

## Sistema TQS-Vigas e a NBR-6118:2003 (Parte I)

Continuando a série de artigos sobre o desenvolvimento dos Sistemas TQS com o objetivo de atender a NBR-6118:2003, encaminho abaixo o texto relativo ao dimensionamento e detalhamento de vigas contínuas.

Diria que a conversão do TQS-Vigas foi uma conversão trabalhosa, burocrática, sem grandes inovações como foi o caso do pilar, por exemplo. O TQS-Vigas já era muito rico em critérios e detalhes de desenho e diversos deles já atendiam à NBR-6118:2003. O cálculo mais interessante, flechas, considerando efeito incremental, fluência e a fissuração do concreto passamos ao programa de grelha não-linear física.

Entretanto, o TQS-Vigas incorpora alguns conceitos novos que, se seguidos a risca, vai alterar bastante a forma de se projetar. É o caso, por exemplo, da consideração dos limites de utilidade das seções transversais.

Este artigo é composto de 3 partes.

### 1.) Introdução

O elemento vigas é o elemento mais comum na maioria das estruturas convencionais das edificações. Geralmente, os desenhos de vigas contínuas representam a maior parte da quantidade de desenhos de um projeto. Vamos apresentar algumas considerações sobre o sistema TQS-Vigas (solicitações, dimensionamento, detalhamento e desenho) e a nova NBR-6118:2003 (NB1/03). Vamos procurar salientar os itens novos da Norma e como o TQS-Vigas foi programado. Assuntos que sofreram poucas ou nenhuma alteração como, por exemplo, dimensionamento a flexão, faremos apenas uma citação.

A maioria dos tópicos importantes desta nova norma já foram implantados no TQS-Vigas, entretanto, temos alguns trabalhos a desenvolver ainda, por exemplo, com relação a armadura de costura junto aos ferros ancorados, detalhes específicos de ancoragem, detalhes de alojamento de barras na seção etc.

Em resumo, vamos abordar os seguintes tópicos sobre o TQS-Vigas:

Modelo Estrutural - origem de esforços, limitações etc.

Mesa Colaborante - importância, como é calculado etc.

Redistribuição de  $M(-)$  - limites, controle da LN, avisos etc.

Dimensionamento a Flexão - As mínimo, baricentro, limites de LN etc.

Dimensionamento a Cortante -  $Asw$  mínimo, verificações, modelos, avisos etc.

Dimensionamento a Torção - Núcleo resistente, verificações,  $Asl$  e  $Asw$ , avisos etc.

Torção e Cortante combinados

Detalhamento de  $As$  Longitudinal - Arm. lateral, ancoragem etc

Detalhamento de  $Asw$  Vertical - Espaçamentos etc.

Gerais

Principais Conclusões

### 2.) Modelo Estrutural

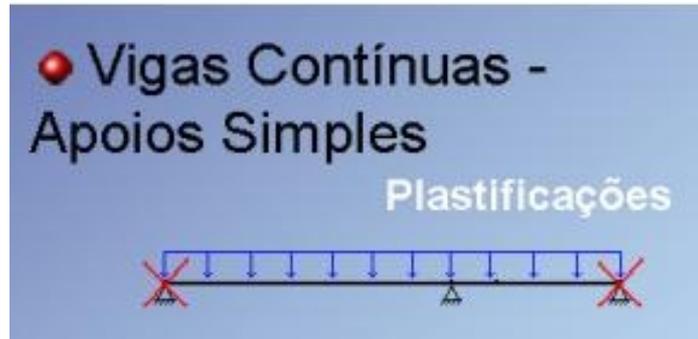
Conforme já tivemos a oportunidade de comentar por diversas vezes, por mais refinadas que forem as técnicas de dimensionamento e detalhamento de armaduras que possamos empregar, o projeto não terá a qualidade suficiente se não trabalharmos com as solicitações mais adequadas para o elemento estrutural. Para as vigas contínuas este conceito também é muito válido.

#### 2.1) Modelos Disponíveis

Os seguintes modelos estruturais de vigas contínuas estão disponíveis no TQS-Vigas:

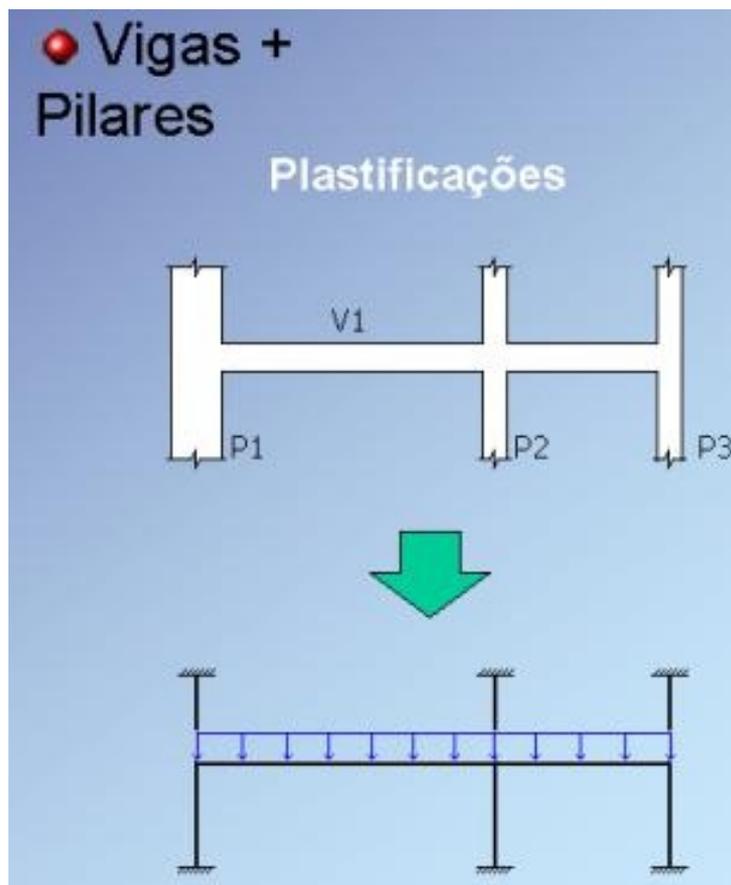
- Viga contínua com apoios rotulados.

Este modelo NÃO é mais recomendado. Está no TQS-Vigas apenas para manter compatibilidade com projetos antigos. Nos dias atuais, com tantos recursos computacionais para análise, é fundamental e necessário a consideração das vigas com seus respectivos pilares para a obtenção das solicitações. Este modelo de apoios rotulados é representado pelo esquema abaixo:



- Vigas contínuas com pilares

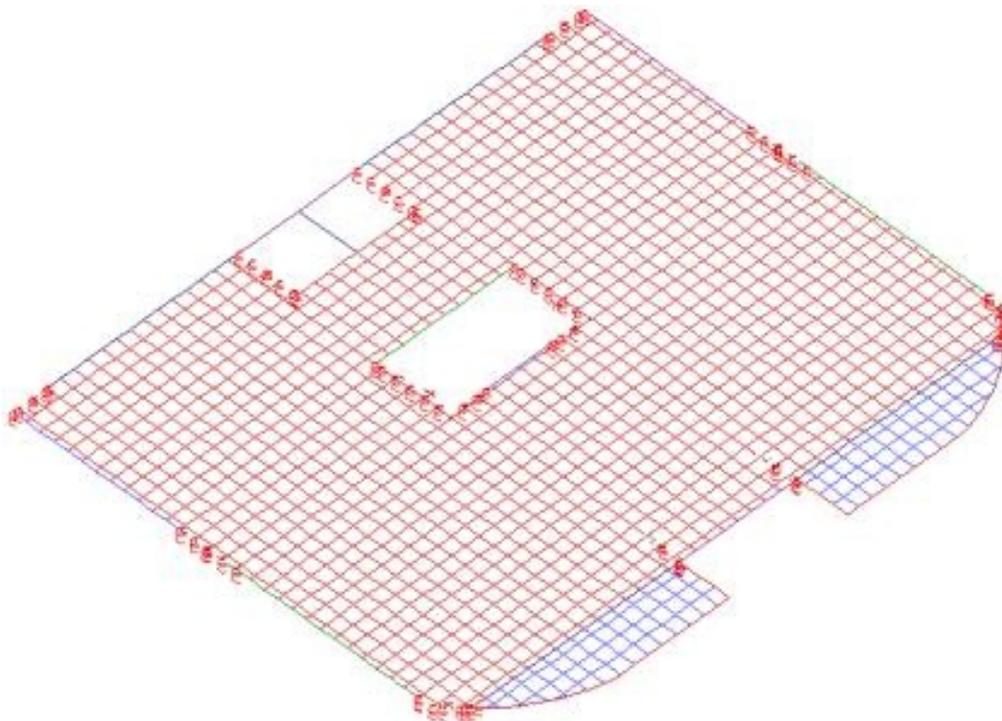
Este é o primeiro modelo indicado. É um modelo interessante para cargas verticais mas não para cargas horizontais. Os nós dos apoios das vigas possuem suas rotações compatibilizadas com as rotações dos nós dos pilares. Já é uma primeira aproximação para a determinação dos esforços nas vigas e pilares. A imprecisão deste modelo é a não consideração da laje e a incerteza nas vinculações dos extremos dos pilares e seus respectivos comprimentos. Este modelo é representado pelo esquema abaixo:



- Grelha

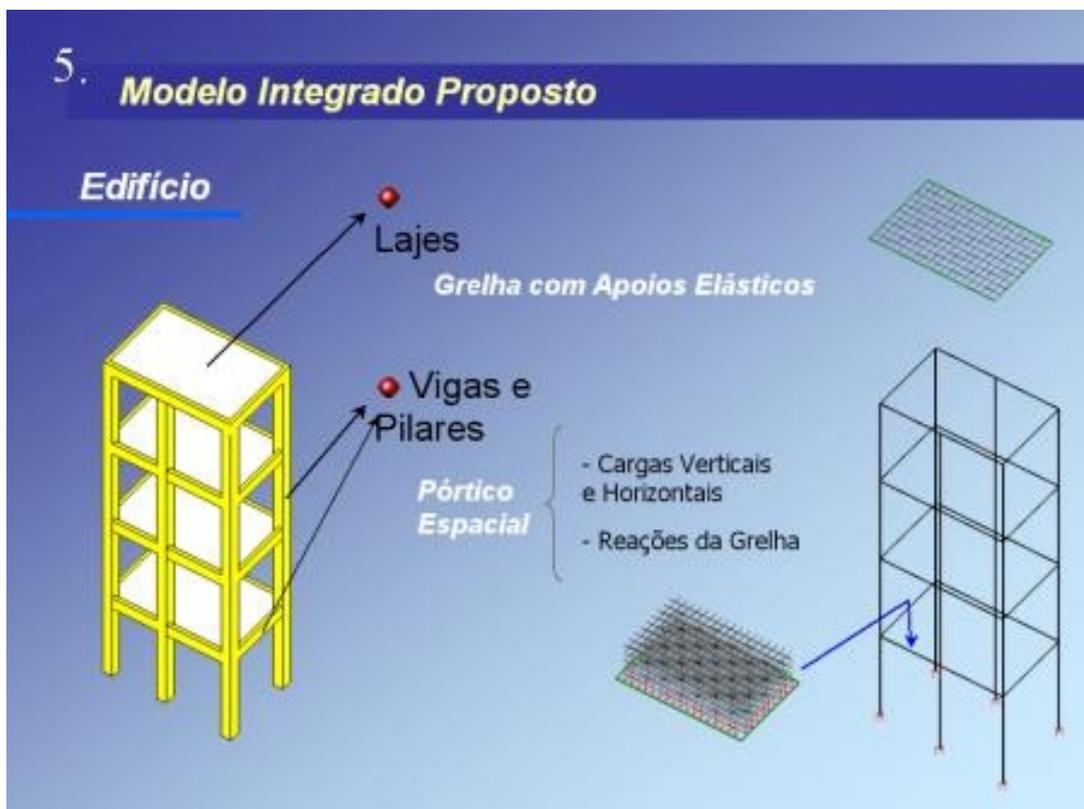
É um modelo mais preciso para a determinação das solicitações. Neste caso é feita a consideração da compatibilização entre deslocamentos verticais para vigas e lajes. Os pilares são considerados como sendo apoios elásticos e a ligação viga-pilar já é uma ligação mais realista onde se considera a efetiva porção do pilar que vai colaborar com a rotação da viga. Não é válido para cargas horizontais. A imprecisão do modelo é a determinação do

comprimento dos pilares verticais e suas respectivas vinculações.



- Pórtico Espacial

Este é o modelo mais indicado. Mas o pórtico espacial não pode ser apenas uma solução teórica baseada na teoria da elasticidade. O pórtico espacial tem que ter algumas características que contemplem o comportamento do concreto armado que é um material heterogêneo, fissurado, de comportamento não linear e construído em etapas. Os esforços das vigas oriundas do pórtico podem ter origem tanto para cargas verticais como para cargas horizontais. Este é o modelo mais recomendado, mas a correta ligação entre vigas e pilares deve estar corretamente equacionada (ligações realistas ou flexibilizadas). Vigas de transição tem que ter um tratamento especial para considerar a carga mais exata dos pilares de transição. Temos o seguinte esquema abaixo:



## 2.2) Ligação Viga - Pilar

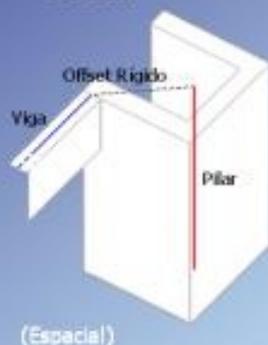
A flexibilização dos nós é representada esquematicamente por:

## Modelo Integrado Proposto – Pórtico Espacial

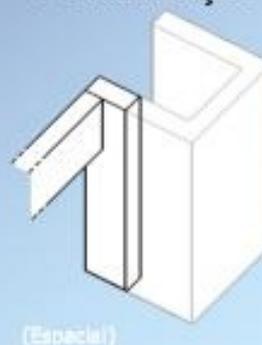
### Ligação Viga-Pilar

Busca de um comportamento mais real

• Ligação Usual



• Com Flexibilização

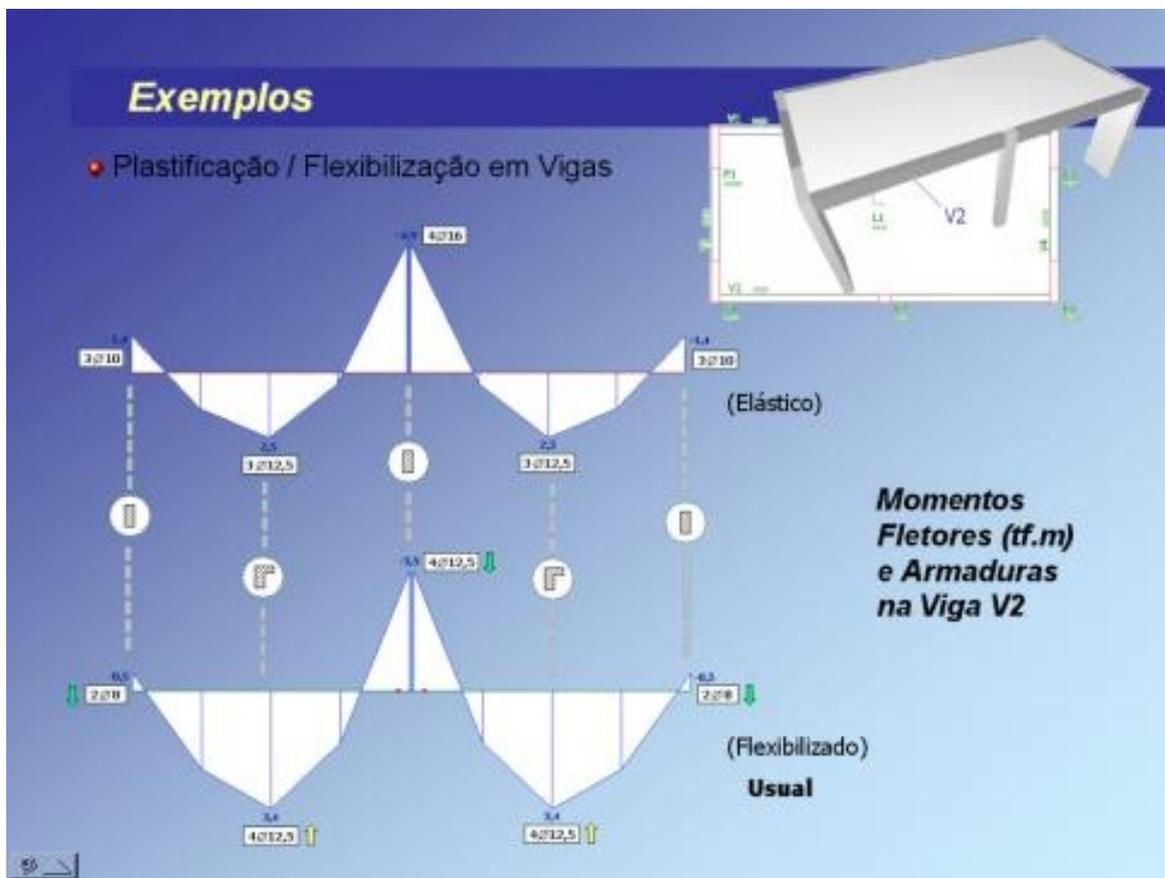


Esta flexibilização é tratada tanto na resolução de esforços pelo grelha como pelo pórtico espacial. Na viga contínua simples vinculada aos pilares superiores e inferiores, ela não é tratada automaticamente. A utilização do pórtico é mais interessante para obtenção de esforços pois, tanto para cargas verticais como horizontais, esta flexibilização é considerada. No grelha, apenas as cargas verticais são consideradas. Podemos afirmar que, com toda segurança, não é viável utilizar os esforços de pórtico espacial calculado no regime elástico, sem a flexibilização, para dimensionamento das vigas contínuas.

É importante ressaltar também, que esta flexibilização entre a viga e pilar não é uma redistribuição de momentos fletores, é apenas o cálculo de solicitações de maneira mais realista, correta e conforme a boa técnica de análise.

### 2.3) Redistribuição de Momentos Negativos

É uma característica largamente utilizada nas estruturas de concreto armado. Segundo inúmeros clientes, esta redistribuição de momentos também deixa a estrutura muito mais econômica e com melhores condições de exeqüibilidade (menos ferros negativos nos apoios deixam a estrutura de execução mais fácil nas ligações com os pilares).



Esta redistribuição, que nada mais é do que a redução dos momentos negativos das vigas junto aos apoios, e a devida compatibilização dos momentos positivos e momentos dos pilares, agora tem um tratamento especial na nova NB1/03:

- Existem limites para esta redistribuição
- A redistribuição nas vigas tem que, obrigatoriamente, se refletir nos pilares.

A nova NB1/03 obriga que sejam verificadas as condições de ductilidade da viga em função do valor da redistribuição de momentos. Este é um dos pontos polêmicos da NB1/03. Inúmeras empresas de projeto, tradicionais, praticam esta redistribuição livremente sem nenhuma consequência aparente.

## 2.4) Momento de Torção

Esta é uma outra grande novidade da NB1/03. Agora a redução da inércia a torção das vigas é limitada a 15% do valor do momento de inércia elástico. Sempre recomendamos desprezar a inércia a torção das vigas onde o momento de torção não fosse fundamental para equilíbrio do elemento. Agora, segundo a NB1/03, qualquer viga de uma grelha vai apresentar momento de torção. Mais à frente, no item dimensionamento, apresentaremos como desprezar momentos de torção muito baixos. Reproduzimos abaixo o texto da NB1/03:

De maneira aproximada, nas grelhas e nos pórticos espaciais, pode-se reduzir a rigidez à torção das vigas por fissuração utilizando-se 15% da rigidez elástica, exceto para os elementos estruturais com protensão limitada ou completa”.

## 2.5) Análise Plástica

Não está prevista nesta versão a introdução de análise plástica. Chegamos até a estudar o assunto, mas devido à complexidade encontrada, julgamos que teríamos um obstáculo enorme para explicar aos nossos clientes o correto funcionamento desta opção.

## 3.) Cargas e Solicitações

Resumindo, o TQS-Vigas trata solicitações provenientes de:

Cargas verticais (permanentes, variáveis etc.)

Cargas horizontais (vento, empuxo, temperatura etc.)

Para cargas variáveis significativas, lembrar que o TQS-Vigas tem um procedimento para cálculo de solicitações máximas e mínimas em função de alternância de cargas, realizado automaticamente.

As solicitações obtidas são:

Momentos fletores

Força cortante

Momento de torção

Como estamos calculando esforços através de um pórtico espacial ( agora inclusive com temperatura, retração e empuxos) podem surgir forças normais nas vigas. No momento, ainda não estamos dimensionando as vigas a flexão composta, o que será realizado em breve. Quando esta força normal for significativa aviso indicativo é emitido.

Os carregamentos do ELU são empregados para o cálculo das armaduras e verificação do esgotamento da capacidade resistente das seções.

Os carregamentos do ELS são empregados para o cálculo de deformações, flechas e fissuração. Estas grandezas são calculadas através de programa específico de grelha considerando a não linearidade física, programa desenvolvido para atendimento a este item da NB1/02, assunto explicado detalhadamente em capítulo à parte.

É sempre bom lembrar que o TQS-Vigas está preparado para dimensionar e detalhar vigas que resistem a cargas verticais e horizontais do modelo de um pórtico espacial. Nas vigas que, efetivamente resistem a cargas horizontais, aquele diagrama de momentos fletores tradicional, quase que acadêmico, é substituído por diagramas de forma “gravatinha” como abaixo:

Diagrama convencional:

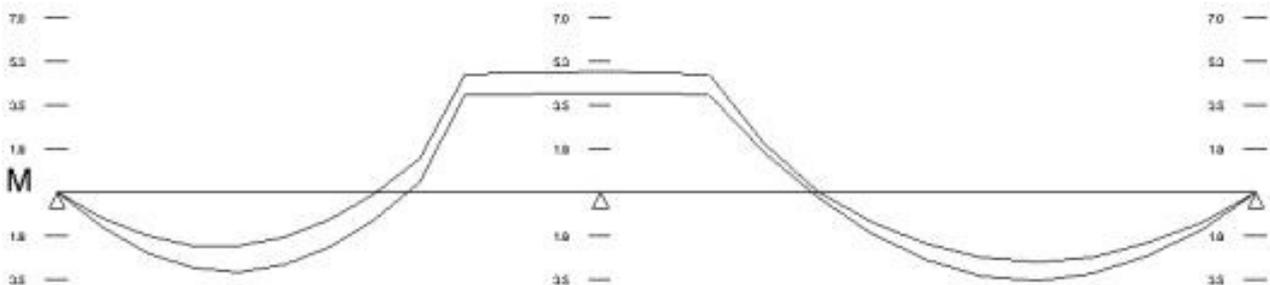
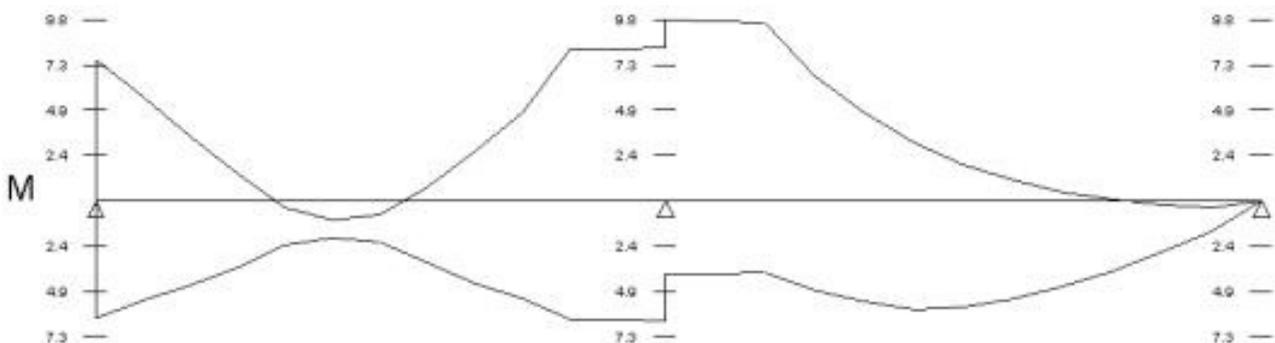


Diagrama real da viga que resiste a cargas horizontais no pórtico:



## 4.) Vão e Largura da Mesa Colaborante

Destacamos este item à parte, pois julgamos que a mesa colaborante ( seção L, T, etc.) assumiu, nesta nova NB1/03, um aspecto relevante.

O item 14.6.2.2 da NB1/03 diz:

Quando a estrutura for modelada sem a consideração automática da ação conjunta de lajes e vigas, esse efeito pode ser considerado mediante a adoção de uma largura colaborante da laje associada à viga, compondo uma seção

transversal T.

A consideração da seção T pode ser feita para estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos na estrutura, de uma forma mais realista.....

No caso de vigas contínuas, permite-se calculá-las com uma largura colaborante única para todas as seções, inclusive nos apoios sob momentos fletores negativos, desde que essa largura seja calculada a partir do trecho de momentos fletores positivos onde a largura resulte mínima.”

Esta seção T é a seção que será efetivamente utilizada para dimensionamento, armaduras mínimas, cálculo de deslocamentos etc. Dada à importância destas informações, estaremos apresentando, brevemente, estes valores de forma gráfica na própria entrada de dados, através do modelador estrutural.

Também o vão das vigas foi alterado nesta edição da NB1/03. Agora o vão é calculado pelo item 14.6.2.4 e tem a expressão:

$$l = l_0 + a_1 + a_2 \quad \text{com}$$

$a_1$  igual ao menor valor entre  $(t_1/2$  e  $0.3 h$ )

$a_2$  igual ao menor valor entre  $(t_2/2$  e  $0.3 h$ )

## 5.) Redistribuição de Momentos Fletores (-)

Conforme já comentado, a redistribuição de momentos negativos agora não pode ser feita livremente, conforme a sensibilidade do engenheiro estrutural. Para dar condições a uma certa redistribuição de momentos negativos é preciso assegurar a capacidade de rotação da viga naquela seção onde foi feita a redistribuição (dutilidade). Para isto, são impostas condições de dutilidade à viga cuja consequência imediata é a limitação da profundidade da linha neutra ( $x$ ) na seção de altura ( $d$ ).

Os limites absolutos para estes valores de  $x/d$  são os seguintes:

$$\begin{aligned} x/d &\leq 0.50 \quad \text{para } f_{ck} \leq 35 \text{ MPa} \\ x/d &\leq 0.40 \quad \text{para } f_{ck} > 35 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Se ao momento fletor negativo  $M$  é aplicada uma redução para  $dM$ , a seguinte relação entre  $d$  e  $x/d$  é estabelecida:

$$\begin{aligned} \delta &\geq 0.44 + 1.25 x/d \quad \text{para } f_{ck} \leq 35 \text{ MPa} \\ \delta &\geq 0.56 + 1.25 x/d \quad \text{para } f_{ck} > 35 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Além disto, a NB1/03 estabelece valores mínimos para o coeficiente de redistribuição de momentos negativos,  $d$ , que são os seguintes:

$$\begin{aligned} \delta &\geq 0.90 \quad \text{para estruturas de nós móveis} \\ \delta &\geq 0.75 \quad \text{para estruturas de nós fixos} \end{aligned}$$

Caso não se consiga estabelecer uma relação adequada conforme as equações acima, deve-se recorrer a análise plástica.

O TQS-Vigas calcula, em função do  $f_{ck}$ , para cada seção com redistribuição de momentos, a partir do coeficiente de redistribuição  $d$ , o valor do  $x/d$  que será o efetivamente utilizado no dimensionamento da seção. Isto provocará, em alguns casos, uma redução da posição da linha neutra na seção e um acréscimo nas armaduras de compressão da

viga.

O coeficiente de redistribuição de momentos negativos pode ser definido tanto no modelador estrutural como no grelha e/ou nos critérios de vigas contínuas. Às vezes o usuário pode se enganar e definir este coeficiente de forma redundante em dois locais, tanto no modelador estrutural como nos critérios do arquivo de projeto de vigas. Se isto ocorrer, o TQS-Vigas detectará o problema e a seguinte mensagem de aviso é emitida:

**AVISO/ERRO: Plastificação Simultânea de Apoios.**

**SISTEMA: CAD/Vigas**

**CLASSIFICAÇÃO: 1 - Médio, Verifique**

**ELEMENTO: Viga 4**

**TRECHO: Vão 2**

No processamento de pórtico espacial momentos fletores (-) junto aos apoios foram reduzidos. No cálculo da viga também foi definido uma plastificação, o que é incoerente.

**Apoio = 2**

**Plastificação do pórtico: esq.=,70 - dir.=,70**

**Plastificação da viga = ,60**

**Soluções: Confirme a plastificação do pórtico e elimine a da viga ou confirme a plastificação da viga e elimine a do pórtico. Com os dois definidos o Cad/Vigas assumirá a plastificação do pórtico e desprezará a da viga.**

Um caso comum que deve ocorrer, pois isto é atualmente empregado freqüentemente, é a definição de coeficientes de plastificação maiores que os limites agora estabelecidos. Por exemplo, um  $d = 0.60$ . Também neste caso, o programa não será interrompido mas mensagem é emitida conforme o exemplo abaixo.

**AVISO/ERRO: Limite de Plastificação Ultrapassado - Pórtico**

**SISTEMA: CAD/Vigas**

**CLASSIFICAÇÃO: 1 - Médio, Verifique**

**ELEMENTO: Viga 3**

**TRECHO: Vão 2**

No modelo de pórtico espacial os momentos fletores (-) junto aos apoios foram reduzidos além do limite recomendado.

**Apoio = 2**

**Plastificação do pórtico: esq.=,60 - dir.=,60**

**Plastificação limite = ,75**

**Soluções: Reduza a plastificação do pórtico para o limite aceitável. Caso a plastificação seja mantida, o Cad/Vigas calculará a viga com este momento reduzido mas limitará a Linha Neutra para aumentar a ductilidade da seção. Isto pode provocar muita armadura dupla.**

**AVISO/ERRO: Limite de Plastificação Ultrapassado - Viga Contínua**  
**SISTEMA: CAD/Vigas**  
**CLASSIFICAÇÃO: 1 - Médio, Verifique**  
**ELEMENTO: Viga 3**  
**TRECHO: Vão 2**

No modelo de Vigas Contínuas os momentos fletores (-) junto aos apoios foram reduzidos além do limite recomendado.

Apoio = 2

Plastificação da viga: esq.=,60 - dir.=,60

Plastificação limite = ,75

Soluções: Reduza a plastificação da viga para o limite aceitável. Caso a plastificação seja mantida, o Cad/Vigas calculará a viga com este momento reduzido mas limitará a Linha Neutra para aumentar a ductilidade da seção. Isto pode provocar muita armadura dupla.

Agora os limites de  $x/d$  para cada seção são informações importantes e de interesse no projeto estrutural conforme a nova NB1/03. O coeficiente de redistribuição afeta o  $x/d$  da seção e este valor afeta o dimensionamento das armaduras. Para exemplificar, vamos mostrar a tabela abaixo para se ter uma idéia do comportamento entre esta redistribuição e as armaduras.

Vamos tratar este caso prático para uma seção retangular de 15 / 60 cm. - Concreto de 20 MPa.

Utilizaremos as seguintes redistribuições de momentos:

Caso	$\delta$	Plastificação(%)	$x/d$	Prof. Linha Neutra (cm)
1	0.85	15	0.33	18.1
2	0.70	39	0.21	11.5
3	0.60	40	0.13	7.1
4	0.30	70	-0.01 ??	-6.0 ??

Notem que há uma incoerência nos valores de  $x/d$  quando a redistribuição atinge valores elevados. No caso 4, o  $x/d$  torna-se negativo o que é irreal. Para sanar este problema, temos um critério no arquivo de critérios de projeto que estabelece um valor mínimo para  $x/d$  independente do valor calculado. Evidentemente que diversas mensagens de aviso são emitidas avisando o usuário para o problema.

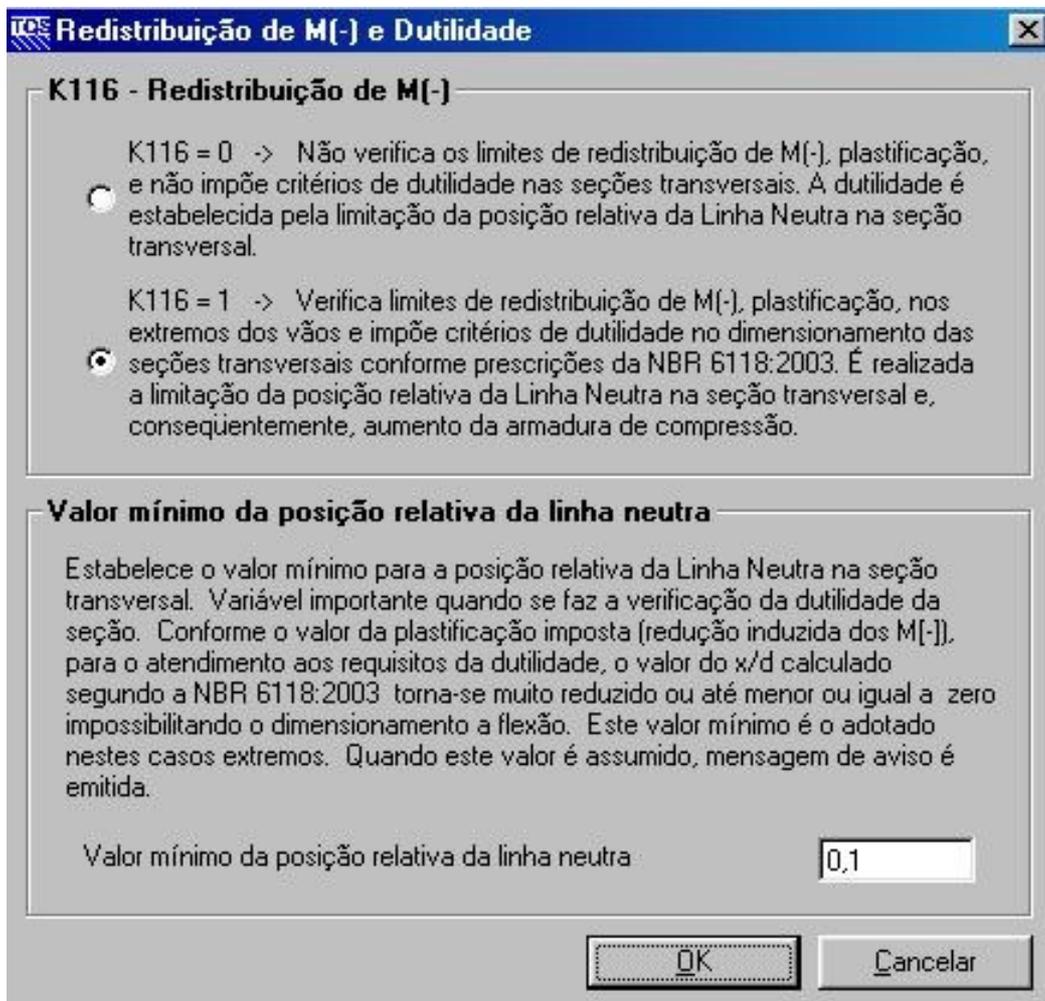
Para o exemplo acima, vamos calcular armaduras para diversos valores de momentos fletores comparando o dimensionamento que era realizado sem a limitação dos valores de  $x/d$  e com a limitação de  $x/d$ . Temos a seguinte tabela:

M [Tf.cm]	fck = 20 15 / 60 d = 55	ARMADURAS (cm <sup>2</sup> )			
	NB1/80	NB1/03			
	x/d=QQ	x/d=0,33	x/d=0,21	x/d=0,13	
<b>600</b> (Pequeno)	LN = 11,43 A <sub>S</sub> = 3,83 A' <sub>S</sub> = 0,00 Total = 3,83	LN = 11,43 A <sub>S</sub> = 3,83 A' <sub>S</sub> = 0,00 Total = 3,83	LN = 11,43 A <sub>S</sub> = 3,83 A' <sub>S</sub> = 0,00 Total = 3,83	LN = 7,15 A <sub>S</sub> = 3,69 A' <sub>S</sub> = 1,30 Total = 4,99	
<b>1300</b> (Médio)	LN = 28,70 A <sub>S</sub> = 9,61 A' <sub>S</sub> = 0,00 Total = 9,61	LN = 18,15 A <sub>S</sub> = 8,53 A' <sub>S</sub> = 2,44 Total = 10,97	LN = 11,55 A <sub>S</sub> = 8,14 A' <sub>S</sub> = 4,27 Total = 12,41	LN = 7,15 A <sub>S</sub> = 8,00 A' <sub>S</sub> = 5,60 Total = 13,60	
<b>2000</b> (Elevado)	LN = 34,40 A <sub>S</sub> = 14,74 A' <sub>S</sub> = 3,22 Total = 17,96	LN = 18,15 A <sub>S</sub> = 12,83 A' <sub>S</sub> = 6,75 Total = 19,58	LN = 11,55 A <sub>S</sub> = 12,44 A' <sub>S</sub> = 8,56 Total = 21,00	LN = 7,15 A <sub>S</sub> = 12,30 A' <sub>S</sub> = 9,90 Total = 22,20	
<b>Plastificação(%)</b>	15 – 30 e 40	15	30	40	

Estes limites de x/d máximos são agora calculados e impressos no memorial de cálculo do TQS-Vigas conforme o exemplo abaixo.

A R M A D U R A S ( F L E X A O E C I S A L H A M E N T O ) -			
FLEXAO-   E S Q U E R D A		D I R E I T A	
	M.NEGATIVO= 2855.9 TF*CM		M.NEGATIVO= 709.8 TF*CM
[CM]	AS = 20.18 -SRAD- [ 7 B 20.0MM]		AS = 4.58 -SRAS- [4 B 12.5MM]
	ASL= 21.97 -----		ASL= .00 -----/-
	x/dMax = .21		x/dMax= .45
	***ASL COMPR.***		
	% BARIC.ARMAD.= 10		% BARIC.ARMAD.= 3
[TF,CM]	BIT.FISS.= 5.7 MOM.MIN= 709.8		BIT.FISS.=1.0 MOM.MIN= 709.8

Para acionar esta redistribuição de momentos, a opção abaixo deve ser a escolhida:



Continua...

Nelson Covas - TQS