



Cálculo de 2ª ordem em Tricalc, exemplos não resolvidos com o método dos coeficientes de amplificação

O cálculo de segunda ordem, apresentado pelo *Tricalc* desde a versão 7.0, veio abrir um novo leque de possibilidades no cálculo de estruturas, como por exemplo a possibilidade de estudar os fenómenos de instabilidade (encurvadura por exemplo) de forma automática, o cálculo de tirantes integrados na estrutura e com qualquer disposição geométrica (sem simplificações de cálculo ou restrições à sua disposição no modelo estrutural) ou a possibilidade de utilizar apoios unidireccionais e elásticos que trabalham só à compressão.

Nas antigas versões de *Tricalc* era possível obter uma aproximação muito incerta através da utilização de coeficientes de amplificação. No entanto, dadas as grandes vantagens apresentadas pelo cálculo de 2ª ordem quando comparado com o método dos coeficientes, a Arktec sempre procurou integrar no Tricalc o cálculo de 2ª ordem tendo sido implementado a partir do momento em que a capacidade de computação e dos algoritmos de cálculo tornaram viável a sua utilização, uma vez que o método dos coeficientes será descontinuado em face do que comporta de insegurança e custos para o projecto.

Em antecipação às novidades da próxima versão *Tricalc 7.3*, podemos informar que a Arktec ampliou a capacidade de cálculo em 2ª ordem para a sua utilização em lajes de fundação, eliminando os apoios elásticos que trabalhavam à tracção quando a laje tinha tendência para levantar em parte da sua superfície, introduzindo uma coacção que não é real. Neste artigo analisaremos as vantagens oferecidas por esta nova funcionalidade do *Tricalc* e a implicação que tem nos resultados do cálculo de estruturas que possuem lajes de fundação.

Tricalc.9: Lajes de fundação e vigas flutuantes

O módulo 9 de Tricalc permite definir e calcular lajes de fundação e vigas flutuantes integradas em qualquer estrutura. O modelo de cálculo considerado para as lajes de fundação baseia-se na modelação com uma malha de barras, com uma determinada discretização. A interacção entre a laje e o terreno, considera-se um dos métodos mais comumente aceites, o da proporcionalidade entre a tensão e a deformação.

Desta forma, as lajes de fundação modelam-se como um conjunto de barras de secção constante em duas direcções ortogonais entre si, com apoios elásticos situados nos nós ou nodos de intersecção. Os apoios elásticos situam-se em todos os nós da laje, o que significa que se considera em contacto com o terreno em toda a sua superfície. De forma análoga, as vigas flutuantes modelam-se dividindo as barras em segmentos e aplicando um apoio elástico nos pontos de divisão. Em ambos os casos, as barras e apoios elásticos das lajes e vigas flutuantes conjugam-se com as barras e elementos finitos do resto da estrutura para gerarem uma única matriz de rigidez que se utiliza para o cálculo dos deslocamentos, garantindo-se assim a interacção entre todos os elementos estruturais.

Considerações sobre os apoios elásticos

Os apoios elásticos podem estar sujeitos a deslocamentos e rotações devido às reacções, que não são conhecidos até se ter realizado um primeiro cálculo. Estes dependem das constantes de rigidez utilizadas no apoio elástico: K_x , K_y , K_z , G_x , G_y , G_z , que representam a rigidez ao deslocamento e à rotação nos três eixos que representam o espaço. A título de exemplo, a constante K_y representa a força necessária para produzir um deslocamento vertical do apoio de 1 cm.

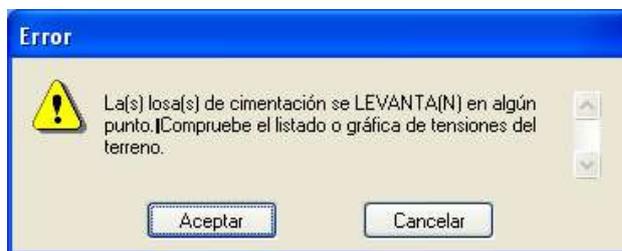
No caso das lajes de fundação, o programa calcula automaticamente os valores de cada apoio elástico da laje a partir dos seguintes dados: coeficiente de balasto e discretização da laje. Para as vigas flutuantes o cálculo é similar, considerando-se a largura da viga em vez da discretização. Para o efeito as vigas devem estar pré-dimensionadas antes de se lhes atribuir a condição de vigas flutuantes.

O cálculo realizado pressupõe que as lajes de fundação e as vigas flutuantes estão apoiadas no terreno, ao qual se transmite uma determinada pressão e devido à qual se produz um assentamento das lajes e vigas flutuantes.

Nas versões anteriores de *Tricalc*, os apoios elásticos trabalhavam tanto no sentido positivo como no sentido

negativo. Devido a esse comportamento, era aconselhável comprovar que não existiam pontos onde as lajes se separassem do terreno, ou seja, onde se deslocassem para cima, uma vez que os apoios elásticos efectuariam uma coacção (tracção) da laje que não corresponderia à realidade, onde o terreno não retém a laje nem existe nenhuma outra força que 'prenda' a laje ao terreno.

Por esse motivo, aparece uma mensagem de advertência que indica que a laje se levanta em algum ponto e requer a intervenção do utilizador.



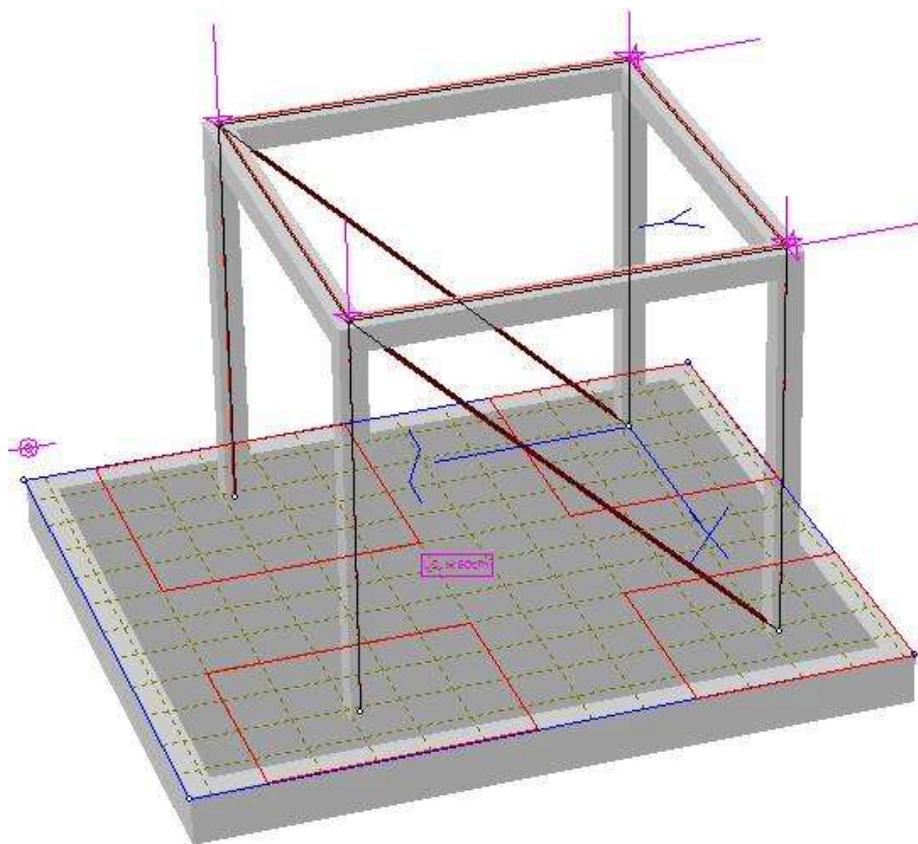
Novidade em Tricalc 7.3

A aplicação do cálculo em 2ª ordem, neste caso, permite solucionar o problema que descrevemos no apartado anterior. Na nova versão do programa, ao realizar o cálculo para cada uma das combinações de hipóteses possíveis, na análise de 1ª ordem identificam-se os apoios elásticos que estejam a trabalhar à tracção, e na análise de 2ª ordem identificam-se os apoios elásticos que estejam a trabalhar à tracção, eliminando-se da matriz de rigidez. Deste modo, nos pontos onde a laje se levante não haverá nenhum tipo de restrição a esse movimento, obtendo-se um cálculo das tensões sobre o terreno totalmente válido.

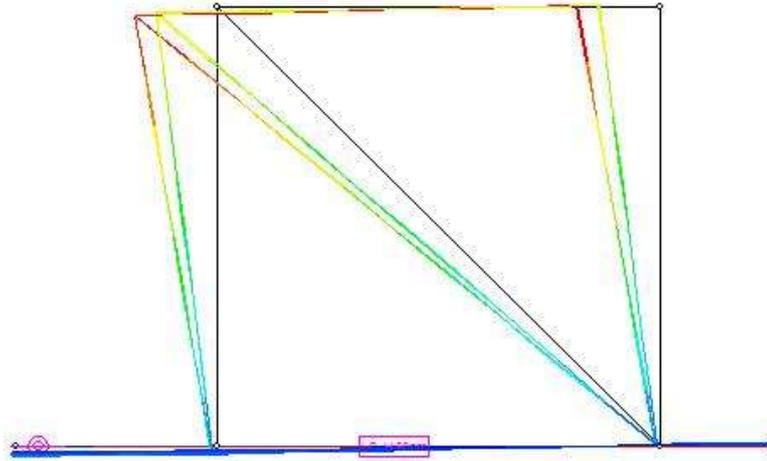
Este cálculo é equivalente ao que se realiza para o cálculo de tirantes, onde se anulam as barras com condição de tirante atribuída e que estejam a trabalhar à compressão, porém ampliando o conceito aos apoios elásticos que só trabalham à compressão.

Um exemplo

Seguidamente veremos um caso prático onde se reproduzem as circunstâncias que analizámos anteriormente. Analisaremos uma estrutura tridimensional simples assente sobre uma laje de fundação:

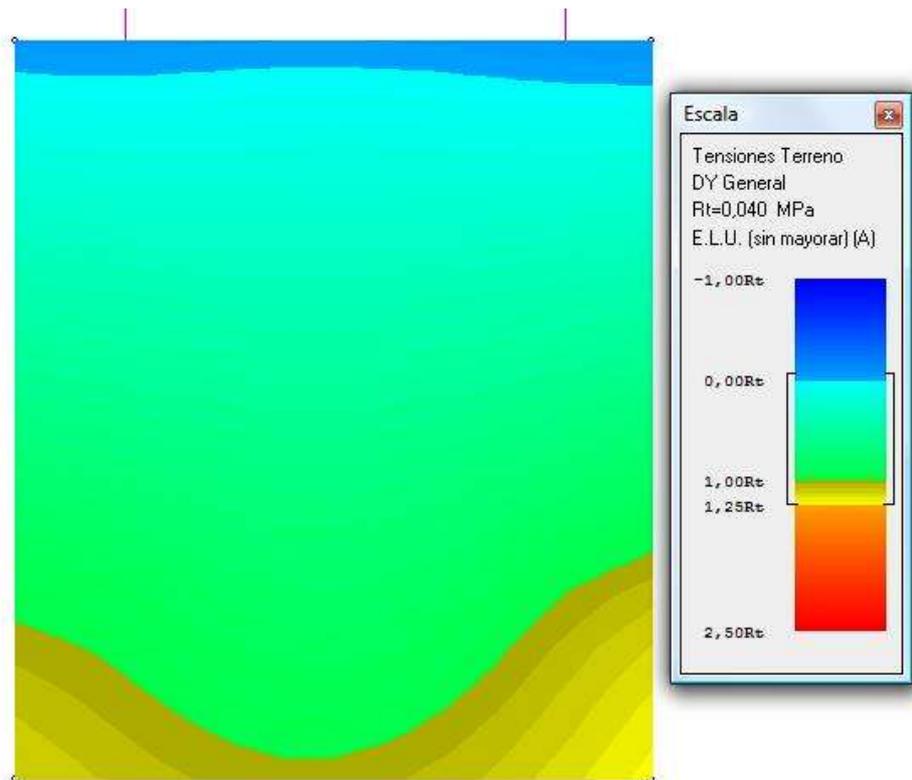


No plano superior existem acções com uma importante componente horizontal, o que poderia produzir um levantamento da laje em um dos seus lados. A imagem seguinte mostra um gráfico de deslocamentos após a realização de um cálculo de 1ª ordem elástica:

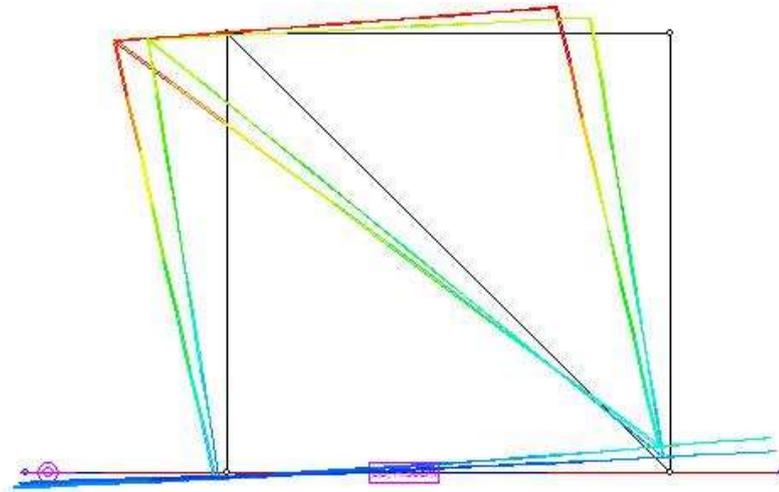


Graficamente podemos apreciar que uma extremidade da laje (lado maior) se "afunda" no terreno, enquanto que a outra extremidade (lado menor) tende a levantar-se. Neste caso, a maior parte dos apoios elásticos da laje sofrem compressões enquanto os apoios elásticos situados na extremidade que tende a levantar estão a ser traccionados, ajudando a que a laje não se levante, o que não corresponde ao funcionamento real.

Esta situação pode-se ver ilustrada no gráfico de tensões do terreno:

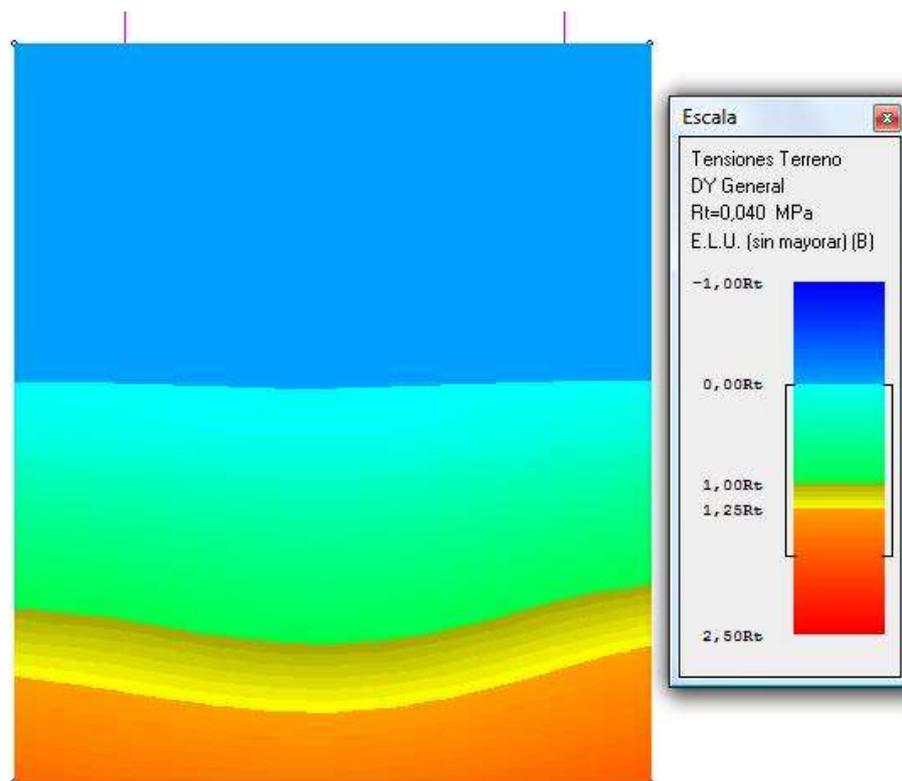


Se realizarmos um cálculo de 2ª ordem na versão 7.3, obteremos o seguinte gráfico de deslocamentos:



Neste caso o lado menor da laje levanta-se consideravelmente. Este efeito deve-se à retirada dos apoios elásticos que trabalhavam à tracção, sendo os nós da laje livres para se movimentarem pois não se consideram trabalhando à tracção.

Neste novo cálculo (em 2ª ordem em lajes de fundação), o estado das tensões do terreno é totalmente distinto do cálculo em 1ª ordem:



A zona representada a cor azul é a zona do terreno onde não existem compressões, uma vez que a laje levanta-se nessa zona.

Podemos ver a diferença entre o cálculo em 1ª ordem e 2ª ordem com a listagem de deslocamentos de um dos pontos situados no lado menor:

Desplazamientos

Desplazamientos. Ejes generales, Hormigón, E.L.U., mayoradas

nn	H	Id	Dx (cm)	Dy	Dz	Gx (rad)	Gy	Gz
216	M+	A	+0,005	+0,067	+0,087	+0,0004	+0,0000	+0,0000
216	M-	A	+0,000	+0,000	+0,000	+0,0000	-0,0000	+0,0000
216	M+	B	+0,031	+0,639	+0,192	+0,0016	+0,0000	+0,0000
216	M-	B	+0,000	+0,000	+0,000	+0,0000	-0,0001	+0,0000
216	M+	C	+0,000	+0,000	+0,000	+0,0000	+0,0000	+0,0000
216	M-	C	+0,000	+0,000	+0,000	+0,0000	+0,0000	+0,0000
216	M+	D	+0,031	+0,639	+0,192	+0,0016	+0,0000	+0,0000
216	M-	D	+0,000	+0,000	+0,000	+0,0000	-0,0001	+0,0000

Predimensionado Desplazamientos Solicitaciones Reacciones Errores

O deslocamento vertical positivo (para cima) na listagem "A" (1ª ordem) é muito menor que o valor obtido em "B" (2ª ordem).

Em vista destes resultados, pode-se deduzir que um cálculo através do método simplificado dos coeficientes de amplificação nunca pode chegar a cobrir este tipo de casos, pelo que se requer a utilização de um cálculo em 2ª ordem com as características que incorpora o Tricalc desde a sua versão 7.0.