



## ESTUDO DA FLUÊNCIA E RETRAÇÃO NA ANÁLISE DE UM TABULEIRO EM VIGAS MÚLTIPLAS DE UMA PONTE RODOVIÁRIA

Michael Leone Madureira de Souza

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Benjamin Ernani Diaz

Cláudia Ribeiro Eboli

Rio de Janeiro

Março de 2014

ESTUDO DA FLUÊNCIA E RETRAÇÃO NA ANÁLISE DE UM TABULEIRO EM  
VIGAS MÚLTIPLAS DE UMA PONTE RODOVIÁRIA

Michael Leone Madureira de Souza

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

---

Prof. Benjamin Ernani Diaz, Dr.-Ing., Dr. Eng.

---

Prof.<sup>a</sup>. Cláudia Ribeiro Eboli, D. Sc.

---

Prof. Fernando Celso Uchôa Cavalcanti, M. Sc.

---

Prof.<sup>a</sup>. Flávia Moll de Souza Judice, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2014

ESTUDO DA FLUÊNCIA E RETRAÇÃO NA ANÁLISE DE UM TABULEIRO EM  
VIGAS MÚLTIPLAS DE UMA PONTE RODOVIÁRIA

Madureira de Souza, Michael Leone

Estudo da Fluência e Retração na Análise de um Tabuleiro em Vigas Múltiplas de uma Ponte Rodoviária / Michael Leone Madureira de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

XVIII, 67 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientadores: Benjamin Ernani Diaz e Claudia Ribeiro Eboli

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 67

1. Fluência. 2. Retração. 3. Propriedades reológicas. 4. Etapas construtivas. 5. Ponte rodoviária. I. Diaz, Benjamin Ernani, et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo.

À minha família, pelo apoio incondicional, paciência e incentivo.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e aprendizado durante todos esses anos de graduação.

Aos professores da Escola Politécnica da UFRJ e em especial ao Prof. B. Ernani Diaz e Prof<sup>a</sup>. Claudia Ribeiro Eboli, pela dedicação e ensinamentos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

## ESTUDO DA FLUÊNCIA E RETRAÇÃO NA ANÁLISE DE UM TABULEIRO EM VIGAS MÚLTIPLAS DE UMA PONTE RODOVIÁRIA

Michael Leone Madureira de Souza

Março/2014

Orientadores: Benjamin Ernani Diaz e Claudia Ribeiro Eboli.

Curso: Engenharia Civil

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento de um tabuleiro de uma ponte rodoviária quando submetido a deformações por fluência e retração. A avaliação destas propriedades do concreto surge como um questionamento sobre o comportamento em serviço de uma estrutura que opera durante dezenas de anos, exposta a cargas diversas, intempéries e influenciada pelo tempo. Com a crescente demanda por estruturas mais esbeltas e de arquitetura mais arrojada é crucial o entendimento das propriedades e potencialidades do concreto. Portanto, para avaliar de forma geral a influência das deformações reológicas durante o envelhecimento do concreto, como, por exemplo, a deformada do tabuleiro e as perdas de protensão, foram analisadas as tensões axiais da laje, bem como seu deslocamento vertical, além das tensões axiais das fibras mais extremas da viga, com o auxílio do software de análise de estruturas SAP2000 v.14.

*Palavras-chave:* Fluência, Retração, Pontes, Protensão

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

CREEP AND SHRINKAGE STUDY OF THE STRUCTURAL ANALYSIS FOR A  
ROAD BRIDGE WITH PRECAST BEAMS

Michael Leone Madureira de Souza

Março/2014

Advisors: Benjamin Ernani Diaz e Claudia Ribeiro Eboli

Course: Civil Engineering

This work studies the behavior of a structure of a road bridge subjected to deformations caused by creep and shrinkage. The evaluation of the effects in the stress distribution caused by these rheological events is important to access the behavior of a structure in service operating for decades, subjected to various actions and influenced by weather. With the increasing demand for slimmer and bolder civil structures, it is important to evaluate the consequences of the concrete rheological events. Therefore, during the life span of the structure in investigation, the time history of the effects of rheological deformation was analyzed, including the deformed shape of the longitudinal beams, the prestress loss, the axial stresses of the concrete slab, the vertical displacements, as well as, the axial stresses of the beam, with the help of the computer program for structural analysis SAP2000. V14.

*Keywords:* Creep, Shrinkage, Bridge, Prestress

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA .....	1
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE FLUÊNCIA E RETRAÇÃO.....	3
2.1. DEFORMAÇÕES DO CONCRETO .....	4
2.2. FLUÊNCIA.....	6
2.2.1. COMPONENTES DA FLUÊNCIA.....	6
2.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A FLUÊNCIA.....	8
2.3. RETRAÇÃO .....	10
2.3.1. COMPONENTES DA RETRAÇÃO .....	10
2.3.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A RETRAÇÃO .....	12
3. DADOS DO PROJETO DA PONTE RODOVIÁRIA.....	14
3.1. PLANTAS DE FÔRMA.....	14
3.2. ETAPAS CONSTRUTIVAS.....	16
3.3. VIGAS .....	17
3.4. CABLAGEM .....	19
3.5. TRANSVERSINAS .....	23
3.6. APARELHO DE APOIO.....	24
3.7. MATERIAIS EMPREGADOS .....	25
3.7.1. CONCRETO .....	25
3.7.2. AÇO .....	25
3.8. RESUMO DA GEOMETRIA DA PONTE .....	26
4. MODELO EM ELEMENTOS FINITOS .....	28
4.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS UTILIZADOS .....	29
4.1.1. CONCRETO .....	29
4.1.2. AÇO .....	30
4.2. VIGAS .....	30
4.3. CABOS DE PROTENSÃO .....	32
4.4. LAJE .....	32
4.5. TRANSVERSINAS .....	34
4.6. APOIOS .....	35
4.7. CARREGAMENTOS.....	36
4.8. ANÁLISE EM ETAPAS CONSTRUTIVAS .....	41
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	45

<b>5.1. MODELO ESTACIONÁRIO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2. MODELO REOLÓGICO .....</b>	<b>50</b>
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
<b>6.1. VARIAÇÃO DAS TENSÕES NA VIGA V1.....</b>	<b>55</b>
<b>6.2. DESLOCAMENTOS VERTICAIS .....</b>	<b>59</b>
<b>6.3. VARIAÇÃO DAS TENSÕES NO CENTRO DA LAJE.....</b>	<b>62</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

– Letras Minúsculas

$h$  – Coeficiente de forma;

$h_{\text{laje}}$  – Coeficiente de forma da laje;

$h_{\text{viga}}$  – Coeficiente de forma da viga;

$h_{\text{ap}}$  – Altura do aparelho de apoio;

$k_{\text{ap}}$  – Coeficiente de rigidez da mola do aparelho de apoio;

$t$  – Tempo;

– Letras Maiúsculas

A – Área;

$A_{ap}$  – Área do aparelho de apoio;

E – Módulo de elasticidade;

$E_c(\tau_0)$  – Módulo de elasticidade no instante de tempo  $\tau_0$ ;

G – Módulo de elasticidade transversal;

V – Força cortante;

$V_{d\_serv}$  – Força cortante de cálculo em serviço.

– Letras Gregas

$\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica;

$\beta_{sh}$  – Coeficiente de retração;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson;

$\varepsilon$  – Deformação;

$\varepsilon_e$  – Deformação instantânea – “*elastic*”;

$\varepsilon_{cr}$  – Deformação por fluência – “*creep*”;

$\varepsilon_{sh}$  – Deformação por retração – “*shrinkage*”;

$\varepsilon_T$  – Deformação por temperatura – “*temperature*”;

$\varepsilon_{cr,d}$  – Fluência elástica retardada;

$\varepsilon_{cr,fi}$  – Fluência rápida inicial;

$\varepsilon_{cr,fb}$  – Fluência básica;

$\varepsilon_{cr,fd}$  – Fluência por secagem;

$\varepsilon_{sh,e}$  – Retração instantânea;

$\varepsilon_{sh,d}$  – Retração por secagem;

$\rho$  – Peso específico;

$\sigma$  – Tensão normal;

$\sigma_c$  – Tensão de compressão;

$\sigma_c(\tau_0)$  – Tensão de compressão no instante de tempo  $\tau_0$ ;

$\tau_0$  – Instante de tempo inicial;

$\tau_C$  – Período de tempo necessário à cura do concreto;

$\varphi(t, \tau_0)$  – Função do coeficiente de fluência

## 1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto são predominantes no Brasil, devido à facilidade de execução, produção simples e por ter custo baixo, se comparado com outras tecnologias, como as estruturas de aço, por exemplo.

Com a crescente demanda por estruturas mais esbeltas e de arquitetura mais arrojada, é crucial a avaliação das propriedades e potencialidades do concreto, principalmente por se tratar de um material cuja construção pode ter grande vida útil.

O estudo de propriedades como a fluência e retração surge como um questionamento sobre o comportamento em serviço de uma estrutura de concreto, que fica em operação durante dezenas de anos exposta a cargas diversas e intempéries.

### 1.1. MOTIVAÇÃO

Entender a influência das propriedades reológicas do concreto (fluência e retração) durante a etapa de operação/serviço de uma superestrutura de ponte rodoviária com tabuleiro em vigas múltiplas de concreto protendido.

### 1.2. OBJETIVO E METODOLOGIA

Avaliar e mensurar os efeitos da fluência e retração do concreto em uma ponte rodoviária por meio de um modelo em elementos finitos.

O modelo será desenvolvido utilizando o software comercial de análises, SAP2000 v.14, considerando as etapas construtivas (“*staged construction*”) e as propriedades reológicas do concreto.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para facilitar a leitura, o trabalho está dividido da seguinte forma:

Capítulo 2: Apresenta fundamentos básicos sobre a fluência e retração.

Capítulo 3: Apresenta o projeto da ponte rodoviária analisada, tais como as seções transversais e longitudinais do tabuleiro, materiais empregados, cablagem e as etapas construtivas (cronograma da obra).

Capítulo 4: Aborda a modelagem em elementos finitos no SAP2000 v.14. A partir das geometrias, materiais e demais diretrizes do projeto, é feita a escolha dos métodos de modelagem e aproximações inerentes.

Capítulo 5: Apresenta os resultados extraídos do modelo com breves comentários. As verificações foram baseadas no projeto piloto, SOUZA (2013) desenvolvido durante o curso de Concreto Protendido I, ministrado pelo Prof. Benjamin Ernani Diaz que serve de referência para o presente estudo.

Capítulo 6: Compara os resultados obtidos no capítulo 5 com os obtidos para um modelo semelhante, que possui as mesmas etapas construtivas, porém com análise que não considera a fluência e a retração como parte da solução.

Capítulo 7: Apresenta as considerações finais sobre o estudo realizado e sugestões para trabalhos posteriores.

## 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

A resposta de um elemento de concreto submetido a um carregamento qualquer possui duas parcelas, uma imediata e outra em função do tempo. Ambas devem estar de acordo com as prescrições de deformações, tensões, flechas, fissuração, etc. presentes nas normas técnicas aplicáveis, tanto no ELS (Estado Limite de Serviço) quanto no ELU (Estado Limite Último).

Em relação aos fenômenos reológicos, uma vez que este elemento esteja submetido a um carregamento prolongado, a resposta em função do tempo se dará com uma deformação gradual causada pela fluência e pela retração do concreto.

A deformação por fluência está associada ao estado de tensões do concreto, enquanto que a deformação por retração é um fenômeno independente ao carregamento aplicado. Essas deformações ocasionam aumento das flechas e curvaturas, perdas de protensão e redistribuição de tensões.

Para realizar a previsão dos efeitos provocados pelos fenômenos reológicos no elemento, é necessário:

- conhecimento das propriedades de fluência e retração para o concreto utilizado;
- procedimentos numéricos ou analíticos que incluam esses efeitos na solução da análise da estrutura.

Para a definição das propriedades reológicas do concreto existem fontes na literatura nas quais é possível obter informações com base em comparações de dosagem, composição e tipo de concreto; bem como podem ser realizadas análises laboratoriais, apesar de não ser uma opção prática. Porém, devido à heterogeneidade e à variabilidade do concreto, as duas opções não são utilizadas como determinísticas, e sim como base, onde, por meio de tratamentos probabilísticos, os resultados finais são obtidos.

A solução da análise de uma estrutura submetida à fluência e à retração deve satisfazer os mesmos três requisitos básicos da análise de qualquer estrutura, que são o equilíbrio de forças, a compatibilidade de deslocamentos e as equações constitutivas. Foram desenvolvidos inúmeros métodos numéricos e analíticos para avaliação e dimensionamento de estruturas em concreto armado e protendido. Porém, como todo método, possui níveis de refinamento e aproximações inerentes à modelagem matemática.

## 2.1. DEFORMAÇÕES DO CONCRETO

Em um instante de tempo  $t$ , a deformação total de um ponto da estrutura submetido a um carregamento é composta por quatro parcelas, como detalhado abaixo. Na notação, os subscritos utilizados vêm do nome do fenômeno em inglês.

- Deformação instantânea – “*elastic strain*”,  $\varepsilon_e(t)$
- Deformação por fluência – “*creep strain*”,  $\varepsilon_{cr}(t)$
- Deformação por retração – “*shrinkage strain*”,  $\varepsilon_{sh}(t)$
- Deformação por temperatura – “*temperature strain*”,  $\varepsilon_T(t)$

Por questões de simplificação, apesar de não retratar a realidade física do fenômeno, essas quatro parcelas são consideradas independentes entre si, e, portanto, calculadas separadamente.

A deformação total no instante de tempo  $t$  de um ponto, em um elemento de concreto submetido à temperatura constante e a uma tensão  $\sigma_{c0}$  aplicada no instante de tempo  $\tau_0$ , é igual à soma das parcelas de deformação instantânea, de fluência e de retração.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cr}(t) + \varepsilon_{sh}(t)$$

Para facilitar a visualização, na Figura 2.1, são apresentados gráficos de deformação versus tempo ( $\varepsilon \times t$ ) e tensão versus tempo ( $\sigma \times t$ ).

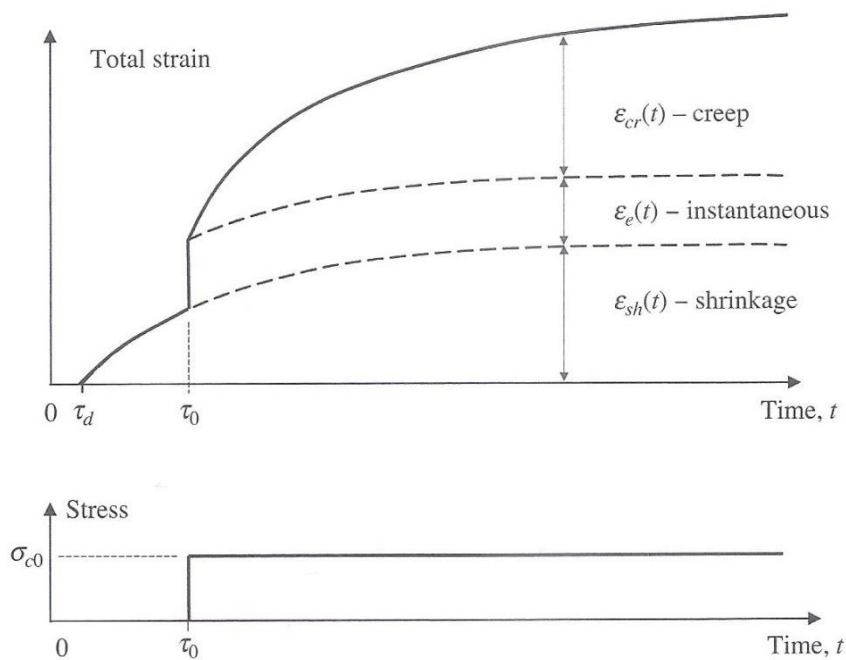


Figura 2.1 – Componentes de deformação produzida por um carregamento prolongado.

Fonte: GILBERT e RANZI (2011)

É possível verificar que a deformação por retração  $\varepsilon_{sh}(t)$  se inicia imediatamente após a cura do concreto ( $t=\tau_d$ ), antes da aplicação do carregamento ( $t<\tau_0$ ), o que evidencia que esta propriedade é independente do estado de tensões imposto pelo carregamento externo aplicado ao elemento analisado.

No momento de aplicação do carregamento, instante  $\tau_0$ , há um salto no gráfico que representa a parcela instantânea da deformação  $\varepsilon_e(t)$ . A última componente, a deformação por fluência  $\varepsilon_{cr}(t)$ , se inicia no instante seguinte ao da aplicação do carregamento ( $t>\tau_0$ ), o que ratifica que esta propriedade é função do estado de tensões do elemento.

Vale ressaltar que a curva de cada componente de deformação tende a uma assíntota horizontal quando o tempo de análise tende à infinito. Portanto, a deformação em elementos de concreto, proveniente das propriedades reológicas, possui um valor limite quando o horizonte de projeto é de longo prazo.



## 2.2. FLUÊNCIA

De acordo com METHA e MONTEIRO (2008) a fluência é o nome do fenômeno onde ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento de concreto quando este é submetido a um estado de tensões constante ao longo do tempo. A taxa de crescimento da deformação por fluência é alta nos períodos imediatamente superiores à aplicação do carregamento, diminuindo com o passar do tempo até estabilizar em um valor máximo limite. Ver Figura 2.2.

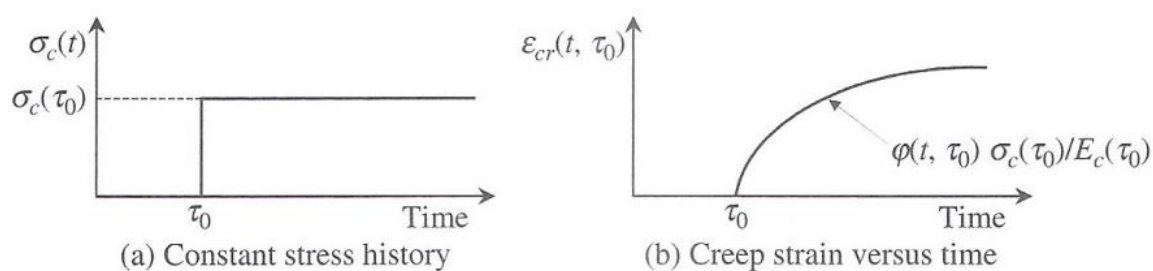


Figura 2.2 – Estado de tensões constante, (a); deformação por fluência produzida, (b).

Fonte: GILBERT e RANZI (2011)

Quando um elemento carregado está em equilíbrio hídrico com o ambiente, situação onde não há perda de água do concreto para o ambiente externo, a deformação gradual proveniente do carregamento recebe o nome de fluência básica. A deformação adicional que ocorre com o elemento, quando este ainda perde água para o ambiente externo, recebe o nome de fluência por secagem. Essa distinção é feita somente no campo teórico.

### 2.2.1. Componentes da fluência

Para um melhor entendimento do fenômeno físico, de acordo com GILBERT e RANZI (2011), a fluência pode ser subdividida em vários componentes que retratam o mecanismo completo. O gráfico da Figura 2.3 ilustra essa divisão. Vale ressaltar que essa divisão não é usual quando da análise estrutural de elementos sujeitos à fluência.

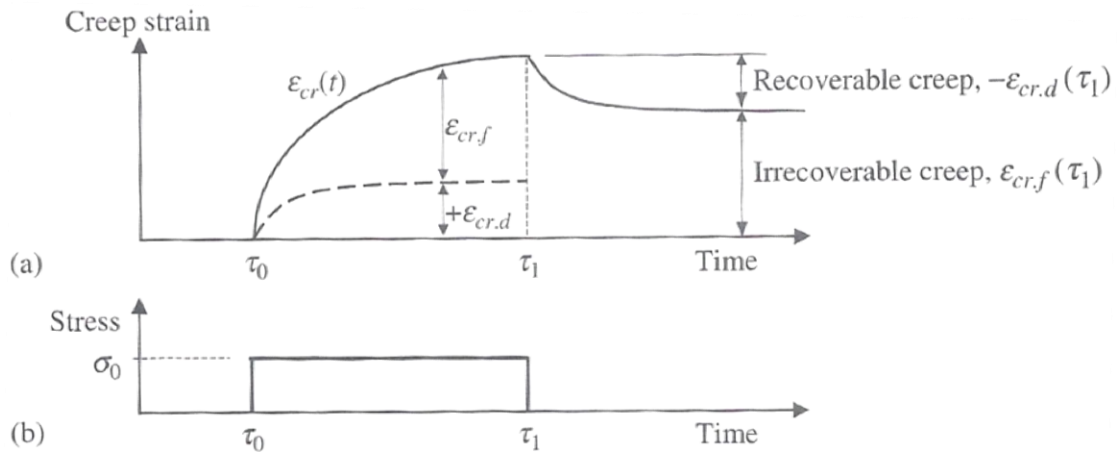


Figura 2.3 – Componente reversível e irreversível da deformação por fluência. Fonte: GILBERT e RANZI (2011)

A primeira componente desse fenômeno recebe o nome de deformação rápida inicial,  $\epsilon_{cr,fi}(t)$ , e ocorre durante as 24 horas após a aplicação do carregamento, no instante  $\tau_0$ . Essa parcela é irreversível e inversamente proporcional à idade do concreto no instante de aplicação da carga (a idade do concreto é representada pelo tempo em dias desde sua cura). Portanto, quanto mais jovem o concreto maior a deformação rápida inicial.

A segunda parcela, também irreversível, é a deformação adicional que ocorre até o descarregamento do elemento, no instante  $\tau_1$ , ou a tempo tendendo ao infinito, quando não há variação no estado de tensões do elemento. Essa componente pode ser considerada como: deformação básica,  $\epsilon_{cr,fb}(t)$ , que ocorre quando a umidade ambiental é superior ou igual à de saturação da pasta de cimento, e deformação por secagem,  $\epsilon_{cr,fd}(t)$ , que ocorre quando a umidade ambiente é inferior à da pasta de cimento e há perda de água do concreto para o ambiente externo.

A deformação básica é influenciada pela composição da mistura de concreto (tipo de agregado, tamanho e quantidade, resistência característica, etc.) e pela idade do concreto no momento da aplicação da carga.

A deformação por secagem é influenciada pelas propriedades da mistura, como por exemplo, o fator água-cimento, e pela geometria da peça de concreto (tamanho e formato do elemento).

A terceira e última parcela desse fenômeno recebe o nome de deformação elástica retardada,  $\varepsilon_{cr,f}(t)$ , e ocorre após o descarregamento do elemento, no instante  $\tau_1$ . Essa componente é reversível e ocorre em função da restituição da deformação elástica do agregado presente no concreto.

O conceito de reversível e irreversível não pode ser consolidado sem que seja conhecido o histórico do estado de tensões ao qual está submetido o concreto. Esse histórico é evidenciado pelo gráfico de tensão versus tempo ( $\sigma \times t$ ), Figura 2.3, onde é possível visualizar a variação de tensões ao longo do tempo.

#### 2.2.2. Fatores que influenciam a fluência

A fluência é um mecanismo extremamente complexo que ainda não é entendido completamente. Entre as inúmeras possíveis causas desse fenômeno, é válido destacar:

- a perda de água adsorvida pela pasta de cimento. Devido à tensão de confinamento provocada pela carga aplicada, parte da água presente na mistura é expulsa por meio dos inúmeros poros capilares presentes no concreto;
- a deformação do agregado. A carga imposta à peça de concreto é transferida gradualmente da pasta de cimento para o agregado. À medida que o agregado é carregado, este se deforma elasticamente.

Muitos fatores influenciam tanto na magnitude, quanto na taxa de desenvolvimento do fenômeno, seja amplificando ou atenuando seus mecanismos. Fatores como as propriedades da mistura do concreto, condições ambientais, como temperatura e umidade, e condições de carregamento do elemento.

A magnitude dos efeitos das deformações por fluência diminui com:

- o aumento da resistência característica do concreto;
- o aumento do tamanho e resistência do agregado;
- o aumento da umidade relativa do ambiente externo.

Atenção especial deve ser dada ao fato de que, quanto maior for a idade do concreto quando submetido ao carregamento, menor será a magnitude da deformação por fluência do elemento, como ilustra a Figura 2.4.

$$\varepsilon_{cr}(t_i) > \varepsilon_{cr}(t_j) \rightarrow t_i < t_j$$

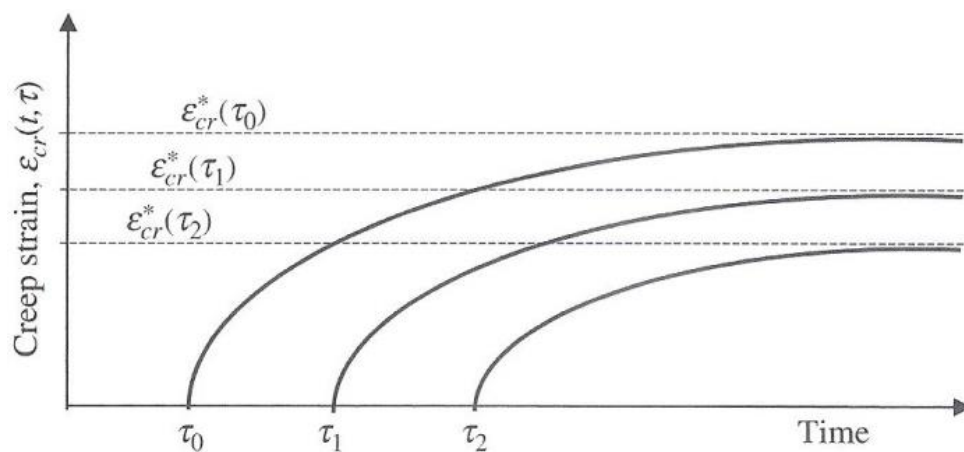


Figura 2.4 – Deformação por fluência produzida em concretos com diferentes idades.

Fonte: GILBERT e RANZI (2011)

Por outro lado, a magnitude dos efeitos das deformações por fluência aumenta com:

- o aumento da temperatura ambiente.
- o aumento da razão (superfície ou área) / (volume) do elemento, como por exemplo, para as lajes;
- o aumento do fator água-cimento;
- o aumento do abatimento do concreto, de acordo com a NBR 6118:2003.

## 2.3. RETRAÇÃO

A retração é o nome do fenômeno no qual ocorre o aumento gradual da deformação de um elemento devido à sua exposição a um ambiente externo com umidade relativa inferior à saturação da pasta de cimento, bem como às reações químicas relativas às próprias características do material, como grau de hidratação, microestrutura do concreto e componentes da mistura.

É importante ressaltar que a deformação por retração é independente do estado de tensões submetido ao concreto, como é mostrado na Figura 2.1, sendo a pasta de cimento hidratada, de acordo com METHA e MONTEIRO (2008), a principal causa de deformações relativas à umidade no concreto.

### 2.3.1. Componentes da retração

De acordo com GILBERT e RANZI (2011), é possível segmentar a deformação por retração em quatro componentes: plástica, química, térmica e por secagem. A retração plástica ocorre quando a mistura do concreto ainda está viscosa e, posteriormente, ocorrem as retrações química, térmica e por secagem.

A retração química ocorre nos primeiros dias, ou semanas, após o lançamento do concreto, devido às reações químicas na pasta de cimento influenciada pelo grau de hidratação da mistura. É verificada em um elemento que não esteja sujeito às mudanças na umidade e, com isso, não perde água adsorvida ao ambiente externo.

A retração térmica ocorre nas primeiras horas, ou dias, após a hidratação do concreto, durante a dissipação do calor provocado pela reação exotérmica na pasta de cimento.

É válido ressaltar que, tanto a retração química quanto a térmica não, estão associadas ao processo de perda de água da pasta de cimento. A soma de seus efeitos é denominada como deformação por retração endógena,  $\varepsilon_{sh,e}(t)$ .

A retração por secagem,  $\epsilon_{sh,d}(t)$ , representa a diminuição de volume do elemento devida à perda de água da pasta de cimento e ocorre durante o processo de envelhecimento do concreto.

Semelhante à fluência, a separação do fenômeno da retração é feita somente no campo teórico, sendo negligenciada quando da análise estrutural.

Assim como na fluência, de acordo com METHA e MONTEIRO (2008), a deformação por retração também possui parcela reversível e irreversível. A Figura 2.5 ilustra as duas parcelas da deformação por retração, onde o eixo horizontal representa o tempo em dias e o eixo vertical representa o encurtamento.

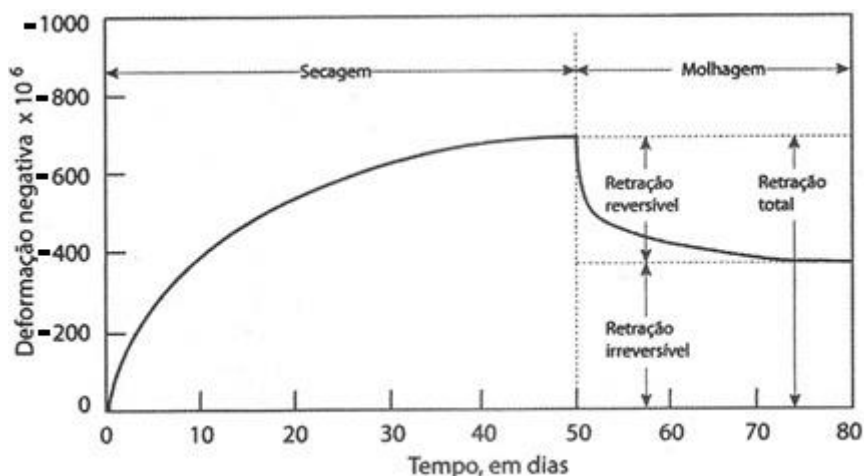


Figura 2.5 – Componente reversível e irreversível da deformação por retração. Fonte: METHA e MONTEIRO (2008)

Por meio de ciclos de molhagem-secagem as deformações por retração são parcialmente revertidas, como mostra a Figura 2.5. Após a molhagem do concreto, houve uma restituição gradual de parte das deformações impostas ao elemento, o que permite concluir que a retração por secagem é a parcela reversível da deformação por retração, sendo as demais parcelas (plástica, química e térmica) irreversíveis.

### 2.3.2. Fatores que influenciam a retração

A retração é considerada uma deformação reológica medida em um elemento exposto à temperatura constante e sem restrições de deslocamentos. A deformação por retração,  $\varepsilon_{sh}(t)$ , é usualmente considerada como a soma da retração por secagem  $\varepsilon_{sh,d}(t)$  e a retração endógena  $\varepsilon_{sh,e}(t)$ .

A deformação por secagem  $\varepsilon_{sh,d}(t)$  ocorre em função da perda de parte da água adsorvida pela pasta de cimento que é transferida para o ambiente externo como consequência da umidade diferencial relativa.

Muitos fatores influenciam, tanto na magnitude, quanto na taxa de desenvolvimento do fenômeno, seja amplificando ou atenuando seus mecanismos. Fatores como: umidade relativa do ambiente externo, características da pasta de cimento como, por exemplo, o grau de hidratação, o fator água-cimento, o tipo e tamanho dos agregados e a geometria da peça de concreto.

A magnitude dos efeitos da deformação por retração diminui com:

- o aumento da resistência característica do concreto;
- o aumento do módulo de elasticidade do agregado;
- o aumento do tamanho do agregado.

Apesar de a retração por secagem diminuir com o aumento da resistência do concreto, a magnitude das deformações provenientes da retração química e térmica (endógena) são sensivelmente aumentadas. Isso se deve ao fato de a quantidade de água livre para a hidratação do concreto de alta resistência ser menor do que a de concretos de menor resistência.

Por outro lado, a magnitude dos efeitos da deformação por retração aumenta com:

- o aumento do fator água cimento;
- o aumento da temperatura ambiente;
- o aumento da superfície de contato entre a peça de concreto e o ambiente externo.



### 3. DADOS DO PROJETO DA PONTE RODOVIÁRIA

A ponte seria construída no Rio de Janeiro e possui duas faixas de rolamento em cada sentido, com 3,50m de largura por faixa. Seu projeto é constituído por cinco longarinas em concreto protendido com pós-tração e aderência posterior. O tabuleiro da ponte possui dupla simetria e seu horizonte de projeto é de 50 anos.

Há um alargamento descontínuo da alma das vigas nos décimos de vão próximos aos apoios, onde é prevista a execução de transversinas de apoio solidárias à laje. O tabuleiro da ponte é apoiado nos pilares sobre aparelhos de apoio do tipo elastômero fretado (neoprene).

Todas as medidas presentes nos desenhos disponibilizados neste capítulo estão em centímetros; salvo o contrário, quando a unidade é explicitada. As plantas e detalhes das seções serão dispostos, sempre que possível, aproveitando a dupla simetria do tabuleiro.

#### 3.1. PLANTAS DE FÔRMA

A seguir estão detalhadas algumas plantas de fôrma da ponte rodoviária. As seções (S1 a S11), indicadas na Figura 3.1 e Figura 3.2, representam os décimos do vão teórico da ponte que possui 37,20m de comprimento e 15,50m de largura. A Figura 3.3 e Figura 3.4 apresentam as seções transversais ao longo do vão e na região do apoio respectivamente. A distância do apoio à extremidade da viga é de 0,45m.

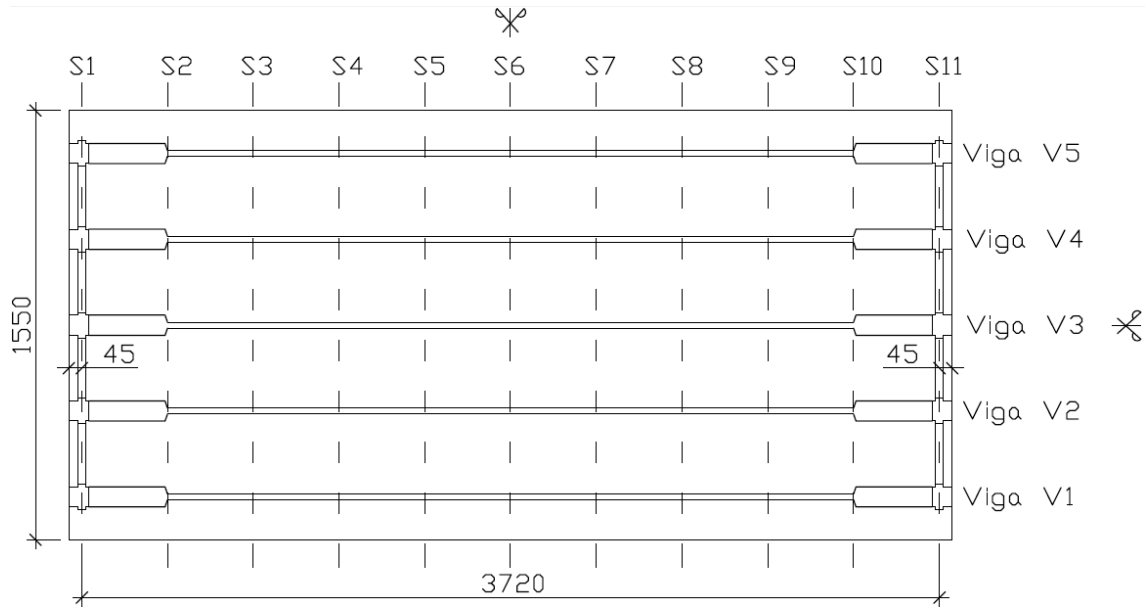


Figura 3.1 – Planta de fôrma da ponte rodoviária

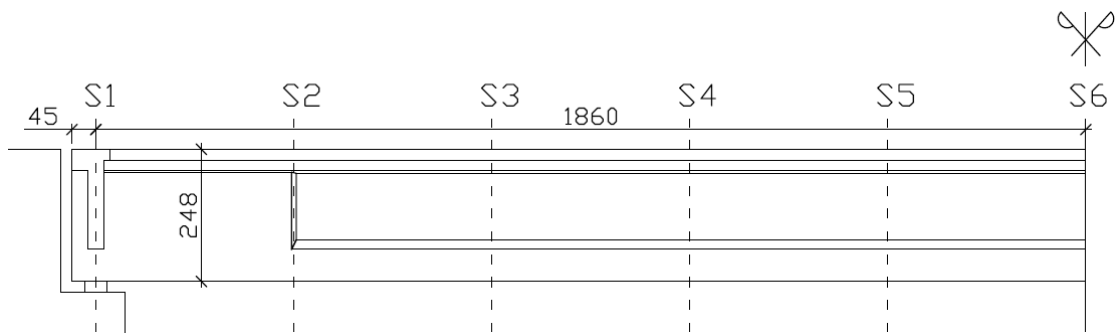


Figura 3.2 – Vista longitudinal da viga V1

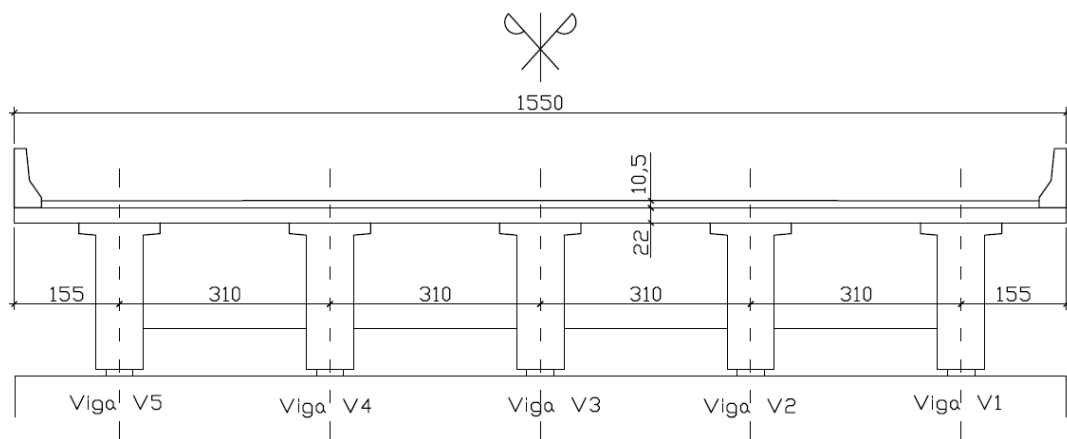


Figura 3.3 – Seção típica do apoio, S1 e S11, da planta de fôrma da ponte rodoviária

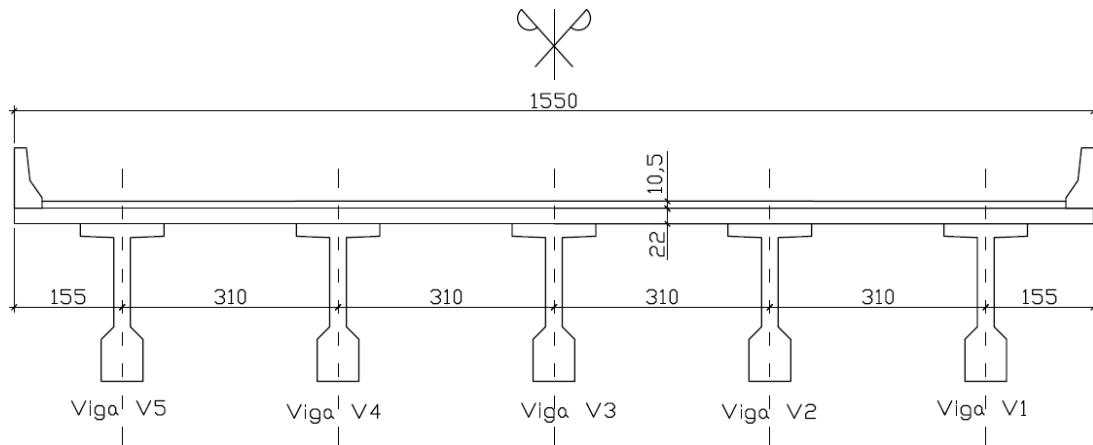


Figura 3.4 – Seção típica do vão, S2 a S10, da planta de fôrma da ponte rodoviária

### 3.2. ETAPAS CONSTRUTIVAS

A etapa construtiva deste estudo tem início a partir da concretagem das longarinas do tabuleiro, ou seja, pressupõe as fundações e os pilares da ponte (infra e mesoestrutura) prontos.

A concretagem da viga é executada “in loco” (para fins de análise, pois as vigas pré-moldadas são moldadas realmente em canteiro) e ocorre simultaneamente à concretagem das transversinas de apoio. Esta operação marca o início da etapa construtiva deste estudo, dia 0. Após 7 dias, executa-se a protensão das cinco vigas do tabuleiro em uma única etapa, sendo os quatro cabos, C1, C2, C3 e C4, de cada longarina, em etapa única (para fins de análise). A tensão de protensão aplicada em cada cabo nas ancoragens é de 1.406 MPa.

A concretagem da laje é executada, “in loco”, no 28º dia da construção, portanto, passados 21 dias após a protensão das vigas da ponte. A barreira lateral e camada asfáltica são executadas 22 dias após a concretagem da laje.

Para facilitar a visualização, a Tabela 3.1 detalha as etapas construtivas supracitadas. É válido ressaltar que não serão divulgadas informações detalhadas sobre as fases construtivas e métodos de construção por não se tratar de parte integrante do escopo do presente estudo.

Tabela 3.1 – Etapas construtivas da ponte rodoviária

CONSTRUÇÃO			
Item	Descrição	Duração (dias)	Tempo decorrido (dias)
1	Concretagem da viga e das transversinas	0	0
2	Execução da protensão	7	7
3	Concretagem da laje	21	28
4	Execução da barreira lateral e da camada asfáltica	22	50

### 3.3. VIGAS

As vigas utilizadas nesse projeto foram executadas “in loco” (para fins de análise), com protensão limitada, concreto protendido nível 2, pós-tração e aderência posterior, de acordo com as prescrições da NBR 6118:2003, tal como mostra a Tabela 3.2. A protensão é executada em etapa única (para fins de análise), para as cinco vigas do tabuleiro, por meio da aplicação de 1.406MPa de tensão em cada ancoragem dos cabos de protensão.

Existem seções típicas de apoio, dispostas nos décimos do vão, próximas à região dos apoios, Figura 3.3, e seções típicas de vão, Figura 3.4. O alargamento das almas das vigas nas seções próximas aos apoios é previsto para resistir aos esforços cortantes atuantes nessas seções, evitando assim o esmagamento da biela devido à compressão.

Tabela 3.2 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura em função das classes de agressividade ambiental. Fonte: NBR 6118:2003

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	--
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D <sup>1)</sup>	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D <sup>1)</sup>	Combinação frequente

<sup>1)</sup> A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com  $a_p = 50$  mm (figura 3.1).

NOTAS

1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2.

2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens.

3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.

Na Figura 3.5 são representadas as seções transversais da viga protendida.

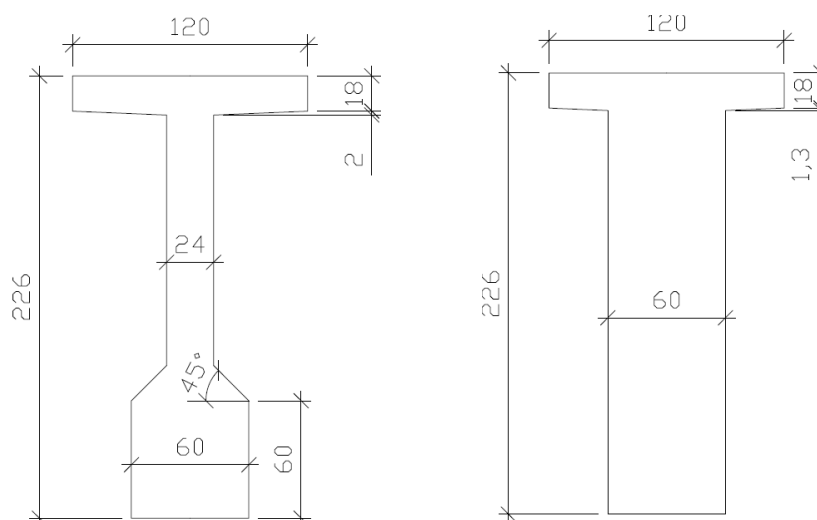


Figura 3.5 – Seção transversal da viga pré-moldada ao longo do vão e próxima à região do apoio

### 3.4. CABLAGEM

A armadura de protensão da viga é composta por 4 cabos, cada um com 12 cordoalhas CP-190 RB 15,2mm, com ancoragens ativas nas extremidades das vigas. O traçado dos cabos é simplifiadamente representado por três trechos, Figura 3.10, dois trechos parabólicos nas extremidades, simétricos e concordantes com um trecho central reto. Esta configuração geométrica não precisa na prática ser atendida.

O trecho reto é o segmento do traçado onde o cabo passa pelo meio do vão, na posição mais próxima ao bordo inferior da viga, devendo obedecer, portanto, aos limites mínimos de cobrimento.

De acordo com a NBR 6118:2003, o cobrimento mínimo deve atender os requisitos apresentados na Tabela 3.3. Considerando a classe de agressividade ambiental adotada, classe III, o cobrimento mínimo da armadura deve ser de 4,5cm. Foi adotado, conservadoramente, o comprimento de 11cm para a distância entre o bordo inferior da viga e o eixo dos cabos de protensão localizados no meio do vão.

Tabela 3.3 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c=10\text{mm}$ . Fonte: NBR 6118:2003

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

<sup>4)</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Para o presente estudo, o desvio horizontal dos cabos não será considerado. Portanto, na seção do meio do vão, os 4 cabos de protensão estarão presentes na sua posição real. Esta hipótese simplificadora foi adotada para facilitar a modelagem computacional.

Para a visualização da cablagem, as Figura 3.6 à Figura 3.9 apresentam o detalhamento adotado.

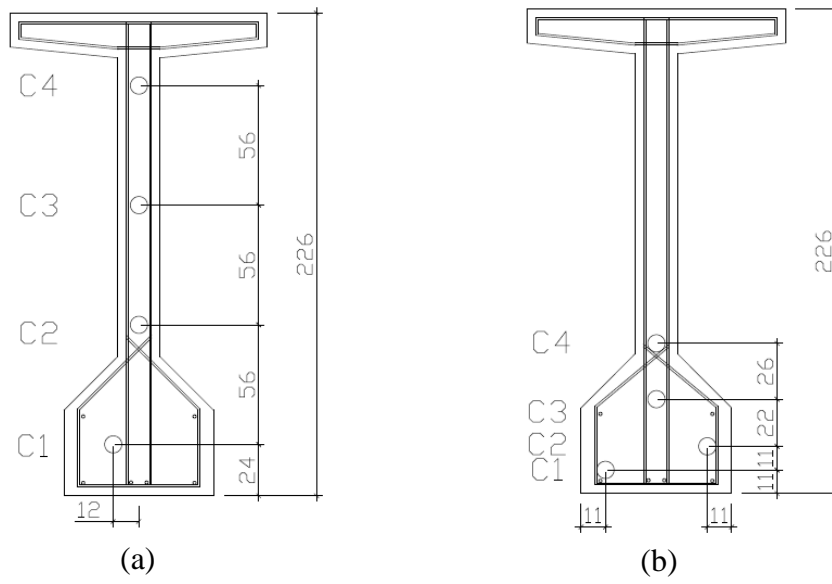


Figura 3.6 – Detalhe da (a) seção S1 e (b) seção S2

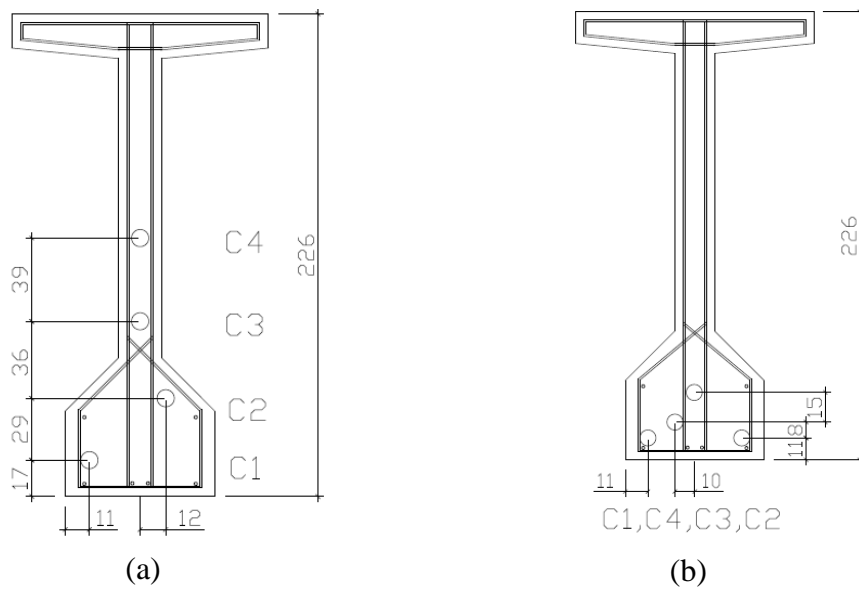


Figura 3.7 – Detalhe da (a) seção S3 e (b) seção S4



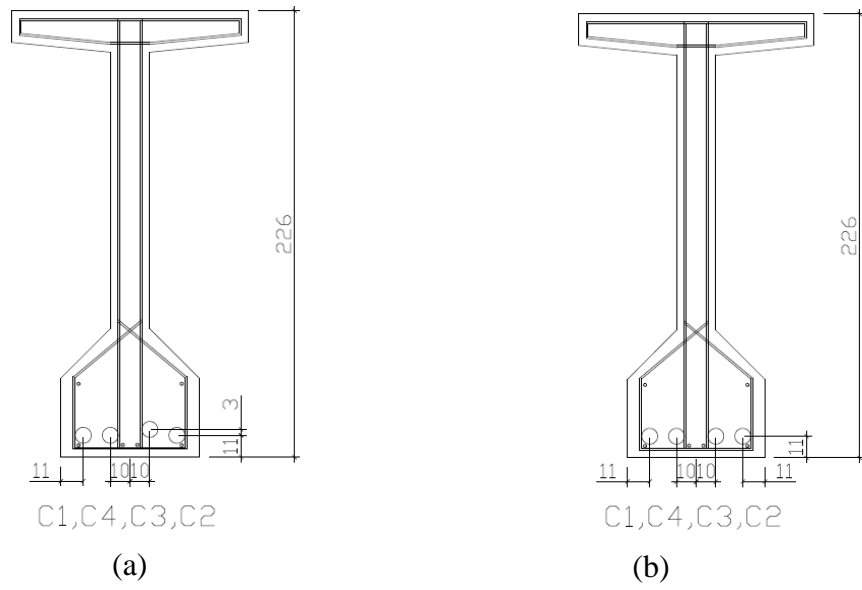


Figura 3.8 – Detalhe da (a) seção S5 e (b) seção S6

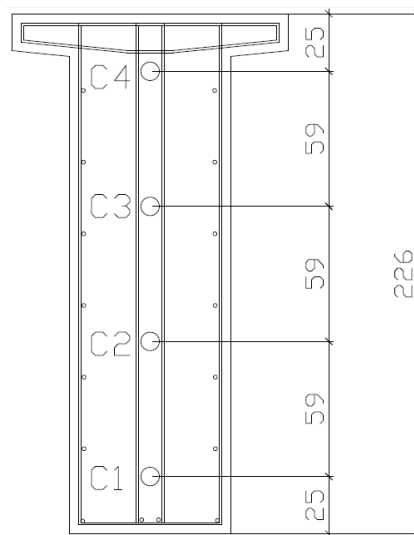


Figura 3.9 – Detalhe da seção na região da ancoragem dos cabos

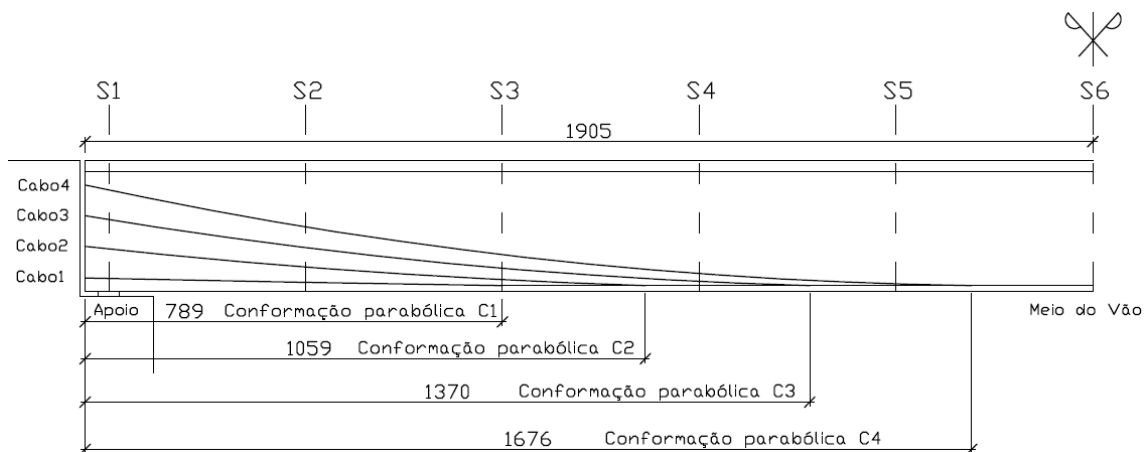


Figura 3.10 – Traçado longitudinal dos cabos em elevação

### 3.5. TRANSVERSINAS

As transversinas de apoio utilizadas nesse projeto foram executadas “in loco” (para efeito de análise) e conectadas à laje. A transversina tem altura de 1,88m e leva em consideração a necessidade de manutenção e troca dos aparelhos de apoio, possui uma espessura de 0,30m e largura colaborante de 0,72m.

A Figura 3.11 apresenta um detalhe da região do apoio e a Figura 3.12 apresenta a seção transversal S1 do tabuleiro. Nas duas figuras, a transversina está destacada para facilitar sua visualização.

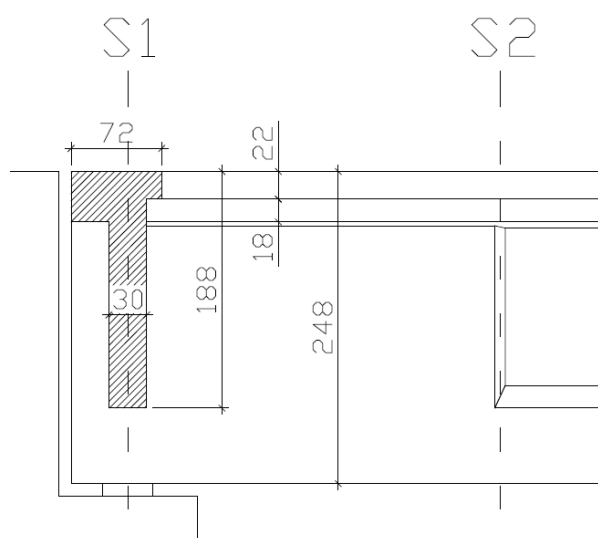


Figura 3.11 – Detalhe da região do apoio em elevação

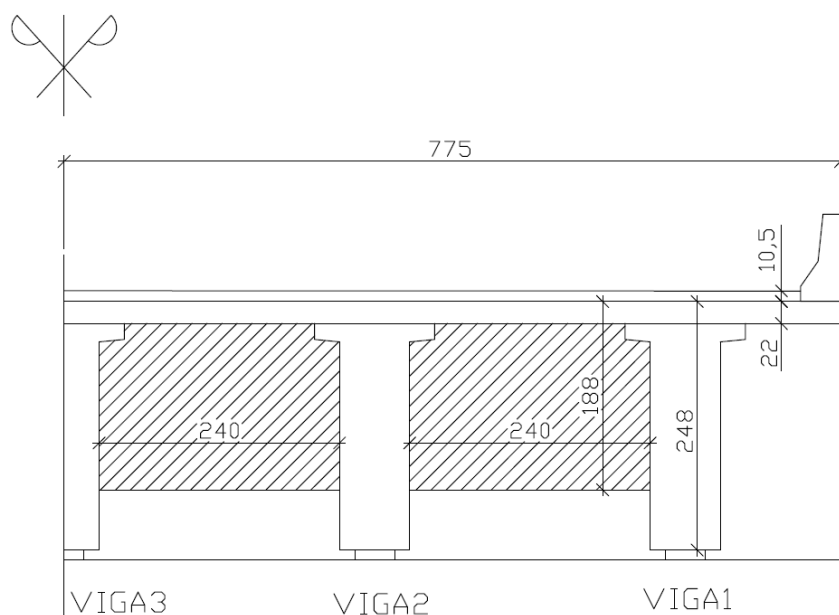


Figura 3.12 – Detalhe da seção S1 da planta de fôrma da ponte rodoviária

### 3.6. APARELHO DE APOIO

Foram utilizados 10 aparelhos de apoio em neoprene fretado, representados na Figura 3.13 e Figura 3.14, com as seguintes especificações:

- dimensões em planta: 450mm (transversal) e 300mm (longitudinal);
- 3 camadas de neoprene de 10mm cada;
- 1 camada de neoprene de 3mm para cobrimento (superior e inferior);
- 4 chapas de aço de espessura de 2mm.

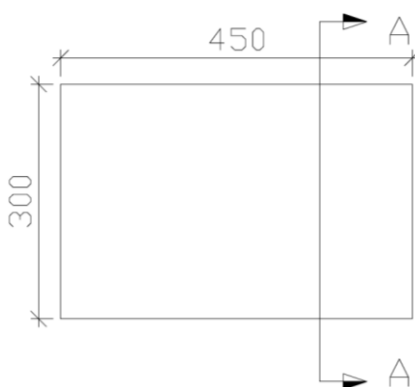


Figura 3.13 – Vista superior do aparelho de apoio (medidas em mm)

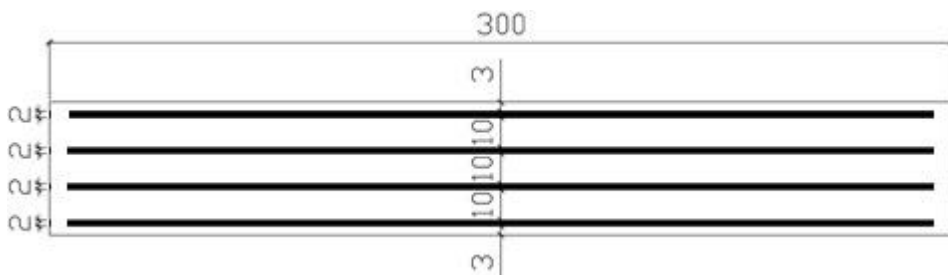


Figura 3.14 – Detalhe da seção AA, na direção longitudinal da ponte (medidas em mm)

### 3.7. MATERIAIS EMPREGADOS

#### 3.7.1. Concreto

A NBR 6118:2003 estabelece critérios para o uso do concreto de acordo com a classe de agressividade do meio ambiente, como mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Fonte: NBR 6118:2003

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
<p>NOTAS</p> <p>1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.</p> <p>2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.</p> <p>3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.</p>					

Tratando-se de um projeto que seria executado na cidade do Rio de Janeiro, a classe de agressividade considerada foi a classe III e, portanto, para os elementos de concreto (laje, vigas e transversinas) foi adotado o C35 com cimento de pega normal.

#### 3.7.2. Aço

O aço utilizado em elementos de concreto protendido se caracteriza por elevadas tensões de resistência. Para este projeto, foi utilizado o CP190 – RB que, de acordo com a NBR 7483:2004, significa:

**CP** – Concreto Protendido

**190** – Limite mínimo de resistência à tração, em kgf/mm<sup>2</sup> (1kgf/mm<sup>2</sup> = 10MPa)

**RB** – Relaxação Baixa

É válido ressaltar que a relaxação é uma propriedade do aço relacionada à deformações de alongamento quando este é submetido a tensões constantes ao longo do tempo. A relaxação do aço não faz parte do escopo deste estudo.

As cordoalhas, compostas por 7 fios, têm as características apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características do CP-190 RB 15,2 mm. Fonte: NBR 7483:2004

Designação ABNT	Diâmetro Nominal	Área Aproximada	Área Mínima	Massa Aproximada	Carga Mínima à 1% de Deform.	Carga Mínima de Ruptura	Alongamento sob Carga (em 610 mm)
	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )	(kg/km)	(kN)	(kN)	(%)
CP-190 RB 15,2	15,2	143,5	140	1.126	239,2	265,8	3,5

### 3.8. RESUMO DA GEOMETRIA DA PONTE

Tabuleiro:

- Vão longitudinal teórico: 37,20m
- Largura: 15,50m
- Distância do apoio à extremidade da viga: 0,45m
- Espessura da laje: 0,22m
- Espessura da transversina de apoio: 0,30m
- Largura colaborante da laje: 0,72m
- Espessura do pavimento asfáltico: 0,105m

Viga protendida:

- Altura: 2,26m
- Largura da mesa superior: 1,20m
- Espessura da mesa superior: 0,20m
- Espessura da extremidade da mesa superior: 0,18m
- Espessura da alma: 0,24m
- Espessura da alma no apoio: 0,60m
- Largura do talão inferior: 0,60m
- Altura do talão inferior: 0,60m
- Espaçamento transversal entre vigas: 3,10m
- Largura colaborante da laje 3,10m

#### 4. MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo foi desenvolvido utilizando o software comercial de análises, SAP2000 v.14. Com ele foram analisadas as etapas construtivas (“*staged construction*”) considerando as propriedades reológicas do concreto. A Figura 4.1 apresenta uma ilustração do modelo em elementos finitos, descrito em detalhes neste capítulo.

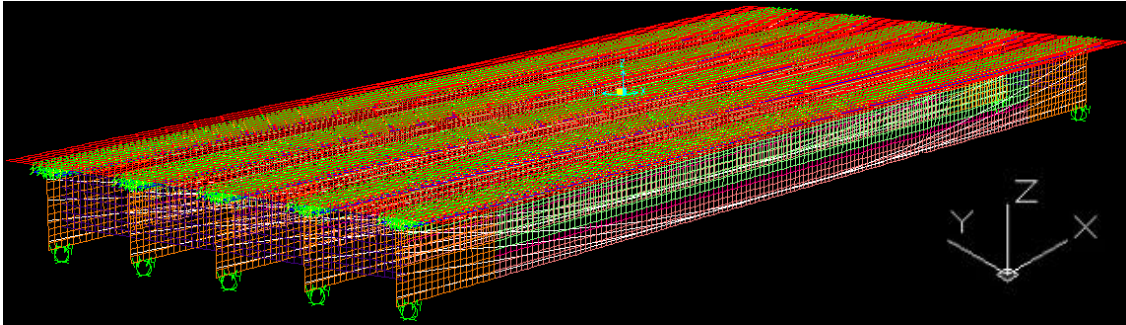


Figura 4.1 – Vista isométrica do modelo em elementos finitos. Fonte: SAP2000 v.14

O centro dos eixos globais do modelo está localizado no eixo da laje, no meio do vão e possui X na direção longitudinal, Y na direção transversal e Z na direção vertical, com sentido positivo para cima. Os eixos de coordenadas localizados na parte inferior direita da Figura 4.1 foram apresentados apenas para facilitar a visualização das direções positivas.

As unidades básicas das grandezas físicas para todos os cálculos realizados neste capítulo estão de acordo com o adotado no software de análise estrutural SAP2000 v.14. Para este projeto, foram consideradas as seguintes unidades:

- unidade padrão de força – **kN**
- unidade padrão de comprimento – **m**
- unidade de temperatura – **K**.

Com isto as unidades adicionais resultantes são:

- unidade de tensão – **kPa**
- unidade de resistência dos materiais – **kPa**

- unidade de módulo de elasticidade – **kPa**
- unidade de área – **m<sup>2</sup>**
- unidade de força distribuída por área – **kN/m<sup>2</sup>**
- unidade de peso específico – **kN/m<sup>3</sup>**

#### 4.1. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS UTILIZADOS

##### 4.1.1. Concreto

Foi adotado o concreto C35 com cimento de pega normal. Este concreto foi utilizado para a definição das propriedades resistentes de todos os elementos estruturais da ponte. Os cálculos estão detalhados abaixo.

##### **Propriedades de resistência, NBR 6118:2003**

*Tipo de material* = "concrete" (concreto)

$$\rho = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$E = 0,85 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} = 0,85 \times 5600 \times \sqrt{35} \rightarrow 28.160.000 \text{ kPa}$$

$$\nu = 0,2$$

$$\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

##### **Propriedades reológicas, CEB-FIP 90**

*Coefficiente do tipo de cimento* = 0,25

*Umidade relativa* = 85%

*Coefficiente de forma:*

$$* h_{laje} = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 3,41}{31,44} = 0,216 \text{ m}$$

$$* h_{viga} = \frac{2 \times A_c}{u} = \frac{2 \times 0,9732}{7,389} = 0,263 \text{ m}$$

*Coefficiente de retração*  $\rightarrow \beta_{sh} = 5$

*Início da retração* = 0 dias



#### 4.1.2. Aço

Foi adotado o aço CP190-RB. A armadura ativa de cada viga longarina é constituída de quatro cabos com doze cordoalhas de 15,2mm. As cordoalhas são compostas por sete fios. As propriedades deste aço estão apresentadas abaixo.

#### **Propriedades de resistência, NBR 7483:2004 e NBR 6118:2003**

*Nome do material = CP190RB*

*Tipo de material = "tendon" (cabo de protensão)*

$$\rho = 78,83 \text{ kN/m}^3$$

$$E = 200.000.000 \text{ kPa}$$

$$\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

As propriedades reológicas do aço foram negligenciadas, uma vez que não fazem parte do escopo do presente estudo.

#### 4.2. VIGAS

Foram adotadas cinco longarinas com duas seções transversais típicas, uma ao longo do vão e outra nas regiões próximas ao apoio.

As duas seções transversais foram modeladas com elementos finitos de casca com espessura constante. A seção da viga ao longo do vão é ilustrada na Figura 4.2. As propriedades de cada elemento estão detalhadas no final deste item.

A Figura 4.2 busca distinguir, por diferenciação de cores, os elementos que modelam as duas seções transversais típicas. Os elementos finitos de casca são aproximadamente quadrados, com 0,25m de comprimento de lado com as respectivas espessuras especificadas no final deste item.

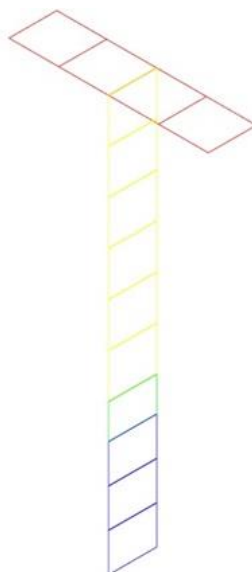


Figura 4.2 – Modelo em elementos finitos da viga ao longo do vão. Legenda de cores:  
talão – elemento azul; engrossamento da alma – elemento verde; alma – elemento  
amarelo; mesa – elemento vermelho.

#### **Propriedades dos elementos finitos da viga:**

*Tipo do elemento = "Shell – Thin" (casca)*

*Material = Concreto*

*Ângulo do material = 0*

As propriedades acima são as mesmas utilizadas para cada elemento finito das duas seções transversais da viga. Abaixo estão detalhadas as informações específicas de cada elemento.

*Nome do elemento: Alma*

*Espessura de membrana = 0,24m*

*Espessura de flexão = 0,24m*

*Nome do elemento: Alargamento Alma*

*Espessura de membrana = 0,60m*

*Espessura de flexão = 0,60m*

*Nome do elemento: Mesa*

*Espessura de membrana = 0,192m*

*Espessura de flexão = 0,192m*

*Nome do elemento: Talão*

*Espessura de membrana = 0,60m*

*Espessura de flexão = 0,60m*

*Nome do elemento: Engrossamento*

*Espessura de membrana = 0,42m*

*Espessura de flexão = 0,42m*

#### 4.3. CABOS DE PROTENSÃO

Cada cabo de protensão foi modelado como elemento de “tendon” e inserido na viga em função da cablagem, definida no item 3.4, deste trabalho.

#### **Propriedades dos elementos de “tendon” do cabo de protensão:**

*Nome do elemento = Cabo Protensão*

*Modelagem do "tendon" como elemento*

*Material = CP190RB*

*Área da seção transversal =  $1,68 \times 10^{-3}m^2$*

#### 4.4. LAJE

Utilizando a mesma metodologia adotada para a modelagem das vigas, as lajes são representadas por elementos finitos de casca com espessuras constantes. Os elementos finitos de casca são aproximadamente quadrados, com 0,25m de comprimento.

A ligação laje-viga foi realizada por meio de links, com 0,21m de comprimento, tanto para as seções da viga ao longo do vão, como detalhado na Figura 4.3. Os links são elementos sem nenhuma propriedade resistente e são utilizados para que haja dependência linear de deslocamento entre os nós ligados e, por conseguinte, entre os respectivos elementos. Os três deslocamentos, U1, U2 e U3, bem como as três rotações, R1, R2 e R3 nos nós extremos de cada link foram prescritos.

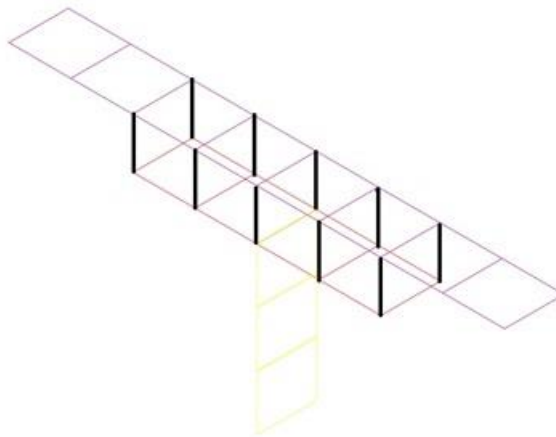


Figura 4.3 – Ligação laje e viga ao longo do vão. Legenda de cores: alma – elemento amarelo; mesa – elemento vermelho; link – linha preta; laje – elemento roxo.

#### **Propriedades dos elementos finitos da laje:**

*Nome do elemento: Laje*

*Tipo do elemento = "Shell – Thin" (casca)*

*Material = Concreto*

*Ângulo do material = 0*

*Espessura de membrana = 0,22m*

*Espessura de flexão = 0,22m*

#### **Propriedades dos links:**

*Tipo de link = Linear*

*Massa e peso = 0*

*Inércias rotacionais = 0*

*Fatores de linha = 1*

*Direções restringidas = U1, U2, U3, R1, R2 e R3*

#### 4.5. TRANSVERSINAS

A transversina foi modelada com o mesmo tipo de elemento finito, casca, com espessura constante. Os elementos finitos de casca são aproximadamente quadrados, com 0,25m de comprimento.

O bordo inferior da transversina foi definido a 0,60m do bordo inferior da viga, sendo solidária à laje. A Figura 4.4 detalha a transversina entre as vigas V1 e V2.

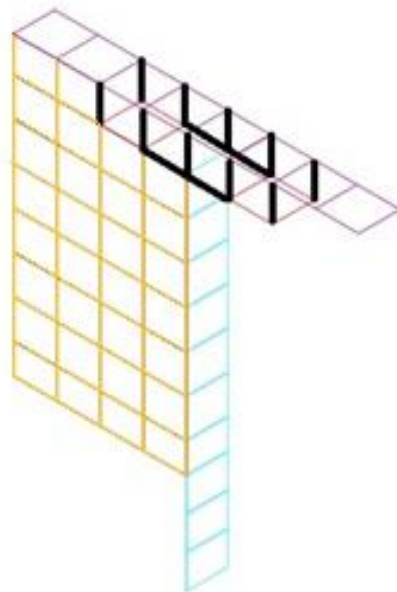


Figura 4.4 – Modelo em elementos finitos da transversina. Legenda de cores:  
alargamento da alma – elemento azul claro; mesa – elemento vermelho; link – linha  
preta; laje – elemento roxo; transversina – elemento amarelo.

#### **Propriedades dos elementos finitos da transversina:**

*Nome do elemento: Transversina*

*Tipo do elemento = "Shell – Thin" (casca)*

*Material = Concreto*

*Ângulo do material = 0*

Espessura de membrana = 0,30m

Espessura de flexão = 0,30m

#### 4.6. APOIOS

Foi adotado o aparelho de apoio de neoprene fretado. Para modelar o aparelho de apoio foram utilizadas apoios elásticos. O cálculo do coeficiente de rigidez do apoio elástico está detalhado abaixo.

A força cortante de serviço ( $V_{d\_serv}$ ) foi determinada no projeto piloto, SOUZA (2013). Os esforços presentes no tabuleiro estão detalhados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de solicitações características do tabuleiro. Fonte: SOUZA (2013)

Resumo	G1		G2		G3		Trem Tipo Positivo+Negativo				
	V	M	V	M	V	M	Mínimos V	Mínimos M	Máximos V	Máximos M	
Nós											
1	498,48	0,00	321,45	0,00	242,92	0,00	-24,12	0,00	611,58	0,00	
2	362,03	1600,60	257,19	1075,80	194,33	813,28	-20,95	-80,66	520,03	2044,40	
3	271,52	2779,00	192,93	1912,50	145,75	1445,80	-60,46	-143,11	434,97	3625,40	
4	181,02	3620,70	128,67	2510,10	97,17	1897,70	-106,48	-187,37	356,42	4743,00	
5	90,51	4125,70	64,4	2868,70	48,58	2168,80	-159,01	-214,28	284,38	5425,10	
6	0,00	4294,10	0,14	2988,20	0,00	2259,10	-218,04	-223,41	218,84	5657,80	
7	-90,51	4125,70	-64,12	2868,70	-48,58	2168,80	-284,38	-214,28	159,01	5425,10	
8	-181,02	3620,70	-128,39	2510,10	-97,17	1897,70	-356,42	-187,37	106,48	4743,00	
9	-271,52	2779,00	-192,65	1912,50	-145,75	1445,80	-434,97	-143,11	60,46	3625,40	
10	-362,03	1600,60	-256,91	1075,80	-194,33	813,28	-520,02	-80,66	20,95	2044,40	
11	-498,48	0,00	-321,45	0,00	-242,92	0,00	-611,58	0,00	24,12	0,00	

onde:

- G1 – Solicitações relativas ao peso próprio das vigas
- G2 – Solicitações relativas ao peso da laje
- G3 – Solicitações relativas ao peso do asfalto e barreira lateral

Propriedades do aparelho de apoio:

$$G = 1 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 10 \cdot \text{MPa}$$

$$A_{ap} = \frac{V_{d\_serv}}{\sigma} = 0.137 \text{ m}^2$$

Altura adotada do aparelho de neoprene:

$$h_{ap} = 0.030\text{m}$$

Rigidez da "mola" do aparelho de neoprene:

$$k_{ap} = \frac{G \cdot A_{ap}}{h_{ap}} = 4.562 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Os apoios elásticos são modelados em cada uma das cinco vigas longarinas, em ambas as extremidades. Os deslocamentos nas direções X (longitudinal) e Y (transversal) são restringidos por apoios elásticos com a rigidez calculada anteriormente e na direção Z por apoio rígido. As rotações não são restringidas.

#### 4.7. CARREGAMENTOS

Para o presente estudo foram criados sete carregamentos com propriedades distintas detalhadas abaixo:

##### **Carga de peso próprio:**

O SAP2000 v.14 utiliza as propriedades do material e das seções transversais para criar o peso próprio. Portanto, a carga de peso próprio de cada elemento modelado, laje, viga e transversina é definida de forma padrão pelo software como DEAD.

##### **Carga da laje:**

Para aplicar a carga da laje na viga, de forma coerente com as etapas construtivas do projeto, foram criados dois carregamentos distintos.

*Nome do carregamento: AplicaLaje*

*Tipo de carregamento: "Joint Load" (Carga nodal)*

*Aplicação: Topo de cada uma das cinco vigas*

$$\text{Força aplicada} = 4,23 \text{ kN}$$

Esta carga simula o carregamento do peso próprio da laje quando da etapa de concretagem, onde não há rigidez despertada pelo concreto, somente o peso da mistura sobre as vigas. O cálculo da magnitude foi feito através da influência da laje sobre os nós vigas longarinas.

$$\text{Peso próprio total da laje} = 25 \times 0,22 \times 38,192 \times 15,5 = 3255,87 \text{ kN}$$

$$N^{\circ} \text{ de nós de cada viga} = 154$$

$$N^{\circ} \text{ de vigas} = 5$$

$$\text{Força aplicada por nó} = \frac{3255,87}{154 \times 5} = 4,23 \text{ kN}$$

O segundo carregamento criado para simular o peso próprio da laje já considera a cura do concreto e, conseqüentemente, sua rigidez é despertada.

*Nome do carregamento: ResisteLaje*

*Tipo de carregamento: "Uniform Shell" (Carga de superfície)*

*Aplicação: Sobre toda área da laje*

$$\text{Força aplicada} = 5,5 \text{ kN/m}^2$$

### **Carga de protensão:**

*Nome do carregamento: Protensao*

*Tipo do carregamento: Tensão*

*Aplicação: Nas duas extremidades do cabo de protensão*

$$\text{Tensão aplicada} = 1.406.000 \text{ kPa}$$

$$\text{Coeficiente de atrito aparente entre cabo e bainha} = 0,2$$

$$\text{Coeficiente de perda por curvatura não intencional} = 0,002\text{m}^{-1}$$

$$\text{Deslocamento na ancoragem quando da protensão} = 0,006\text{m}$$



### **Carga da barreira lateral:**

Nome do carregamento: *BarreiraLateral*

Tipo de carregamento: "Joint Load" (Carga nodal)

Aplicação: Nós internos dos elementos extremos nos bordos do tabuleiro

Força aplicada = 1,44 kN

O cálculo da força aplicada está detalhado abaixo:

Peso da barreira lateral = 5,8 kN/m

Nº de nós para cada barreira lateral = 154

$$\text{Força aplicada} = \frac{5,81 \times 38,192}{154} = 1,44 \text{ kN}$$

### **Carga de asfalto:**

Nome do carregamento: *Asfalto*

Tipo de carregamento: "Uniform Shell" (Carga de superfície)

Aplicação: Sobre toda área que possui asfalto

Força aplicada =  $0,105 \times 24 = 2,52 \text{ kN/m}^2$

### **Carga móvel**

A carga móvel foi baseada no trem tipo Classe 45, NBR 7187:2003, de acordo com a Figura 4.5.

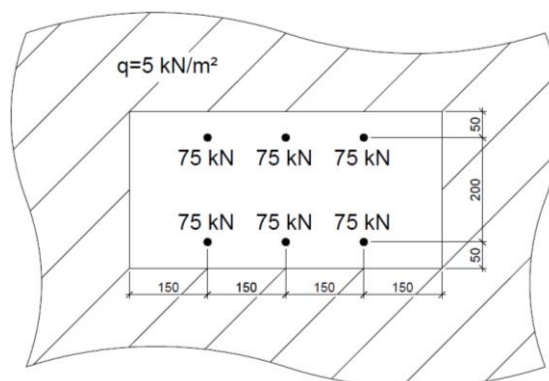


Figura 4.5 – Trem tipo Classe 45. Fonte: NBR 7187:2003

As cargas de peso próprio do veículo foram aplicadas por meio de cargas nodais. A carga de multidão foi aplicada distribuída pela laje. Nos cálculos detalhados mais abaixo, o coeficiente de impacto é considerado para determinação das grandezas dos carregamentos aplicados.

O trem tipo foi aplicado em uma única posição, no meio do vão da ponte, e posicionado transversalmente em função da linha de influência, ver Figura 4.6, de distribuição transversal de carga da viga V1, a mais externa. Esta linha de influência foi calculada no projeto piloto, SOUZA (2013).

<b>Y</b>	1,063	0,78318	0,2632	0,00932	-0,036	-0,0184	-0,0066
<b>X (m)</b>	-7,75	-6,2	-3,1	0	3,1	6,2	7,75

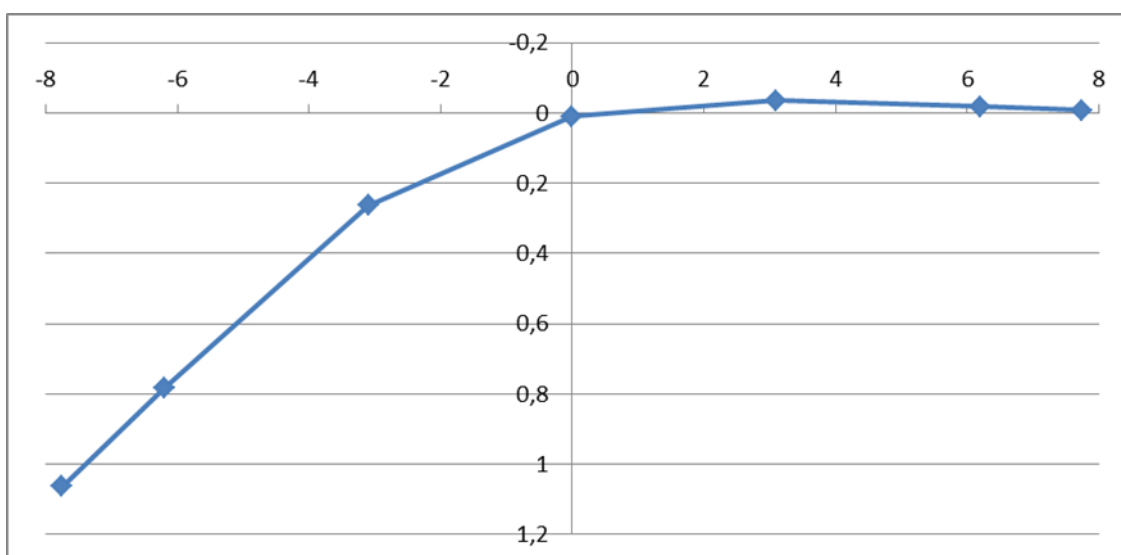


Figura 4.6 – Linha de influência de distribuição transversal para a viga V1. Fonte: SOUZA (2013)

### **Cargas concentradas do veículo:**

Adotou-se o trem tipo simplificado, conforme prescrito pela NBR 7187:2003, de acordo com a linha de influência (Figura 4.6).

*Nome do carregamento: CargaConcentrada*

*Tipo de carregamento: "Joint Load" (Carga nodal)*

*Carga pontual:*

$$(75 \times 6 - 5 \times 3 \times 6) / 6 = 60 \text{ kN}$$

$$\text{Força aplicada} = 60 \times (1,4 - 0,007 \times 37,2) = 68,40 \text{ kN}$$

A Figura 4.7 mostra a aplicação da ação proveniente das rodas do veículo tipo, no meio do vão, de acordo com a linha de influência transversal (Figura 4.6).

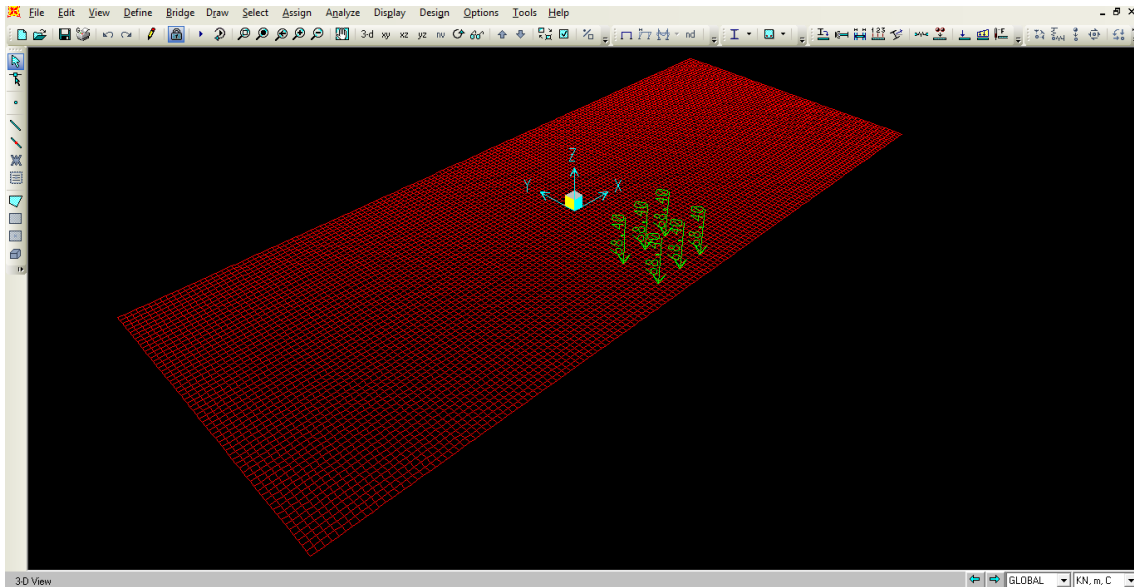


Figura 4.7 – Detalhe da aplicação das cargas concentradas, vista isométrica. Fonte: SAP2000 v.14

### **Carga de multidão:**

*Nome do carregamento: CargaMultidão*

*Tipo de carregamento: "Uniform Shell" (Carga de superfície)*

$$\text{Força aplicada} = 5 \times (1,4 - 0,007 \times 37,2) = 5,70 \text{ kN/m}^2$$

A Figura 4.8 mostra a aplicação da carga de multidão (cor lilás), ao longo de todo vão, de acordo com a linha de influência transversal (Figura 4.6).

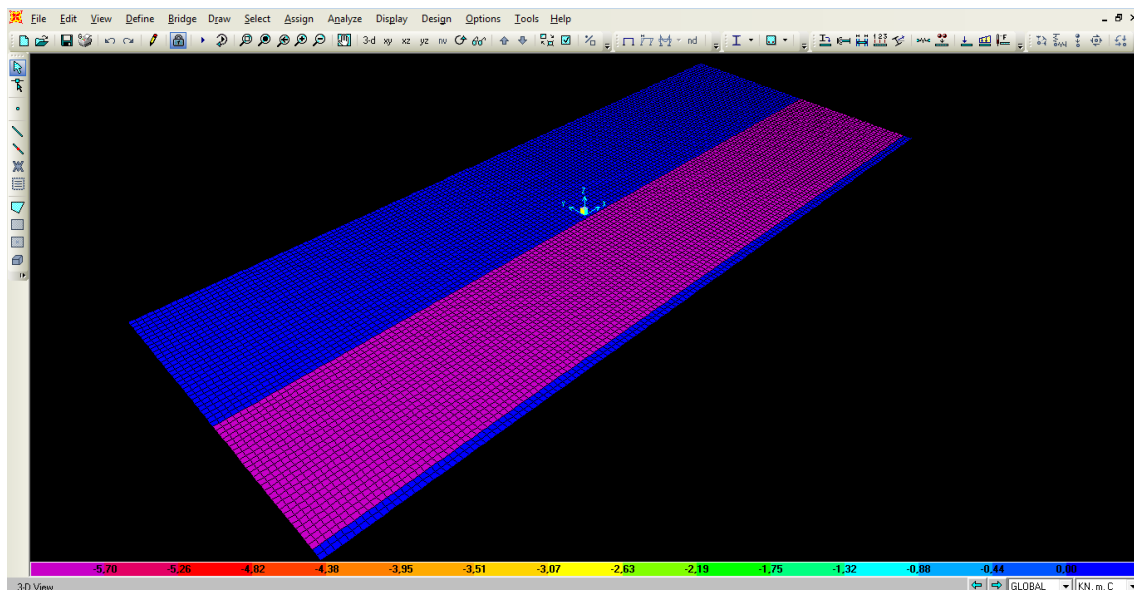


Figura 4.8 – Detalhe da aplicação da carga de multidão, vista isométrica. Fonte: SAP2000 v.14

#### 4.8. ANÁLISE EM ETAPAS CONSTRUTIVAS

As etapas construtivas, descritas no item 3.2, foram definidas no software de acordo com a Tabela 4.3, que informa todos os comandos, durações, fatores, etc., que foram aplicados na análise. Para facilitar o entendimento, a Tabela 4.2 descreve a operação realizada em cada etapa modelada.

É válido ressaltar que o procedimento adotado para a modelagem das etapas construtivas é fruto de um estudo sobre a opção de análise em “*Nonlinear Staged Construction*”. O SAP2000 v.14 não informa a idade do concreto durante as diversas etapas da análise, causando dúvidas em localizá-las. Esta falha foi corrigida na versão 16 do programa. Portanto, as etapas nas quais há adição ou remoção de parâmetros no modelo, cargas, elementos, grupos, etc., a duração é arbitrada em 0 (zero) dia. Por outro lado, nas etapas que possuem duração em dias, nenhuma operação é realizada no modelo.

Tabela 4.2 – Descrição das etapas construtivas da ponte

DESCRIÇÃO DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS		
Etapa	Duração (dias)	Operação
1	0	Executa-se a concretagem da viga.
2	7	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.
3	0	A viga já possui rigidez para resistir ao seu peso próprio. A protensão dos cabos é executada em etapa única.
4	21	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.
5	0	Executa-se a concretagem da laje.
6	0	A viga recebe o carregamento do peso próprio da laje.
7	4	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.
8	0	A laje já possui rigidez para resistir ao seu peso próprio. É retirado o escoramento e fôrmas.
9	18	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.
10	0	Executa-se a barreira lateral e o asfalto sobre a laje do tabuleiro.
11	50	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.
12	0	Aplica-se a carga móvel.
13	0	Retira-se a carga móvel.
14	100	Nenhuma operação é realizada. Apenas conta-se o tempo de duração da etapa anterior.

**Propriedade das análises em etapas construtivas:**

MODELO ESTACIONÁRIO

*Nome do caso: StagConst\_2*

*Tipo de caso: "Static" (Estático)*

*Tipo de análise: "Nonlinear Staged Construction" (Etapas construtivas)*

*Condição inicial: "Zero Initial Conditions" (Estado de tensões inicial nulo)*

*Método de não linearidade geométrica: "None" (Nenhum)*

*Visualização dos resultados: "End of Each Stage" (Final de cada etapa)*

*Parâmetros não lineares: "Default" (Padrão, sem fluência e retração)*

## MODELO REOLÓGICO

*Nome do caso: TimDepen\_2*

*Tipo de caso: "Static" (Estático)*

*Tipo de análise: "Nonlinear Staged Construction" (Etapas construtivas)*

*Condição inicial: "Zero Initial Conditions" (Estado de tensões inicial nulo)*

*Método de não linearidade geométrica: "None" (Nenhum)*

*Visualização dos resultados: "End of Each Stage" (Final de cada etapa)*

*Parâmetros não lineares: "Time Dependent Material Properties"*

As definições acima representam os dois modelos criados para realizar o estudo da influência das deformações de retração e fluência na ponte rodoviária. Os modelos possuem as mesmas etapas construtivas, diferindo somente nos parâmetros não-lineares, como descrito acima. Um modelo não considera a fluência e retração para a solução da análise estrutural (MODELO ESTACIONÁRIO) e o outro considera (MODELO REOLÓGICO). O capítulo 5 apresenta os dois modelos de forma mais detalhada.

Tabela 4.3 – Definição das etapas construtivas da ponte

DEFINIÇÃO DAS ETAPAS CONSTRUTIVAS									
Etapa	Duração (dias)	Disponibilizar Saída	Operação	Tipo de Objeto	Nome do Objeto	Idade Inicial	Tipo	Nome	Fator
1	0	Yes	Add Structure	Group	Vigas	0	-	-	-
2	7	Yes	-	-	-	-	-	-	-
3	0	Yes	Load Objects If Added	Group	Vigas	-	Load Pattern	Dead	1,0
			Load Objects	Group	Vigas	-	Load Pattern	Protensao	1,0
4	21	Yes	-	-	-	-	-	-	-
5	0	Yes	Load Objects	Group	Vigas	-	Load Pattern	AplicaLaje	1,0
6	0	Yes	Add Structure	Group	Laje	0	-	-	-
7	4	Yes	-	-	-	-	-	-	-
8	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	ResisteLaje	1,0
			Load Objects	Group	Vigas	-	Load Pattern	AplicaLaje	-1,0
9	18	Yes	-	-	-	-	-	-	-
10	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	BarreiraLateral	1,0
			Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	Asfalto	1,0
11	50	Yes	-	-	-	-	-	-	-
12	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
13	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
14	100	Yes	-	-	-	-	-	-	-
15	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
16	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
17	300	Yes	-	-	-	-	-	-	-
18	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
19	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
20	500	Yes	-	-	-	-	-	-	-
21	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
22	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
23	1000	Yes	-	-	-	-	-	-	-
24	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
25	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
26	2000	Yes	-	-	-	-	-	-	-
27	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
28	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
29	4000	Yes	-	-	-	-	-	-	-
30	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
31	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
32	8000	Yes	-	-	-	-	-	-	-
33	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
34	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5
35	2250	Yes	-	-	-	-	-	-	-
36	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	0,5
37	0	Yes	Load Objects	Group	Laje	-	Load Pattern	CargaMovel	-0,5

Os fatores de ponderação das cargas foram adotados de forma a atender às diretrizes da combinação frequente da NBR 6118:2003. O somatório de dias, de cada etapa, é equivalente aos 50 anos de projeto da ponte rodoviária.

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento de um tabuleiro de ponte rodoviária em serviço, quando submetido à deformações por fluência e retração. O comportamento das tensões axiais da laje, bem como seu deslocamento vertical, além das tensões axiais das fibras mais extremas da viga, permitem avaliar, de forma geral, a influência das propriedades reológicas durante o envelhecimento do concreto como, por exemplo, a deformada do tabuleiro e as perdas de protensão. Portanto, os resultados extraídos dos modelos em elementos finitos foram:

- Tensão axial no topo do elemento finito da laje, posicionado no meio do vão, sobre a viga V3 (centro da laje);
- Tensão axial no elemento finito central da mesa da viga V1, posicionado no meio do vão;
- Tensão axial no elemento finito do bordo inferior da viga V1, posicionado no meio do vão;
- Deslocamento vertical do nó central do elemento finito da laje, posicionado no meio do vão, sobre a viga V3 (centro da laje).

Para evidenciar a influência das deformações reológicas, foram criados dois modelos em elementos finitos utilizando-se duas abordagens diferentes para análise estrutural. Na primeira abordagem, dita estacionária, utiliza-se o procedimento convencional de análise elástica, onde as propriedades não variam com a idade do concreto. A segunda, dita reológica, considera a influência das propriedades reológicas do concreto.

A validação dos dois modelos foi realizada através do projeto piloto, SOUZA (2013). Este trabalho foi desenvolvido durante a disciplina de Concreto Protendido I, do curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da UFRJ, ministrado pelo Prof. Benjamin Ernani Diaz, servindo de referência para o presente estudo.



Para facilitar o entendimento da análise dos resultados, o modelo que não leva em consideração as deformações por fluência e retração foi denominado MODELO ESTACIONÁRIO. O segundo modelo, que considera os efeitos reológicos do concreto na solução da análise, foi denominado MODELO REOLÓGICO.

### 5.1. MODELO ESTACIONÁRIO

O modelo estacionário não leva em consideração as propriedades reológicas. Na Figura 5.1 está detalhado o gráfico das tensões axiais obtidas nas fibras extremas dos bordos da viga V1.

É válido ressaltar que as tensões foram extraídas dos elementos finitos extremos (bordo superior e bordo inferior) da viga V1, posicionados no meio do vão da ponte. O gráfico vermelho representa a variação da tensão na fibra extrema do bordo superior e o gráfico verde representa a variação da tensão na fibra extrema do bordo inferior.

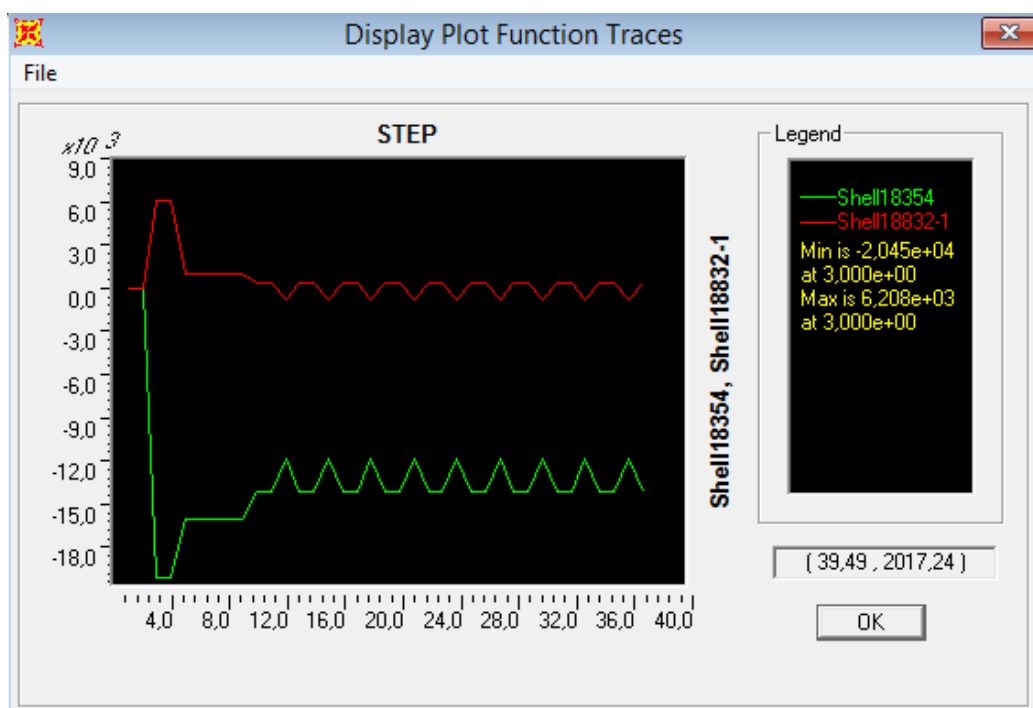


Figura 5.1 – Tensões axiais na viga V1 do modelo estacionário. Fonte: SAP2000 v.14

Na Figura 5.1, o eixo das abscissas representa as etapas da análise, de acordo com a Tabela 4.2, e o eixo das ordenadas representa as tensões axiais, em kPa.

Os valores máximos de tensão, tanto no bordo inferior, quanto no superior, são verificados no momento em que a protensão é executada. Os picos subsequentes do gráfico representam as tensões, de compressão nas fibras inferiores e de tração nas fibras superiores, provocadas pela aplicação e posterior retirada da carga móvel. A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.1 – Valores das tensões axiais na viga V1 do modelo estacionário

Tensões Axiais na Viga V1		
Posição da Viga	Protensão	Final da Análise
Bordo Superior	6208 kPa	280 kPa
Bordo Inferior	-20450 kPa	-14400 kPa

A Figura 5.2 apresenta o gráfico das tensões axiais obtidas no centro da laje. É válido ressaltar que o resultado foi extraído no topo do elemento finito do modelo da laje.

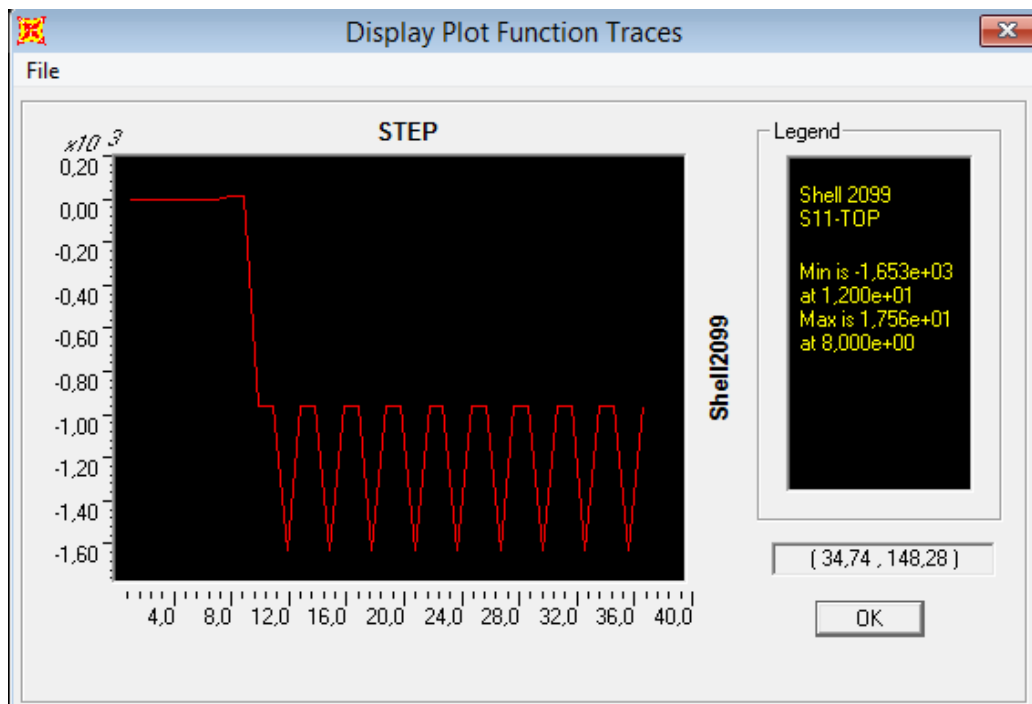


Figura 5.2 – Tensões axiais da laje do modelo estacionário. Fonte: SAP2000 v.14

Na Figura 5.2, o eixo das abscissas representa as etapas da análise, de acordo com a Tabela 4.2, e o eixo das ordenadas representa as tensões axiais, em kPa.

O patamar inicial do gráfico representa as etapas onde a laje ainda não foi concretada, ou ainda não possui rigidez para resistir às solicitações. De forma análoga ao verificado no gráfico das tensões normais da viga V1, os picos de tensão subsequentes representam as tensões de compressão provocadas pela aplicação e posterior retirada da carga móvel. Esse comportamento é repetido em todos os resultados extraídos e, portanto, não será mais comentado. A Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.2 – Valores das tensões axiais na laje do modelo estacionário

Tensões Axiais no Topo da Laje		
Posição na Laje	Aplicação da Carga Móvel	Final da Análise
Meio do vão	-1650 kPa	-970 kPa

A Figura 5.3 apresenta o gráfico da variação dos deslocamentos verticais obtidos no ponto da laje posicionada no meio do vão, sobre a viga V3. É válido ressaltar que o resultado foi extraído no nó do elemento finito do modelo da laje.

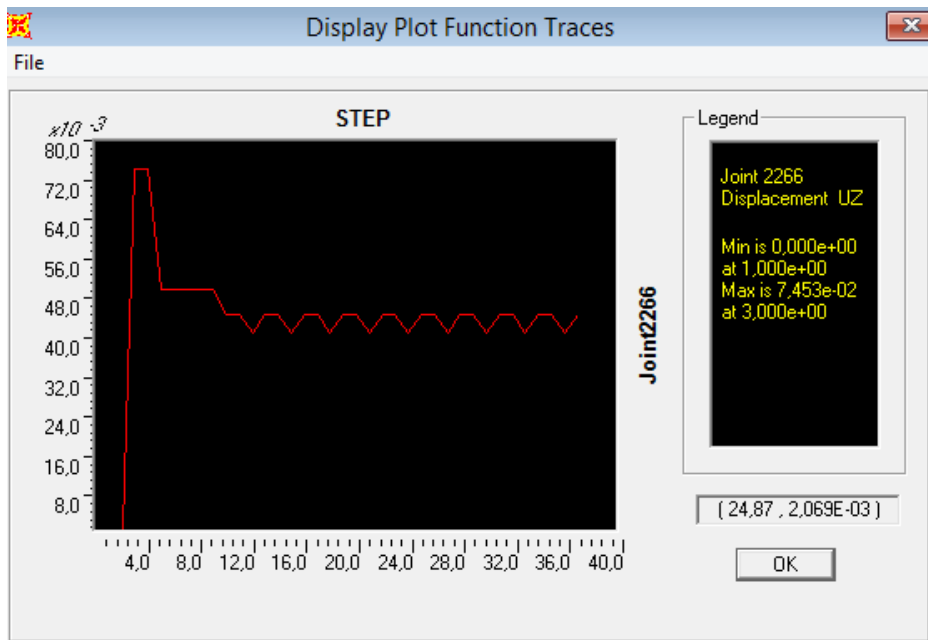


Figura 5.3 – Deslocamento vertical da laje do modelo estacionário. Fonte: SAP2000

Na Figura 5.3, o eixo das abscissas representa as etapas da análise, de acordo com a Tabela 4.3, e o eixo das ordenadas representa os deslocamentos verticais, em metros.

O valor máximo de deslocamento vertical é verificado no momento em que a protensão é executada. É válido ressaltar que o deslocamento da laje ocorre no sentido de Z (eixo global vertical do modelo) positivo, ou seja, para cima. A Tabela 5.3 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.3 – Valores dos deslocamentos verticais na laje do modelo estacionário

<b>Deslocamento Vertical na Laje</b>		
<b>Posição na Laje</b>	<b>Protensão</b>	<b>Final da Análise</b>
Meio do vão	0,075 m	0,044 m

## 5.2. MODELO REOLÓGICO

O modelo reológico leva em consideração as deformações por fluência e retração como parte da solução da análise estrutural da ponte rodoviária. Na Figura 5.4 está detalhado o gráfico das tensões axiais obtidas nas fibras extremas dos bordos da viga V1.

As tensões foram extraídas dos elementos finitos extremos (bordo superior e bordo inferior) da viga V1, posicionados no meio do vão da ponte. O gráfico vermelho representa a variação da tensão na fibra extrema do bordo superior e o gráfico verde representa a variação da tensão na fibra extrema do bordo inferior.

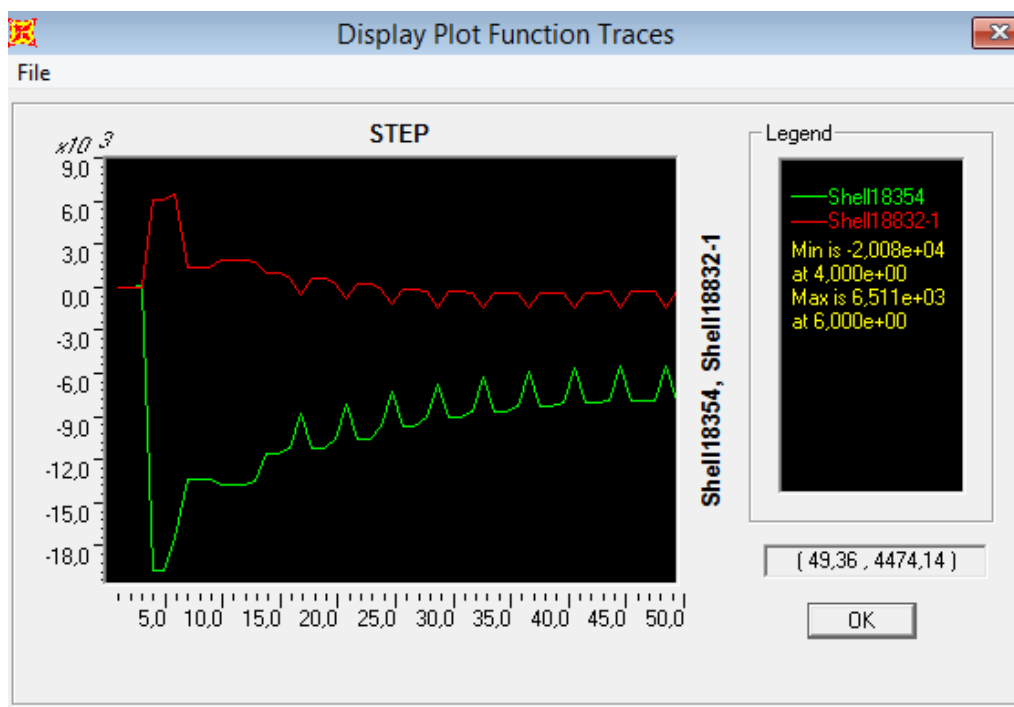


Figura 5.4 – Tensões axiais da viga V1 do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

Na Figura 5.4, o eixo das abscissas representa as etapas da análise e o eixo das ordenadas representa as tensões axiais, em kPa.

É válido ressaltar que o número de etapas verificadas na Figura 5.4 não está de acordo com a Tabela 4.3. Isso se deve à metodologia de cálculo do software no que concerne a análise de propriedades reológicas. O SAP2000 v.14 cria etapas intermediárias para que seja possível realizar as iterações numéricas da análise. Porém, é imperativo afirmar que nenhuma etapa é perdida, modificada ou invertida. O que ocorre é um deslocamento de algumas etapas quando comparada com sua ordem original.

Os valores máximos de tensão, tanto no bordo inferior, quanto no superior, são verificados no momento em que a protensão é executada. Os picos subsequentes do gráfico representam as tensões, de compressão nas fibras inferiores, e de tração nas fibras superiores, provocadas pela aplicação e posterior retirada da carga móvel. De forma análoga ao modelo estacionário, esse comportamento é repetido em todos os resultados extraídos e, portanto, não será mais comentado. A Tabela 5.4 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.4 – Valores das tensões axiais na viga V1 no modelo reológico

<b>Tensões Axiais na Viga V1</b>		
<b>Posição da Viga</b>	<b>Protensão</b>	<b>Final da Análise</b>
Bordo Superior	6510 kPa	-330 kPa
Bordo Inferior	-20080 kPa	-8200 kPa

A Figura 5.5 apresenta o gráfico das tensões axiais obtidas no centro da laje. É válido ressaltar que o resultado foi extraído no topo do elemento finito do modelo da laje.

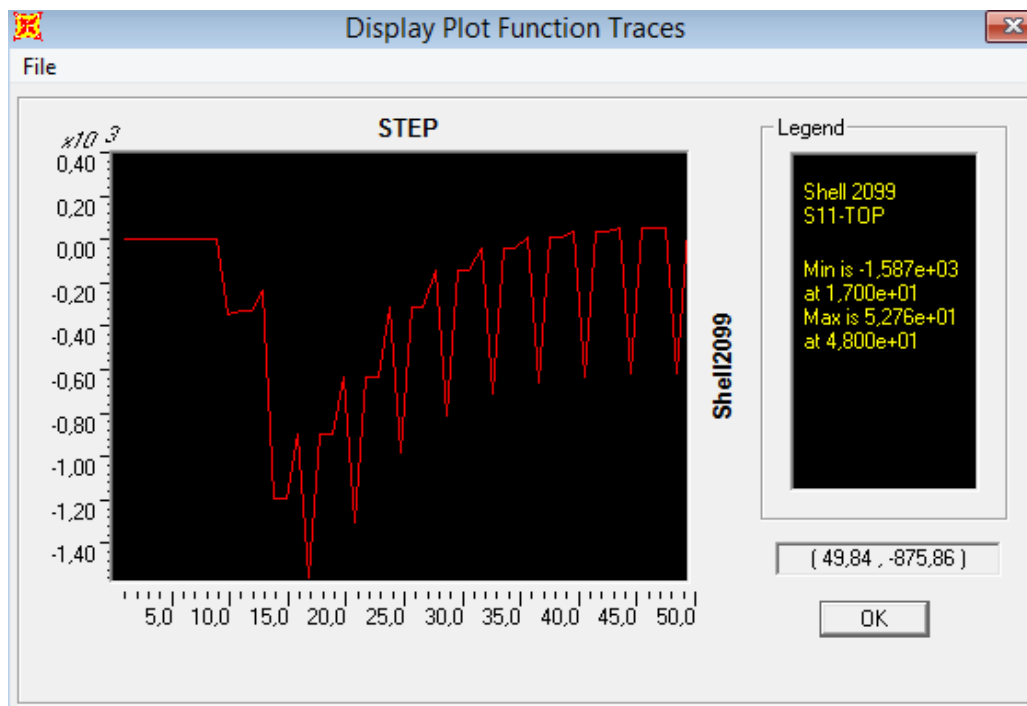


Figura 5.5 – Tensões axiais da laje do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

Na Figura 5.5, o eixo das abscissas representa as etapas da análise, de acordo com a Tabela 4.2, e o eixo das ordenadas representa as tensões axiais, em kPa.

O patamar inicial do gráfico representa as etapas onde a laje ainda não foi concretada, ou ainda não possui rigidez para resistir às solicitações. A Tabela 5.5 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.5 – Valores das tensões axiais na laje do modelo reológico

Tensões Axiais no Topo da Laje		
Posição na Laje	Aplicação da Carga Móvel	Final da Análise
Meio do vão	-1590 kPa	50 kPa

A Figura 5.6 apresenta o gráfico da variação dos deslocamentos verticais obtidos no ponto da laje posicionada no meio do vão, sobre a viga V3. É válido ressaltar que o resultado foi extraído no nó do elemento finito do modelo da laje.

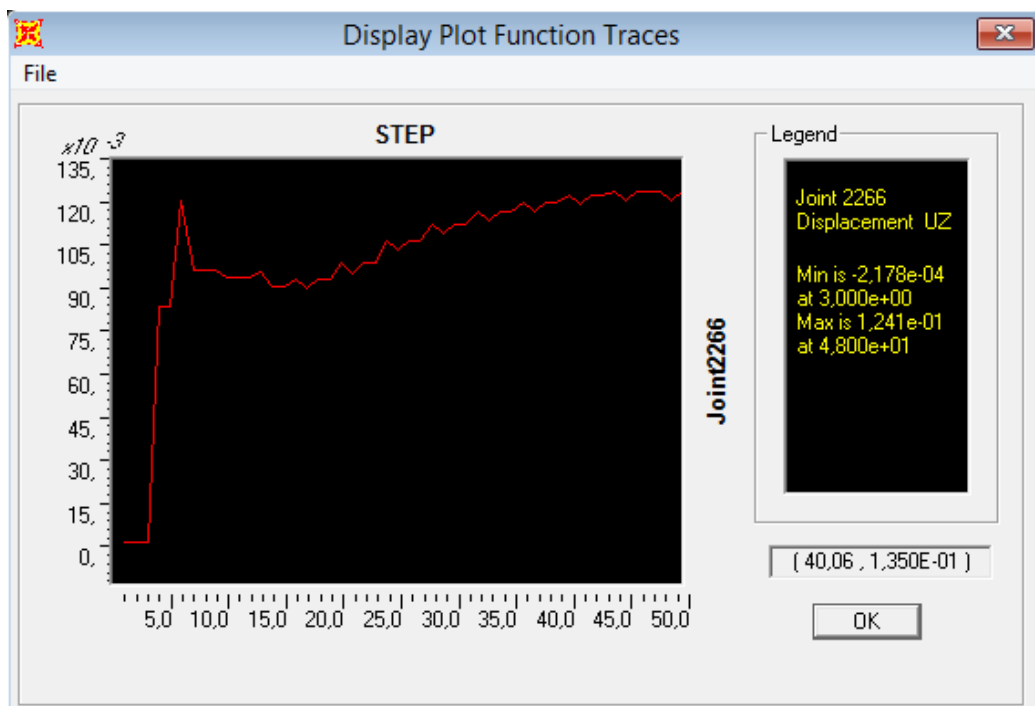


Figura 5.6 – Deslocamento vertical da laje do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

Na Figura 5.6, o eixo das abscissas representa as etapas da análise e o eixo das ordenadas representa os deslocamentos verticais, em metros.

O máximo deslocamento da fase inicial é verificado no momento em que a protensão é executada. É válido ressaltar que o deslocamento da laje ocorre no sentido de Z (eixo global vertical do modelo) positivo, ou seja, para cima. A Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos.

Tabela 5.6 – Valores dos deslocamentos verticais na laje do modelo reológico

Deslocamento Vertical na Laje		
Posição na Laje	Protensão	Final da Análise
Meio do vão	0,120 m	0,124 m



## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

É possível constatar, quando da análise comparativa entre os resultados dos dois modelos, estacionário e reológico, que há uma variação expressiva no resultado final de todos os parâmetros analisados neste estudo.

As curvas constantes dos parâmetros analisados no modelo estacionário, verificadas quando a viga entra em serviço, apresentam taxa de variação no modelo reológico.

A análise dos resultados foi dividida em três etapas. O item 6.1 aborda a variação das tensões nos bordos extremos da viga V1, o item 6.2 verifica os deslocamentos verticais no centro da laje e, por último, o item 6.3 avalia a variação das tensões no topo da laje, no meio do vão.

## 6.1. VARIACÃO DAS TENSÕES NA VIGA V1

A Figura 6.2 apresenta o gráfico das tensões axiais da viga V1 do modelo reológico, o qual demonstra uma diminuição das tensões de compressão no bordo inferior, bem como uma redução das tensões de tração no bordo superior ao longo da duração da análise. Comportamento diferente é verificado na Figura 6.1, que apresenta o gráfico das tensões axiais da viga V1 do modelo estacionário.

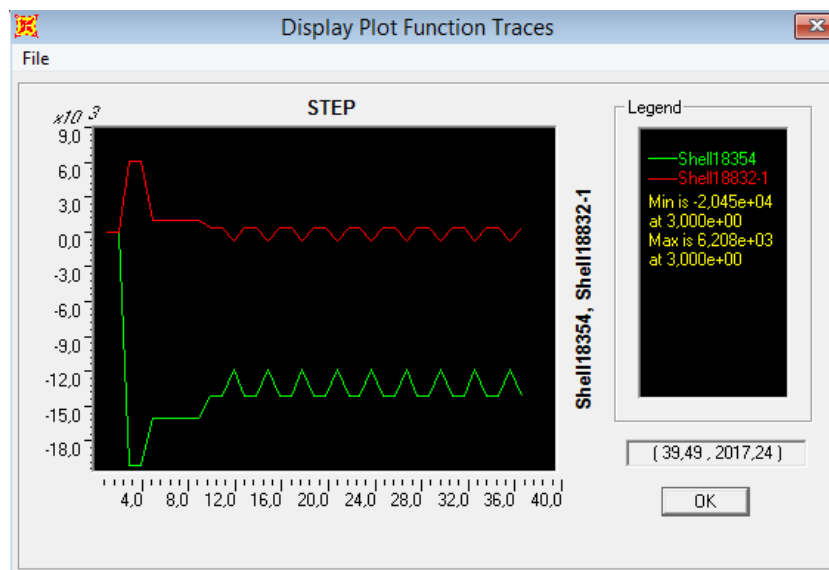


Figura 6.1 – Tensões axiais na viga V1 do modelo estacionário. Fonte: SAP2000 v.14

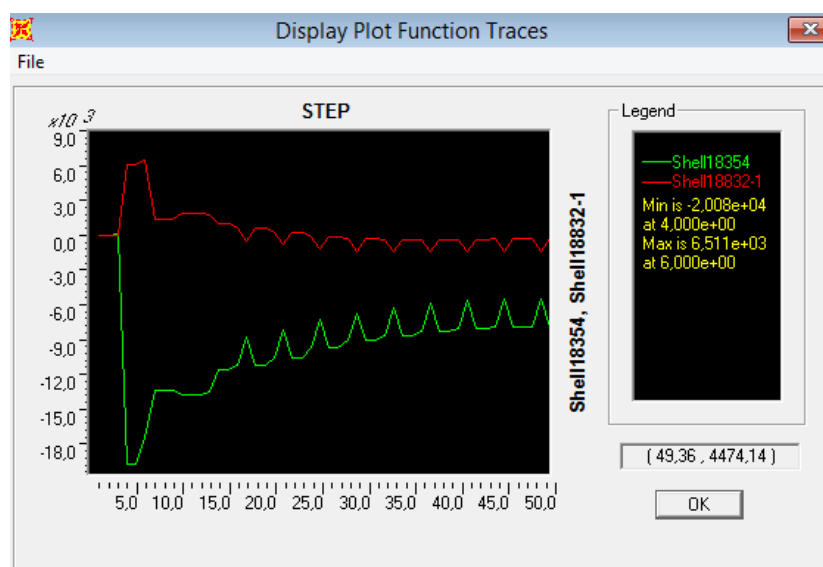


Figura 6.2 – Tensões axiais da viga V1 do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

O comportamento da curva da Figura 6.2, é semelhante ao verificado na Figura 2.1, que retrata a curva típica de deformação por fluência e retração. Ocorre uma variação acentuada nos primeiros momentos da análise, sendo seguido por uma tendência de estabilização em um valor limite constante.

Devido à deformação por fluência e retração, ocorre um encurtamento gradual das fibras da viga, que, em função da aderência entre concreto e bainha, causa uma diminuição das forças de tração nos cabos. A redução da força axial de protensão, por sua vez, proporciona uma perda, também gradual, nas tensões de compressão no bordo inferior da viga. Esse processo cíclico se repete ao longo de toda a análise.

De acordo com o capítulo 2, a deformação reológica tende a estabilizar em um valor limite constante. Esse comportamento é verificado também no gráfico das tensões no bordo da viga V1, Figura 6.2. O processo de deformação pela fluência e retração é gradativamente reduzido, o que diminui a taxa de variação da força axial dos cabos, fazendo com que haja uma tendência de estabilização no estado de tensões da viga.

Para avaliar a perda da protensão, a Figura 6.3 apresenta a força axial no cabo C1 no meio do vão da viga V1, obtida no momento da execução da protensão e a Figura 6.4 apresenta a força axial no mesmo ponto do cabo C1, porém ao término da análise. As duas figuras estão relacionadas ao modelo reológico.

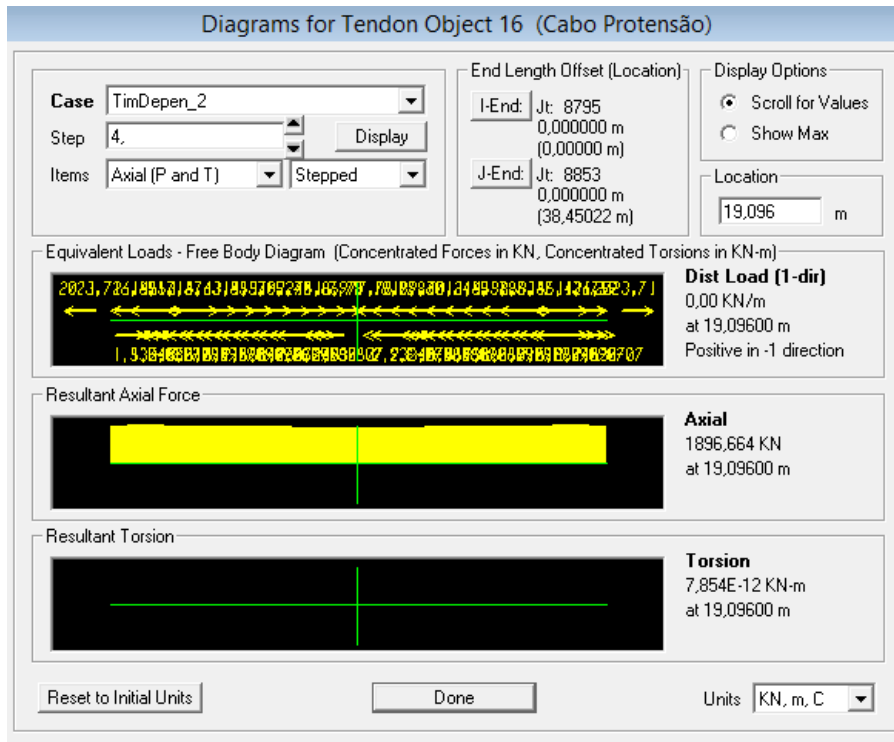


Figura 6.3 – Força no cabo C1, no ato da protensão, do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

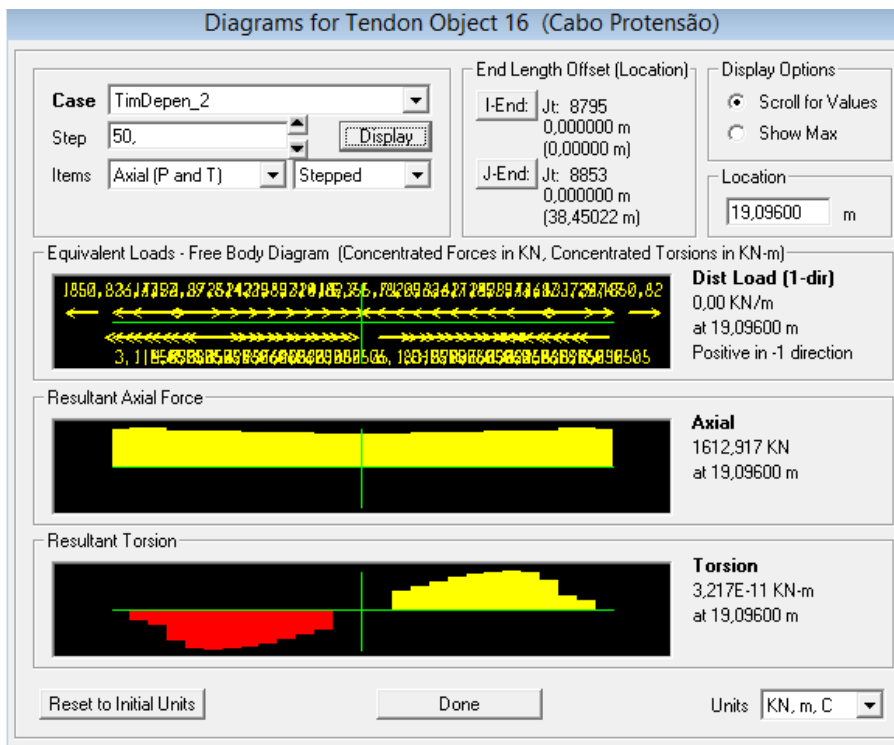


Figura 6.4 – Força no cabo C1, ao término da análise, do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

A Tabela 6.1 apresenta os valores da força axial no cabo de protensão C1.

Tabela 6.1 – Comparativo entre as forças axiais no cabo C1 do modelo reológico

<b>Força Axial no Cabo de Protensão C1</b>			
<b>Etapa</b>	<b>Posição</b>	<b>Força (kN)</b>	<b>Variação</b>
Execução da Protensão	Meio do vão	1897	<i>Redução de 15%</i>
Final da Análise	Meio do vão	1613	

A perda na força axial do cabo C1, entre a execução da protensão até o final do tempo de projeto da ponte (50 anos), é da ordem de 15%.

Para comparar os resultados das tensões nos bordos da viga V1, a Tabela 6.2 resume os valores obtidos em cada modelo.

Tabela 6.2 – Comparativo entre as tensões axiais na viga V1

<b>Tensões Axiais na Viga V1</b>					
<b>Modelo</b>	<b>Posição da Viga</b>	<b>Protensão (kPa)</b>	<b>Variação</b>	<b>Final da Análise (kPa)</b>	<b>Variação</b>
Estacionário	Bordo Superior	6208	<i>Aumento de 4,9%</i>	280	<i>Inversão do estado de tensões</i>
Reológico		6510		-330	
Estacionário	Bordo Inferior	-20450	<i>Redução de 1,8%</i>	-14400	<i>Redução de 43,1%</i>
Reológico		-20080		-8200	

A Tabela 6.2 demonstra que a variação das tensões, no ato da protensão, é baixa, da ordem de 5%. Isso se deve ao fato de a protensão ser executada quando o concreto ainda apresenta pouca idade, em relação ao início da construção (7 dias após a concretagem das vigas, Tabela 3.1).

Por outro lado, a variação das tensões na viga V1, ao final da análise, não é desprezível. No bordo superior há uma inversão no estado de tensões das fibras, passando de tração para compressão, enquanto no bordo inferior ocorre uma redução superior a 40% na tensão de compressão.

## 6.2. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

A Figura 6.6, apresenta os deslocamentos verticais no centro da laje do modelo reológico. Nota-se um aumento progressivo do deslocamento ao longo da duração da análise. Por outro lado, o gráfico do deslocamento vertical no centro da laje do modelo estacionário, Figura 6.5, mostra que a flecha é praticamente constante.

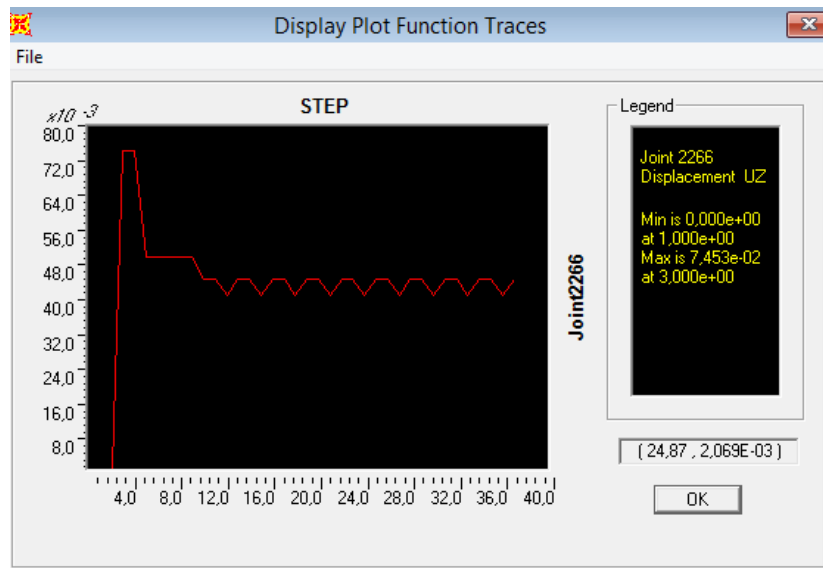


Figura 6.5 – Deslocamento vertical da laje do modelo estacionário. Fonte: SAP2000

v.14

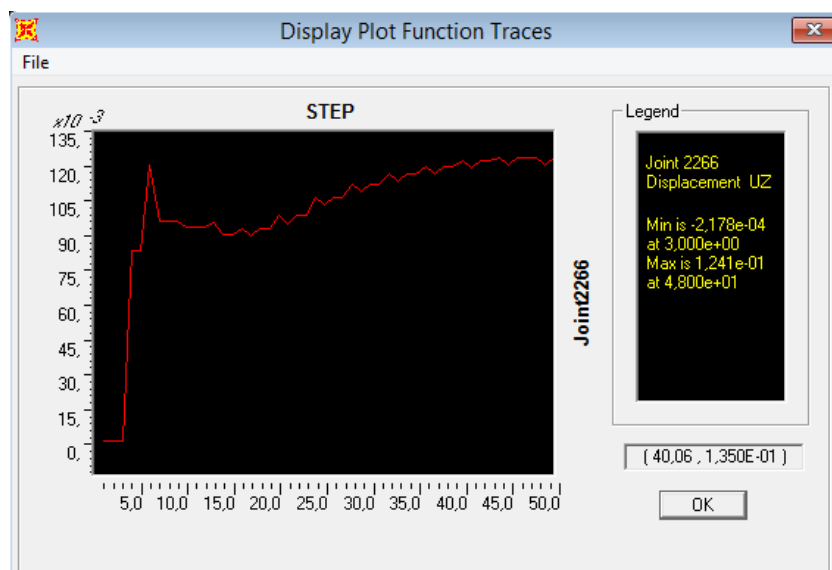


Figura 6.6 – Deslocamento vertical da laje do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

O comportamento da curva da Figura 6.6, possui semelhança com o gráfico de tensões da viga V1 do modelo reológico, Figura 6.2. Esta conclusão é resultado de todo o processo de deformação por fluência e retração explicado no item 6.1. Portanto, assim como as tensões na viga V1, o deslocamento vertical no centro da laje tende a um valor limite constate ao término da análise.

Esse deslocamento ocorre com o sinal positivo, sentido crescente de Z, (eixo vertical global do modelo), o que evidencia que a deformação reológica amplifica a configuração típica imposta pela protensão (flecha para cima), como ilustrado na Figura 6.7.

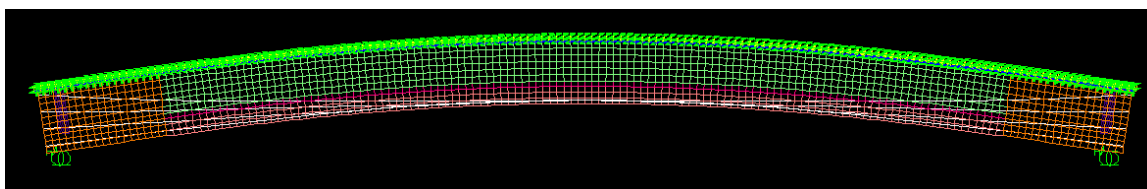


Figura 6.7 – Configuração deformada da viga no modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

Para realizar um comparativo dos deslocamentos verticais no centro da laje, a Tabela 6.3 detalha os resultados obtidos em cada modelo.

Tabela 6.3 – Comparativo entre os deslocamentos verticais no centro da laje

Deslocamento Vertical no Centro da Laje					
Modelo	Posição na Laje	Início do serviço (cm)	Variação	Final da Análise (cm)	Variação
Estacionário	Centro	4,4	<i>Aumento de 111%</i>	4,4	<i>Aumento de 182%</i>
Reológico	Centro	9,3		12,4	

A Tabela 6.3 demonstra que o deslocamento vertical no início do serviço da ponte, no modelo reológico, é superior ao dobro do verificado no modelo estacionário, e ao final da análise, é quase o triplo.

Portanto, diferente do obtido na análise das tensões da viga V1, a influência das deformações por fluência e retração são expressivas desde curtos períodos de tempo, quando da análise dos deslocamentos verticais na laje.

A Figura 6.8 ilustra o comportamento dos deslocamentos verticais com o passar do tempo da análise. O eixo das abscissas representa o tempo de análise, em dias, enquanto o eixo das ordenadas representa o deslocamento vertical, em metros.

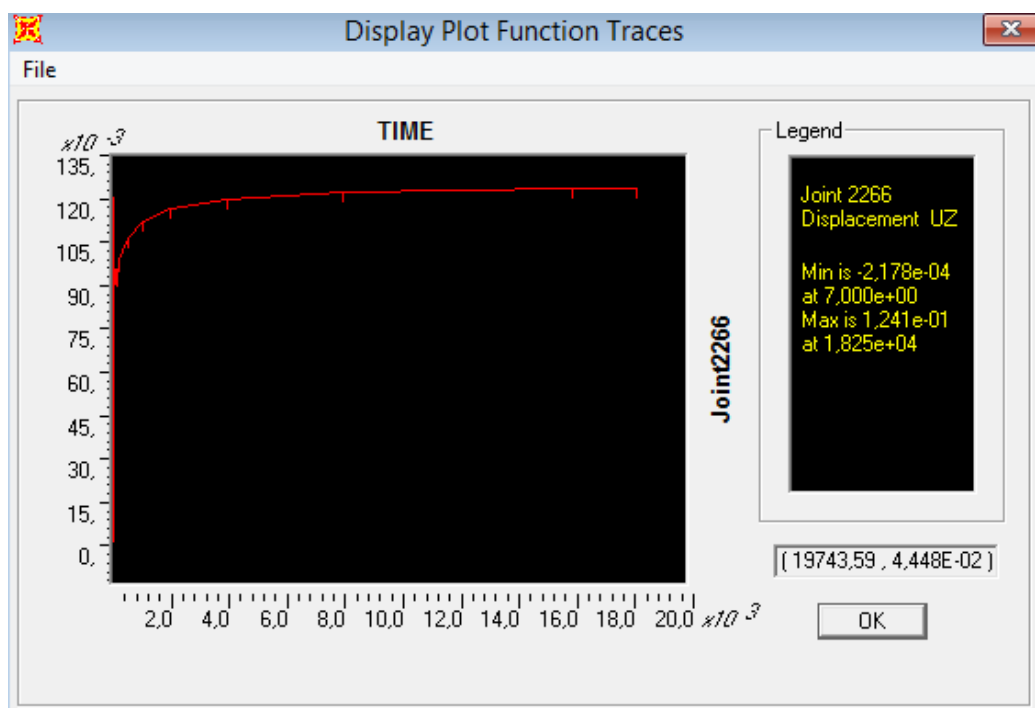


Figura 6.8 – Curva de deslocamento vertical da laje ao longo do tempo. Fonte: SAP2000 v.14

Os pequenos segmentos de reta vertical, presentes na curva, representam a deformação elástica proveniente da aplicação e retirada da carga móvel ao longo do tempo de análise.



### 6.3. VARIAÇÃO DAS TENSÕES NO CENTRO DA LAJE

De forma análoga ao exposto nos itens anteriores, também se observa na Figura 6.10, uma diminuição das tensões de compressão no bordo superior da laje no modelo reológico. Contrariamente, as tensões obtidas no mesmo elemento para o modelo estacionário, Figura 6.9, apresentam-se estáveis.

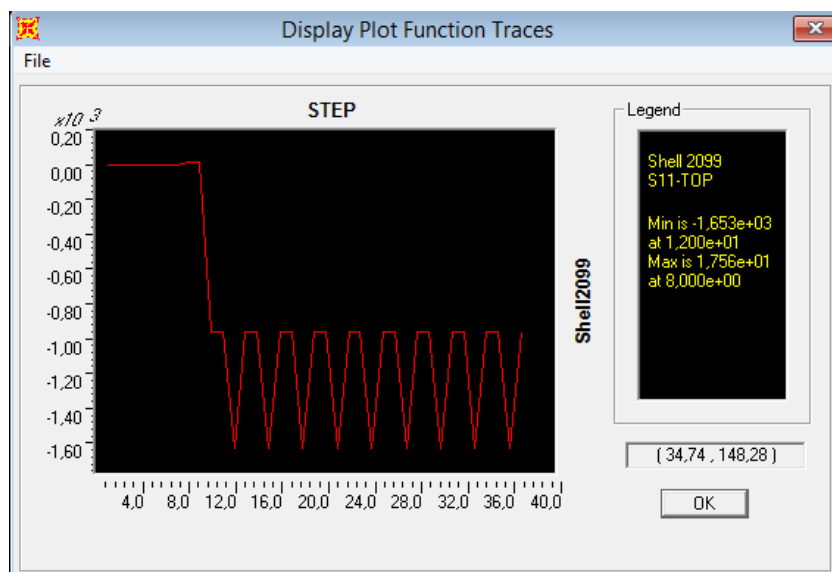


Figura 6.9 – Tensões axiais da laje modelo estacionário. Fonte: SAP2000 v.14

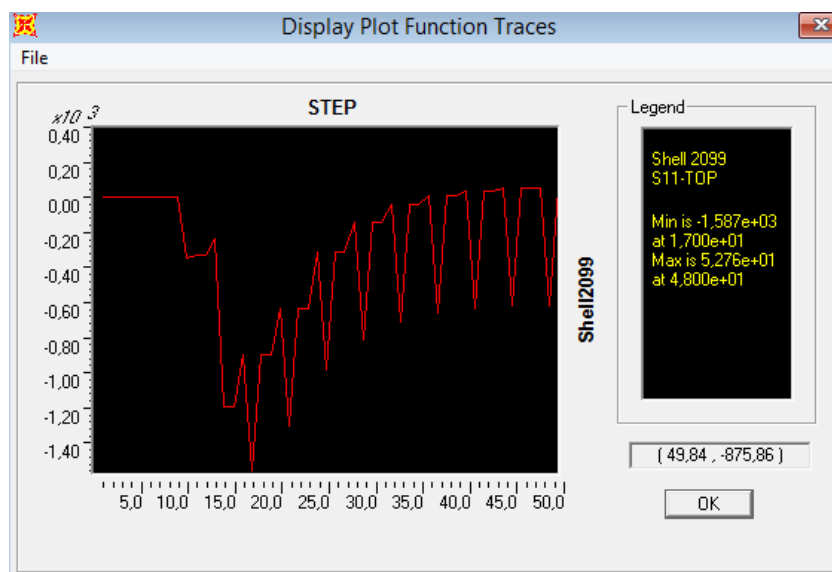


Figura 6.10 – Tensões axiais da laje do modelo reológico. Fonte: SAP2000 v.14

Também é possível constatar na Figura 6.10, que ocorre uma inversão no estado de tensões nas fibras superiores da laje, passando da compressão para a tração. Já no bordo inferior da laje, as fibras permanecem comprimidas.

A configuração deformada da viga impõe um deslocamento vertical positivo da laje, sentido crescente de Z (eixo vertical global do modelo), para cima, como ilustrado na Figura 6.7, resultando em uma diminuição da compressão e início da tração das fibras superiores da laje.

O comportamento da curva de tensões da laje também possui semelhança com o gráfico típico de deformações por fluência e retração, Figura 2. Portanto, o valor final da análise pode ser tomado como constante para períodos de tempo posteriores.

Para realizar um comparativo entre as tensões da laje, a Tabela 6.4 detalha os resultados obtidos em cada modelo.

Tabela 6.4 – Comparativo entre as tensões axiais no centro da laje

Tensão Axial no Bordo Superior da Laje									
Modelo	Posição na Laje	Início do serviço (kPa)		Variação		Final da Análise (kPa)		Variação	
		Com carga móvel	Sem carga móvel	Com carga móvel	Sem carga móvel	Com carga móvel	Sem carga móvel	Com carga móvel	Sem carga móvel
Estacionário	Centro	-1650	-970	<i>Redução de</i>	<i>Redução de</i>	-1650	-970	<i>Redução de</i>	<i>Inversão no</i>
Reológico	Centro	-1590	-910	3,8%	6,2%	-630	50	61,8%	<i>estado de tensões</i>

A tabela acima demonstra que a variação das tensões, quando do início do serviço da ponte rodoviária, é baixa, inferior a 4%, com a aplicação da carga móvel e 6% com a remoção da carga móvel. Isso se deve ao fato de o início do serviço se dar em um período curto de tempo em relação ao início da construção (50 dias após a concretagem das vigas, Tabela 3.1).

Por outro lado, a variação das tensões na laje ao final da análise não é desprezível. Há uma redução de 60% nas tensões de compressão da laje quando da aplicação da carga móvel e uma inversão no estado de tensões das fibras, passando de compressão para tração com a remoção da carga móvel.

A influência das deformações reológicas na tensão na laje é análoga ao verificado nas tensões da viga, tanto para períodos curtos de tempo, onde essa influência é baixa, quanto para períodos longos de tempo, como no caso da análise que é de 50 anos, onde ocorre uma inversão da tensão das fibras da laje.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente estudo foi possível verificar e mensurar a magnitude das deformações devido à fluência e a retração em um tabuleiro de ponte rodoviária com vigas múltiplas em concreto protendido.

A influência dessas deformações se mostrou presente em todos os parâmetros analisados ao final do tempo de análise. Porém, no caso da variação de tensão, tanto na viga quanto na laje, as deformações reológicas mostraram-se relevantes em períodos de tempo mais longos, enquanto que para os deslocamentos verticais da laje, desde o início da análise já impôs variações relevantes.

Os resultados, a priori, se mostram dentro de limites aceitáveis de algumas verificações em serviço (ELS), tais como das tensões na viga (totalmente comprimida não há fissuração) e das tensões de tração do concreto (inferiores a resistência à tração do C35).

Além disso, fica claro que as verificações usuais de tensões feitas de forma tradicionais, sem a consideração de efeitos reológicos, não correspondem à realidade física. A determinação tradicional das tensões no ELS somente dá uma ideia do comportamento das tensões no histórico do tempo.

Após este estudo, é possível atestar a adequabilidade desta estrutura ao ELS da NBR 6118:2003. Portanto, as consequências dos eventos de fluência e retração não são críticas, ou seja, não há necessidade de maiores verificações por parte dos projetistas quando do projeto de pontes rodoviárias usuais em vigas múltiplas de concreto protendido.

Entretanto, em estruturas cujo estudo de flechas seja considerado relevante, os efeitos provocados pela fluência, retração e perda de protensão precisam ser levados em consideração de forma mais precisa. Entre elas, podem ser citadas as pontes de grande vão construídas em balanços sucessivos, pontes estaiadas e estruturas ferroviárias para

trens de alta velocidade, além de estruturas de edificações que não devem apresentar flechas elevadas.

Ficou claro neste trabalho que é importante efetuar determinações de flechas em estruturas pré-moldadas de pontes, levando em conta os efeitos reológicos, para períodos longos de tempo. É evidente que esta estimativa, na prática, não precisa ser realizada de forma sofisticada, bastando estimá-las por meio de fórmulas simples.

Como sugestão para trabalhos posteriores, indica-se a verificação da ponte no ELS com uso de estruturas pré-moldadas unidas por lajes flexíveis nos apoios, bem como a avaliação da influência da aplicação contínua de cargas variáveis, como, por exemplo, uma parcela quase permanente da carga móvel, no desenvolvimento de deformações pela fluência e retração. Também sugere-se o estudo do combate das flechas provocadas por fluência e retração em estruturas pré-moldadas para trens de alta velocidade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos*. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7187: Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido – Procedimentos*. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7483: Cordoalhas de aço para concreto protendido – Requisitos*. Rio de Janeiro. 2004.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). *Design Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete*, 1984.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. (CEB). *CEB-FIP Model Code*, 1990.

DIAZ, B. E. – *Notas de aula: concreto protendido I*, 2013.

GILBERT, R. I. e RANZI, G., 2011, *Time Dependent Behaviour of Concrete Structures*, 1ed. USA e Canada, Spon Press.

LEONHARDT, F., 1983, *Construções de Concreto: vol. 5, Concreto Protendido*, 1ed. Rio de Janeiro, Interciência.

METHA, K. P. e MONTEIRO, P. J. M., 2008, *Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3 ed. São Paulo, Ibracon.

SAP2000 – *Integrated Software for Structural Analysis and Design*, advanced 14.0.0, Computers and Structures, Inc.

SOUZA, M. L. M. - *Projeto de um Tabuleiro de Ponte em Vigas Protendidas com Pós-Tensão e Laje de Concreto Armado*, 2013.