

EFEITOS DEPENDENTES DO TEMPO EM VIGAS PRÉ-MOLDADAS COMPOSTAS COM LAJES ALVEOLARES E VINCULAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

Luis Fernando Sampaio Soares¹ & Mounir Khalil El Debs²

Resumo

Nesse artigo estudam-se os efeitos dependentes do tempo em vigas de concreto pré-moldado, protendidas ou não, com concretagem posterior formando um conjunto de seção composta com lajes alveolares, com o estabelecimento da continuidade de comportamento correspondente à ligação semi-rígida. Os esforços de restrição causados pelos efeitos de retração e fluência dos diversos concretos envolvidos e relaxação das cordoalhas de protensão nos extremos dessas vigas acarretam uma redistribuição de esforços função do tempo. Esta análise é feita utilizando a programação em elementos finitos CONS. As principais conclusões de um estudo de situação típica de estrutura de concreto pré-moldado são: a) os efeitos de bloqueio acarretaram alterações de momento fletor na ligação de até 80% para o modelo em concreto armado, e inversão do sinal para o concreto protendido; b) os deslocamentos axiais tiveram uma maior influência dos efeitos do tempo para os modelos avaliados chegando a disparidades de 90% para o protendido; c) a retração diferencial originou tensões de tração consideráveis em especial na região da interface entre os concretos distintos.

Palavras-chave: Efeitos dependentes do tempo. Vigas pré-moldadas compostas. Esforços de restrição. Ligações semi-rígida.

TIME-DEPENDENT EFFECT ON COMPOSITE PRECAST BEAMS WITH HOLLOW CORE SLABS AND SEMI-RIGID CONNECTIONS

Abstract

This paper deals with time-dependent effects in precast concrete beams, prestressed or not, with posterior concreting, resulting in a structure of a composite cross section with hollow core slabs, and made continuous by a connection of a semi-rigid behavior. The restraint stresses caused by the effects of the shrinkage and creep of the different concretes involved and relaxation of the prestressed tendons in the extremities of these beams imply in a time-dependent stress rearrangement. This analysis is made using the finite element based program CONS. The main conclusions based on typical precast concrete structure evaluation are: a) restraint stresses have led to sensible modifications in the bending moment of the connection with changes of 80% for the reinforced concrete sample, and sign inversion for the prestressed one; b) the axial deformations had a great influence in time effects in the samples analyzed, with changes of 90% in the prestressed concrete case; c) the differential shrinkage has generated great tensile stresses, specially on the interface.

Keywords: Time-dependent effects. Composite precast beams. Restraint stresses. Semi-rigid connections.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é considerada uma das mais atrasadas dentro de um contexto geral de indústrias por apresentar baixos índices de produtividade e qualidade, grandes desperdícios de materiais e morosidade.

¹ Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, luisfernandosoaes@gmail.com

² Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, mkdebs@sc.usp.br

A pré-moldagem constitui uma alternativa interessante no sentido de reverter esse quadro, justamente por propor uma economia em escala, redução do tempo de obra, aumento da produtividade, otimização das seções dos elementos estruturais, eliminação de cimbramentos e limpeza do canteiro.

Por se tratar ainda de um ramo em evolução, a indústria de pré-fabricados enfrenta algumas dificuldades para sua viabilização plena. Estas são decorrentes da necessidade de equipamentos para transporte, colocação dos elementos nos seus locais definitivos de emprego e em especial, a necessidade de promover as ligações entre os diversos elementos que compõem a estrutura.

Algumas dessas ligações, pontos cruciais dentro da viabilização do seu emprego, apresentam dificuldades na determinação da sua real deformabilidade, ou relação *momento x rotação*. Trata-se de um caráter fundamental para compreensão da sua funcionalidade na estrutura, e principal desvantagem em relação às construções monolíticas.

O refinamento na análise estrutural, consequência do sensível desenvolvimento das ferramentas computacionais atreladas a métodos numéricos, tem auxiliado os engenheiros no sentido de diminuir o número de incertezas envolvendo essas análises, referindo-se não somente ao comportamento da ligação efetivada, mas contemplando todas as etapas prévias envolvidas, e no decorrer de sua vida útil.

Nesse contexto, visando acompanhar a tendência natural de se projetar cada vez melhor em termos de desempenho e durabilidade, tem-se procurado estudar as consequências impostas pelo tempo nos esforços e deslocamentos das estruturas. Efeitos estes contabilizados desde o processo construtivo, onde já é possível verificar alterações na distribuição de esforços, passando à utilização da construção com histórico de cargas, deformações intrínsecas do concreto (retração e fluência), perdas da força de protensão, entre outros.

Este trabalho é direcionado ao pavimento apresentado na Figura 1. Trata-se de um pavimento bastante empregado em edifícios formado por vigas em concreto armado ou protendidas, apoiando lajes alveolares com posterior concretagem de capa estrutural completando a seção resistente e estabelecendo a continuidade parcial ou semi-rigidez da ligação.

Após a efetivação da ligação, a deformação dos concretos juntamente com as variações de tensão pelo relaxamento dos cabos de protensão alteram os deslocamentos e rotações nos extremos das vigas, acarretando uma redistribuição de esforços. Essas variações são função do período transcorrido, de tal forma que o diagrama de momento fletor é variável, de comportamento intermediário situado entre o isostático inicial e o hiperestático.

A retração diferencial dos vários concretos envolvidos (idades diferentes) origina um binário de forças que causa um momento de restrição negativo (Figura 2a), enquanto que o efeito da fluência pela protensão é bloqueado no sentido de tracionar as fibras superiores da viga, acarretando um momento positivo de restrição (Figura 2b). Ainda, a fluência devida às cargas permanentes no elemento contribui para o aparecimento de um esforço de restrição negativo (Figura 2c).

O objetivo deste trabalho é caracterizar a influência do tempo nos esforços e deslocamentos de um conjunto estrutural parcialmente pré-moldado. Simular através de aproximações por análise numérica, o comportamento da estrutura em serviço considerando as deformações intrínsecas dos vários concretos envolvidos (de idades distintas), as deformações e relaxação dos aços, e a deformabilidade da ligação (semi-rigidez), desde as disposições iniciais construtivas à sua vida útil.

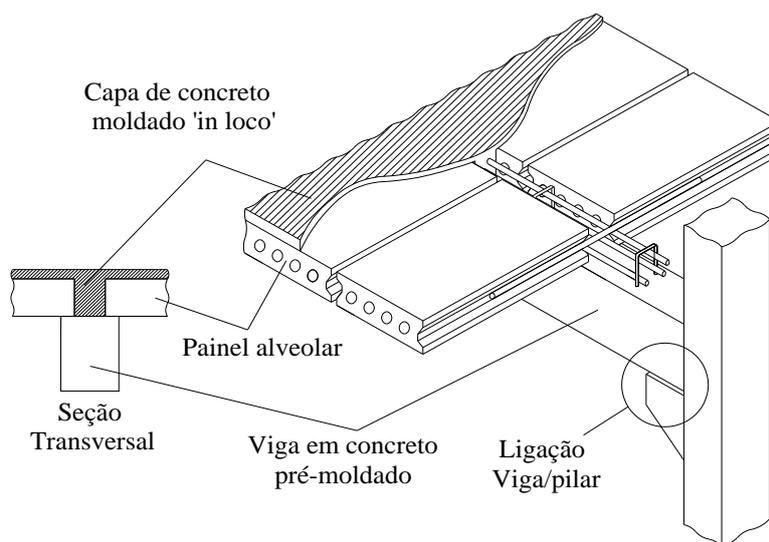


Figura 1 – Ilustração do conjunto de piso avaliado.

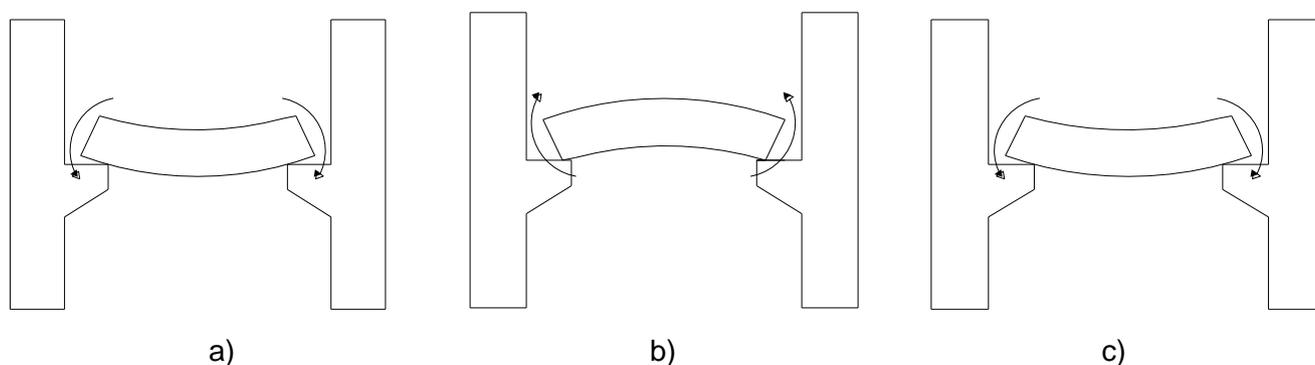


Figura 2 – Momentos de restrição que aparecem na região da ligação sobre os apoios ao longo do tempo. a) efeito da retração diferencial; b) efeito da protensão; c) efeito da carga permanente.

2 METODOLOGIA

Visando cumprir os objetivos estabelecidos, definiu-se a seguinte metodologia para esse artigo: fundamentação teórica, expondo separadamente os tópicos mais importantes; análise numérica, com a utilização de uma programação em elementos finitos e dois modelos representativos; resultados em formato gráfico exibindo os pontos mais relevantes com respectivas análises; e as conclusões do estudo.

3 FUNDAMENTOS

Considerando a quantidade de aspectos individualmente relevantes dentro da temática que se pretende abordar, optou-se por dividir esta seção entre alguns desses pontos. Em seguida serão reunidos, devidamente respaldados, para a efetuação das simulações numéricas e consequentes análises.

3.1 Painel alveolar

Para computar a presença dos alvéolos das lajes nos modelos deste artigo utiliza-se o trabalho efetuado por XIE (2009), que emprega o método dos elementos finitos na avaliação das propriedades constitutivas de lajes alveolares. Demonstrou-se dessa forma que a porção média entre um alvéolo e outro em nada contribuía para a rigidez axial e à flexão podendo ser desprezada, e permitindo a determinação dos módulos de elasticidades por intermédio de uma seção transversal equivalente, Figura 3.

Essa área efetiva torna possível tratar os painéis alveolares como uma laje maciça de altura equivalente e módulo de elasticidade modificado. Este valor fica determinado conforme a equação Eq. (1):

$$E_M = E_0 \frac{\eta_1 D \text{sen} \alpha_0 + \eta_2 (d + D - D \text{sen} \alpha_0)}{D + d} \quad (1)$$

Sendo que,

$$\eta_1 = 1 - \frac{D^3}{h^3 \text{sen} \alpha_0} \left(\frac{3}{8} \alpha_0 + \frac{1}{4} \text{sen} 2\alpha_0 + \frac{1}{32} \text{sen} 4\alpha_0 \right) \quad (2)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{D^3}{h^3} \cos^3 \alpha_0 \quad (3)$$

As grandezas D , d , h , estão ilustradas na Figura 3:

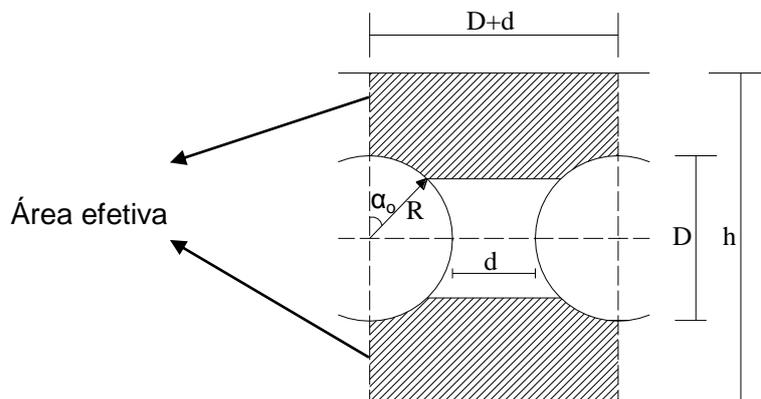


Figura 3 – Área efetiva da seção transversal da laje alveolar. Fonte: XIE (2009).

O trabalho relata ainda que uma série de resultados numéricos indica valores para α_0 em torno de $\alpha_0 = \frac{\pi}{8}$, adotado para fins práticos.

3.2 Seções compostas

Estruturas compostas formadas por concretos pré-moldados e os chamados moldados “in loco” completando a seção resistente, comumente denominadas de parcialmente pré-moldadas, são

muito utilizadas nos sistemas de pavimentação de edifícios e pontes. O comportamento diferido das partes envolvidas nessa seção transversal é de fundamental importância.

A contribuição dos fenômenos de retração e fluência pode vir a ser determinante na vida útil da estrutura, causando esforços distintos em módulo e até em sentido dos determinados em projeto. Alguns casos desses podem ser observados em HASTAK et al. (2003), onde é relatado casos de pontes construídas em vãos simples com posterior estabelecimento de continuidade que apresentaram danos na região da ligação pelo aparecimento de momentos positivos não previstos, provocados pelos efeitos dependentes do tempo.

Diversos métodos foram estudados no sentido de estimar os acréscimos de deformação pelo comportamento diferido das seções compostas de concreto utilizando o método de Dischinger ou métodos baseados na seção transformada, por exemplo.

MARÍ (2000) apresenta um modelo para cálculo não-linear dependente do tempo de estruturas tridimensionais compostas em concreto construídas de forma segmentada, discretizando a seção transversal em elementos finitos tipo barra com um número de prismas desses concretos (distintos em diversos aspectos como idade, f_{ck} , etc.) e também aços, com relações individuais de *tensão x deformação*. Ao final, a integração dos elementos e suas características resulta na seção completa.

3.3 Ligações semi-rígidas

As ligações em concreto pré-moldado e suas peculiaridades quanto às formas, montagens, comportamentos, são talvez a mais importante questão e limitante para o emprego dessa forma construtiva. Os projetos dessas ligações devem obedecer a uma série de critérios preestabelecidos relacionados ao comportamento estrutural, tolerâncias dimensionais, resistência ao fogo, durabilidade e manutenção, facilidade de manuseio e montagem, etc.

No caso das ligações viga-pilar, sua real deformabilidade se destaca dentro das incertezas envolvidas na sua análise por estar diretamente vinculada à distribuição de esforços. Concebidas inicialmente como articuladas para os casos de edifícios baixos, à medida que se aumenta essa altura são necessárias seções mais robustas chegando a inviabilizar o projeto. Essas ligações são definidas tradicionalmente, conforme exposto em EL DEBS (2000), pela relação *momento fletor x rotação*.

Os estudos acerca desse tema têm buscado por meio de simulações numéricas e modelos analíticos respaldados posteriormente por ensaios experimentais, o estabelecimento de expressões confiáveis para aplicação direta nos projetos em concreto pré-moldado, determinando assim valores de mola a considerar na avaliação da estrutura montada. Em termos práticos há uma melhora na distribuição de esforços acarretando em seções mais esbeltas e conseqüentemente mais econômicas.

Os sistemas de pavimentos pré-moldados seguem obrigatoriamente os mesmos critérios comentados no início do tópico, e os objetivos essenciais para garantir seu comportamento razoável seriam: a) conectar os elementos com a estrutura de apoio; b) transferir as forças de tração para os sistemas de estabilização; c) estabelecer integridade estrutural tornando possível a ação de diafragma e distribuição das ações horizontais; d) acomodar os efeitos de fluência, da retração, das mudanças de temperatura e dos recalques diferenciais.

Enfatiza-se o último ponto, onde se ressaltou a importância de tratar as conseqüências dos efeitos dependentes do tempo (fluência e retração) nas ligações entre os elementos estruturais.

Se os apoios não forem projetados para continuidade total de momentos (ligação rígida), recomenda-se colocar barras de armadura para a ligação no meio da seção transversal, ao invés de colocá-las na mesa superior, evitando assim as conseqüências dos já citados momentos de restrição junto aos apoios. Estes momentos de restrição serão mais bem detalhados em tópicos seguintes.

É importante expor que o estudo das ligações em concreto pré-moldado é um assunto muito mais rebuscado, bem além da rápida exposição tratada no artigo em questão, que almeja apenas fornecer subsídios para um bom entendimento das modelagens e análises que se seguirão.

3.4 Efeitos do tempo

As indeterminações relacionadas à análise das estruturas em concreto armado e protendido vão além da questão imediata dos carregamentos, destacando nesse âmbito o fato dos materiais envolvidos possuírem comportamento diferido, variável também em função do tempo despendido.

Em outras palavras, o concreto e os aços ativos estão sujeitos a deformações adiadas, sejam inerentes aos materiais, como a retração, seja em função da constância do carregamento, caso da fluência e da relaxação. A consequência direta desses fenômenos no conjunto aqui abordado é o aparecimento dos *Momentos de restrição* nos extremos das vigas pelo estabelecimento de continuidade posterior.

Esse acréscimo de rigidez na ligação provoca bloqueios à livre deformação dos materiais e consequente deslocamentos axiais e rotações, Figura 4, além de uma redistribuição de esforços. Essas alterações devem ser contabilizadas por apresentarem ordem de grandeza considerável, conforme demonstra HASTAK et al. (2003).



Figura 4 – Ilustração da rotação (φ) e deslocamento axial (Δl) que aparecem nos extremos da viga.

ANDRADE (1994) discorre a respeito de métodos numéricos utilizados para a determinação desses esforços de restrição para o caso de vigas pré-moldadas protendidas com a continuidade estabelecida somente através da colocação de armadura passiva. Sejam esses procedimentos o *Método do PCA*, *Método do PCA modificado*, e *Procedimento empregado*, conforme denominação utilizada pelo autor.

No artigo em questão foi utilizada uma programação computacional para avaliar os efeitos desses esforços de bloqueio nos extremos de uma viga em concreto armado e em concreto protendido, a ser exposta. Segue-se então para a análise numérica onde se fará a apresentação da rotina computacional que será utilizada na avaliação do posterior modelo, exibindo de maneira geral a forma com que os dados são contabilizados no programa e o seu funcionamento.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Estruturas de concreto armado e protendido apresentam dificuldades bem específicas as suas análises justificadas entre outros aspectos, pela contabilização de dois materiais de propriedades distintas, comportamento não-linear devido à fissuração, efeitos diferidos provocados pela fluência e retração do concreto, relaxação do aço de protensão, efeitos do histórico dos carregamentos aplicados etc.

Somam-se a esses a consideração dos processos construtivos aos quais está sujeita a estrutura de concreto pré-moldado, resultando, por exemplo, em mudanças na configuração estática como para os casos de cimbramento e descimbramento ou acréscimos e retiradas de articulações, alterações na seção resistente, incorporações de novas partes, cabos pós-tracionados, entre outros.

Ao final, tem-se uma sensível redistribuição de esforços função de cada etapa transcorrida, de maneira a justificar a contabilização desses fatores todos quando da elaboração do projeto.

Para o caso particular aqui tratado, avalia-se estruturas parcialmente pré-moldadas, o que sugere concretos em idades distintas trabalhando em conjunto, e estabelecimento de continuidade posterior, em outras palavras, mudança na configuração estática do isostático inicial à configuração intermediária representada pela deformabilidade na ligação (semi-rigidez). Passa-se então à apresentação do programa que será utilizado nas simulações numéricas do modelo com as características ressaltas acima.

4.1 O Programa CONS

Para a modelagem numérica do objeto desse artigo foi utilizado um programa baseado no método dos elementos finitos denominado *CONS*, de autoria do Professor *Antonio R. Mari Bernat* do Departamento de Engenharia da Universidade Politécnica da Catalunha, situada em Barcelona – Espanha. Essa rotina computacional desenvolvida em linguagem Fortran faz a análise não-linear no tempo de estruturas de concreto construídas evolutivamente.

SOARES (2011) fez um estudo de validação do *CONS* utilizando alguns trabalhos experimentais de avaliação das estruturas de concreto armado em serviço. Efetuando a modelagem numérica dos mesmos exemplos, o autor observa em suas conclusões finais resultados bastante satisfatórios com emprego da programação.

4.1.1 Elemento finito

A estrutura é constituída por elementos finitos tipo barra com três nós, treze graus de liberdade, seis em cada extremo e um no centro (eliminado por condensação estática), necessário para obtenção da matriz de rigidez à flexão e à contabilização de variação da linha neutra por fissuração, Figura 5.

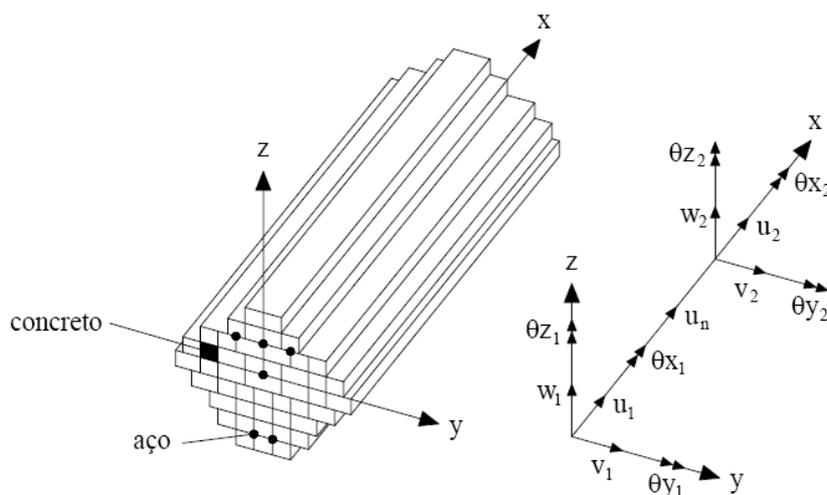


Figura 5 - Elemento Finito.

Cada elemento é um prisma composto por um número discreto de filamentos de concreto e aço, definidos geometricamente pela sua área e posição em relação ao eixo de referência adotado. A

integração dessas áreas resulta na seção total, sendo que quando algum desses filamentos não existe (por não ter sido “construído”, estiver fissurado, etc), sua contribuição diferencial é zero.

4.1.2 Propriedade dos materiais

Visando incorporar o comportamento dos diversos materiais envolvidos na análise, representa-se cada por uma respectiva curva *tensão x deformação*. Para o concreto, utiliza-se o gráfico proposto por CARREIRA & CHU (1986), que considera sua contribuição tracionado entre fissuras. Assim sendo, quando um filamento qualquer atinge a deformação relativa a sua resistência à tração, ele fissa, e sua tensão não se anula de imediato, decrescendo à zero enquanto a respectiva deformação aumenta. O aço da armadura passiva é assumido de comportamento bilinear, enquanto que o ativo é considerado multilinear, conforme demonstra MARÍ (2000).

4.1.3 Comportamento diferido do concreto

Os modelos utilizados para avaliação das propriedades diferidas do concreto na programação foram retirados de expressões estabelecidas em normativas diversas. A deformação por fluência (ε_{cc}) é calculada pela solução da integral de superposição expressa na Eq. (4).

$$\varepsilon_{cc} = \int_0^t C(t, \tau) d\sigma(\tau) \quad (4)$$

Sendo que,

$C(t, \tau)$ - Fluência específica dependente da idade τ em que começou a agir a tensão $\sigma(\tau)$.

Para uma análise numérica da fluência, o tempo total pode ser subdividido em intervalos Δt . Dessa forma, a integral da equação (4) pode ser aproximada por uma somatória finita envolvendo acréscimos incrementais de tensão a cada passo de tempo. A forma adotada pela programação para representar essa fluência específica é a série de Dirichlet.

4.1.4 Vinculações

As condições de contorno são reproduzidas por seis molas localizadas nos nós definidos a fim de expressar os três graus de liberdade de rotação mais os três de translação. As rigidezes são estabelecidas em início, podendo variar no tempo de acordo com o processo construtivo em questão, permitindo a reprodução de cimbramentos, descimbramentos, colocação de novos apoios tal como a eliminação de algum existente.

Novos apoios são obtidos restringindo os deslocamentos da estrutura no nó em questão para todas as cargas a partir do momento definido. Já a eliminação de uma condição de contorno consiste em aplicar uma carga no apoio suprimido, como uma força desequilibrada de mesmo módulo e sentido contrário que atua no seguinte passo de carga ou de tempo sobre a nova configuração estrutural.

É possível ainda estabelecer valores intermediários para as molas dos apoios, como os utilizados em ligações semi-rígidas, bastando apenas especificar sua ordem de grandeza no vínculo em questão. Contudo, uma eventual perda de rigidez da ligação por fissuração em serviço, não é contabilizada, evidenciando uma das questões limitantes da programação.

4.1.5 Protensão

A programação permite a contabilização de um número discreto de cabos de protensão na estrutura, possuindo um perfil e área de seção transversal constante ao longo do seu comprimento, e composto por quantidade definida de segmentos retilíneos.

Essa protensão é introduzida na análise como uma ação ou sistema de cargas obtido por equilíbrio do cabo. O traçado das cordoalhas pode ser retilíneo, poligonal, ou parabólico, sendo que a posição dos dois pontos extremos dentro de um segmento é definida pelas excentricidades locais e_y e e_z , Figura 6.

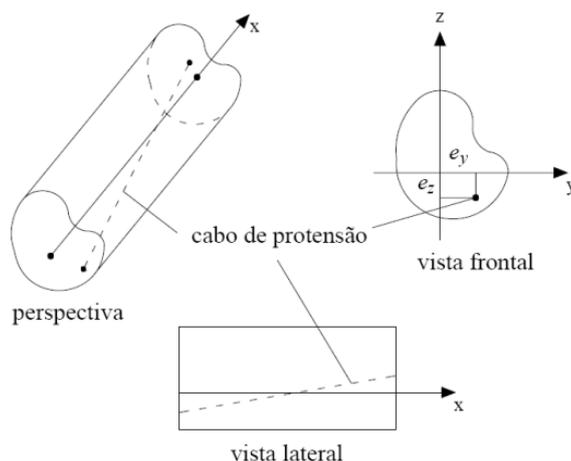


Figura 6 – Elemento finito com armadura de protensão. Fonte: MERLIN (2006).

4.1.6 Estratégia de análise não-linear

As ações externas são avaliadas segundo um processo incremental iterativo, onde para cada passo de carga ou tempo definidos se faz as iterações até atingir as condições de equilíbrio.

O fluxograma simplificado, Figura 7, MARÍ (2000), apresenta o esquema geral da programação em que os dados de entrada gerais (1) abrangem a geometria da estrutura, discretização, condições de contorno, propriedades dos materiais, armadura passiva, perfil da armadura de protensão, fases construtivas, condições ambientais, critério de convergência e informações de controle dos dados de saída.

Já os dados de entrada de cada fase construtiva (2) incluem variações da geometria, condições de contorno específicas da etapa (alterações, eliminação, acréscimo de vínculos), carregamentos ou recalques impostos, protensão de cabos, intervalos de tempo (dias) entre as fases construtivas, passos de tempo e de cargas.

5 EXEMPLOS DE ANÁLISE

O objeto de estudo deste artigo é o conjunto de piso parcialmente pré-moldado apresentado anteriormente na Figura 1. As seções longitudinais e transversais tal como suas respectivas discretizações estão exibidos da Figura 8 à Figura 11. Vale observar que a viga pré-moldada do modelo foi avaliada tanto para uma armadura passiva quanto ativa, com detalhes ilustrados na Figura 12.

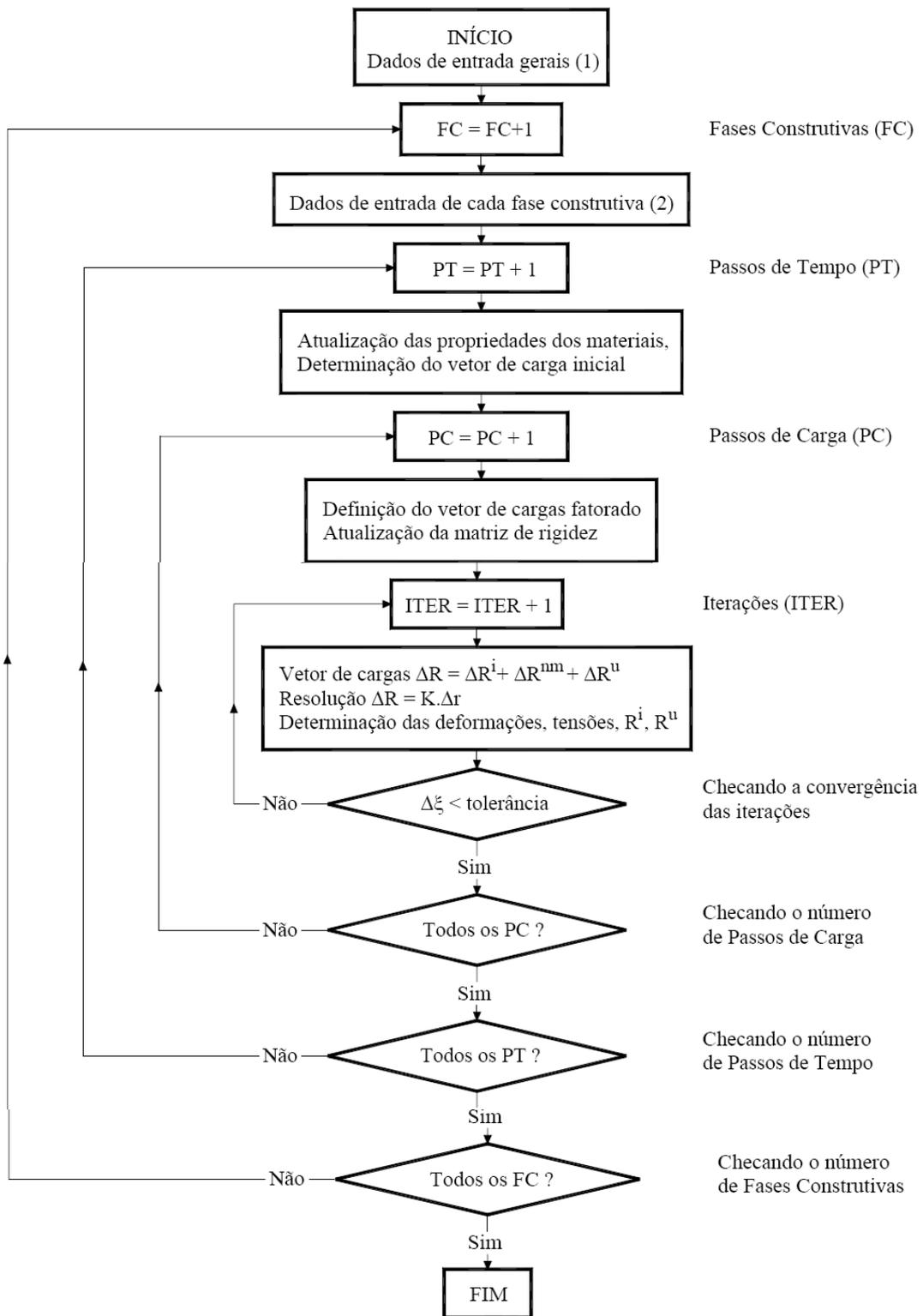


Figura 7 – Fluxograma simplificado.

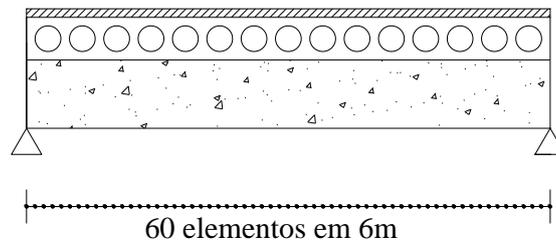


Figura 8 – Seção e discretização longitudinal do modelo.

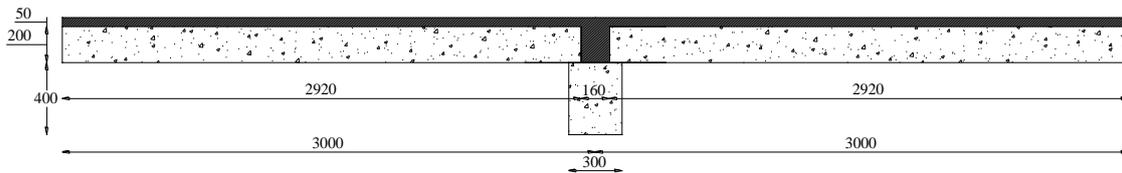


Figura 9 – Seção transversal.

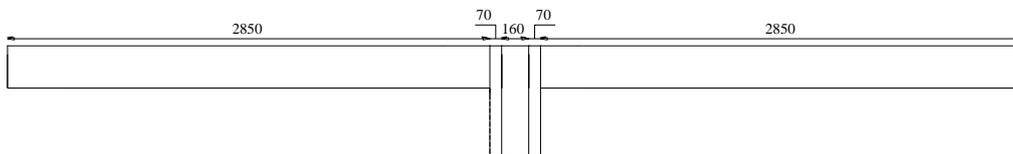


Figura 10 – Discretização vertical da seção transversal do modelo (valores em *mm*).

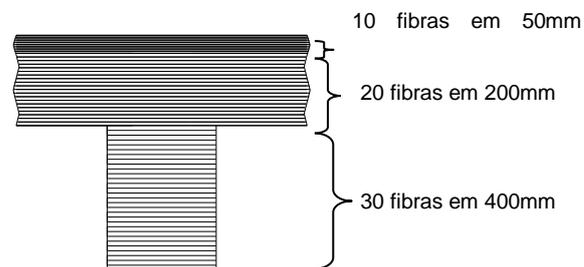


Figura 11 – Discretização horizontal da seção transversal do modelo.

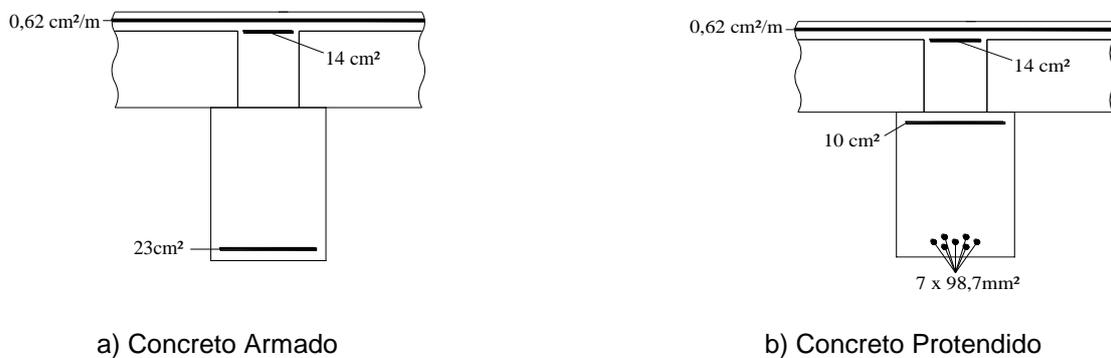


Figura 12 – Armaduras empregadas nos modelos armado e protendido.

Outros dados relevantes para a avaliação em serviço do modelo descrito estão exibidos na Tabela 1. Destaque para o valor do f_{ck} empregado nas lajes alveolares justificado pela necessidade de se representar uma resistência característica à compressão equivalente ao módulo de elasticidade calculado pela formulação apresentada anteriormente na Eq. (1).

Tabela 1 – Dados complementares

Umidade	55%
Cimento para a viga	Alta resistência inicial
f_{ck} para a viga	35MPa
Cimento para a laje	Alta resistência inicial
f_{ck} para a laje	34,73MPa
Cimento para a capa	Comum
f_{ck} para a capa	25MPa
Perímetro exposto	11,5m
Rigidez de mola dos apoios	63,50 MN.m/rad
Força de Protensão (Armadura ativa)	-980 kN

O fluxograma da Figura 13 exhibe as etapas consideradas na análise em serviço do modelo.

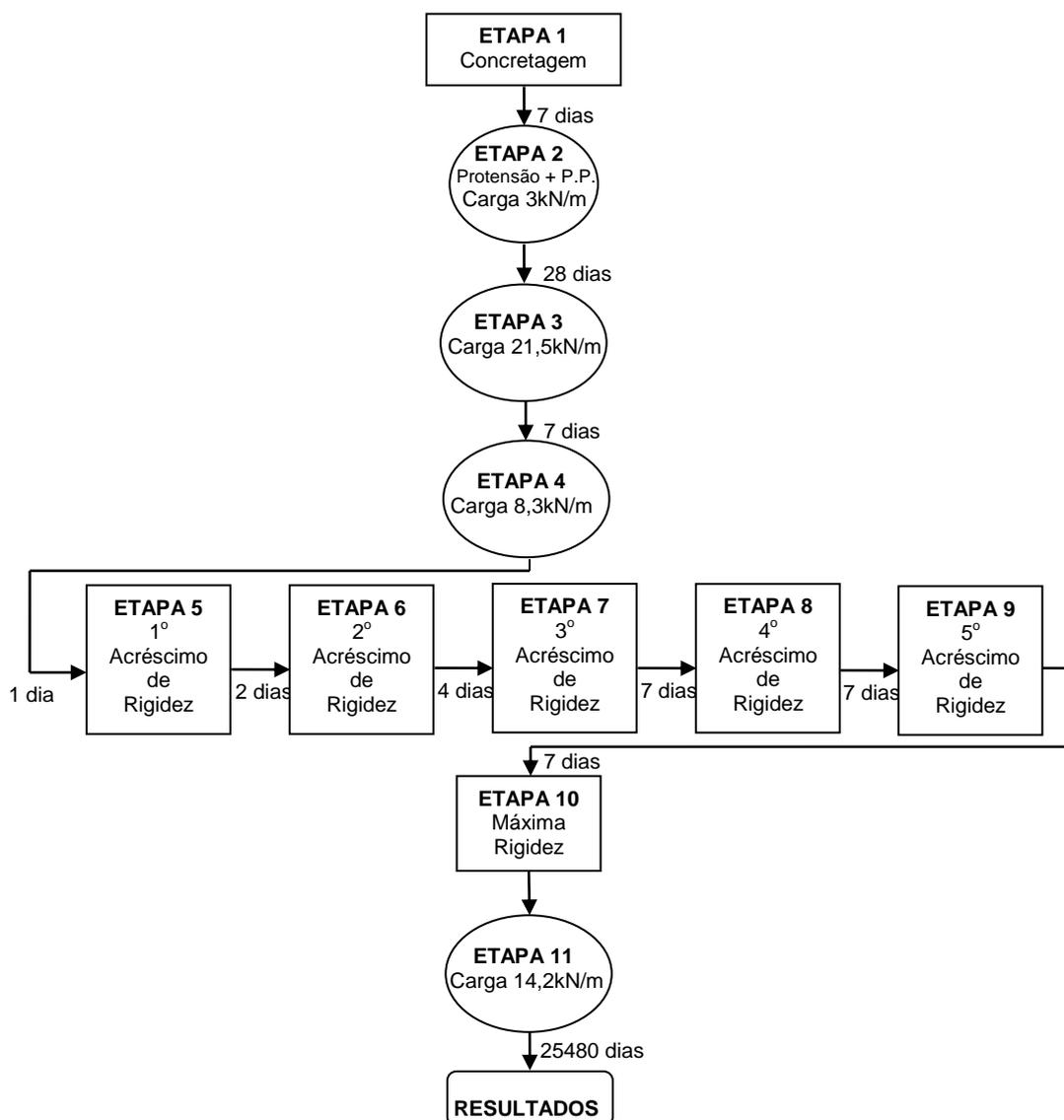


Figura 13 – Fluxograma das etapas.

6 RESULTADOS E ANÁLISE

Inicia-se apresentando o momento fletor ao longo do tempo na ligação, considerando uma análise não-linear física, onde é possível verificar a sensível alteração nos valores de flexão. Destaque para a variação posterior à imposição do último carregamento tanto no modelo armado quando no protendido, Figura 14.

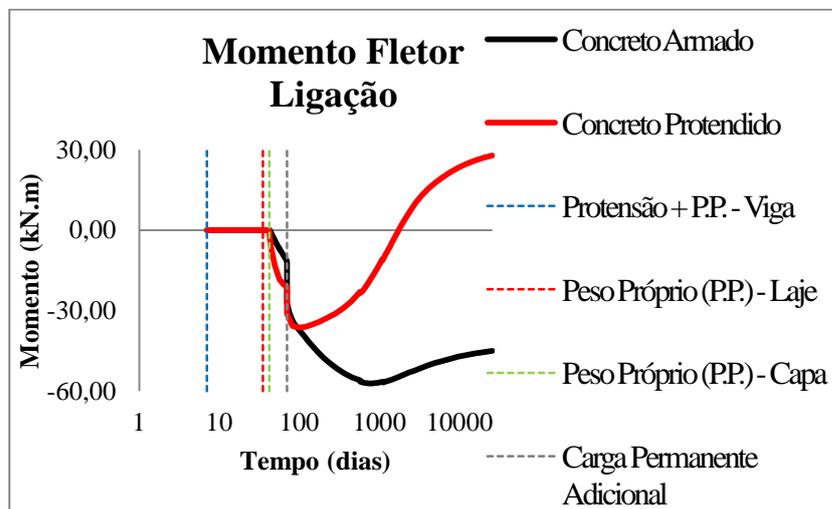


Figura 14 – Relação entre os modelos de concreto *Armado/Protendido* para momento fletor na ligação ao longo do tempo com o eixo das abscissas em escala logarítmica.

As avaliações das deformações; translação axial, rotação do extremo, e flecha no meio do vão, apresentada com mais detalhes em SOARES (2011), demonstraram uma maior influência dos efeitos do tempo para o primeiro, deslocamentos axiais (Figura 15), em ambos os modelos. Ressalta-se a variação no concreto mais antigo, posterior à imposição do último carregamento, denominado no exemplo de *Carga Permanente Adicional*.

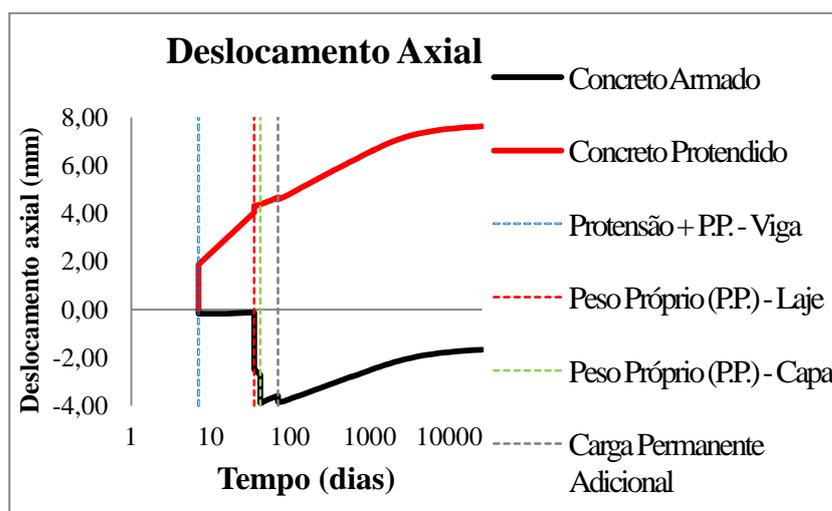


Figura 15 – Relação entre os modelos de concreto *Armado/Protendido* para deslocamento axial ao longo do tempo no extremo do modelo com o eixo das abscissas em escala logarítmica.

A fim de apresentar a influência dos efeitos do tempo nas tensões do elemento avaliado, apresentam-se duas fibras representativas estrategicamente posicionadas no topo da seção transversal, *Fibra SCML*, e na interface dos concretos de idades distintas, *Fibra ICML*, Figura 16.

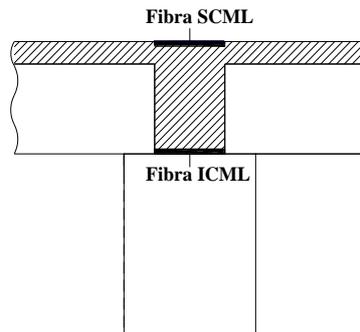


Figura 16 – Localização das fibras representativas na seção transversal para análise das tensões.

A Figura 17 e a Figura 18 exibem a variação dessas tensões em função do tempo, onde é possível atestar um comportamento semelhante nos modelos em *Concreto Armado* e *Concreto Protendido*. Destaque para os esforços adicionais de tração pela retração diferencial inicialmente, e o decréscimo posterior dessas tensões justificado pela incorporação à seção resistente:

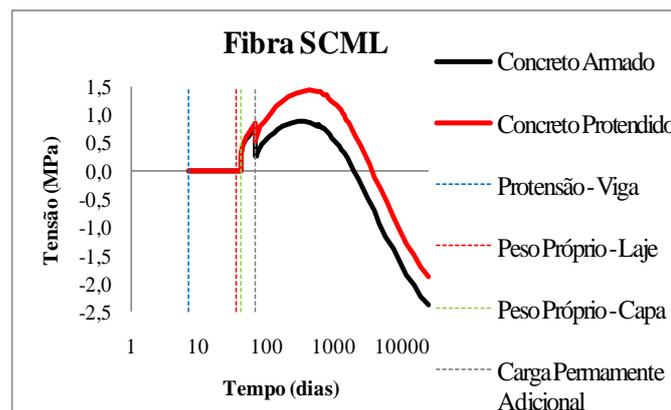


Figura 17 – Relação entre os modelos de concreto Armado/Protendido para variação da tensão na fibra SCML ao longo do tempo com o eixo das abscissas em escala logarítmica.

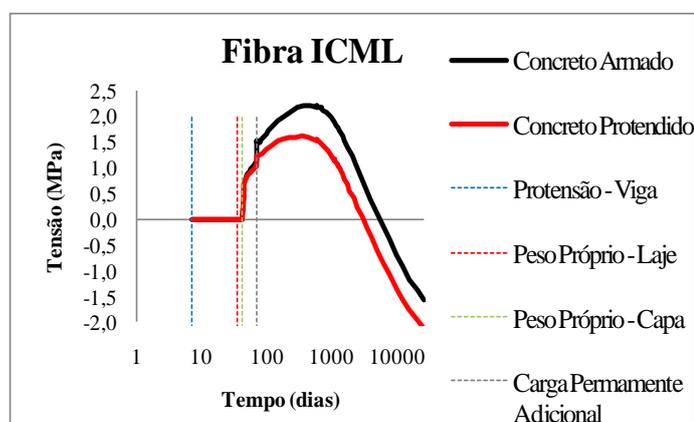


Figura 18 – Relação entre os modelos de concreto Armado/Protendido para variação da tensão na fibra ICML ao longo do tempo com o eixo das abscissas em escala logarítmica.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados do exemplo de um pavimento de concreto pré-moldado típico, podem ser alinhavadas as seguintes conclusões:

a) Há uma variação considerável nos esforços de flexão na ligação para as vigas pré-moldadas compostas com estabelecimento de continuidade posterior da ordem de 80% no modelo com viga em concreto armado, e chegando a inversão de sentidos para aquele com viga em concreto protendido. Esses resultados são consequências não somente das diversas etapas a que estão sujeitas, mas aos efeitos diferidos aqui ressaltados.

b) Dentre as deformações avaliadas, as translações axiais apresentaram uma maior influência dos efeitos do tempo. Essa disparidade ocorre em especial no concreto mais antigo bem observado nas variações posteriores à consideração do último carregamento denominado aqui de *Carga Permanente Adicional*. Tanto para o modelo com viga em concreto armado, com variações de até 60%, quanto para o de viga em concreto protendido, chegando a 90%.

c) A análise das tensões na seção transversal destacou a influência da retração diferencial na interface dos concretos de idades distintas, evidenciado aqui pelas fibras *SCML* e *ICML*, originando esforços de tração de ordem de grandeza consideráveis. Ainda, demonstrou também a posterior incorporação do concreto moldado no local à seção resistente, evidenciado por uma retardada compressão na região.

8 REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. M. **Momentos Fletores dependentes do tempo em vigas de pontes pré-moldadas protendidas com o estabelecimento de continuidade no local**. 1994. 198p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

CARREIRA, D.J.; CHU, K.H. Stress-strain relationship of reinforced concrete in tension. **Journal of American Concrete Institute**, V.83, n.1, p.21-28, 1986.

EL DEBS, M.K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. Projeto REENGE. EESC – USP, São Carlos, 2000.

HASTAK, M.; MIRMIRAN, A.; MILLER, R.; SHAH, R.; CASTRODALE, R. State of practice for positive moment connections in prestressed concrete girders made continuous. **Journal of bridge engineering**, september/october, 267-272, 2003.

MARÍ, A.R. Numerical simulation of segmental construction of three dimensional concrete frames. **Journal of Engineering Structures**, V.22, n.6, p.585-596, 2000.

MERLIN, A.J. **Análise Probabilística do comportamento ao longo do tempo de elementos parcialmente pré-moldados com ênfase em flechas de lajes com armação treliçada**. 2006. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOARES, L.F.S. **Efeitos dependentes do tempo em vigas pré-moldadas compostas com lajes alveolares e vinculações semi-rígidas**. 2011. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

XIE, J.Z. Macroscopic elastic constitutive relationship of cast-in-place hollow-core slabs. **Journal of Structural Engineering**, September, v. 135, n. 9, 1040-1047p, 2009.

