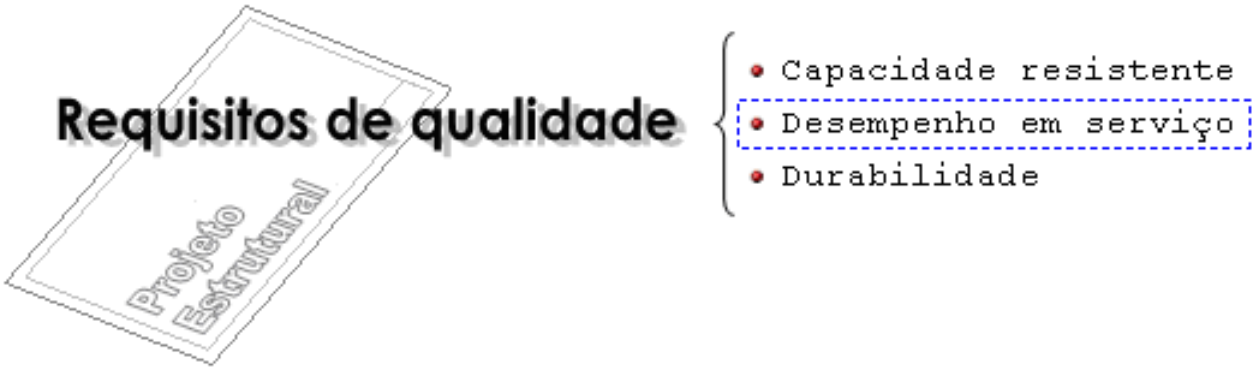
Os Estados Limites de Serviço

I. Introdução

Este artigo descreve, de forma resumida, como os tópicos referentes aos **estados limites de serviço em pavimentos de concreto-armado**, estão sendo considerados e adaptados aos sistemas TQS 11, perante as prescrições da nova norma NBR6118:2003.

Trata-se de um assunto bastante importante, e que inclusive mereceu destaque no "6º Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural - ENECE", realizado neste fim de ano, cujo tema principal foi "A NB-1/2003 e os Estados Limites de Serviço".

Vale lembrar também que, além da capacidade resistente e da durabilidade, o desempenho em serviço é um dos requisitos mínimos de qualidade que uma estrutura de concreto deve atender.



Situações indesejáveis, tais como o aparecimento de fissuras visíveis, de flechas excessivas e de vibrações exageradas, **devem ser previstas e minimizadas, na medida do possível, durante a elaboração dos projetos estruturais**.

II. Abrangência e limitações

Inicialmente, antes de mais nada, é importante definir claramente o contexto geral do problema que está sendo tratado, isto é, sua abrangência e limitações.

Em projetos de estruturas de concreto-armado, todos elementos usualmente são dimensionados no estado limite último (ELU), e depois verificados em cada um dos estados limites de serviço (ELS). Em estruturas de concreto-protendido, o processo é inverso, isto é, o dimensionamento feito em ELS e as verificações no ELU.

O ELU é sempre caracterizado pela ruína ou esgotamento da capacidade resistente última. Trata-se de uma situação na qual espera-se que uma estrutura nunca atinja, tanto é que se faz o uso de diversos coeficientes de segurança. As resistências dos materiais são minoradas (gc e gs) e os esforços solicitantes majorados (gf). **Felizmente, dificilmente presenciamos estruturas que atingem o estado limite último.**

Os estados limites de serviço, por sua vez, procuram retratar o "dia-a-dia" de uma estrutura, isto é, seu comportamento perante a utilização da obra. Tratam-se de situações mais suscetíveis, que muitas vezes nos deparamos no nosso cotidiano. Quem nunca presenciou uma estrutura que possui fissuras, flechas ou vibrações que deixam uma sensação desagradável?

Através das diversas verificações dos ELS, procura-se assegurar, em média, que o comportamento real das peças que compõe a estrutura seja adequado, isto é, dentro de limites sensoriais e funcionais aceitáveis. **Muito embora não implique numa ruína como no ELU, quando um ELS é atingido, pode-se inviabilizar totalmente a utilização de uma construção da mesma forma.**

São diversos os estudos e as pesquisas já realizadas, e que estão sendo desenvolvidas, que procuram simular o comportamento real (em serviço) de uma estrutura de concreto-armado. As análises e as ferramentas disponíveis estão cada vez mais complexas e precisas. No entanto, é muito importante que todos os engenheiros estruturais estejam cientes da seguinte premissa:

Prever exatamente como as estruturas de concreto-armado se comportarão após a execução da construção é uma tarefa extremamente complicada, e porque não, impossível. Existem diversas situações reais que podem não estar sendo levadas em conta nos cálculos. Várias aproximações são feitas, mesmo nas formulações mais refinadas. **O que se faz, na realidade, é estimar as flechas e as aberturas de fissuras** que possivelmente aparecerão ao longo da vida útil da estrutura.

III. A nova norma NBR6118:2003

A antiga norma NBR6118:1980, no item 2.1.2 "Estados limites de utilização (de serviço)", estabelecia somente três tipos de estados limites de serviço: estado de formação de fissuras, estado de fissuração inaceitável e estado de deformação excessiva.

A nova norma NBR6118:2003, além de trocar definitivamente o termo "utilização" por "serviço" e definir siglas específicas para cada um dos tipos, traz mais alguns estados limites:

a) Estado de formação de fissuras (ELS-F)

b) Estado de abertura de fissuras (ELS-W)

c) Estado de deformação excessiva (ELS-DEF)

d) Estado de descompressão (ELS-D)

e) Estado de descompressão parcial (ELS-DP)

f) Estado de compressão excessiva (ELS-CE)

g) Estado de vibrações excessivas (ELS-VE)

Os três primeiros retratam as mesmas situações previstas na antiga norma, porém possuem algumas novas formulações. Os itens 17.3 "Elementos lineares sujeitos a solicitações normais – Estados limites de serviço" e 19.3 "Dimensionamento e verificação de lajes – Estados limites de serviço", descrevem os critérios que devem ser utilizados em elementos lineares e nas lajes, respectivamente.

Os estados d), e) e f) são usualmente verificados em estruturas protendidas, e não serão abordados neste artigo. Já, o último item relativo às vibrações, é uma novidade que vem descrita na seção 23 "Ações dinâmicas e fadiga".

Os itens 13.3 "Deslocamentos limites" e 13.4 "Controle da fissuração e proteção das armaduras" estabelecem, de forma detalhada, os limites para os deslocamentos e aberturas de fissuras, respectivamente.

De antemão, dando uma rápida passada pelos itens da nova norma descritos anteriormente, pode-se chegar a uma primeira conclusão: **em relação a norma antiga, os estados limites de serviço são tratados com muito mais ênfase**. As prováveis situações em que a estrutura estará sujeita em serviço são melhores retratadas, bem como considerações mais precisas são apresentadas.

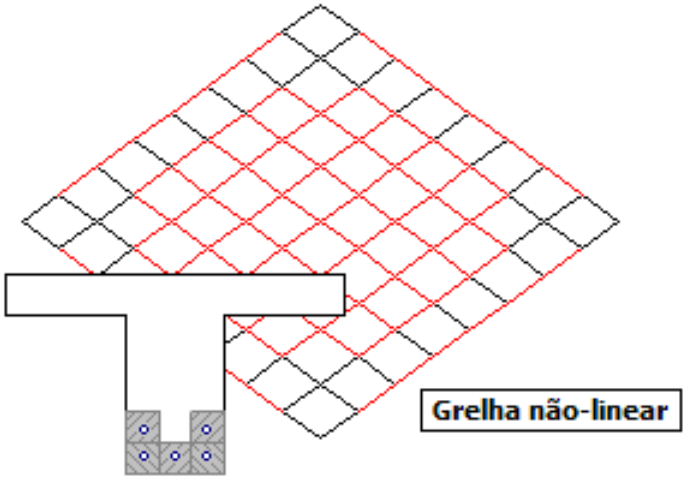
Chama-se atenção ainda para mais uma afirmação definida no item 16.2.4 "Segurança em relação aos ELS (desempenho em serviço)":

"Os modelos a serem usados nessa verificação de ELS são diferentes daqueles usados nos ELU. Além de suportarem cargas menores, têm rigidez diferente, usualmente maior."

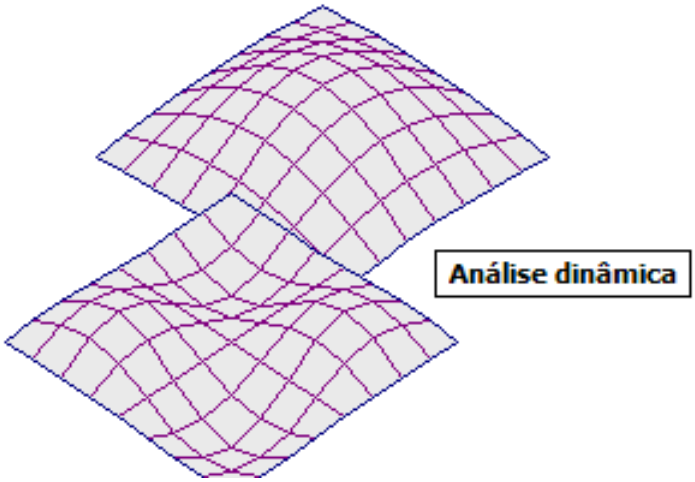
IV. Os estados limites de serviço no TQS

Todos os estados limites de serviço referentes à fissuração (ELS-F e ELS-W), às deformações (ELS-DEF) e às vibrações (ELS-VE), serão tratadas de forma consistente nos sistemas TQS.

As **flechas imediatas e diferidas no tempo, bem como as aberturas de fissuras**, serão calculadas através de um processamento de grelha, no qual é considerada a não-linearidade do concreto-armado, gerado principalmente pela fissuração do concreto (grelha não-linear física).



A **verificação das vibrações no pavimento** será realizada através de uma análise dinâmica.

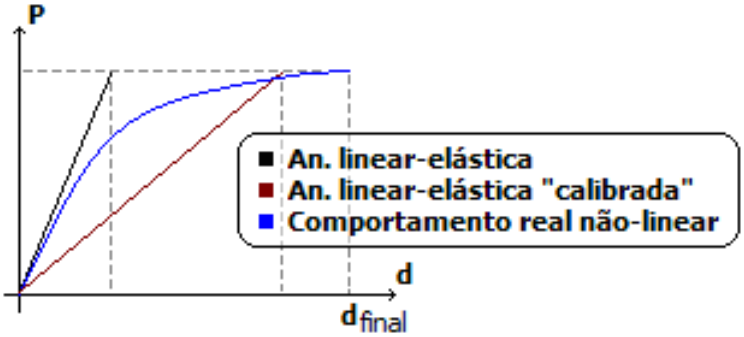


Maiores detalhes dos programas serão apresentados nos capítulos seguintes.

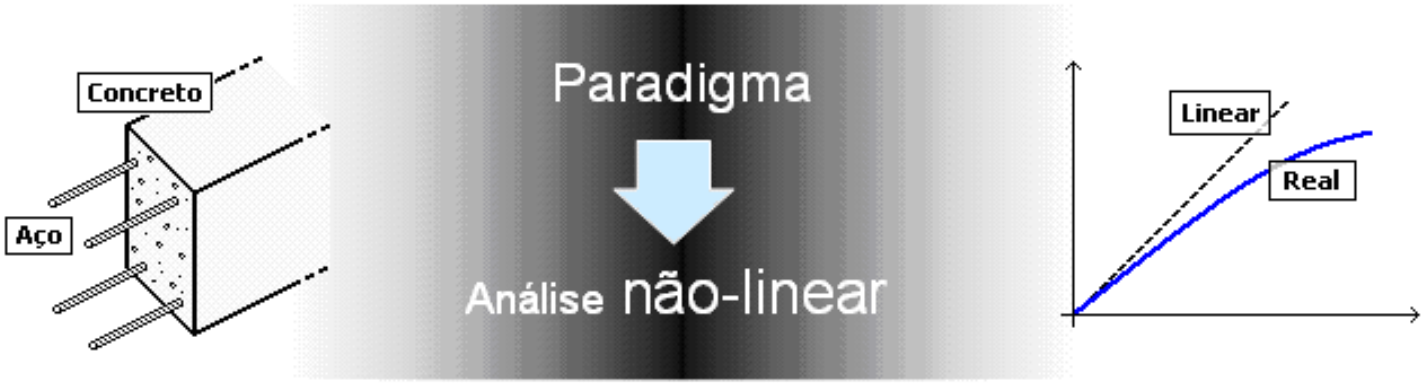
V. Análise das deformações

Usualmente, os deslocamentos em serviço em pavimentos de concreto-armado são obtidos a partir de **análises linear-elásticas**. Obtém-se bons resultados finais através da consideração de **reduções de rigidezes no modelo**, que na realidade, procuram simular a não-linearidade física e a fluência inerentes ao material. Porém, estas correções devem ser **previamente estudadas e corretamente calibradas**. Caso contrário, os resultados poderão ficar em total desacordo com a realidade.

Não existem números, coeficientes ou divisores "mágicos". Cada situação deve ser analisada e tratada de forma particular. **Experiência e bom-senso, neste caso, são fundamentais**.

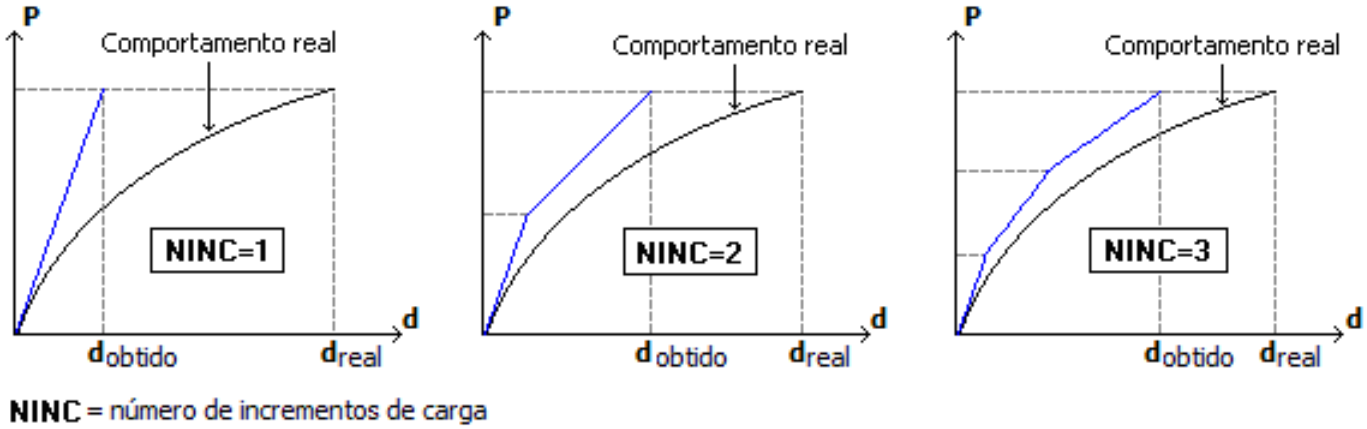


Para verificar o comportamento em serviço de edifícios de concreto-armado de forma mais adequada e consistente, **é aconselhável que seja realizada uma análise que leve em consideração o comportamento não-linear dos materiais empregados**.



No caso de **pavimentos de concreto-armado**, em que os elementos estruturais (vigas e lajes) estão predominantemente submetidos à esforços de flexão, **esta não-linearidade física é fundamentalmente gerada pela fissuração do concreto**.

Na análise não-linear, o carregamento total aplicado na estrutura é subdividido em incrementos de carga (ou passos de carga), de tal forma que a **rigidez em cada ponto do pavimento possa ser corrigida gradativamente a medida que a fissuração se propaga**. Quanto maior o número de incrementos de carga considerado, mais precisos serão os deslocamentos finais obtidos.



Além disso, **ocorre uma pequena redistribuição de esforços**, uma vez que os mesmos tendem a migrar para as regiões de maiores rigidezes.

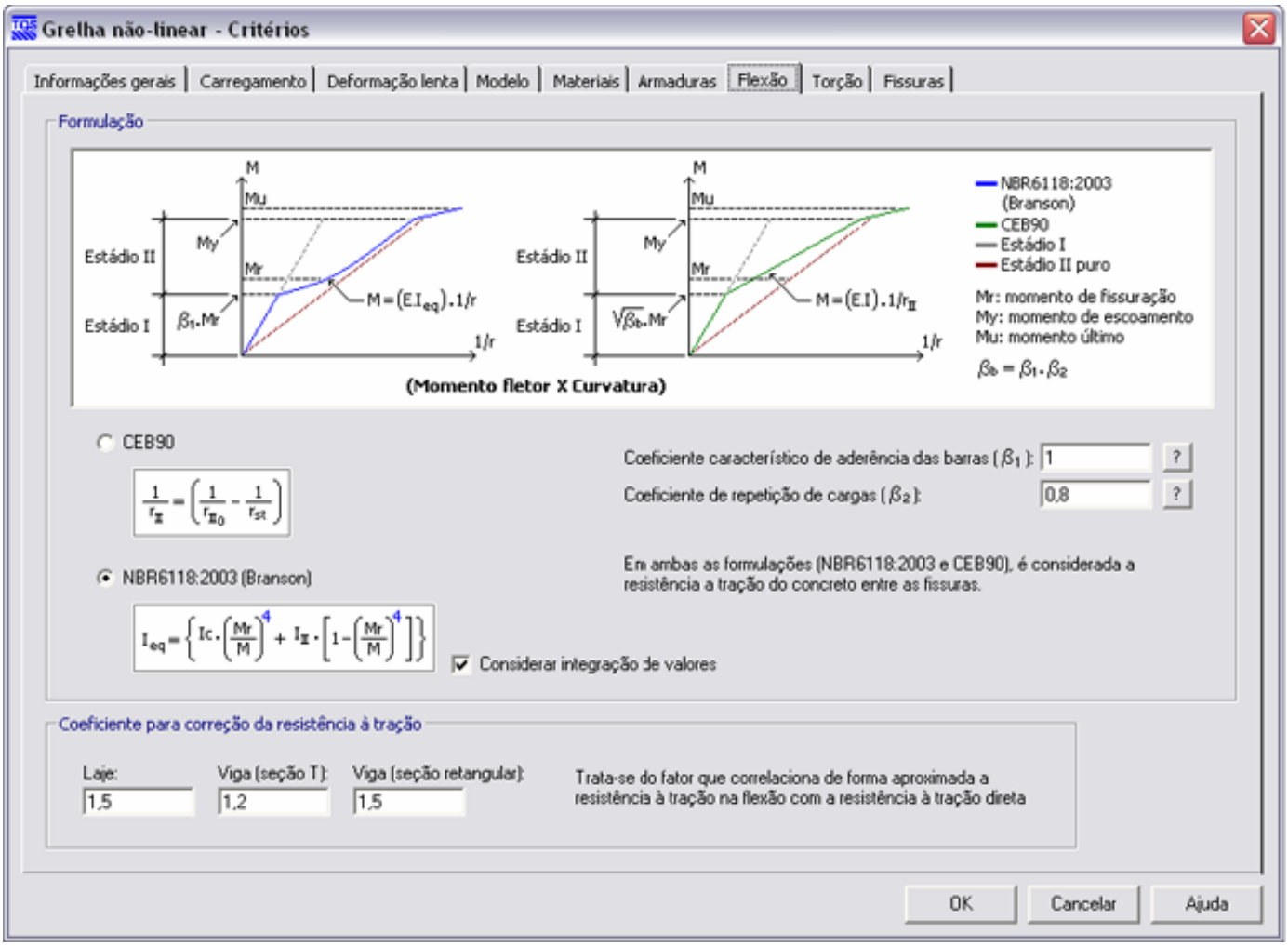
V.1 Grelha não-linear TQS

Quando a TQS iniciou o desenvolvimento do grelha não-linear há 4 anos, tinha-se um objetivo bem claro a sua frente: **fornecer aos engenheiros estruturais uma ferramenta que possibilitasse a análise das flechas em serviço em pavimentos de concreto-armado, de forma mais precisa e realística**. Este objetivo foi então alcançado, e o grelha não-linear disponibilizado a partir da versão 8.

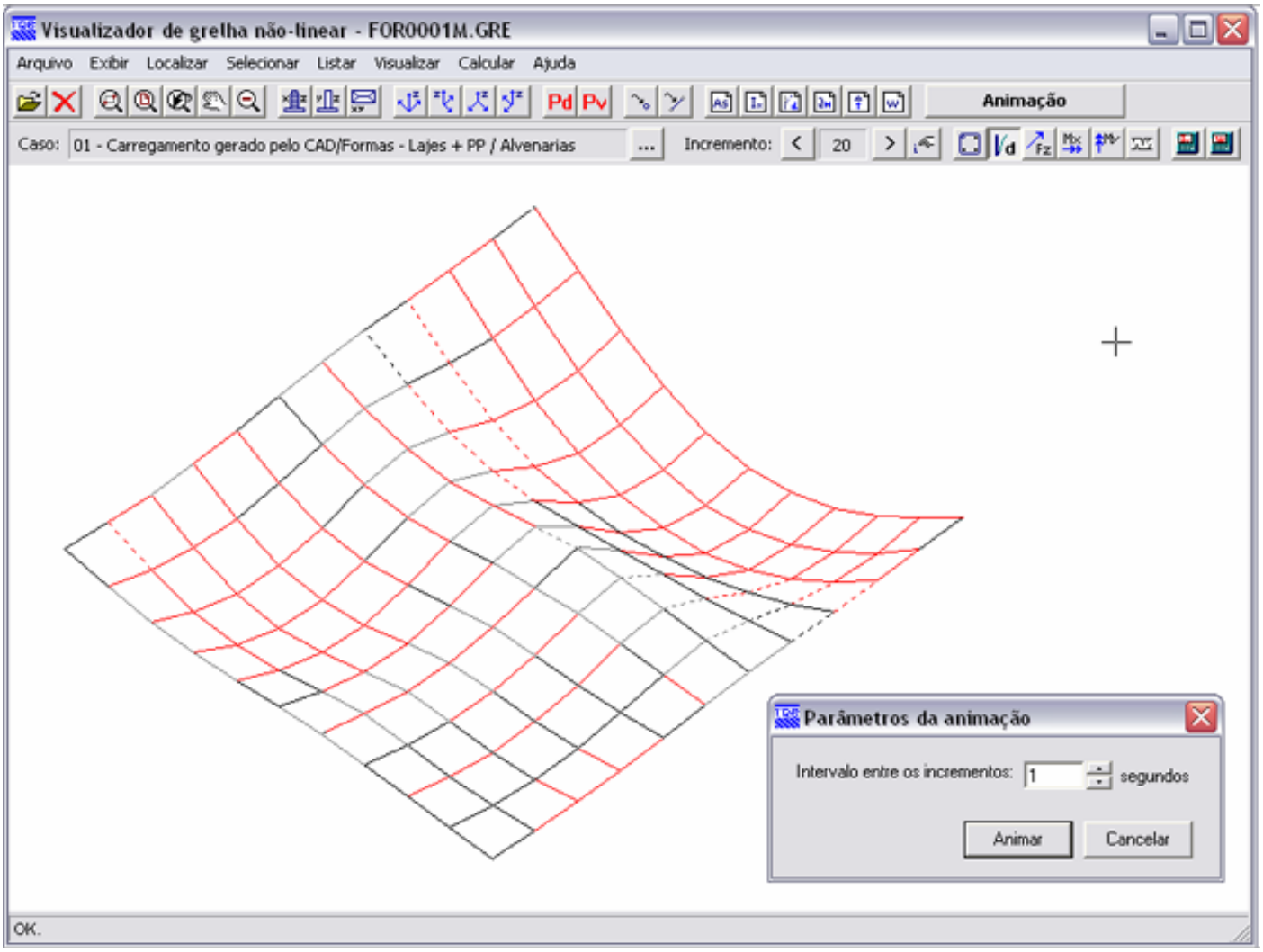
Em virtude das prescrições da nova norma NBR6118:2003, houve a necessidade de fazer certas adaptações no

programa. Resumidamente, eis os **recursos que já foram acrescentados**:

Cálculo e visualização das aberturas de fissuras
Correção da rigidez através da formulação de Branson (EI_{eq})
Otimização do tempo de processamento através do MIX
Verificação para as combinações ELS
Melhoria na consideração da deformação lenta
Através de uma série de **critérios de projeto**, é possível controlar toda a análise não-linear de forma detalhada.



Os resultados obtidos, são **apresentados de forma 100% gráfica**, facilitando a interpretação dos mesmos. A propagação da fissuração, bem como a redistribuição dos esforços no pavimento, pode ser visualizada por uma animação.



V.2 Diagrama momento-curvatura

Conforme havia sido mostrado no artigo "Efeitos locais de 2ª ordem em pilares", já publicado na comunidade-TQS, uma alternativa muito interessante para simular o efeito da não-linearidade física numa análise estrutural, é o uso das **relações momento-curvatura**.

$$\text{NLF} \begin{cases} \sigma = E.\varepsilon \\ M = (EI).1/r \ \checkmark \end{cases}$$

Naquela ocasião, os elementos analisados (pilares) estavam submetidos à uma flexão normal composta, e normalmente, sob compressão. Existiam certas particularidades que também eram adotadas: $1{,}1.f_{cd}$, EI_{sec}, ...

Embora os princípios básicos sejam os mesmos, o diagrama momento-curvatura para os elementos que compõe o pavimento (vigas e lajes), que agora estão submetidos à uma flexão simples, é diferente. A **não-linearidade passa a ser definida principalmente pelo efeito da fissuração**, e não apenas pelas relações tensão-deformação dos materiais.

A seguir, é mostrado o diagrama momento-curvatura utilizado nas análises.

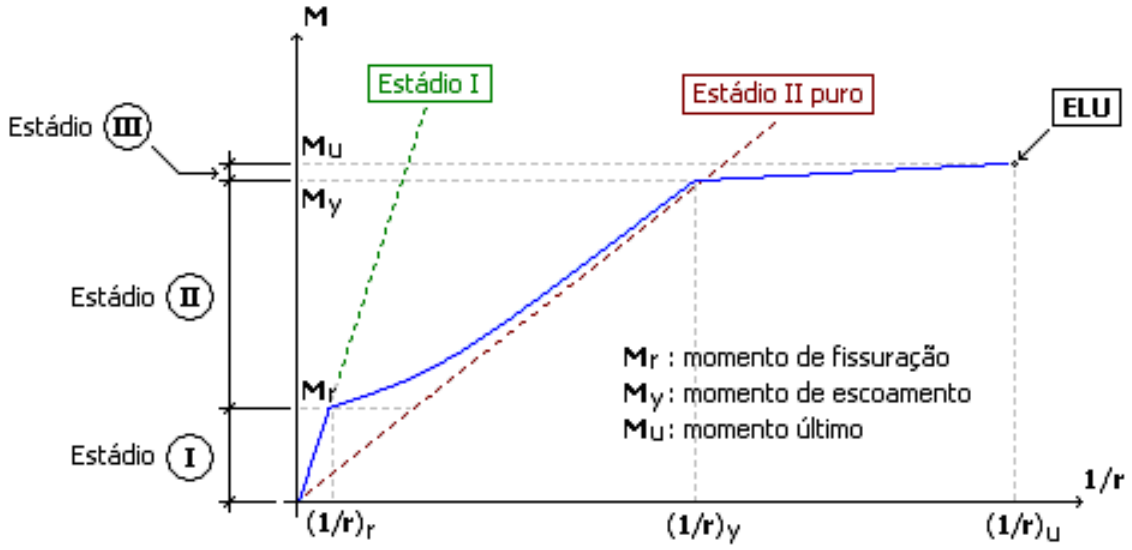


Diagrama momento-curvatura

É fundamental entendê-lo. E por isso, vamos explicá-lo com detalhes:

O **diagrama momento-curvatura efetivamente utilizado** na análise é o que está representado na cor azul. As retas tracejadas somente são auxiliares.
O diagrama momento-curvatura utilizado pode ser claramente **subdivido em três trechos principais**, que são os estádios I, II e III.
A reta tracejada verde representa o **estádio I**, situação na qual a seção não apresenta fissuras e o concreto ainda resiste à tração.
A reta tracejada vermelha representa o **estádio II puro**, situação na qual somente a armadura resiste à tração e a configuração das tensões de compressão no concreto é triangular.
A transição do estádio I para o estádio II é definido **pelo momento de fissuração** (M_r), que corresponde ao esforço que provoca a abertura da primeira fissura, e que pode ser calculado através da fórmula definida no item 17.3.1 "Generalidades" da nova NBR6118:2003.
A transição do estádio II para o estádio III é definido pelo **momento de escoamento** (M_y), que corresponde ao esforço que provoca o escoamento da armadura tracionada).
O diagrama termina quando o **estado limite último (ELU)** é alcançado.
O trecho que representa o **estádio I é linear**.
O trecho que representa o **estádio II não é linear**. Trata-se de uma **transição entre o estádio I e o estádio II puro**.
O trecho que representa o **estádio III é praticamente linear**. Nota-se que, para pequenos acréscimos de momento, há grandes acréscimos de curvatura. Fica então evidente, a **correspondência com o escoamento do aço**.

V.3 Estrutura de concreto-armado em serviço

Através do diagrama momento-curvatura apresentado anteriormente, nota-se que **a rigidez EI varia entre os trechos do diagrama**. No estádio II, inclusive, esta variação ocorre ponto a ponto. Em termos de redistribuição de esforços, isto não provoca grandes alterações. **Porém, em termos de deslocamentos (flechas), a variação é direta, e muitas vezes, significativa.**

No item 17.3.1 "Generalidades", descreve-se de forma clara:

"Nos estados limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estádio I e parcialmente no estádio II. A separação entre estas duas partes é definida pelo momento de fissuração."

FRANÇA (2003), apresenta um diagrama muito interessante para um caso de vigas biapoiadas.

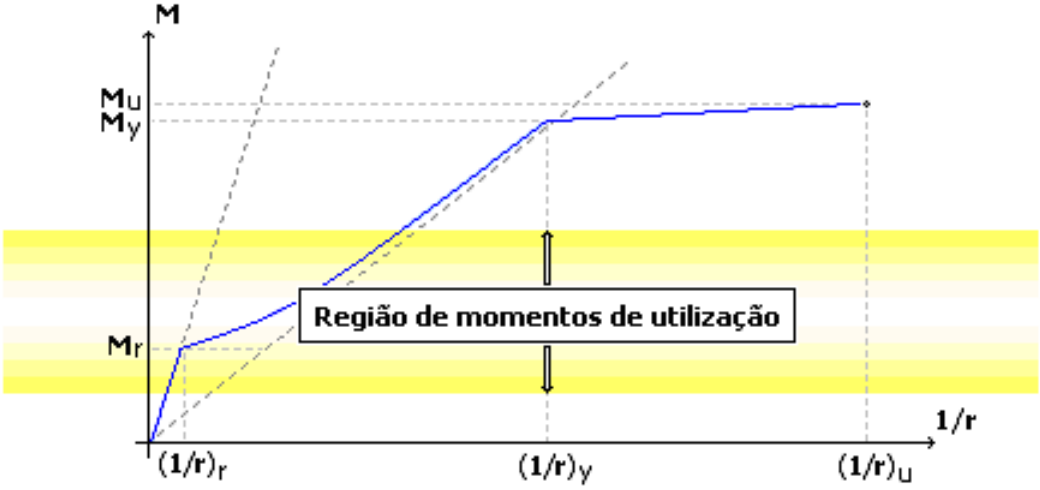


Diagrama momento-curvatura

Pode-se afirmar então que:

Considerar **toda a estrutura apenas no estádio I (mais rígida), pode resultar em valores contra a segurança**.
Em contra-partida, considerar **toda a estrutura apenas no estádio II, pode resultar em valores exagerados**.

V.4 Particularidades do estádio II

Nos elementos de concreto-armado, não ocorre a transição direta entre os estádios I (não-fissurado) e o II puro (totalmente fissurado). **As fissuras são discretas, isto é, aparecem somente em algumas seções de uma região da estrutura**.

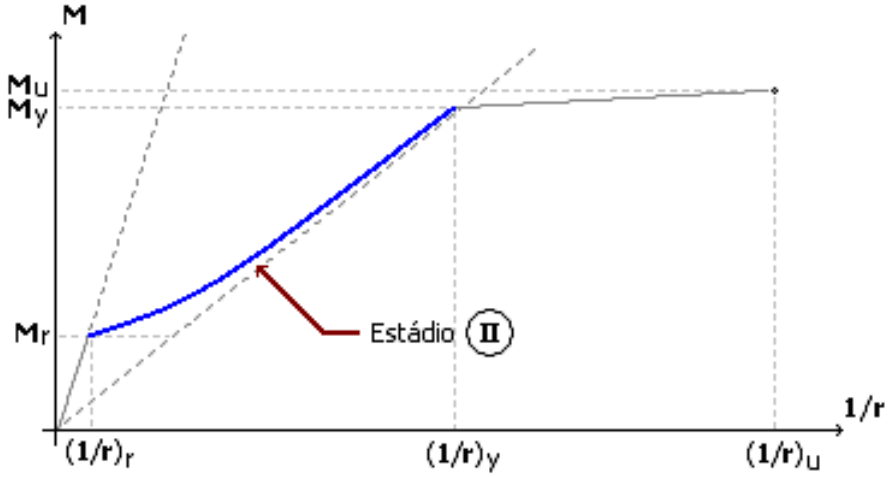
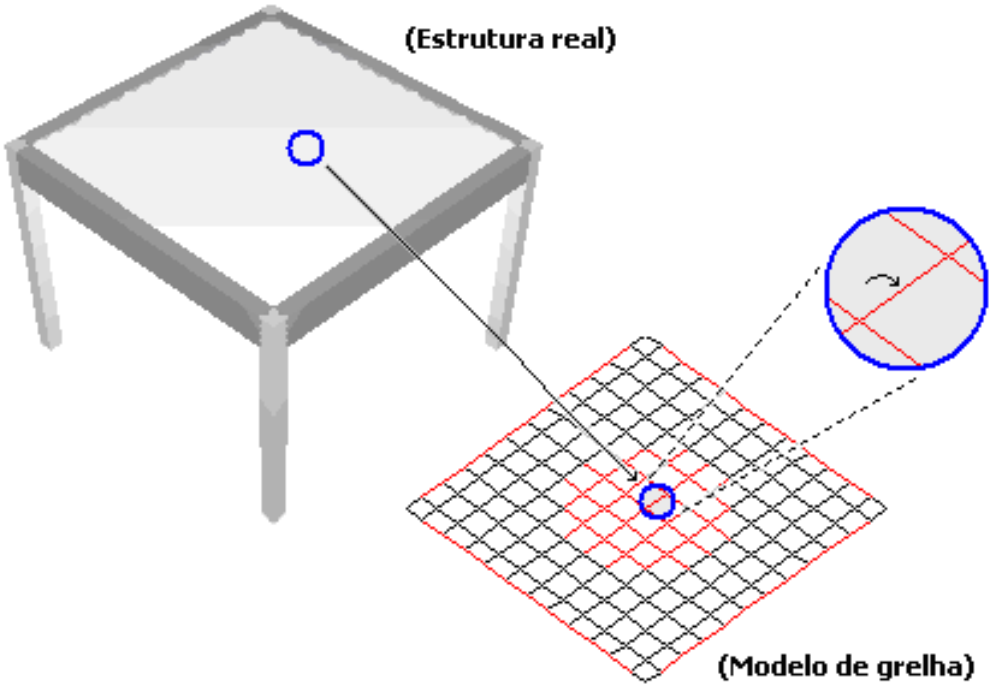


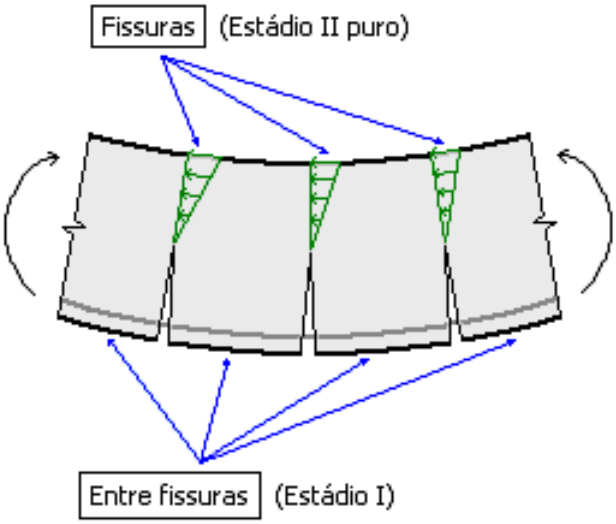
Diagrama momento-curvatura

Vamos ilustrar melhor esta transição correspondente ao estádio II.

Seja um **trecho de um pavimento**, representado por uma barra do modelo de grelha e submetida à uma flexão positiva.



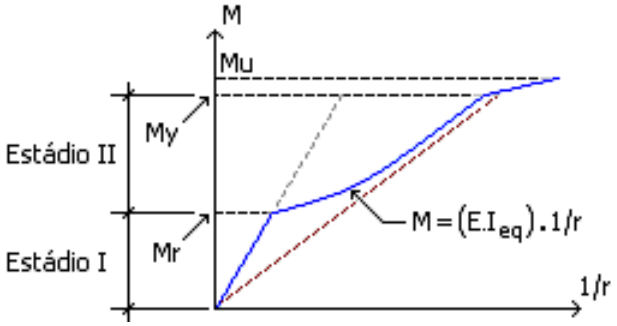
Uma vez ultrapassado o momento de fissuração em certos pontos deste trecho, aparecerão fissuras em algumas seções. Com isso, parte da barra passará para o estádio II puro, e a outra permanecerá no estádio I. **Entre as fissuras, o concreto ainda continuará resistindo aos esforços de tração**.



O estádio II procura, na realidade, representar a "média" ou mesmo a "integração" entre os estádios I e II puro, existentes numa região da estrutura.

Existem diversas formulações que retratam a situação descrita anteriormente.

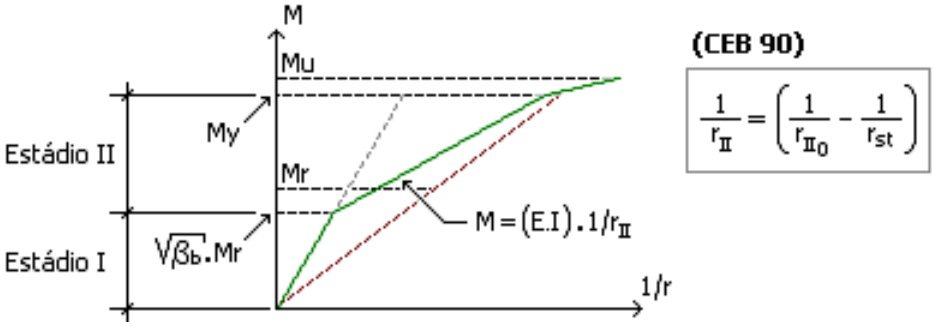
A **nova norma NBR6118:2003 optou pela fórmula de Branson**, na qual é feita uma interpolação direta das rigidezes entre os estádios I e II puro, resultando-se numa rigidez equivalente (EI_{eq}).



NBR6118:2003 (Branson)

$$I_{eq} = \left\{ I_c \cdot \left(\frac{M_r}{M}\right)^3 + I_{II} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_r}{M}\right)^3\right] \right\}$$

Uma outra opção é a formulação proposta pelo **CEB90**, baseada numa correção de curvaturas.

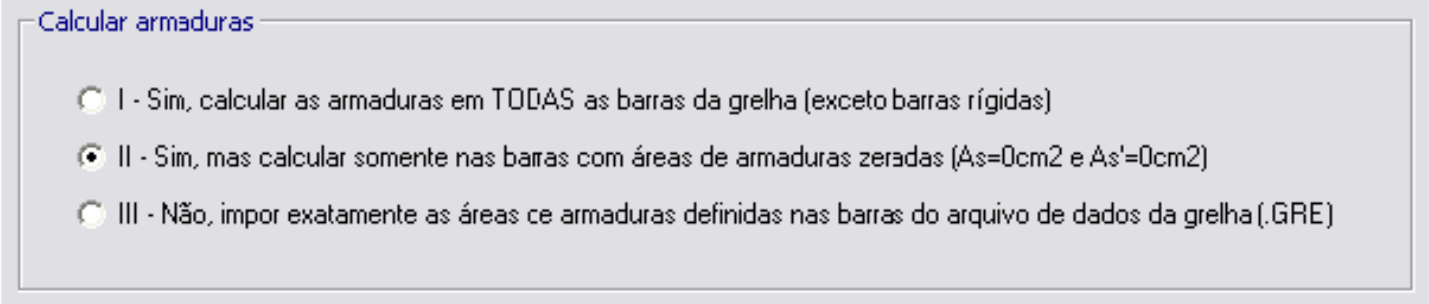


No grelha não-linear TQS, estão disponíveis as duas formulações apresentadas acima.

V.5 Armaduras

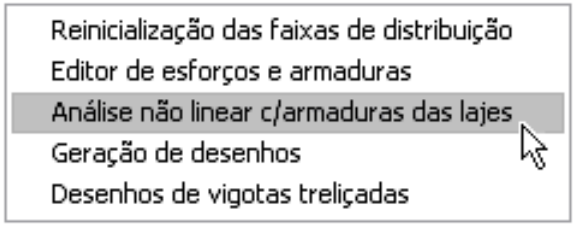
Na análise não-linear, toda a armadura precisa ser previamente conhecida (ou calculada), pois **a resposta da estrutura depende de como ela está armada**.

No grelha não-linear TQS, as **armaduras podem ser calculadas ou impostas nas barras do modelo**.



Nas barras da grelha onde as armaduras forem calculadas pelo programa, **a verificação da área mínima de armadura de tração é feita através do momento mínimo** ($M_{d,mín}$), de acordo com o item 17.3.5.2.1 "Armadura de tração" da NBR6118:2003, respeitando uma taxa mínima absoluta definida por um critério de projeto (0,15%).

Uma alternativa muito interessante que torna a análise não-linear mais real é **o processamento com as armaduras das lajes**. Neste caso, será considerado todo o detalhamento definido no editor de esforços do TQS-Lajes.



V.6 Deformação lenta

A deformação lenta ou fluência em uma estrutura de concreto-armado é caracterizada pelo **aumento nas deformações do concreto, quando a mesma é submetida à cargas permanentes**, isto é, aquelas que estarão aplicadas durante boa parte da existência da estrutura. As cargas variáveis, não geram fluência.

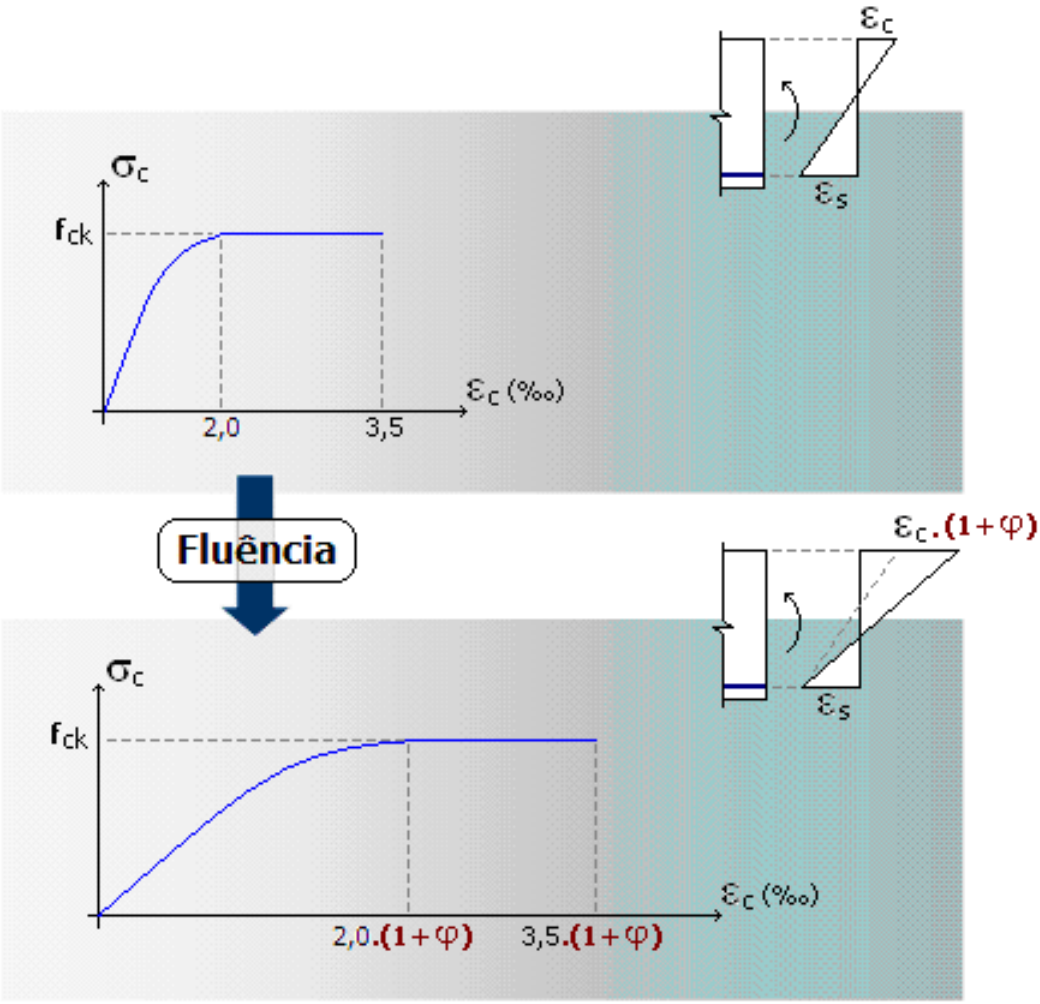
Seja de uma forma significativa ou de uma maneira mais branda, a **deformação lenta está sempre presente nas estruturas de concreto-armado**, e portanto, precisa ser levada em conta nas verificações em serviço.

No grelha não-linear TQS, **a deformação lenta pode ser tratada de duas formas**:

a. Através da majoração direta das flechas imediatas pelos coeficientes de fluência

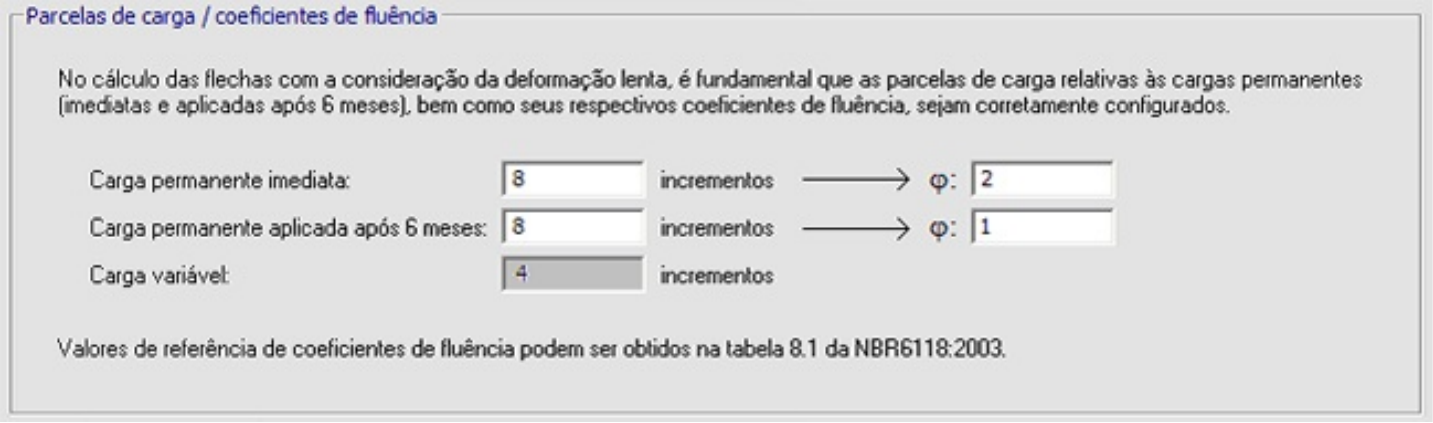
$$f_{final} = f_{imediata} \cdot (1 + \phi)$$

b. Através da correção do diagrama tensão-deformação do concreto.



A primeira alternativa é mais adequada quando as seções estão predominantemente comprimidas, como por exemplo, estruturas com armaduras ativas. No caso de pavimentos de concreto-armado, a segunda opção é mais indicada.

Outra característica interessante do grelha não-linear TQS, é a separação da carga permanente em duas partes: imediata e após 6 meses. Procura-se com isto, **retratar a maior magnitude dos efeitos da fluência para as cargas permanentes aplicadas em estruturas com concreto em menor idade**.



VI. Verificação das aberturas de fissuras

No item 13.4 “Controle da fissuração e proteção das armaduras” da nova norma NBR6118:2003, descreve-se:

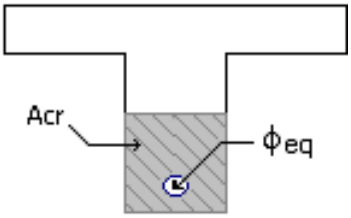
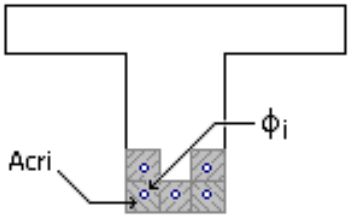
“A fissuração em elementos estruturais de concreto armado é inevitável, devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto à tração; mesmo sobre ações de serviço (utilização), valores críticos de tensões de tração são atingidos.”

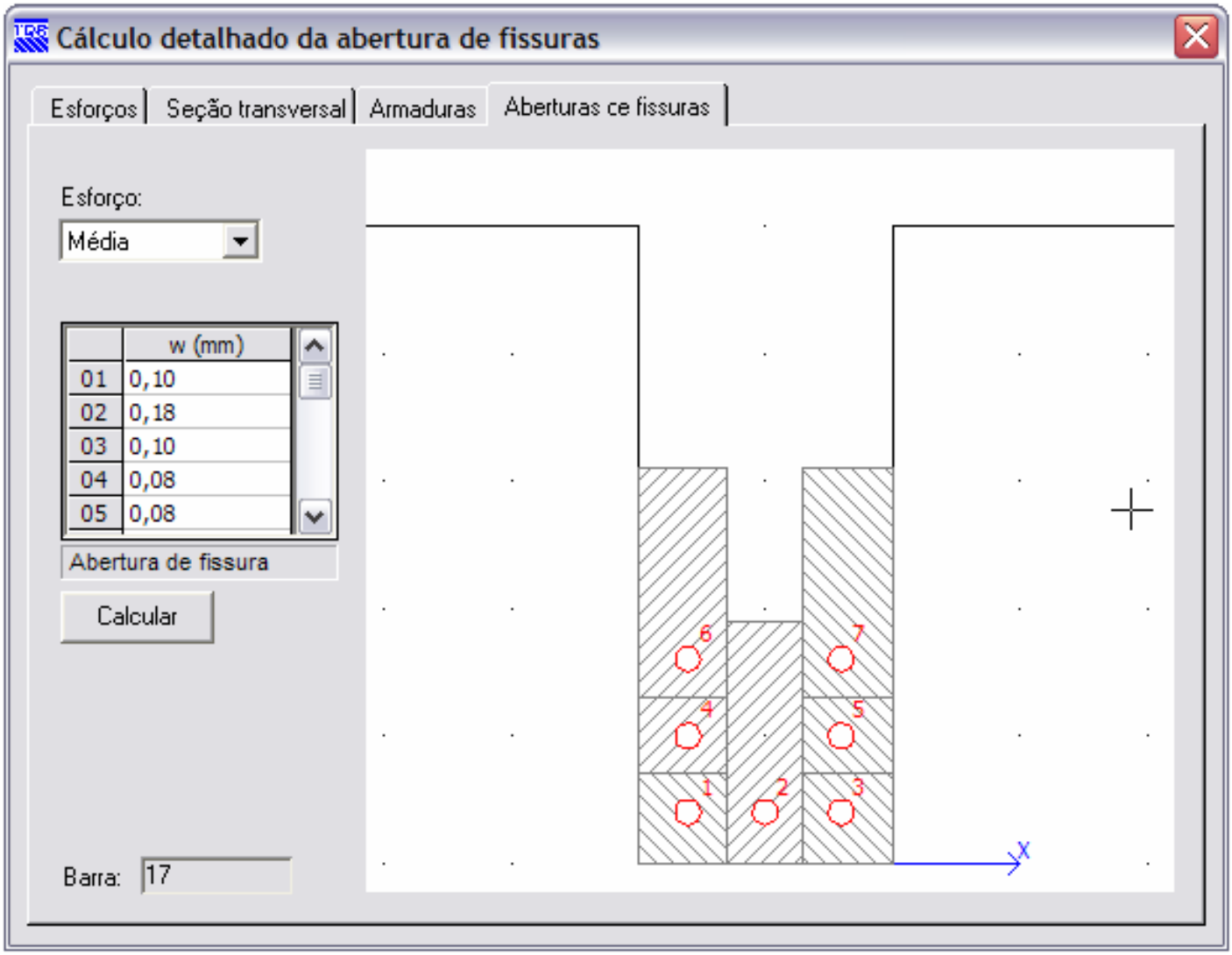
Assim como a qualidade do concreto e o cobrimento das armaduras, **a fissuração também influi de maneira direta na durabilidade de uma estrutura**, e seu controle, portanto, passa a ser uma tarefa relevante e obrigatória.

Muito embora o item 17.3.3.2 "Controle da fissuração através da limitação da abertura estimada das fissuras", forneça formulações específicas para o cálculo das aberturas de fissuras, é muito importante ter em mente que os **valores obtidos representam uma estimativa para uma eventual situação de utilização**. Nenhuma exatidão pode ser exigida.

Controlar a fissuração, ou mesmo calcular as aberturas de fissuras, são tarefas bastante complicadas. São inúmeros os fatores que governam o problema em questão.

No processamento de grelha não-linear TQS, já foi incluído o cálculo das aberturas de fissuras segundo às fórmulas da nova norma, para cada incremento de carga.

	A área da região de envolvimento protegida pelas armaduras (A_{cr}) é calculada inicialmente de maneira aproximada, segundo uma bitola equivalente definida a partir das armaduras (superior e inferior) existentes nas barras.
Posteriormente, o cálculo detalhado das aberturas de fissuras, isto é, para cada uma das áreas de envolvimento das armaduras (A_{cri}), pode ser realizado dentro do visualizador de grelha não-linear.	

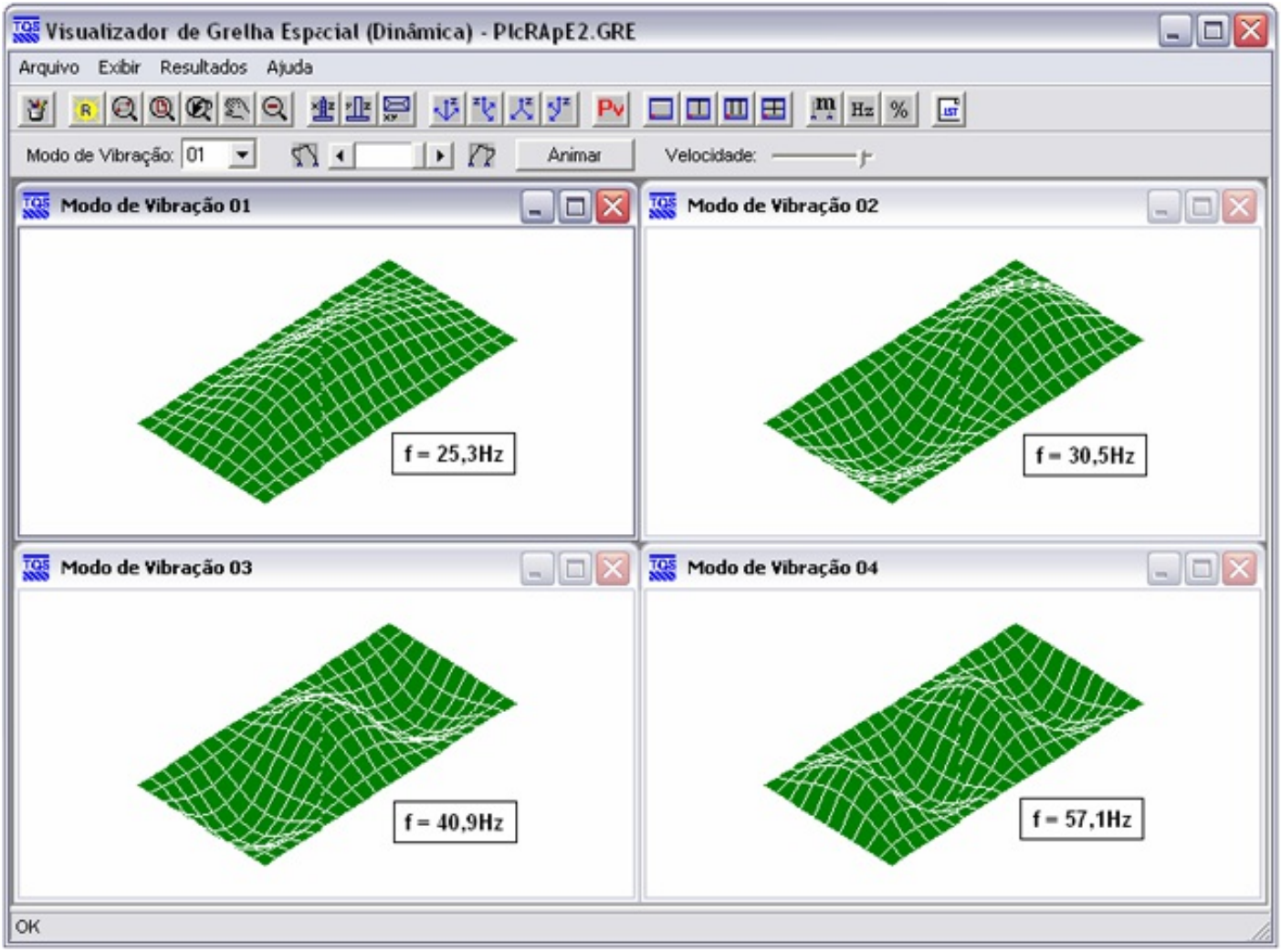


VII. Verificação das vibrações

Na seção 23 “Ações dinâmicas e fadiga” da nova norma NBR6118:2003, são estabelecidas condições para que estruturas sujeitas à vibrações tenham um comportamento satisfatório assegurado. Especifica-se que $f > 1{,}2.f_{crit}$, onde f é frequência própria da estrutura e f_{crit}, a frequência crítica, cujos valores indicativos podem ser encontrados na tabela 23.1.

O estado limite de serviço referente às vibrações excessivas (ELS-VE), pode ser verificado através dos sistemas TQS pelo **módulo de análise dinâmica**. Toda a sua implementação teórica, adaptada tanto pavimentos modelados por grelha como por elementos finitos de placa, foi elaborada pelo Dr. Eng. Sérgio Pinheiro Medeiros.

As **frequências naturais para cada um dos modos de vibração são calculadas** durante o próprio processamento da grelha. Todos os resultados obtidos são visualizados graficamente através de um editor específico.

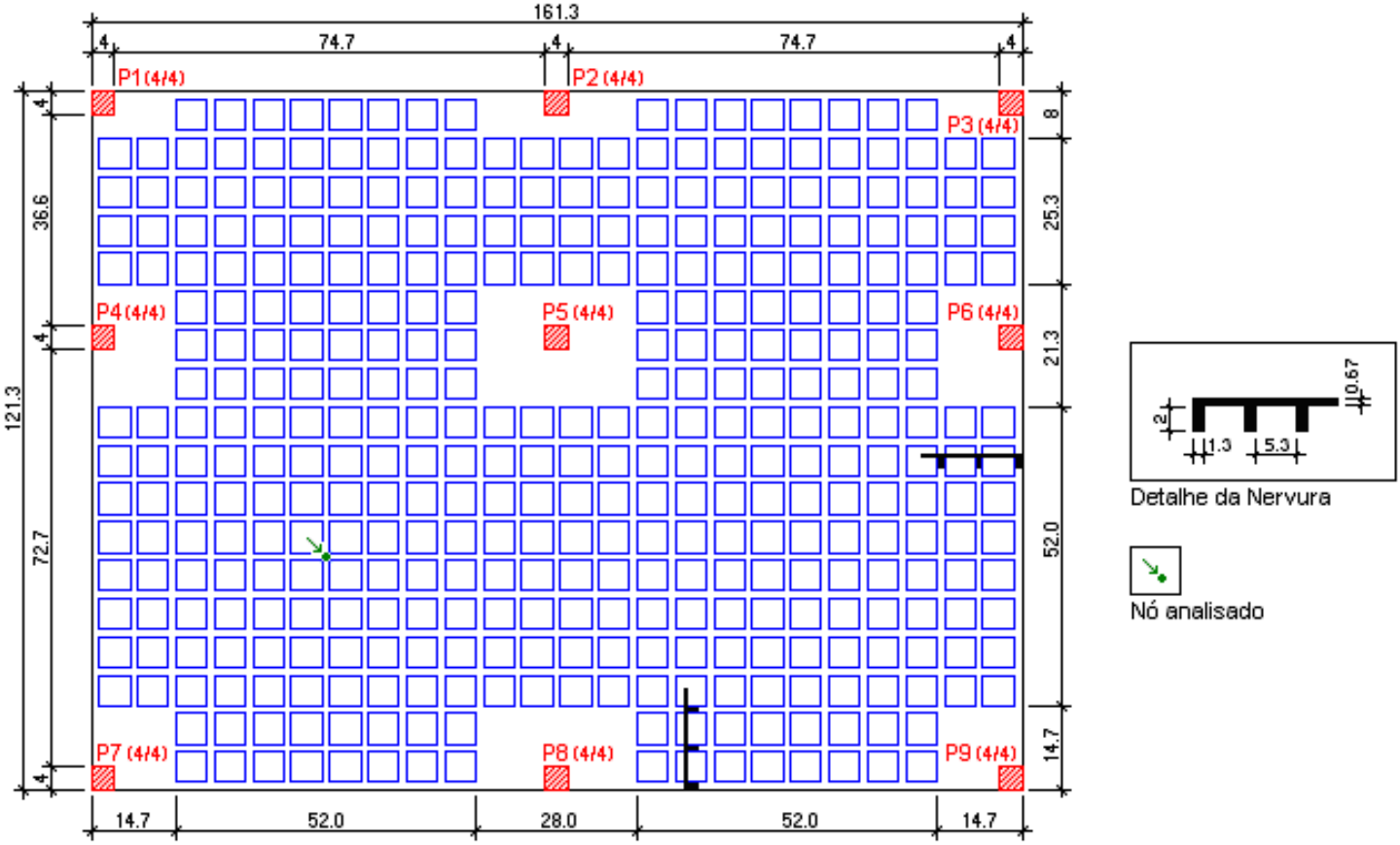


VIII. Exemplos

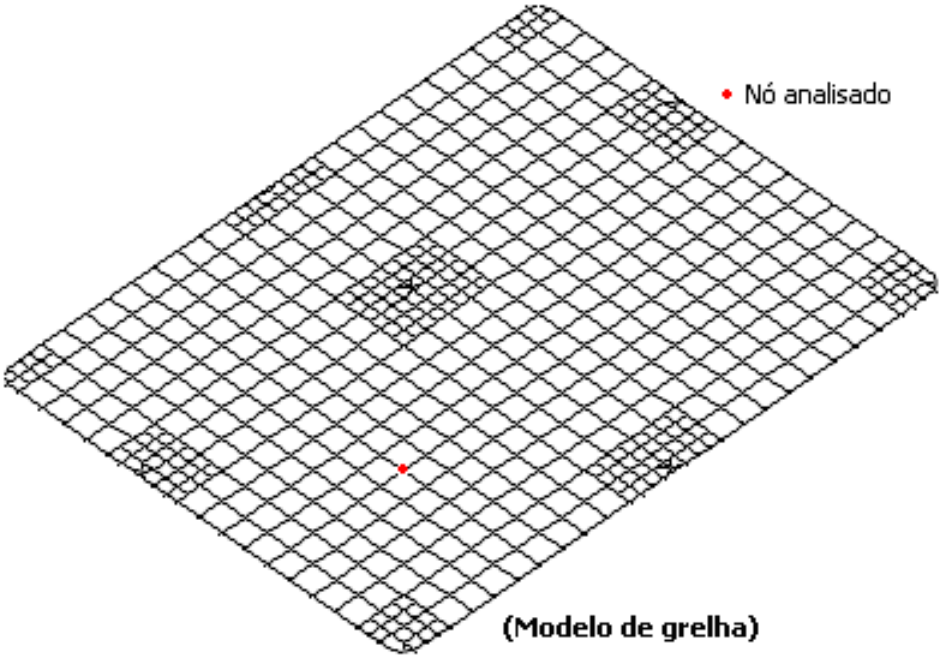
Neste capítulo, são apresentados alguns resultados obtidos pelo grelha não-linear TQS.

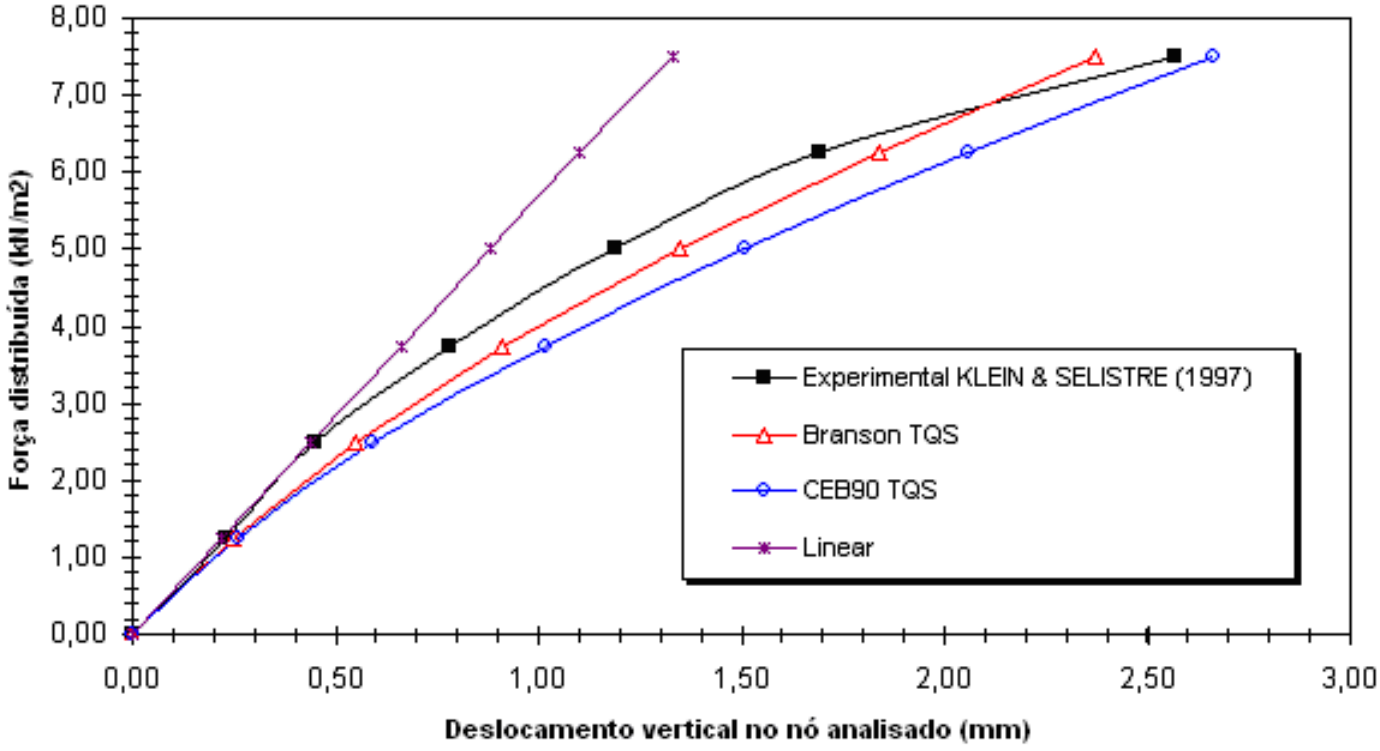
VIII.1 Exemplo 01

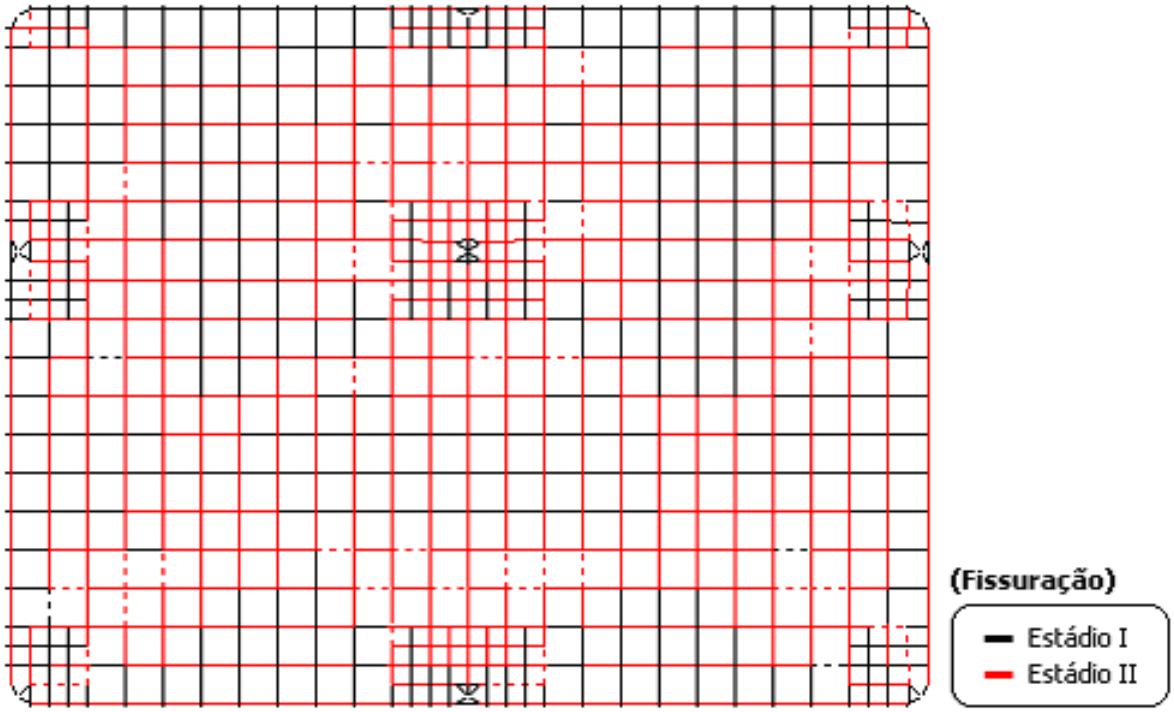
Trata-se um exemplo bastante interessante, publicado pela ABECE, no qual **comparam-se os resultados da análise não-linear, com os deslocamentos reais obtidos a partir de um modelo experimental reduzido**.



Modelo Experimental Reduzido (KLEIN & SELISTRE)
Todas medidas em cm

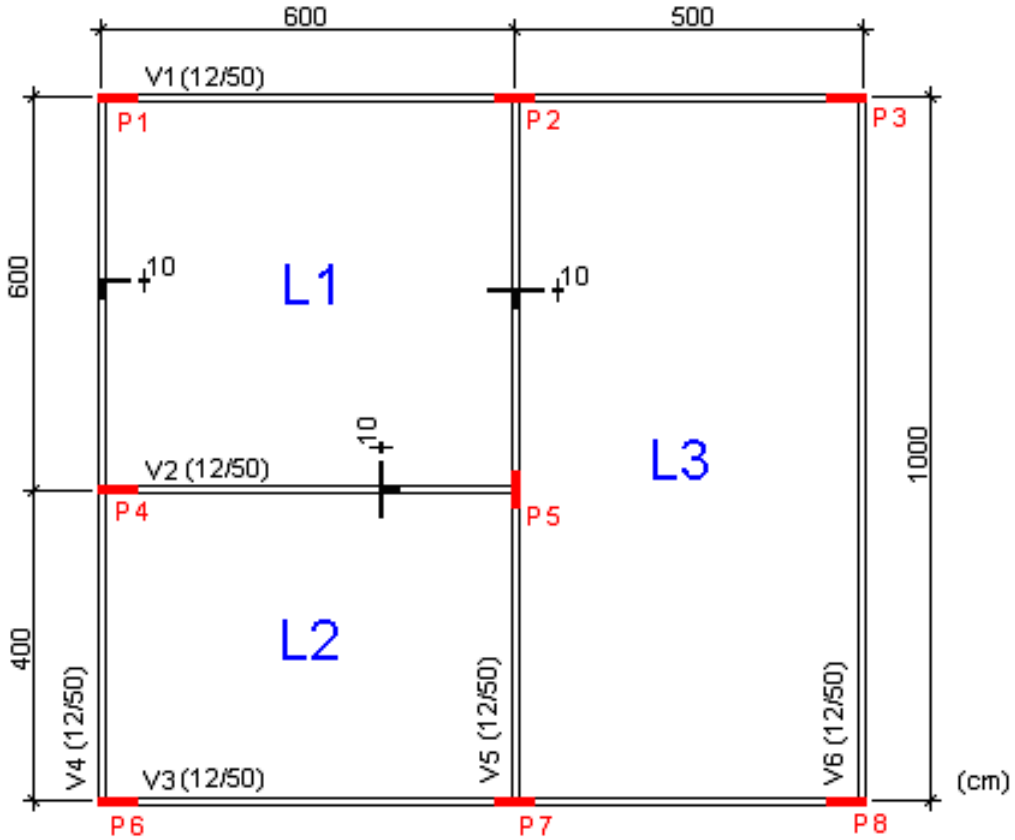


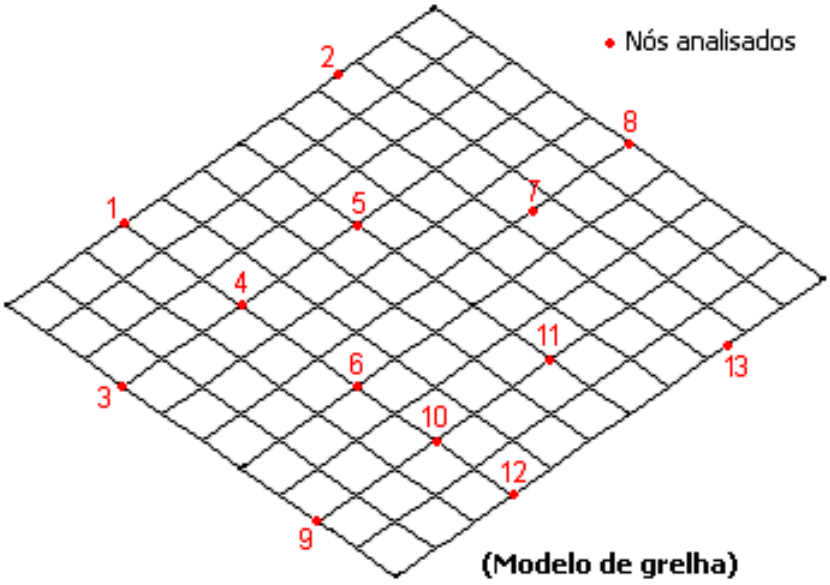




VIII.2 Exemplo 02

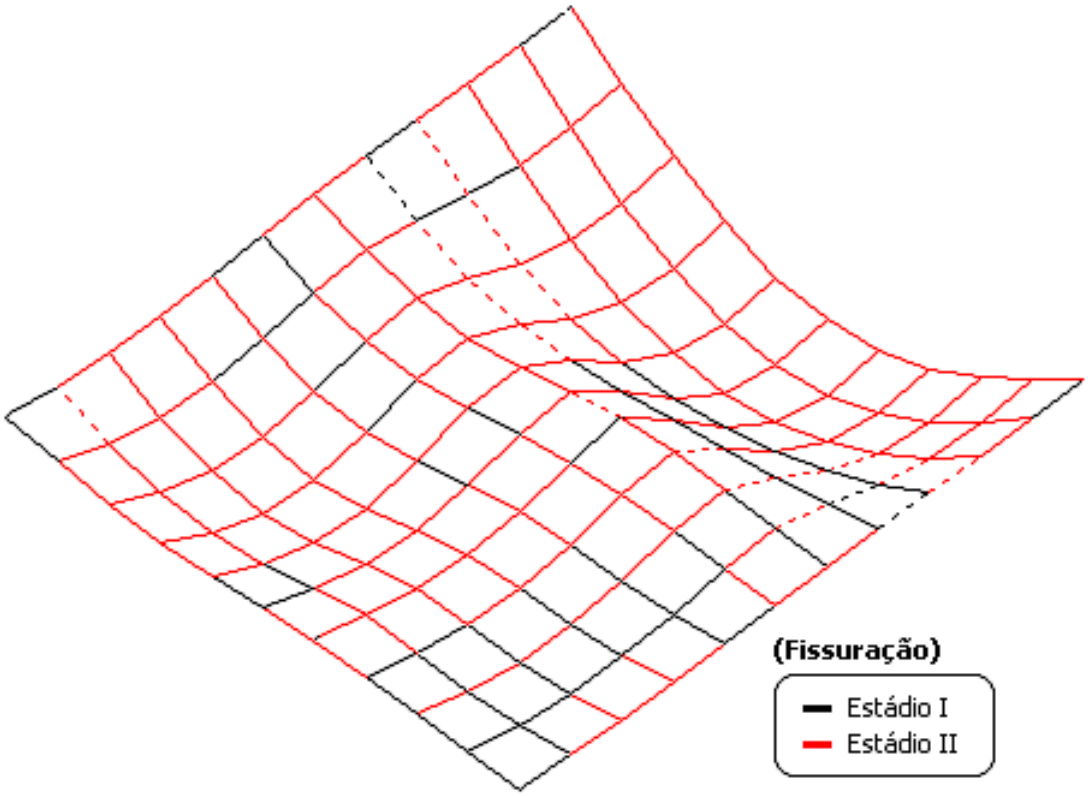
Trata-se de um exemplo que está publicado na tese de doutoramento do eng. Roberto Chust de Carvalho, cujos resultados foram comparados com o grelha não-linear TQS.





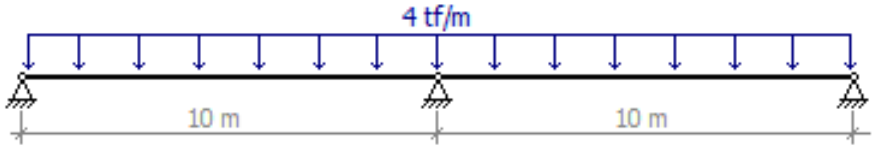
(Modelo de grelha)

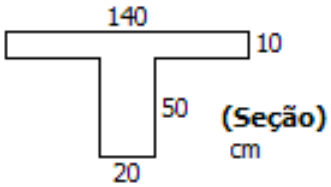
Ponto	Deslocamentos (mm)		
	Tese CHUST	Branson TQS	CEB90 TQS
1	5,5	1,8	2,5
2	0,9	0,2	0,2
3	6,6	2,7	3,1
4	17,5	13,0	14,0
5	8,8	7,0	7,2
6	6,0	5,6	5,7
7	28,7	23,9	24,6
8	30,2	29,2	28,5
9	-0,4	-0,3	-0,3
10	4,9	4,9	5,0
11	-0,7	-0,4	-0,4
12	2,6	1,0	1,2
13	1,0	0,3	0,3



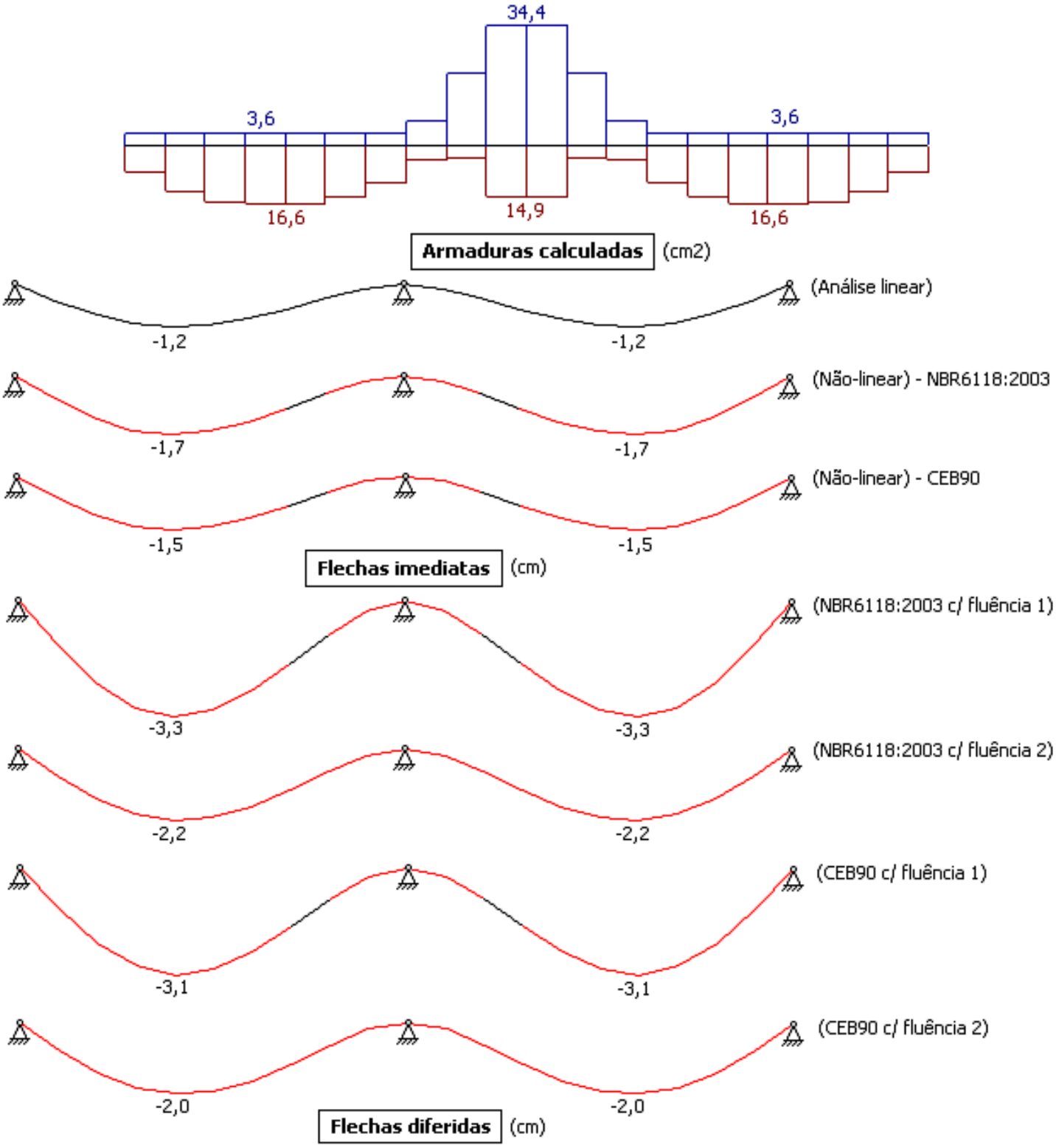
VIII.2 Exemplo 03

Trata-se de uma viga de seção T com 3 apoios. São apresentados os resultados obtidos pelo grelha não-linear TQS.

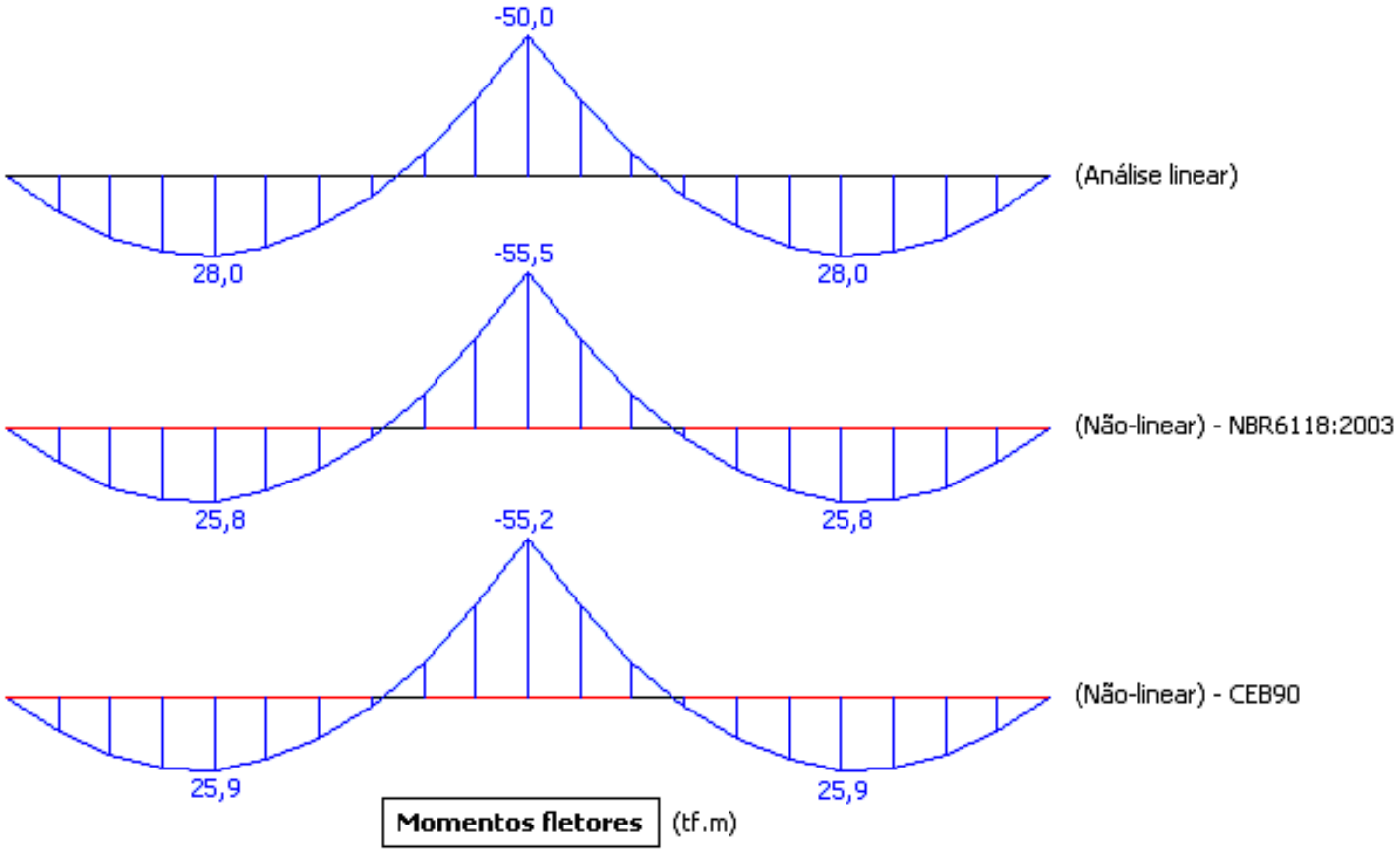




Parcela permanente imediata = 40%
Parcela permanente após 6 meses = 40%
Parcela variável = 20%



Fluência 1: majoração direta nas flechas imediatas
Fluência 2: correção no diagrama tensão-deformação do concreto



IX. Referências

CARVALHO, R.C. "Análise não-linear de pavimentos de edifícios de concreto através da analogia de grelha", Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1994.

FRANÇA, R.L.S. "Principais fatores que influenciam nas deformações de peças de estrutura de concreto", 5º Seminário de Estruturas, Projeto e produção com foco na racionalização e qualidade, 2003.

OLIVEIRA, R.S., CORRÊA, M.R.S., RAMALHO, M.A. "Avaliação da deformação de lajes nervuradas considerando a não-linearidade física: comparação entre valores teóricos e experimentais", e-Artigos ABECE, n. 4, 2000.