

1

Introdução

1.1

Objetivos

Este trabalho tem como propósito a criação de uma ferramenta computacional para a verificação estrutural em serviço de vigas de concreto protendidas com pós-tração aderente limitada ou completa de acordo com a NBR 6118.¹ Este *software*, denominado **Prestress**, é uma extensão (*add-in*) do Autodesk Robot Structural Analysis Professional[®] (**Robot**), alavancando a modelagem estrutural deste para obter os esforços oriundos da protensão.

A partir do modelo gerado no **Robot** e dos dados relativos à protensão, os esforços isostáticos oriundos da protensão ao longo da vida-útil da viga são calculados e carregamentos equivalentes são aplicados. O cálculo do programa independe das condições de contorno da viga, permitindo assim que tanto vigas hiperestáticas quanto isostáticas sejam resolvidas. Qualquer efeito das condições de contorno da estrutura é obtido pelo **Robot** e incorporado pelo **Prestress**. Tendo assim os esforços (possivelmente hiperestáticos) da estrutura, a ferramenta então verifica a viga ao estado limite de serviço (ELS).

A filosofia *Building Information Modeling* (BIM) está tendo grandes impactos na engenharia civil. Trata-se do conceito de unir todas as vertentes de um projeto em uma única base de dados. Tem-se então apenas um modelo da estrutura, que incorpora todos os dados das diferentes esferas presentes na fase de projeto e ao longo da vida da estrutura: projetos arquitetônicos, estruturais, hidráulicos, elétricos, mecânicos, da construção e da manutenção.

Embora este trabalho não aborde diretamente o tema BIM, o **Robot** foi selecionado como a plataforma do **Prestress** pois pertence à família de programas da Autodesk que implementa a filosofia BIM. O BIM não obriga a adoção do ambiente de apenas um desenvolvedor de *software*, porém as bases de dados abertas, tradicionalmente contidas em arquivos seguindo o padrão *Industry Foundation Classes* (IFC), ainda têm dificuldades em transmitir toda a “inteligência” dos modelos. Por este motivo, embora não seja absolutamente necessário, utilizar um ambiente fechado por ora simplifica seguir a filosofia BIM. Com o **Robot** como plataforma, o **Prestress** pode então ajudar a unir o cálculo da protensão ao da estrutura global. A verificação de interferências e construtibilidade da protensão, embora ainda não implementada (ver Seção 6.1), consistirá em um exemplo da filosofia BIM quando criada no

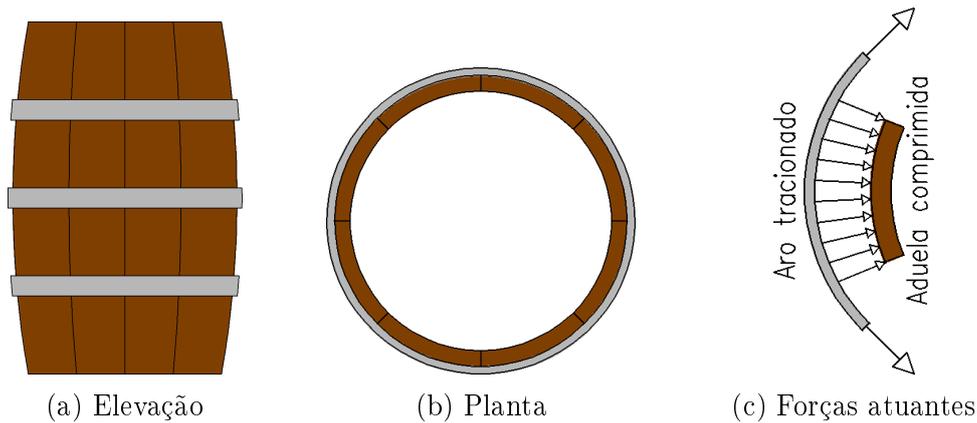


Figura 1.1: Barril protendido. O aro é aquecido e posicionado. Ao esfriar, este é impedido de retrair e um estado de tensões de tração no aro e compressão nas aduelas de madeira é gerado.

Autodesk Revit® (**Revit**).

1.2 Protensão

Nas estruturas de concreto armado, a resistência à flexão de uma viga resulta da deformação e fissuração do concreto na região tracionada, ativando assim a armadura passiva, que passa a suportar (em teoria) toda a força de tração da seção. No concreto protendido, a armadura é ativada antes da viga entrar em carga. Ao ser protendida, a armadura comprime o concreto nas regiões tradicionalmente sob tração, aumentando a resistência da viga tanto à flexão quanto à força cortante e impedindo (ou reduzindo) sua deformação e fissuração sob o efeito de cargas externas. Isso permite vencer maiores vãos e reduzir os custos de material em obras tradicionalmente feitas em concreto armado.

Um exemplo clássico da utilização de protensão é o barril. Aduelas de madeira são envoltas com aros de aço aquecido. Ao esfriar, os aros sofrem uma retração que é resistida pelas aduelas. As aduelas então apresentam esforços de compressão radial que resistem à pressão hidrostática no barril cheio.

1.3 Robot e seu API

O **Robot** é um *software* de modelagem do comportamento estrutural de um sistema. O programa permite o cálculo tridimensional com elementos unidimensionais de barra, elementos finitos planares e sólidos, considerando diversas condições de contorno e o cálculo linear elástico de carregamentos

(permitindo assim a superposição de efeitos) ou considerando efeitos dinâmicos e de segunda ordem.

A ferramenta também apresenta uma *Application Programming Interface* (API) que permite que programas externos interajam com sua base de dados. Tudo o que o **Prestress** faz só é possível devido à API desenvolvida.

1.4

Revisão bibliográfica

Existem hoje diversos programas que permitem o cálculo de vigas protendidas. Apresentam-se abaixo algumas das principais ferramentas no mercado, sem ordem.

- **Robot:** Este mal pode ser considerado como um programa de vigas de concreto protendido, caso contrário não faria muito sentido desenvolver o **Prestress**. Está nesta lista apenas para indicar que o programa inclui um carregamento equivalente de protensão nativo. O cálculo, porém, é simplista, permitindo apenas uma curvatura do cabo (sendo assim útil apenas para vigas biapoiadas sem balanço) e desconsiderando todas as perdas;
- **midas Civil:** Programa de alto nível, permite o cálculo de complexas estruturas protendidas com etapas construtivas, tal como pontes em balanços sucessivos. O comportamento (possivelmente não-linear) no tempo dos diferentes materiais também é considerado, permitindo assim o cálculo preciso das perdas progressivas. A protensão pode ser por pré- ou pós-tração (com ou sem aderência);
- **SAP 2000:** Permite o cálculo de vigas protendidas com pós-tração e, com algumas modificações, pré-tração. Os elementos de protensão (cabos, cordoalhas ou fios) podem ser considerados como objetos ou transformados em carregamentos equivalentes no programa. As perdas são calculadas automaticamente pelo programa (de acordo com a norma CEB-FIP 1990) quando a protensão é considerada como objeto, mas deve ser informada pelo usuário caso deseje-se apenas o carregamento equivalente. O programa, no entanto, não apresenta verificações ao ELS;
- **ADAPT-ABI:** Calcula e verifica ao ELS vigas protendidas com pré- ou pós-tração (com ou sem aderência). As perdas e verificações podem ser feitas de acordo com diversas normas internacionais (mas não a NBR 6118¹). O cálculo pode ser com diversas etapas construtivas;

- **ADAPT-PT/RC**: Calcula e verifica ao ELS vigas com pré- ou pós-tração (com ou sem aderência) em 2D. As perdas e verificações podem ser feitas de acordo com diversas normas, inclusive a NBR 6118;¹
- **RAPT**: Trabalha apenas em 2D mas é conhecido por ser simples e rápido de utilizar. Calcula e verifica ao ELS vigas com pré- ou pós-tração (com ou sem aderência) para algumas normas internacionais;
- **Nemetschek Scia**: Calcula e verifica estruturas protendidas com pré- ou pós-tração (com ou sem aderência) em 3D. O *software* permite o cálculo das perdas e das verificações aos estados limites de serviço e último de acordo com algumas normas, em especial a Eurocode 2, porém não inclui a NBR 6118.¹

Todos estes programas são úteis para o cálculo de vigas protendidas. No entanto, apenas o **ADAPT-PT/RC** permite verificar a estrutura pela norma brasileira, e este programa é limitado ao estudo 2D. Existem já outros trabalhos existentes que calculam vigas protendidas para a norma brasileira, tal como os desenvolvidos por Bortone² e Lazzari *et al.*:^{3,4}

- O trabalho de Bortone permite a entrada de dados do traçado do cabo por segmentos de curvas parabólicas ou retas (apenas se horizontais) e apresenta uma consideração do efeito da temperatura nas perdas por relaxação do aço. O programa utiliza um método iterativo para estimar a interação entre as parcelas de perdas progressivas. Este método no entanto assume que todos os cabos estão suficientemente próximos para que possam ser considerados como um cabo equivalente. O programa também adota condições ambientais constantes, não permitindo assim a consideração do efeito das variações climáticas, permite apenas uma etapa de protensão e adota métodos simplificados para o cálculo das perdas por atrito (adotando a função linearizada), encunhamento da ancoragem e deformação elástica do concreto. O programa também não permite que a estrutura apresente descontinuidades de seção;
- O trabalho de Lazzari *et al.* é muito interessante pois permite o cálculo de pórticos planos com protensão aderente ou não-aderente considerando o efeito da armadura passiva e de possíveis fases construtivas. Os materiais são considerados de forma não-linear. O programa permite o cálculo de vigas com protensão parcial, permitindo a abertura de fissuras, e a verificação ao estado limite último, funcionalidades que o trabalho de Bortone (e o **Prestress**) não apresenta. O usuário também pode optar por verificar a estrutura para a norma francesa (BPEL 91). As perdas são

todas calculadas a partir de modelos reológicos dos materiais, podendo ou não ser similares aos resultados obtidos a partir da norma brasileira.

Ambos trabalhos desenvolveram programas *stand-alone*, o que significa que o usuário deve gerar dois modelos estruturais: um para o cálculo do elemento protendido e outro para o restante da estrutura. Isso não permite o estudo do efeito da protensão na estrutura global (e vice-versa), além de demandar um certo retrabalho pelo usuário. Tem-se então um nicho de atuação do **Prestress**, que expande a capacidade do **Robot**, um programa de modelagem 3D, ao cálculo de vigas protendidas (com pós-tração aderente) de acordo com os métodos preconizados na NBR 6118.¹

1.5

Organização do texto

A vasta maioria do conteúdo deste trabalho é apresentada nos dois capítulos seguintes.

O Capítulo 2 apresenta a teoria da protensão. Os esforços provenientes da protensão são determinados, assim como todas as perdas que ocorrem tanto no instante da aplicação da força de protensão quanto ao longo da vida-útil da estrutura. Por fim, apresentam-se as duas verificações necessárias para que a protensão seja considerada satisfatória: aos estados limite último (ELU) e de serviço (ELS).

Já o Capítulo 3 descreve a implementação computacional de todos os conceitos apresentados no capítulo anterior. Apresentam-se todos os passos de utilização do *add-in*: sua instalação, sua interface gráfica, o cálculo da protensão e suas perdas, a verificação ao ELS e a impressão de resultados.

Os Capítulos 4 e 5 apresentam exemplos de utilização do **Prestress**. O primeiro utiliza o Viaduto de acesso a Santa Isabel⁵ e apresenta um passo-a-passo do programa, descrevendo em detalhes o que deve ser feito pelo usuário e compara os resultados obtidos pelo **Prestress** aos obtidos pelos cálculos tradicionais de acordo com a NBR 6118.¹ O segundo é mais objetivo, apresentando dois exemplos: O Viaduto da Guarita - Pista Norte⁶ e o Viaduto de Jacareí II.⁷ Estes, no entanto, descrevem apenas a estrutura e os resultados obtidos pelo programa, assim como quaisquer comentários que sejam relevantes.

O Capítulo 6 apresenta os comentários finais e as conclusões em relação aos temas abordados nos capítulos anteriores e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

No caso de vigas de seção variável foi necessária a implementação do cálculo de propriedades geométricas integrais. O Apêndice A apresenta uma

tabela com as equações adotadas para cada propriedade de cada tipo de seção transversal aceita pelo **Prestress**.

O Apêndice B inclui todos os dados necessários ao cálculo da protensão para os exemplos vistos nos Capítulos 4 e 5. Estes dados são os desenhos originais relevantes de cada estrutura (planta, elevação, seção transversal e protensão) e as propriedades da viga, dos materiais adotados e da protensão.