidade de processamento. Para avaliação das etapas construtivas, esforços transversais à seção e pontos de concentração de tensões não costumam ser relevantes.

2.3 Determinação das forças de serviço ideais nos estais

A determinação das forças de serviço nos estais é um dos pontos mais importantes no projeto de pontes estaiadas. A escolha de um arranjo de forças mais adequado conduz a melhores distribuições de esforços, tanto no tabuleiro, quanto nos pilones.

Existem quatro métodos para determinação das forças de serviço nos estais: o método da viga contínua sobre apoios rígidos, utilizado para pré-dimensionamento; o método do equilíbrio das forças (CHEN, 2000); o método dos deslocamentos nulos (WANG, 1993); o método de otimização (HAN e YAN, 2000) e, o mais recente, método da força unitária proposto por JANJIC (2003). A apresentação detalhada desses métodos foge ao escopo do presente trabalho.

3. Conceito de pré-alongamento

Um conceito fundamental para a compreensão do comportamento de cabos, sempre presente no projeto e na execução de pontes estaiadas, é o de pré-alongamento. Quando se deseja obter as forças de projeto num dos estais ao final da montagem, fornece-se para a engenharia de campo a força do estai a ser imposta no instante de execução, logo que o estai é protendido pela primeira vez. Esta força vai depender da forma de montagem e das forças finais dos estais após a montagem. No modelo computacional de análise, as forças nos estais são introduzidas por meio de “carregamentos de alongamento” (strain) no estado indeformável da estrutura, com sua montagem finalizada. Do ponto de vista matemático, o pré-alongamento é a deformação por unidade de comprimento do elemento que, quando o mesmo possui as extremidades fixas, produz uma tensão proporcional a essa deformação segundo a lei de Hook. Ou seja, no modelo com suas ligações enrijecidas, ou sistema principal pelo método da rigidez, essas forças internas são determinadas para aplicação na análise que será procedida. Dessa forma, fica evidente que as forças no estado indeformável são diferentes daquelas obtidas ao final do processo de análise.

4. Carregamento do modelo com as forças de serviço nos estais

Para iniciar a análise, o modelo deve ser carregado com as forças de trabalho nos estais, conforme previsto no projeto. Como a alteração da força em um estai tem influência sobre os demais, é preciso determinar o conjunto de pré-alongamentos que, combinado aos carregamentos de peso próprio da estrutura e das cargas permanentes, resultam no conjunto de forças de trabalho previsto para todos os estais.

Pode-se resolver esse problema por meio de um processo iterativo, aplicando um alongamento unitário em cada estai separadamente. Com as forças resultantes de cada uma dessas análises, monta-se uma matriz $n \times n$, também denominada matriz de influência, como nos métodos para determinação das forças ideais. Nesse caso, as incógnitas são os carregamentos de deformações impostas nos cabos (strain loads) correspondentes aos pré-alongamentos e, nessa matriz de influência $[m]$, m_{ij} representa o esforço axial resultante no estai i devido à aplicação do alongamento unitário no estai j .

Se o modelo utilizado for linear, o vetor de alongamentos nos cabos $\{S\}$, ou de fatores multiplicadores, pode ser calculado diretamente em função do vetor de forças desejadas $\{F^0\}$, resolvendo o sistema de equações a seguir:

$$\{F^0\} = [m]\{S\} + \{F^d\} \quad (\text{Equação 1})$$

onde,

$\{F^0\}$ é o vetor de forças nos estais;

$[m]$ é a matriz de influência;

$\{S\}$ é o vetor de alongamentos ou fatores multiplicadores (incógnitas);

$\{F^d\}$ é o vetor forças nos cabos devidas às cargas permanentes.

Como o modelo apresenta comportamento não linear, um processo iterativo tem de ser aplicado. Para reduzir o número de iterações, as primeiras forças a serem utilizadas podem ser as obtidas em uma análise linear. Posteriormente, processa-se uma análise não-linear com os alongamentos obtidos no processo linear. Com as forças resultantes, calcula-se a diferença entre esse primeiro resultado e as forças de serviço previstas no projeto. Com essas diferenças, monta-se um vetor $\{\Delta_F\}$, utilizado na resolução da Equação 2, fornece o vetor $\{\Delta_S\}$ contendo os acréscimos que deverão ser somados aos pré-alongamentos aplicados anteriormente para a realização de uma nova iteração.

$$\{\Delta_F\} = [m] \cdot \{\Delta_S\} \quad (\text{Equação 2})$$

onde,

$[m]$ é a matriz de influência;

$\{\Delta_F\}$ é a matriz coluna que contém a diferença entre as forças previstas no projeto e aquelas obtidas na análise do modelo na última iteração;

$\{\Delta_S\}$ é a matriz coluna que contém os acréscimos aos pré-alongamentos a serem aplicados na próxima iteração.

Esse processo deve ser repetido diversas vezes até que as forças resultantes nos estais se aproximem das forças de projeto, dentro de uma margem de tolerância previamente estipulada.

Esse procedimento também pode ser efetuado por meio de ferramentas específicas disponíveis nos programas de análise ("CSI Load Optimizer" que acompanha o software SAP2000 ou "Unknown Load Factor" no software MIDAS Civil).

5. Processo de desmontagem (*backward analysis*)

O processo mais comum e largamente citado na literatura para análise das etapas construtivas em pontes estaiadas é a chamada análise retroativa (*backward analysis*). Seguindo uma reversão, ou seja, no sentido inverso do processo de execução da ponte, uma análise, etapa por etapa, pode ser desenvolvida para a determinação da geometria da estrutura em cada fase, bem como para obtenção: das forças em cada estai, das forças iniciais a serem aplicadas nos estais e dos esforços para verificação de cada subestrutura.

Os carregamentos que vão sendo removidos são aplicados em sentido inverso no correspondente modelo da subestrutura onde ocorre a remoção. As treliças de escoramento entram no modelo como cargas que devem ser aplicadas nos pontos de apoio, tanto no sentido positivo quanto negativo, à medida que a mesma se movimenta.

Nesse caso, os modelos criados em sequência devem levar em consideração os deslocamentos nodais da etapa anterior para que os efeitos de segunda ordem de todos os carregamentos sejam atualizados.

De uma maneira geral, a maioria dos projetistas inicia a etapa de análise das fases construtivas pelo processo de desmontagem. Isso se deve ao fato de que, como visto anteriormente, toda a estrutura da ponte é dimensionada para uma situação ideal de serviço que pode ser reproduzida em um modelo final único. Além disso, esse processo é crucial na determinação das forças iniciais a serem aplicadas nos estais durante o processo de construção.

O grande problema da análise retroativa é que os efeitos reológicos, como fluência e retração, bem como qualquer inconformidade apresentada durante a execução (como erros de locação e variações no módulo de elasticidade do concreto), não podem ser incluídas na análise e nem corrigidas pontualmente para adequação com os dados de campo.

Diversas técnicas foram desenvolvidas no trabalho ALMEIDA (2017), para conseguir vencer as diversas etapas de análise para estas fases de desmontagem.

6. Processo de montagem (*forward analysis*)

6.1 Conceitos gerais

Na análise por montagem (*forward analysis*), as diversas estruturas parciais são processadas seguindo o sentido real de construção da estrutura. Nesse caso, diferentemente do processo de desmontagem, os carregamentos são aplicados no sentido correto. Assim como na desmontagem, as treliças de escoramento entram no modelo como cargas que devem ser aplicadas nos pontos de apoio, tanto no sentido positivo, (quando incluídas em um determinado ponto), quanto no negativo (quando são removidas).

A primeira dificuldade encontrada no processo de montagem é a determinação das forças iniciais que precisam ser aplicadas nos estais. Essas forças, conforme exposto anteriormente, precisam ser retiradas do processo de desmontagem. Muitos autores propuseram o método da desmontagem como suficiente para a análise das etapas construtivas (BEHIN e MURRAY, 1990; REDDY et al, 1999; WANG et al, 2004).

De fato, a análise retroativa pode ser utilizada, não só para determinação das forças iniciais nos estais, como também para avaliação dos esforços e dimensionamento da estrutura em cada etapa. Porém, caso haja alguma discrepância entre os resultados da análise e o verificado em campo, a análise retroativa não pode ser atualizada para corrigir esses problemas. Para controlar e corrigir o processo durante a execução, a análise progressiva é a mais indicada. Quando as diferenças encontradas são consideráveis, novos tensionamentos podem ser necessários e as implicações dessas alterações na estrutura final só podem ser avaliadas pelo processo de montagem. Além disso, a variação de temperatura nos elementos também pode ser mais facilmente avaliada pelo processo de montagem.

Conforme citado anteriormente, apenas por meio da análise progressiva pode-se calcular os efeitos reológicos como fluência, retração e relaxação. A utilização dos softwares

comerciais na análise progressiva requer alguns cuidados especiais devido à algumas particularidades dos módulos de análise de etapas construtivas desses programas.

6.2 Correção da geometria durante a montagem (Método da estrutura fantasma)

Quando se utilizam os programas comerciais no método da montagem, são aplicadas algumas descontinuidades entre os segmentos incluídos no modelo ao longo do processo. Cada novo elemento adicionado no modelo é inserido na posição original indeformada. Dessa forma, os elementos que estão ligados entre os nós já presentes e os nós que serão adicionados ficam inclinados entre a posição deformada (etapa anterior) e a posição indeformada (novos elementos).

Esse procedimento interno dos programas não apenas gera deformações na estrutura final, como também introduz esforços indesejados em uma análise não linear. Além disso, a determinação das contra-flechas, que precisam ser fornecidas para a equipe de campo, fica praticamente inviabilizada.

Para solucionar esse problema, utiliza-se um método chamado estrutura fantasma (*ghost structure*). A estrutura é adicionada completa na primeira etapa da montagem, porém, com características de seção quase nulas (muito próximas de zero). À medida que a estrutura vai avançando, vão se alterando as características e incluindo o peso da estrutura. Dessa forma, os novos elementos vão sendo adicionados em posições mais próximas da realidade.

6.3 Forças de abertura (*set-back*)

Outro ajuste que precisa ser feito durante a montagem é o das forças normais no tabuleiro e dos momentos fletores nos pilones. Quando se remove um elemento, como o fechamento central durante o processo de desmontagem, o programa de análise, por um procedimento padrão, aplica os esforços internos dos elementos nos nós adjacentes que ficaram livres.

Teoricamente, quando o segmento central é inserido na estrutura, o mesmo entra em uma situação de esforços normais nulos, o que não é conveniente em um tabuleiro de concreto. Por conta dos efeitos reológicos, as componentes horizontais dos estais tendem a tracionar o trecho central ao longo do tempo, podendo conduzir a esforços excessivamente altos para o dimensionamento.

Além disso, durante a construção são introduzidos momentos fletores nos pilones que podem complicar o dimensionamento e a estabilidade da estrutura quando tratados em conjunto com aqueles produzidos pelas cargas acidentais. Conforme visto anteriormente, a determinação das forças ideais nos estais visa também anular esses esforços de flexão devidos à carga permanente no pilone, por uma questão de economia de materiais.

Para reproduzir essa situação de esforços iniciais no pilone, que é tomada como ponto de partida na desmontagem, aplica-se uma força no tabuleiro introduzida por meio de macacos hidráulicos posicionados contra as duas metades da viga de rigidez.

Novamente, no trabalho de ALMEIDA (2017) foram apresentados diversos procedimentos para se poder levar em conta estas fases construtivas no estudo da montagem.

Apresenta-se, a seguir, algumas das técnicas utilizadas por GRABOW (2004) para correta modelagem da análise progressiva.

6.4 Carregando os estais com a força inicial (*target force*)

Para a inserção dos novos cabos com as forças iniciais previstas no modelo, é utilizada uma ferramenta de carregamento chamada "*Target Force*". Conforme demonstrado anteriormente, a determinação do alongamento que introduz uma força específica no cabo não pode ser feita de maneira direta por conta da não linearidade do modelo.

Como, de maneira geral, as pontes estaiadas apresentam comportamento não linear, faz-se necessária a utilização de um método iterativo, como o "*Target Force*". Esse tipo de carregamento busca atingir uma força pré-determinada no elemento por meio de um processo iterativo que, através do método de Newton-Raphson, aplica sucessivos alongamentos (carregamentos de "*strain*") no elemento, até que o mesmo atinja a força desejada.

7. Estudo de caso: Ponte Cardeal Dom Eugênio Sales

7.1 Descrição geral da Estrutura

As técnicas apresentadas anteriormente são aplicadas ao projeto da ponte Cardeal Dom Eugênio Sales. Trata-se de uma ponte estaiada executada pelo método dos balanços sucessivos, composta por três vãos com pilones isolados em forma de coluna (desligados entre si), e tabuleiro central. O vão central, que não está engastado nos pilones, perfaz um comprimento de 131,0 metros, enquanto os vãos laterais possuem 39,0 metros de comprimento cada. Esse tabuleiro se apoia sobre aparelhos de apoio metálicos, tanto nos apoios centrais (na região dos pilones) quanto nos apoios extremos. A distribuição dos estais nos pilones é feita em forma de semi-leque. O tabuleiro é suportado em cada lado por um total de 14 estais, sendo oito deles voltados para o vão central (estais de vante) e os outros seis para o vão lateral (estais de ré).

Apresenta-se, na Figura 1, uma fotografia da Ponte Cardeal Dom Eugênio Sales pronta e prestes a entrar em operação.



Figura 1 - Ponte Cardeal Dom Eugênio Sales (<http://www.demiranda.it/?portfolio=ponte-strallato-sullavenida-ayrton-senna-rio-de-janeiro-brasile>)

A seção transversal da ponte, que possui largura total de 26,3 m, é composta por duas vigas de concreto, com 1,90 m de altura por 2,0 m de largura, em suas extremidades, ligadas por laje e transversina. Essa seção comporta duas pistas, com 10,05 m de largura em cada sentido, bem como barreiras de protensão do tipo “New Jersey” e dois espaços livres em suas extremidades onde são instaladas as ancoragens dos estais.

7.2 Descrição do modelo computacional

Conforme exposto na seção 2.1, o modelo de pórtico plano com elementos de barra é suficiente para a análise estrutural das etapas construtivas de uma ponte estaiada. Sendo assim, esse tipo de modelo é adotado para a estrutura da ponte cardeal Dom Eugênio Sales. Além disso, optou-se por modelar apenas um quarto da ponte, levando em conta a simetria longitudinal e transversal da obra. Assim, um único pilone é modelado e as características de seção do tabuleiro são introduzidas para metade da obra (uma viga e meia laje). No centro da obra é imposta uma condição de contorno que restringe os deslocamentos longitudinais e rotações em torno do eixo transversal.

A Figura 2 apresenta uma visão geral do modelo em elementos finitos da ponte Cardeal Dom Eugênio Sales.

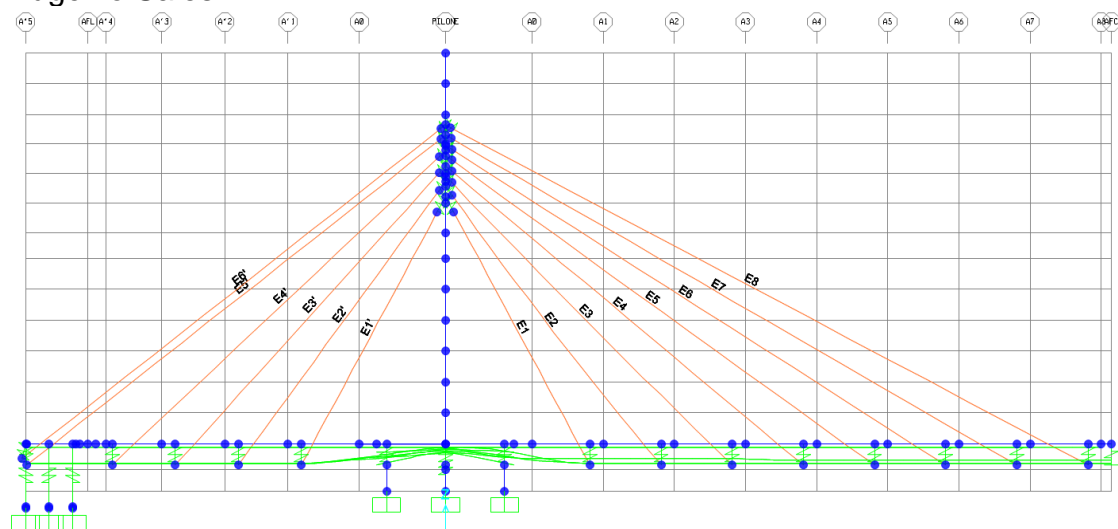


Figura 2 - Modelo em elementos finitos desenvolvido com o programa SAP2000 para análise da ponte Cardeal Dom Eugênio Sales (As linhas curvas em verde representam cabos de protensão).

7.3 Elementos da estrutura

No modelo desenvolvido com auxílio do programa SAP2000, o tabuleiro é constituído por 21 elementos de barra (“frame”) e o pilone por 16 elementos do mesmo tipo. As características das seções transversais do tabuleiro são calculadas para metade da obra com auxílio da ferramenta “Section Designer” disponível no programa SAP2000. No caso do pilone, o mesmo é modelado completo. No trecho onde se encontra a peça metálica superior pré-fabricada, calculam-se as características de uma seção homogeneizada com os diferentes materiais (concreto e aço).

Para facilitar a inserção dos elementos do tabuleiro em seus centros de gravidade, utilizou-se a ferramenta “insertion point”. Esse artifício, disponível no programa SAP2000, permite que se defina em que ponto da seção o eixo do elemento de barra é inserido. Tradicionalmente, nos programas de análise, os elementos de barra são inseridos no modelo com as características referentes ao seu centro de gravidade. No caso do modelo da ponte Cardeal Dom Eugênio Sales, adotou-se como referência o topo da seção transversal. Isso permite que os elementos de barra do tabuleiro sejam todos inseridos em uma mesma linha.

Como os estais da estrutura ficam ancorados no fundo das vigas do tabuleiro, utilizaram-se elementos de ligação rígida (“links”) para fazer a união entre o topo da laje e o fundo da viga, nos pontos de conexão com os estais, e também nos apoios definitivos e provisórios da estrutura. Esse tipo de ligação também foi utilizado no topo do pilone para o correto posicionamento das ancoragens dos estais nessa peça.

Os estais foram modelados como elementos de cabo (“cable”) para facilitar a análise em caso de destensionamento excessivo. É importante destacar que o estais poderiam ser modelados com elementos de barra (“frame”) sem grande prejuízo dos resultados finais. No entanto, em alguns projetos de pontes estaiadas, pode-se verificar o destensionamento, ou compressão, de algum desses elementos durante alguma das etapas construtivas. Sendo assim, a não linearidade intrínseca dos cabos é considerada iterativamente pelo programa SAP2000.

A protensão do tabuleiro foi modelada com elementos de protensão (“tendons”). Esses objetos lineares podem ser embutidos em outros objetos para simular os efeitos de pré-tensão e pós-tensão. Os elementos de protensão podem ser modelados tanto como estruturas independentes (objetos) tanto quando carregamentos equivalentes aplicados aos elementos aos quais eles estão embutidos. No caso dos cabos de protensão do modelo da ponte Cardeal Eugênio Sales, adotou-se a primeira opção.

O escoramento provisório é incluído no modelo para correta análise das etapas construtivas. Embora não estejam presentes na estrutura quando a mesma se encontra pronta, esses elementos precisam constar no modelo completo para que possam ser incluídos e removidos durante a modelagem das etapas construtivas.

Portanto, mesmo que se deseje processar o modelo da estrutura pronta com as forças de serviço nos estais (por meio do cálculo dos pré-alongamentos), é preciso definir uma análise de etapas construtivas para que se possam definir quais elementos constarão no modelo analisado.

A não-linearidade geométrica é considerada como P-delta. Não considerou-se a não-linearidade física por tratar-se de uma análise de etapas construtivas. Para o caso da ponte em questão, os esforços nessas etapas intermediárias ficam bem abaixo daqueles verificados na utilização da ponte (com cargas acidentais). Os esforços verificados nessas etapas construtivas não são suficientes para alterar consideravelmente a rigidez da estrutura e, conseqüentemente, os resultados da análise.

7.4 Carregamentos definitivos

Chamam-se carregamentos definitivos àquelas cargas que são constantes durante a vida útil da estrutura. São eles:

- Peso próprio estrutural: considerado automaticamente pelo programa SAP2000 (exceto no caso das transversinas), tendo em vista que todas as seções transversais foram modeladas com a geometria correta. Considerou-se o peso específico do concreto igual a 25 kN/m³;
- Sobrecarga permanente: Pavimento (32,32 kN/m), guarda-rodas e barreiras (10,62 kN/m), passeios (1,26 kN/m).

Por tratar-se de um modelo de pórtico plano, o peso das transversinas do tabuleiro precisa ser incluído por meio de cargas concentradas aplicadas nos elementos da viga de rigidez. A Figura 3 mostra a aplicação dessas cargas concentradas no modelo.

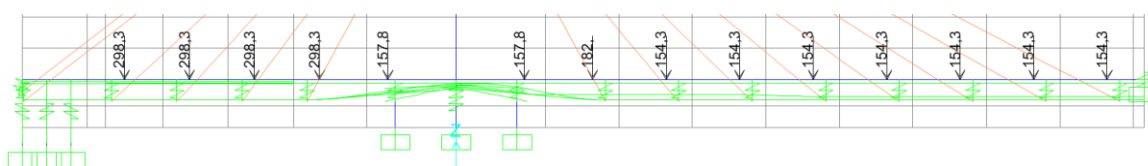


Figura 3 – Cargas de peso das transversinas aplicadas no modelo (em kN)

7.5 Carregamentos provisórios

Durante a montagem da estrutura alguns carregamentos provisórios precisam ser considerados. São eles:

- Peso das treliças que se deslocam ao longo do tabuleiro enquanto o mesmo vai sendo construído;
- Peso do concreto fresco durante as etapas de concretagem de cada aduela.

Os carregamentos apresentados anteriormente precisam ser aplicados em casos de carregamento diferentes em cada ponto de aplicação. A Figura 4 apresenta um desses casos de carregamento criados para aplicação dessas cargas provisórias.

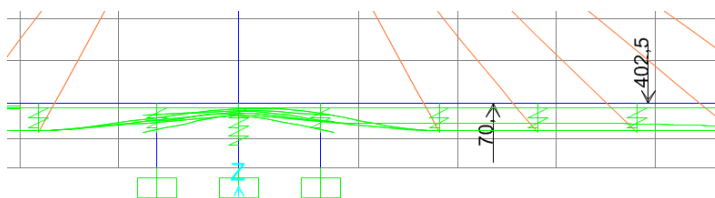


Figura 4 - Aplicação das cargas de peso das treliças de escoramento sobre a Aduela A3 (em kN)

7.6 Carregamento do modelo com os pré-alongamentos dos estais

Antes de se iniciar a análise das etapas construtivas, é preciso carregar o modelo com as forças corretas nos estais para o estado em serviço da ponte (estrutura pronta com peso próprio, sobrecarga permanente e protensão). Esse procedimento pode ser executado com uso de ferramenta específica ou por meio do método da matriz de influência.

Apresenta-se, na Tabela 1, as forças de trabalho nos estais fornecidas no projeto da ponte.

Tabela 1 - Forças de trabalho nos estais

Estai	Força (kN)	Estai	Força (kN)
E6'	5325,0	E2	1505,0
E5'	5324,0	E3	2564,0
E4'	5430,0	E4	2596,0
E3'	2989,0	E5	2910,0
E2'	2303,0	E6	3246,0
E1'	4162,0	E7	3125,0
E1	3326,0	E8	4571,0

7.7 Processo de desmontagem

Como afirmado anteriormente, o processo de desmontagem tem por objetivo principal a determinação das forças iniciais a serem introduzidas nos estais durante a montagem. De posse do modelo carregado com os pré-alongamentos, conforme exposto na seção anterior, pode-se iniciar a análise por processo de desmontagem.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no processo de desmontagem. Entre eles, estão as forças iniciais que devem ser introduzidas na instalação dos estais e as forças de retensionamento que devem ser aplicadas aos estais E'6, E'5 e E8. No caso dos estais de retaguarda, E'5 e E'6, a aplicação de forças cada vez maiores ao longo do processo executivo visa equilibrar os momentos fletores no pilone durante a execução. A introdução de forças definitivas pode provocar fissuras no pilone por esforços excessivos. No caso do estai E8, esse retensionamento busca equilibrar os esforços no trecho de fechamento central.

Além dessas forças nos estais, também foram obtidas as forças de abertura ("set-back"), que devem ser introduzidas contra os dois lados da viga de rigidez antes da instalação do fechamento central, e o contra-peso que deve ser inserido na aduela A'4 para nivelamento do trecho de fechamento lateral.

Tabela 2 - Forças a serem introduzidas no processo de montagem

	Força (kN)		Força (kN)
1ª Etapa E1:	1540,2	1ª Etapa E'6:	1539,4
1ª Etapa E'1:	4110,2	3ª Etapa E'5:	2082,5
1ª Etapa E2:	1105,7	1ª Etapa E7:	3154,5
1ª Etapa E'2:	1919,0	2ª Etapa E'6:	2957,8
1ª Etapa E3:	2002,8	4ª Etapa E'5:	3281,9
1ª Etapa E'3:	2195,5	1ª Etapa E8:	5377
1ª Etapa E4:	2201,9	3ª Etapa E'6:	4906,9
1ª Etapa E'4:	2857,7	5ª Etapa E'5:	4653,4
1ª Etapa E'5:	313,8	2ª Etapa E8:	4254,3
1ª Etapa E5:	2734,4	Abertura A8:	120,0
2ª Etapa E'5:	1208,6	Contrapeso A'4:	650,0
1ª Etapa E6:	3091,3		

7.8 Processo de montagem

Nesse processo utilizou-se a técnica da estrutura fantasma ("ghost-structure"). Sendo assim, em determinada etapa o tabuleiro foi adicionado como um todo, exceto os trechos

de fechamento, e suas características de seção foram alteradas para valores aproximadamente nulos. Posteriormente, na introdução de cada um dos elementos, essas características foram sendo alteradas à medida que o processo construtivo avançava.

7.9 Comparação dos resultados

Apresenta-se, a seguir, a comparação entre resultados obtidos dos modelos computacionais desenvolvidos. São analisados os resultados obtidos ao final do processo de montagem, sem reologia, comparando-os com as forças nos cabos, em serviço, fornecidas pelo projetista (início da desmontagem), bem como os esforços correspondentes nas principais seções.

A Figura 5 apresenta os esforços normais obtidos no início da desmontagem e ao final da montagem, sem reologia.

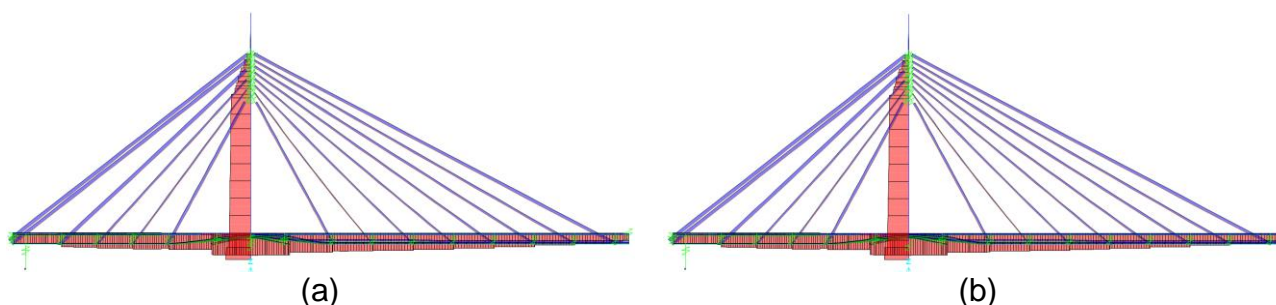


Figura 5 - Diagramas de esforços normais para a estrutura pronta.
 (a) Início da desmontagem; (b) Final da montagem.

A Tabela 3 compara as forças nos estais e os esforços normais nas seções fornecidas pelo projetista (início da desmontagem), e calculadas ao final da montagem.

Tabela 3 - Comparação de forças nos estais – Forças de Projeto x Forças de Montagem

	Forças nos Estais (kN)				Forças Normais (kN)		
	Projeto	Montagem	Diferença		Projeto	Montagem	Diferença
E'6	5325,0	5259,9	-1,2%	E'6	-43007,0	-42286,9	-1,7%
E'5	5324,0	5285,6	-0,7%	E'5	-20213,4	-20117,3	-0,5%
E'4	5430,0	5346,4	-1,5%	E'4	-24228,8	-24095,6	-0,5%
E'3	2989,0	2954,2	-1,2%	E'3	-26318,0	-26197,9	-0,5%
E'2	2303,0	2283,8	-0,8%	E'2	-26219,0	-26121,0	-0,4%
E'1	4162,0	4125,8	-0,9%	E'1	-28463,0	-28306,0	-0,6%
E1	3326,0	3342,6	0,5%	E1	-38386,6	-38325,1	-0,2%
E2	1505,0	1510,3	0,3%	E2	-33211,6	-33067,6	-0,4%
E3	2564,0	2554,5	-0,4%	E3	-31210,3	-31119,4	-0,3%
E4	2596,0	2550,7	-1,7%	E4	-30199,6	-30088,5	-0,4%
E5	2910,0	2837,7	-2,5%	E5	-28274,4	-28154,8	-0,4%
E6	3246,0	3154,2	-2,8%	E6	-26161,5	-26044,1	-0,4%
E7	3125,0	3038,9	-2,8%	E7	-23701,6	-23641,6	-0,3%
E8	4571,0	4566,1	-0,1%	E8	-20877,7	-20885,7	0,0%

Nota-se que as diferenças percentuais são muito reduzidas, próximas a zero. É possível observar pelos diagramas da Figura 5 que os mesmos são praticamente idênticos, indicando uma diferença quase imperceptível.

A Figura 6 apresenta os momentos fletores obtidos no início da desmontagem e ao final da montagem, sem consideração dos efeitos reológicos.

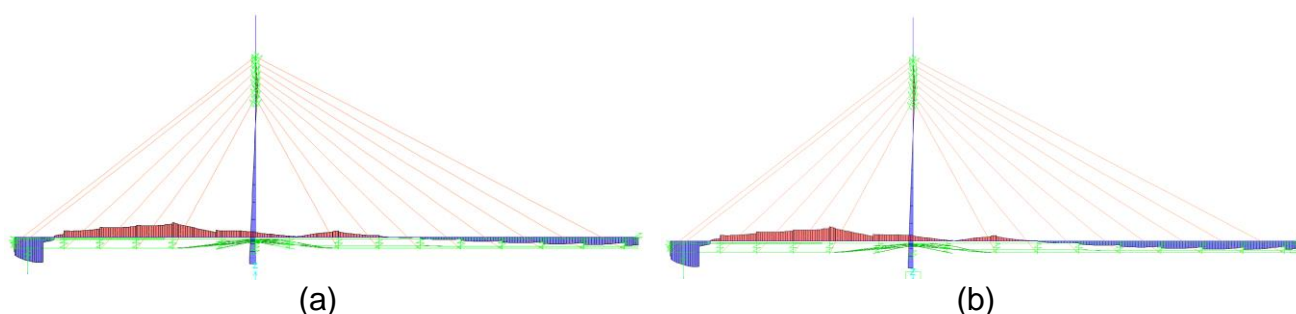


Figura 6 - Diagramas de Momentos Fletores para a estrutura pronta. (a) Início da desmontagem; (b) Final da montagem.

Como se pode notar, os diagramas de momentos são bem similares segundo a Figura 6. No entanto, numericamente percebe-se certa diferença percentual de esforços em algumas seções devida a um deslocamento relativo do diagrama.

A Figura 7 apresenta os esforços cortantes obtidos no início da desmontagem e ao final da montagem sem consideração dos efeitos reológicos.

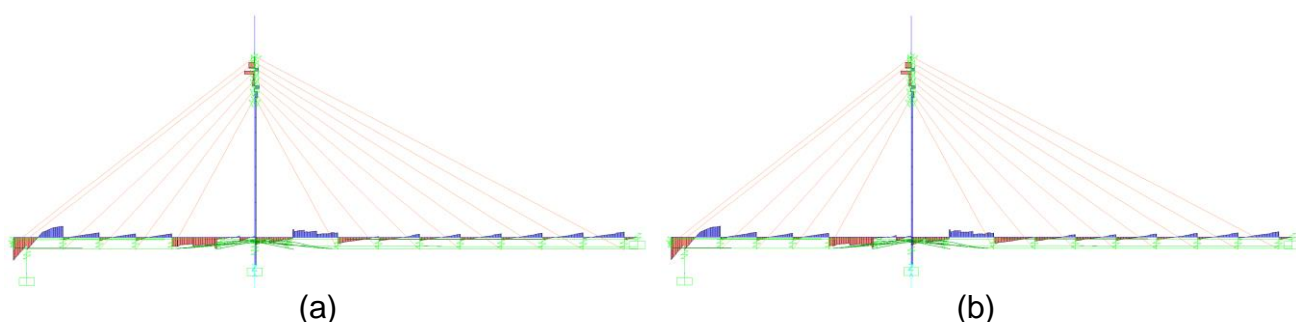


Figura 7 - Diagramas de Esforços Cortantes para a estrutura pronta. (a) Início da desmontagem; (b) Final da montagem

Assim como nos diagramas de momentos fletores, verifica-se um aspecto idêntico entre os diagramas de esforços cortantes no início da desmontagem e no final da montagem apresentados na Figura 7. Porém, numericamente também percebe-se certa diferença percentual de esforços em algumas seções devida a um deslocamento relativo do diagrama.

8. Conclusões

O presente trabalho demonstrou que a modelagem das etapas construtivas é um ponto fundamental no projeto e no acompanhamento da construção de pontes estaiadas. As diferenças de esforços no tabuleiro obtidas segundo os diferentes métodos de carregamento e a análise por montagem (procedimento mais próximo àquele realizado em campo) deixaram evidente que a correta modelagem é fundamental para a obtenção da real distribuição de esforços na estrutura.

Também ficou demonstrado que é possível, e viável, com os recursos computacionais atuais, modelar cada etapa construtiva buscando reduzir, ao máximo, as operações de protensão dos estais durante a execução. Tem-se observado, nas últimas pontes estaiadas construídas no Brasil, que as operações de tensionamento dos estais perduram durante todos os dias da obra, sendo realizadas diversas vezes, nos mesmos cabos, sem que ao final do processo sejam atingidas as forças estabelecidas em projeto. O método apresentado pode ser aplicado a qualquer obra minimizando, em muito, essas operações de protensão.

Outro ponto que também tem causado grandes problemas na execução de pontes estaiadas no Brasil é a obtenção da correta geometria final da obra. O método apresentado possibilita, desde que adequadamente aplicado e com a devida consideração dos efeitos reológicos, o cálculo das contra-flechas que devem ser fornecidas à equipe de campo visando atingir a geometria final desejada, evitando operações de reparo que, muitas vezes, danificam a estrutura ou causam acréscimos consideráveis de material.

9. Referências

ALMEIDA, A. E. F. **Análise de Etapas Construtivas em Pontes Estaiadas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

WALTHER, R.; HOURIET, B.; ISLER, W.; MOIA, P.; KLEIN, J.F.. **Cable stayed bridges**. 2 ed., Thomas Telford, Ltd, London, UK, 1999.

CHEN, D. W.; AU, F. T. K.; THAM, L. G.; LEE, P. K. K.. **Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method**. Computers and Structures, No. 74, pp 1-9, 2000.

WANG, P. H.; TSENG, T.C.; YANG, C.G.. **Initial shape of cable-stayed bridges**. Computers and Structures, Vol. 46, No. 6, pp. 1095-1106, 1993.

HAN, D.J.; YAN, Q.. **Cable force adjustment and construction control**. Cap. 58 "Bridge Engineering Handbook", CRC Press, 2000.

JANJIC, D.; PIRCHER, M.; PIRCHER, H.. **Optimization of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges**. J. Bridge Eng., No. 8(3), pp. 131-137, 2003.

BEHIN, Z.; MURRAY, D. W.. **A substructure – Frontal technique for cantilever erection analysis of cable-stayed bridges.** Computers and Structures, Vol. 42, No 2, pp. 145-157, 1990.

REDDY, P.; GHABOUSSI, J.; HAWKINS, N. M.. **Simulation of construction of cable-stayed bridges.** Journal of Bridge Engineering No. 4, pp. 249-257, 1999.

WANG, P. H.; TANG, T.Y.; ZHENG, H.N.. **Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods.** Computers and Structures, No. 82, pp. 329-346, 2004.

GRABOW, M. J.. **Construction Stage Analysis of Cable-Stayed Bridges.** Diplom-Ingenieur thesis, Technical University of Hamburg-Harburg, Hamburg, Germany, 2004.