

Software PumaWin – principais alterações

O Software PumaWin está na versão 8.2, as principais mudanças que ocorreram ao longo do tempo estão relacionadas a inclusão de novos recursos ou ferramentas, correção de erros de programação e a atualização conforme as recomendações da norma de concreto armado (NBR 6118) vigente à partir de março de 2003 e obrigatória à partir de março de 2004.

As principais alterações que até hoje causam dúvidas e questionamentos são:

- a) **Cálculo de flechas;**
- b) **Limitações de negativos em vigas e lajes contínuas;**

Resumidamente, vamos apresentar o que cada item influenciou no cálculo do PumaWin.

a) Cálculo de flechas:

Este é o item que geralmente informa se a laje passou ou não, principalmente nas lajes isoladas.

Para o cálculo das flechas, é utilizada a seguinte formulação genérica:

$$flecha = \beta \frac{p.vao^4}{E.I}$$

p = carga atuante na laje (peso próprio, carga permanente, carga acidental, alvenaria, etc);

vão = vão teórico da laje, é o vão livre mais uma parcela dos apoios. Perceba que na fórmula esta variável é elevada à quarta, um vão de 5 metros dá uma resposta de 625, um vão de 6 metros dá uma resposta de 1296. Um metro que aumentamos, a flecha neste caso será 2,07 vezes maior (1296/625 = 2,07). É por isso que quanto maior o vão, muito maior é a flecha;

E = módulo de elasticidade do concreto. Esta variável é função do f_{ck} do concreto moldado no local (concreto da obra), quanto maior o f_{ck} maior será o módulo e menor será a flecha.

A norma atual de concreto armado apresenta a seguinte formulação para o cálculo do E:

8.2.8 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade deve ser obtido segundo ensaio descrito na NBR 8522, sendo considerado nesta Norma o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% f_c , ou outra tensão especificada em projeto. Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 d, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a expressão:

$$E_{ci} = 5\,600\, f_{ck}^{1/2}$$

onde:

E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal.

O módulo de elasticidade numa idade $j \geq 7$ d pode também ser avaliado através dessa expressão, substituindo-se f_{ck} por f_{ckj} .

Quando for o caso, é esse o módulo de elasticidade a ser especificado em projeto e controlado na obra.

O módulo de elasticidade secante a ser utilizado nas análises elásticas de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela expressão:

$$E_{cs} = 0,85\, E_{ci}$$

Exemplo:

Para fck igual a 20 MPa o valor de E a ser utilizado é o Ecs.

$$E_{cs} = 0,85.E_{ci} = 0,85.5600.fck^{1/2} = 0,85.5600.\sqrt{20} = 21287$$

Para fck igual a 30 MPa:

$$E_{cs} = 0,85.E_{ci} = 0,85.5600.fck^{1/2} = 0,85.5600.\sqrt{30} = 26072$$

Observe que com o aumento do fck de 20 para 30 temos um aumento da rigidez em 1,22 (26072/21287). Ou seja, a flecha para fck 30 MPa será 1,22 vezes menor que a de 20 MPa.

A norma antiga NBR 6118 de 1978 apresentava uma outra formulação para o valor do E:

8.2.5 Módulo de deformação longitudinal à compressão

Na falta de determinação experimental, o módulo de deformação longitudinal à compressão, no início da curva tensão-deformação efetiva, correspondente ao primeiro carregamento, será suposto igual a:

$$6.600 \sqrt{f_{cj}} \text{ (MPa)}$$

No projeto, tomar-se-á para o cálculo do módulo de deformação:

$$f_{cj} = f_{ck} + 3,5 \text{ MPa}$$

Quando a deformação lenta for nula ou desprezível, por serem as ações de curta duração, o módulo de deformação E_c a adotar é o módulo secante do concreto, suposto igual a 0,9 do módulo na origem dado no item 8.2.5.

Exemplo:

Para fck igual a 20 MPa:

$$E_{cs} = 0,9.E_c = 0,9.6600.\sqrt{20 + 3,5} = 28795$$

Para fck igual a 30 MPa:

$$E_{cs} = 0,9.E_c = 0,9.6600.\sqrt{30 + 3,5} = 34380$$

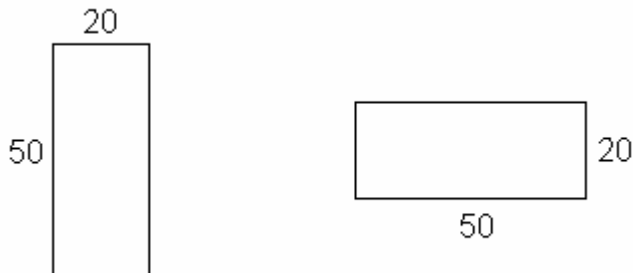
Comparando as normas, para fck igual a 20 MPa a rigidez da norma antiga é $28792/21287 = 1,35$ vezes maior do que a norma atual, com isso a flecha calculada com a norma atual será 1,35 vezes maior do que a anterior. Para fck = 30 MPa, a flecha será 1,32 vezes maior.

Continuando com a descrição das variáveis que interferem no cálculo da flecha:

I = Momento de Inércia da seção de concreto.

Esta variável é função da seção transversal do elemento. Quanto maior a altura, maior será o momento de inércia. Veja um exemplo:

Uma viga 20 cm x 50 cm posicionada com h = 50 cm é mais rígida ao carregamento vertical do que se a mesma for posicionada com h = 20 cm.



Para seções retangulares com o esta, o cálculo do **I** é dado por:

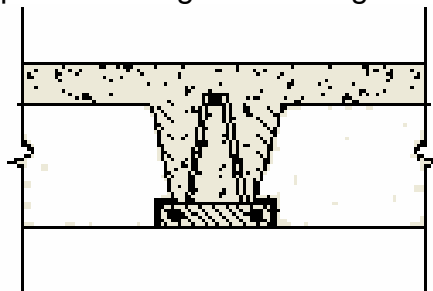
$$I = \frac{B.H^3}{12}$$

Para a primeira seção: $I = \frac{20.50^3}{12} = 208333cm^4$

Para a segunda seção: $I = \frac{50.20^3}{12} = 33333cm^4$

Ou seja, para a mesma seção, apenas mudando a posição há uma grande diferença de rigidez, a primeira viga é 6,25 vezes mais rígida que a segunda.

Para uma laje treliçada, o conceito é o mesmo, apenas há uma diferença no formato da seção, o cálculo do **I** requer um equacionamento maior, pois a seção é dividida em pequenos retângulos e triângulos.



O problema não está no cálculo do valor do **I** e sim em estimar o quanto este valor será reduzido para levar em conta a não linearidade física (fissuração do concreto) que a nova norma recomenda, veja o texto da norma abaixo:

15.3 Princípio básico de cálculo

A análise estrutural com efeitos de 2ª ordem deve assegurar que, para as combinações mais desfavoráveis das ações de cálculo, não ocorra perda de estabilidade nem esgotamento da capacidade resistente de cálculo.

A não-linearidade física, presente nas estruturas de concreto armado, deve ser obrigatoriamente considerada.

Outro texto da norma:

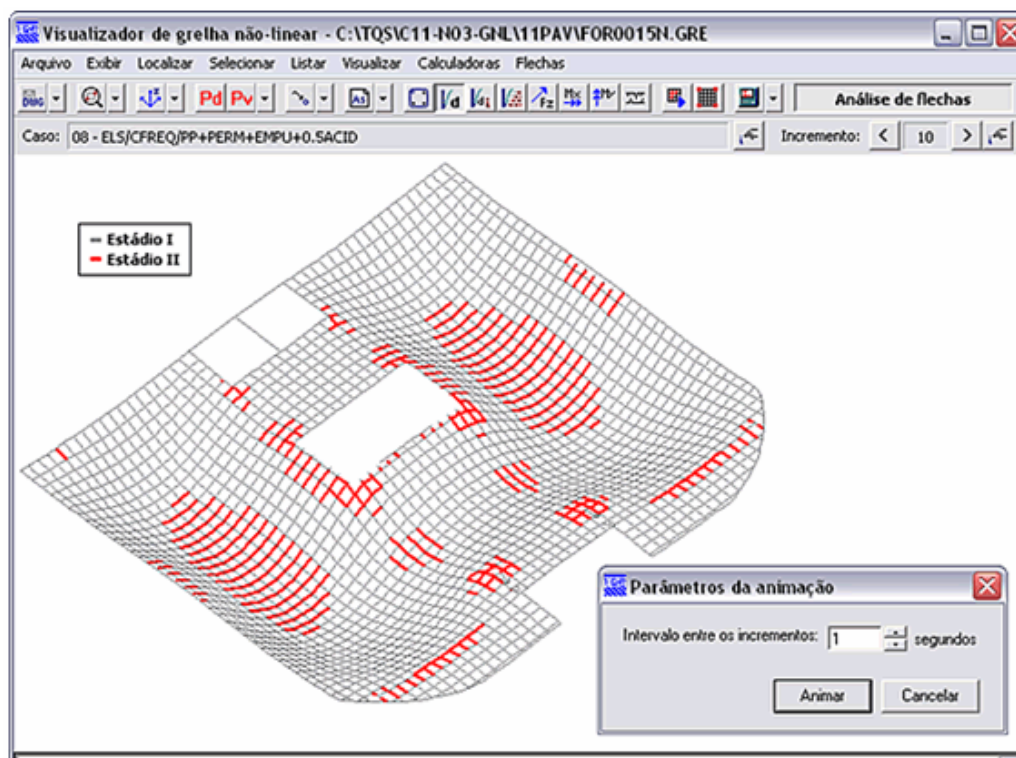
17.3.2 Estado limite de deformação

A verificação dos valores limites estabelecidos na tabela 13.2 para a deformação da estrutura, mais propriamente rotações e deslocamentos em elementos estruturais lineares, analisados isoladamente e submetidos à combinação de ações conforme seção 11, deve ser realizada através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.

A deformação real da estrutura depende também do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais (principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração) no momento de sua efetiva solicitação. Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos a seguir prescritos.

Há dois caminhos a seguir para a consideração da análise não linear:

O **primeiro** é a modelagem da laje em conjunto com as vigas e pilares em um modelo de grelha e fazer a análise não linear com carregamentos incrementais. Para esta análise, os elementos devem estar já com as armaduras dimensionadas. Para fazer esta análise é necessária a adoção de softwares comerciais (TQS, Eberick, etc). O grande problema desta análise é que muitas lajes são dimensionadas pelo fabricante sem que se tenham informações da estrutura de apoio da mesma (vigas e pilares).



Nestas análises, obtemos a redução do momento de inércia I para cada trecho da grelha, estes valores médios de redução são de 0% até 80%. A redução é função das cargas atuantes, da seção da laje e da armadura dimensionada e detalhada.

O **segundo** caminho, que é utilizado no programa PumaWin é a estimativa de uma redução da inércia. A vantagem deste processo é que não são necessárias informações das vigas e pilares, nem das armaduras. Mas o preço que se paga por utilizar processos simplificados é a utilização de

coeficientes com certa margem de segurança para atender a maioria dos casos.

Nas versões iniciais, o valor estimado da redução era de 30%, ou seja, era considerada uma inércia equivalente de **70%** da inércia bruta do concreto.

Através de análises não-lineares com o TQS verificou-se que esta redução realmente ocorria, mas em alguns casos este valor chegava até 40%. Por isso, no “default” do programa, achamos mais seguro apresentarmos o valor de 40%, mas o usuário pode trabalhar com redução menor, de até 30% caso ache melhor. No software, a tela de configuração inicial é apresentada abaixo.

Rigidez da Laje:

Momento de inércia equivalente = % do Momento de inércia da seção bruta de concreto para vãos até 5 metros.
Momento de inércia equivalente = % do Momento de inércia da seção bruta de concreto para vãos maiores de 10 metros.
Módulo de Elasticidade = $0,85 \times 5.600 \times \sqrt{f_{ckj}}$ sendo f_{ckj} a resistência do concreto à 28 dias após a concretagem da laje

Notou-se também nas análises não lineares, que quanto maior o vão, maior é a redução da inércia, por isso, de maneira simplificada foi introduzido o momento de inércia equivalente para vãos maiores do que 10 metros.

Para valores intermediários entre 5 e 10 metros, o programa faz uma interpolação linear entre os valores:

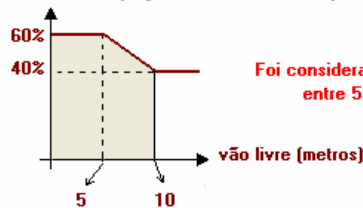
Inércia equivalente para a estimativa das flechas

Neste programa não é considerada a redução da rigidez da laje em função da fissuração do concreto, taxa e escoamento da armadura. O estado limite de vibrações excessivas, também não é verificado no programa.

Há softwares no mercado, como por exemplos (TQS, Eberick, etc) que permitem a análise não linear, levando em conta a taxa de armadura, resistência do concreto e carregamentos incrementais ou iterações e também um item muito importante: o cálculo da laje com modelo de grelha integrado à estrutura. Em função da limitação deste programa (cálculo não integrado à estrutura), é estimada uma inércia equivalente para a determinação das flechas.

O programa estima a flecha das lajes com redução de inércia de modo simplificado. Para uma maior segurança, para vãos maiores do que 5 m a inércia equivalente é decrescente em função do vão livre a ser vencido.

% de Momento de Inércia (seção bruta de concreto)



Foi considerado 60% da Inércia da seção bruta de concreto para vãos até 5 metros, entre 5 e 10 metros, há uma interpolação linear chegando a 40% da Inércia da seção bruta de concreto.

Estes valores poderão ser editados, mas por segurança do processo simplificado, serão fixados valores limites.

Não há uma relação direta entre redução de inércia e vão a ser vencido. Esta proposta de redução é apenas um critério adotado por segurança.

Se forem adotados softwares ou realizados cálculos que levem em conta a análise não-linear, é provável a obtenção de inércias equivalentes maiores na maioria dos casos. Também, em função da discretização adotada, serão obtidas inércias equivalentes diferentes em cada trecho, ou seja, trechos com momentos fletores baixos, a inércia equivalente será alta e trechos com momentos fletores maiores, inércia equivalente menor (Estádio II). Neste nosso cálculo simplificado, a inércia equivalente é única para todo o vão (discretizado em apenas um trecho).

Se o usuário, então desejar, é possível alterar os coeficientes para este limite:

Rigidez da Laje:


Momento de inércia equivalente = % do Momento de inércia da seção bruta de concreto para vãos até 5 metros.
Momento de inércia equivalente = % do Momento de inércia da seção bruta de concreto para vãos maiores de 10 metros.
Módulo de Elasticidade = $0,85 \times 5.600 \times \sqrt{f_{ckj}}$ sendo f_{ckj} a resistência do concreto à 28 dias após a concretagem da laje

Em um cálculo usual de uma laje, o momento de inércia bruta e o equivalente é apresentado na tela resultados-flechas:

Parâmetros para a estimativa dos valores das flechas:

Módulo de deformação longitudinal (MPa):
De acordo c/ a Norma: $E_{cs} = 0,85 \times 5.600 \times \sqrt{f_{ck}} = 26072 \text{ MPa}$

Momento de inércia seção bruta e equivalente:
 $I_b = 100,0\% \times I_b = 6712,10 \text{ cm}^4$
 $I_e = 70,0\% \times I_b = 4698,47 \text{ cm}^4$



No caso acima, temos o E_{cs} calculado com f_{ck} 20 e a Inércia bruta e a Inércia equivalente com 30% de redução, ou seja, considerado **70%** da inércia bruta.

Na fórmula do cálculo da flecha:

$$flecha = \beta \frac{p.vao^4}{E.I}$$

A variável β é função do tipo de apoio da laje. Para lajes isoladas o valor de β é 5/384.

Outro item que interfere no cálculo da flecha é a fluência.


A deformação lenta ou fluência em uma estrutura de concreto armado é caracterizada pelo aumento nas deformações do concreto quando a mesma é submetida às cargas permanentes. Os valores de fluência de acordo com a tabela 8.1 da norma variam de 1,4 à 4,4.

Tabela 8.1 - Valores característicos superiores da deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(t_{\infty}, t_0)$ e do coeficiente de fluência $\phi(t_{\infty}, t_0)$

Umidade ambiente %		40		55		75		90		
Espessura fictícia $2A_c/u$ cm		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\phi(t_{\infty}, t_0)$	t_0 dias	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
	30	3,0	2,9	2,6	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
	60	3,0	2,6	2,2	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4

O valor default desta variável no programa é 2,0, se o usuário desejar reduzir este valor, poderá chegar até a 1,5.

Deformações ao longo do tempo - deformação lenta (para cargas permanentes):

As flechas serão multiplicadas por para considerar de modo simplificado, as deformações da laje ao longo do tempo 

Obs: Na próxima versão vamos deixar este valor chegar até a 1,4.

Obs: Para ficar mais claro a influência destas variáveis, no **anexo 1** (em power point), um cálculo das flechas de uma laje painel maciço, neste exemplo é possível verificar a importância em dividir o carregamento em cargas permanentes e cargas acidentais.

Resumo do cálculo das flechas:

Comparando com as versões anteriores, antigas à norma, os cálculos das flechas apresentam flechas maiores, pois houve uma redução do módulo de elasticidade E e uma maior redução do momento de inércia equivalente I . A influência da **retração** também interferiu no cálculo da flecha.

É possível através da alteração de critérios gerais, reduzir um pouco a margem de segurança do cálculo das flechas, com isso as lajes que não estão passando poderão passar, mas ressaltamos mais uma vez que por tratar-se de processos simplificados, recomendamos a utilização dos valores default inicialmente apresentados após a instalação.

b) Limitações de negativos em vigas e lajes contínuas;

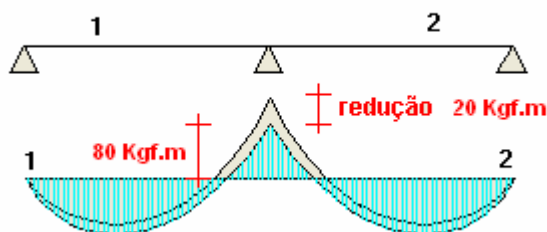
Esta nova limitação foi muito bem apresentado no e-mail do Eng. Otávio.

A laje nervurada possui maior capacidade de resistir o momento fletor positivo do que o momento fletor negativo.

Antes da entrada da nova norma, o programa fazia a verificação do máximo momento fletor negativo que a seção suportava e fazia a redução do negativo até chegar ao equilíbrio.

Exemplo:

continuidade com redução do momento fletor negativo



Se o momento negativo obtido no cálculo fosse de 100 Kgf.m e o momento máximo resistido fosse de 80 Kgf.m o programa fazia a redução de 20 Kgf e o dimensionamento era feito sem problema. Em função desta redução o momento positivo é acrescido (redistribuído).

Com a entrada da nova norma este procedimento continuou, mas com uma limitação dada no item 16.4.4.3. Esta limitação foi incorporada no programa causando resultados não esperados como por exemplo, uma laje isolada que “passava” não “passava” mais com a consideração da continuidade.

14.6.4.3 Limites para redistribuição de momentos e condições de ductilidade

A capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU. Quanto menor for x/d , tanto maior será essa capacidade.

Para melhorar a ductilidade das estruturas nas regiões de apoio das vigas ou de ligações com outros elementos estruturais, mesmo quando não forem feitas redistribuições de esforços solicitantes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

a) $x/d \leq 0,50$ para concretos com $f_{ck} \leq 35$ MPa; ou

b) $x/d \leq 0,40$ para concretos com $f_{ck} > 35$ MPa.

Esses limites podem ser alterados se forem utilizados detalhes especiais de armaduras, como por exemplo os que produzem confinamento nessas regiões.

Quando for efetuada uma redistribuição, reduzindo-se um momento fletor de M para δM , em uma determinada seção transversal, a relação entre o coeficiente de redistribuição δ e a posição da linha neutra nessa seção x/d , para o momento reduzido δM , deve ser dada por:

a) $\delta \geq 0,44 + 1,25 x/d$ para concretos com $f_{ck} \leq 35$ MPa; ou

b) $\delta \geq 0,56 + 1,25 x/d$ para concretos com $f_{ck} > 35$ MPa.

O coeficiente de redistribuição deve, ainda, obedecer aos seguintes limites:

a) $\delta \geq 0,90$ para estruturas de nós móveis;

b) $\delta \geq 0,75$ em qualquer outro caso.

Pode ser adotada redistribuição fora dos limites estabelecidos nesta Norma, desde que a estrutura seja calculada mediante o emprego de análise não-linear ou de análise plástica, com verificação explícita da capacidade de rotação de rótulas plásticas.

Esta nova verificação pode ser habilitada (conforma a norma) ou desabilitada pelo usuário em critérios gerais-redistribuição:

Coeficiente de redistribuição δ deve ser maior ou igual a 0,75.

Se este item estiver desabilitado (o que não é recomendado), a redução máxima que será permitida do momento fletor negativo será de 40%, ou seja, δ deverá ser maior ou igual a 0,6.

Coeficiente adotado neste cálculo $\delta =$

Quando for efetuada uma redistribuição, reduzindo-se um momento fletor, em uma determinada seção transversal, a relação entre o coeficiente de redistribuição δ e a posição da linha neutra nessa seção x/d para o momento reduzido M , deve ser dada por:

a) maior ou igual a $0,44 + 1,25 x/d$ para concretos com f_{ck} menor ou igual a 35 MPa;

b) maior ou igual a $0,56 + 1,25 x/d$ para concretos com f_{ck} maior do que 35 MPa.

Verificar a redistribuição

Para melhorar a ductilidade das estruturas nas regiões de apoios das vigas ou de ligações com outros elementos estruturais, mesmo que não haja redistribuição, a posição da linha neutra no Estado Limite Último deve obedecer aos seguintes limites:

a) x/d menor ou igual a 0,50 para concretos com f_{ck} menor ou igual a 35 MPa.

b) x/d menor ou igual a 0,40 para concretos com f_{ck} maior do que 35 MPa.

Verificar a relação x/d na região dos apoios

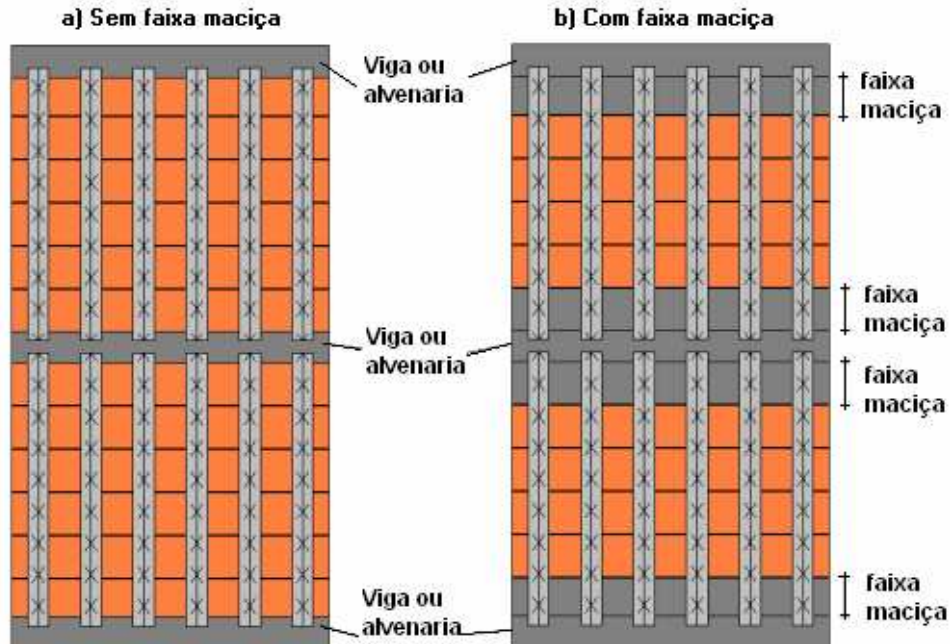
Como toda ferramenta de cálculo, é de responsabilidade do usuário em definir quais critérios serão utilizados no cálculo, estando estas variáveis contempladas na norma ou não.

Um novo artifício que foi introduzido no programa para que a laje seja calculada de acordo com as recomendações de norma e “passe” no cálculo foi a consideração de faixas maciças:

IMPORTANTE:

Quando houver momento fletor negativo em lajes nervuradas formadas por vigotas ou painéis e se as verificações referente à redistribuição e relação x/d não estiverem OK, recomenda-se em manter as verificações de normas e executar faixas maciças próximas ao apoio das lajes.

Para fazer a faixa maciça, não coloque o enchimento próximo aos apoios e utilize uma tábua como forma.



O valor mínimo da faixa maciça permitida pelo programa é de 5 cm e o máximo igual a 50 cm. Para desconsiderar a faixa maciça, indique a largura igual a 0 cm.

IMPORTANTE: O recurso de atribuição de faixa maciça, resolve a maioria dos problemas de verificação dos momentos negativos, mas porém, em função do modelo de cálculo de esforços não ser integrado à estrutura e também não ser modelos de grelha, as armaduras necessárias nesta faixa (positivas e negativas) serão apresentadas de maneira simplificada (igual as armaduras das nervuras de travamento).

Desta maneira, a consideração da faixa maciça poderá ser vista como um pré-dimensionamento, devendo ser depois verificado integrado à estrutura.

Resumindo: Para o cálculo de lajes contínuas o usuário poderá considerar ou não as verificações apresentadas no item 14.6.4.3 da norma, para a consideração basta deixar os itens chegados (default) e também poderá considerar as faixa maciças (recurso para que a laje passe sem ter que desabilitar os itens da norma).

O grande inconveniente da faixa maciça é a necessidade de colocação de formas próximas aos apoios para a confecção da faixa. Mas o resultado é uma laje contínua com elevada rigidez no apoio e menores flechas.