

Manual de Ajuda
Programa AEMC
versão 2.4.2

APRESENTAÇÃO

Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas que calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário.

Histórico de versões

2.4 Versão inicial publicada em 02 de março de 2018

2.4.1 Atualização publicada em abril de 2019

2.4.2 Atualização publicada em junho de 2020

[Lista de modificações](#)

desenvolvido por:

Filipe Augusto Cinque de Proença Franco, D.C.

Agradecimentos:

A todos que mandaram críticas e sugestões no aprimoramento do AEMC, em especial, aos amigos:

Professora Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

Marcos Fritzen, D.Sc.

Carlos Filipe Correia e Silva, M.Sc.

Atualizações do programa

Versão 2.4.2

Alterações em relação a versão anterior 2.4.1

1. Incluída a opção de análise do estado de tensões, deformações e deslocamentos considerando todas as rodas do eixo.
2. Para atender a análise do eixo completa a informação da bitola do eixo é necessária. Foi incluído um campo para a inserção do dado nas propriedades do carregamento (Lx).
3. Atualizada as funções para Abrir e Salvar o Arquivo, compatíveis com as versões anteriores e incluindo o valor da bitola do eixo e a informação do tipo de análise.
4. Atualizado o arquivo da Ajuda.
5. Corrigido o valor do módulo de resiliência elástico não linear que, quando exportado para o Excel, ficava com valor negativo.

PROGRAMA

O AEMC é um programa de computador de análise de camadas elásticas desenvolvido para uso como um componente nos programas MeDiNa e BackMeDiNa (originalmente para o SisPav). A estrutura geral de cálculo utiliza a integração de Gauss-Laguerre nos cálculos das equações integrais.

As hipóteses fundamentais da solução computacional baseiam-se nas mesmas consideradas na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, quais sejam:

1. os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
2. a lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
3. as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
4. todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
5. a superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
6. na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
7. a carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
8. a grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
9. as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Os métodos que utilizam esta solução possuem a vantagem de combinar carregamentos com mais de uma roda, por meio do princípio da superposição e da hipótese de elasticidade linear. É possível também obter os resultados de tensão, deformação e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura sem a necessidade de dividir o meio contínuo em Elementos Finitos.

O conjunto básico de respostas estruturais que é calculada, a partir das equações elásticas, englobam: tensões verticais; tensões radiais; tensões tangenciais; tensões de cisalhamento no plano vertical-radial; e deflexões verticais e radiais.

INTERFACE

A interface com o usuário do AEMC busca reunir em uma tela apenas todas as informações divididas em três Quadros referentes à estrutura do pavimento, ao tipo de carregamento atuante e às respostas em termos de tensões, deformações e deslocamentos. Quando o programa inicia o **Quadro ESTRUTURA** apresenta um perfil de pavimento com quatro camadas onde os dados servem apenas de exemplo de preenchimento. O **Quadro CARREGAMENTO**, inicia com o Eixo Padrão Rodoviário e o **Quadro RESULTADOS** totalmente em branco. Existe uma **Barra de MENU** principal com a opção PROJETO com as funções básicas de Novo, Abrir, Salvar, Salvar Como e Sair do programa e a opção AJUDA, que abre a janela com este Manual do Programa. Cada uma das opções e dos Quadros serão detalhados individualmente, bastando clicar no item desejado.

The screenshot displays the AEMC v.2.3.0.0 software interface. The top bar shows the project name 'Projeto Ajuda' and a menu 'Estrutura >>'. Below this is a table with the following data:

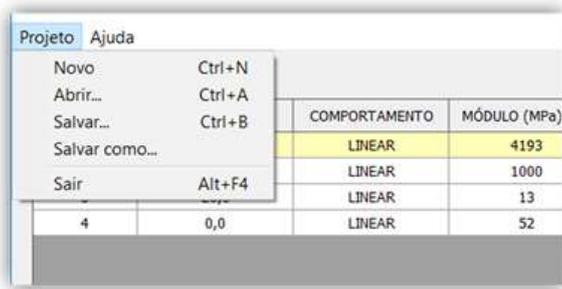
CAMADA	ESPESSURA (cm)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa) / k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	7,5	LINEAR	4193	0,0	0,0	0,0	0,33	0,0
2	18,0	LINEAR	1000	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	20,0	LINEAR	13	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	LINEAR	52	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

The bottom section is divided into two panels. The left panel, titled 'Tipo de carregamento:', shows various loading options with radio buttons. The 'Eixo padrão rodoviário' option is selected. The right panel, titled 'Pontos de análise e resultados', contains a 'Calcular' button and a 'Ferramentas >>' button. Below these is a table for analysis points:

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (µm)	Uy (µm)	Uz
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

The bottom status bar shows 'Estrutura Inicial'.

Menu PROJETO



As opções do menu PROJETO na janela principal do programa permitem o usuário manipular os arquivos de dados da seguinte forma:

<Novo>

Cria um projeto novo

<Abrir...>

Abre um arquivo existente com a extensão <nome_do_arquivo.pAE>.

<Salvar...>

Salva as informações inseridas e geradas automaticamente pelo programa (estrutura, carregamento e resultados) em um arquivo de formato padrão e com a extensão <nome_do_arquivo.pAE>.

<Salvar como...>

Permite salvar as informações com outro nome.

<Sair>

Para encerrar o programa.

UNIDADES

Para o perfeito funcionamento do programa, o projetista deverá atentar para o uso correto das unidades das grandezas físicas utilizadas no programa:

Grandeza	Unidade
Espessura e distâncias	cm
Raio do carregamento	cm
Deslocamentos	μm
Deformações específicas	m/m
Área de contato	cm^2
Pressão de inflação e tensões	MPa
Carga de eixo ou de roda	ton

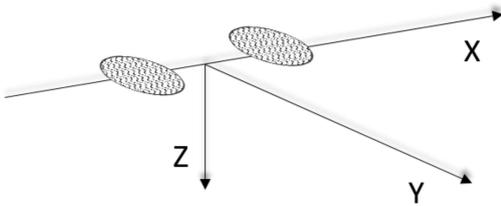
SÍMBOLOS

Os seguintes símbolos são utilizadas no programa:

Símbolo	Significado
X, Y	Distâncias no plano horizontal
Z	Profundidade
U _x , U _y , U _z	Deslocamentos nos eixos x, y e z respectivamente
S _x , S _y , S _z	Tensões no plano X, Y e Z respectivamente
S _{xy} , S _{xz} , S _{yz}	Tensões de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente
s ₁ , s ₂ , s ₃	Tensões principais
sOctNor, sOctCis	Tensões octaédricas normal e de cisalhamento
E _x , E _y , E _z	Deformações específicas no plano X, Y e Z respectivamente
E _{xy} , E _{xz} , E _{yz}	Deformações específicas de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente
e ₁ , e ₂ , e ₃	Deformações específicas principais
T _y , T _x , L _x	Distância entre eixos e entre rodas e a bitola do eixo respectivamente

CONVENÇÕES

O sistema de coordenadas X, Y e Z assumido no programa é o indicado na figura abaixo:



Os valores positivos de tensão e deformação indicam que o ponto está em compressão, enquanto os valores negativos, tração.

As coordenadas dos pontos em que são realizadas as análises devem estar ajustadas para os diversos tipos de eixos. Isso deve ser realizado para permitir a avaliação dos efeitos sobre os diversos pontos no interior da estrutura de forma coerente. Os sistemas de coordenadas, representados na Figura abaixo, coincidem o eixo principal do dimensionamento com o eixo de simetria das áreas carregadas.

Eixo Simples		Eixo de rodas duplas	
2 Eixos Simples (tandem)		2 Eixos de rodas duplas (tandem)	
3 Eixos Simples (tandem)		3 Eixos de rodas duplas (triplo tandem)	
Eixo Especial (ônibus)			

ESTRUTURA

O Quadro ESTRUTURA é formado por dois elementos. Um botão de Comando *Estrutura >>* e uma *Tabela* representando o perfil do pavimento. Cada linha da *Tabela* equivale a uma camada da estrutura do pavimento. A última linha, representa o subleito que, por convenção, possui a espessura igual 0 cm.

A Estrutura inicial apresentada no programa AEMC possui quatro camadas, incluído o subleito. Esta estrutura pode ser totalmente alterada, sendo que são permitidos, no mínimo duas e, no máximo, oito camadas.

Na tabela que exhibe a Estrutura do pavimento são apresentadas as informações das propriedades de cada uma das camadas da estrutura do pavimento, como: espessura, comportamento elástico (se linear ou não linear), módulo, massa específica, parâmetros do Módulo (k1, K2, K3 e K4), coeficiente de Poisson e a condição de aderência.

Estrutura >>										
CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm ³)	COMPORTAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	7,5	2,4	LINEAR	4500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	18,0	1,8	LINEAR	800	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
3	20,0	1,6	LINEAR	300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,35	0,0
4	0,0	1,6	LINEAR	80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,40	0,0

CAMADAS

O botão de Comando *Estrutura >>* permite adicionar ou remover camadas no perfil do pavimento. São permitidas até oito camadas, sendo o mínimo de duas. Por questões de padronização, a primeira camada e o subleito não podem ser excluídas.

Inserindo camadas

Para inserir uma camada nova na estrutura do pavimento, o projetista deve selecionar a linha imediatamente acima da posição da futura camada. Clicar no botão de Comando *Estrutura >>>* e selecionar a opção *Inserir camada abaixo*. O programa automaticamente irá abrir uma nova linha abaixo da camada selecionada e irá preencher com os dados da camada selecionada. Por padronização, o usuário não pode inserir uma camada abaixo do subleito.



The screenshot shows a software interface with a menu titled "Estrutura >>". A sub-menu is open, showing two options: "Inserir camada abaixo" (highlighted in blue) and "Excluir a camada selecionada". Below the menu is a table with five rows representing pavement layers. The second row is highlighted in yellow.

CAMADA	ESPESSURA		k1	k2
1	7,5	LINEAR	4193	0,1
2	18,0	LINEAR	1000	0,1
3	11,0	LINEAR	111	0,1
4	20,0	LINEAR	13	0,1
5	0,0	LINEAR	52	0,1

Excluindo camadas

Para excluir uma camada na estrutura do pavimento, o projetista deve selecionar a linha referente a camada que deseja excluir e clicar no botão de Comando *Estrutura >>* e selecionar a opção *Excluir a camada selecionada*. Também por padronização, a primeira camada e o subleito não poderão ser excluídos.



The screenshot shows the same software interface as above, but the sub-menu option "Excluir a camada selecionada" is now highlighted in blue. The table below remains the same, with the second row highlighted in yellow.

CAMADA	ESPESSURA		k1	k2
1	7,5	LINEAR	4193	0,1
2	18,0	LINEAR	1000	0,1
3	11,0	LINEAR	111	0,1
4	20,0	LINEAR	13	0,1
5	0,0	LINEAR	52	0,1

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Modelos constituintes do comportamento resiliente

Os materiais das camadas podem ser considerados como elásticos lineares ou não lineares e os modelos constituintes do comportamento resiliente são representados a partir da definição das constantes do modelo geral apresentado na expressão abaixo:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \cdot \theta^{k_4}$$

No modelo apresentado na expressão acima, k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são constantes obtidas em laboratório; θ é a tensão octaédrica (igual à soma das tensões principais $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$), σ_d é a tensão desvio, σ_3 é a tensão de confinamento e MR é o módulo de resiliência em MPa.

Comportamento	Parâmetros
Dependente da tensão confinante	$k_3 = 0$ $k_4 = 0$
Dependente da tensão desvio	$k_2 = 0$ $k_4 = 0$
Dependente do Invariante de tensões	$k_2 = 0$ $k_3 = 0$
Modelo composto	$k_4 = 0$

Observação: se o projetista optar pelo modelo elástico linear, o programa levará em conta apenas o valor definido na coluna Módulo, independente dos coeficientes de módulo (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) que foram inseridos.

CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA

O programa de cálculo de tensões, deformações e deslocamentos, AEMC, faz uma modelagem física similar a teoria de molas a fim de permitir o movimento horizontal relativo na interface entre duas camadas. A mola atua na direção radial resistindo ao deslocamento relativo ao longo da interface entre duas camadas, conforme a seguinte lei:

$$\tau_i = k_i \cdot (u_i - u_{i+1})$$

Onde:

T_i é a tensão de cisalhamento radial entre as camadas i e $i+1$;

$U_i - U_{i+1}$ é o deslocamento radial relativo ao longo da interface das camadas i e $i+1$;

K_i é o módulo de rigidez da "mola" que resiste ao deslocamento radial relativo ao longo da interface.

O AEMC faz uma transformação na variável K , para facilitar o cálculo numérico. Ele utiliza um parâmetro adimensional, conforme a regra a seguir:

$$k_i = \frac{l_i}{1 - l_i}$$

Ao se atribuir o valor nulo para o parâmetro L_i , o valor de K_i será nulo e, portanto $T_i = 0$, o que significa que não haverá cisalhamento na interface, logo as camadas não estão aderidas.

Se, por outro lado, $L_i = 1$, tem-se K_i e T_i tendendo ao infinito, que significa que há aderência entre as camadas.

Assim, para simular a aderência entre camadas, o projetista deve entrar com um valor entre **0 (camadas não aderidas) e 1 (camadas aderidas)**.

CARREGAMENTO

A carga de roda é assumida no programa como sendo uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. A pressão de contato entre o pneu e o pavimento é assumida como sendo igual à pressão de inflação dos pneus, por falta de dados mais específicos para as configurações de rodas e pneus utilizados no país. O tamanho da área de contato, portanto, depende da carga de roda e da pressão de inflação dos pneus.

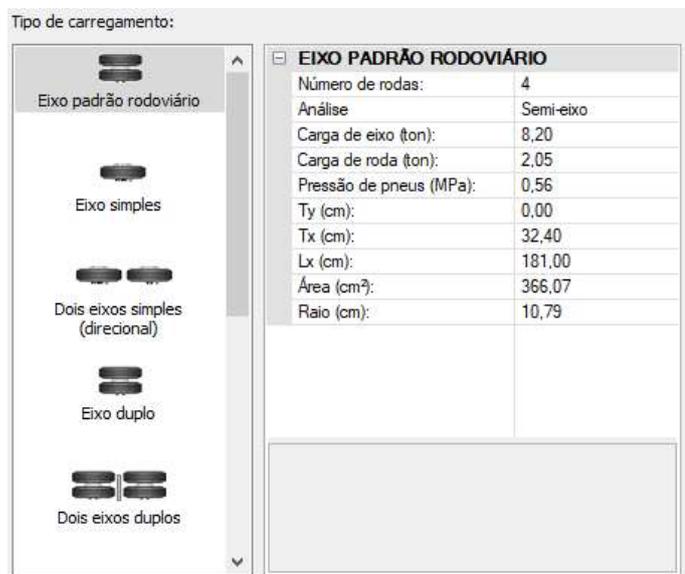
LISTA DE EIXOS

O quadro **Carregamento**, apresentada na Figura a seguir, apresenta uma lista de eixos que permite escolher o tipo de carregamento que se deseja analisar. Na lista de propriedades podem ser alterados os valores de Pressão de Pneus, Carga do Eixo ou a Carga de Roda, além das distâncias entre rodas e entre eixos (Tx e Ty) e bitola do eixo (Lx) da configuração selecionada. Os valores da Área de Contato e do Raio de Carregamento são calculados automaticamente pelo AEMC.

É possível escolher entre uma análise apenas do semi-eixo ou do eixo completo. Na análise do eixo completo, todo o conjunto de rodas do eixo contribui para os resultados do estado de tensões e deformações no ponto da análise. Ao selecionar a análise do eixo completo, o projetista deve verificar e alterar a largura da bitola do eixo (Lx), se for necessário, que vem com o valor padrão de 181,0 cm.

Neste quadro as unidades utilizadas são: centímetros para as distâncias; cm^2 para a área de contato; tonf para as cargas de eixos e de rodas; e MPa para a pressão de pneus.

Tipo de carregamento:



EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
Número de rodas:	4
Análise	Semi-eixo
Carga de eixo (ton):	8,20
Carga de roda (ton):	2,05
Pressão de pneus (MPa):	0,56
Ty (cm):	0,00
Tx (cm):	32,40
Lx (cm):	181,00
Área (cm^2):	366,07
Raio (cm):	10,79

RESULTADOS

O quadro **Resultados** é onde ocorrem os cálculos de tensões, deformações e deslocamentos em todos os pontos definidos pelo usuário. Os pontos podem ser digitados um a um na tabela, nas colunas X, Y e Z, respeitando a **Convenção** do sistema de coordenadas, ou preenchidos automaticamente pressionando o botão **Ferramentas**, na opção *Gerar Pontos Automaticamente*.

Com os pontos inseridos na tabela, o processo de cálculo pode ser iniciado pressionando o botão **Calcular**. Na janela aparece a evolução da análise e dos cálculos. Os resultados finais são então dispostos ao longo da tabela e podem ser exportados para uma planilha Excel® na opção *Exportar para o Excel* do botão **Ferramentas**.

INSERIR PONTOS

Antes de mandar calcular as tensões, deformações e deslocamentos, o projetista deve inserir nas colunas da tabela **Resultados** as coordenadas dos pontos onde deseja obter as tensões, deformações e deslocamentos. Apenas as colunas das coordenadas estão habilitadas para edição. As coordenadas dos pontos devem ser inseridas na sequência das linhas. O programa não realiza os cálculos da linha enquanto as três coordenadas, X, Y e Z não forem inseridas.

A coordenada Z inicia o valor 0,00cm na superfície do pavimento e cresce no sentido da profundidade.

Quando for preciso calcular as tensões, deformações e deslocamentos na fronteira entre duas camadas, recomenda-se não utilizar o ponto exato. Adicione ou diminua 0,001cm no valor da profundidade para obter o resultado na camada desejada.

GERAR PONTOS

A fim de facilitar a inserção dos pontos, o programa dispõe de uma função para o preenchimento automático de pontos para análise. Para acessar a função, o projetista deve clicar no botão **Ferramentas** e na sequência *Gerar Pontos Automaticamente*.



Os pontos são gerados da seguinte forma:

Eixo	Pontos
Z (ao longo da profundidade)	Na superfície ($z=0$) No centro das camadas No topo do Subleito 15cm Abaixo do Subleito
X (perpendicular ao rolamento)	No centro do carregamento ($x=0$) No meio entre o centro e a borda interna da roda No centro da roda Na borda externa da roda 5 pontos a cada 20cm a partir da borda externa da roda
Y (sentido do rolamento)	No centro do carregamento ($y=0$) Entre eixos Sobre os eixos

CONGELAR COORDENADAS

Essa função foi criada para facilitar a navegação pela tabela de **Resultados**. Ao ser acionada, as colunas das coordenadas ficam fixas e não desaparecem da tela quando se navega pelos resultados, facilitando identificar os pontos nas linhas.

Para acionar a função, o projetista, após lançar as coordenadas, deve clicar no botão **Ferramentas** e na sequência *Congelar coordenadas*.

Pontos de análise e resultados

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	2,7027	0,0000	0,0000
3	5,4053	0,0000	0,0000
4	16,2000	0,0000	0,0000

Gerar pontos automaticamente

Congelar coordenadas

Limpar tabela de pontos

Exportar para o Excel

As células congeladas alteram de cor, ficando acinzentadas. Uma vez congelada a tabela, o projetista fica inabilitado para lançar novos pontos ou alterar os existentes. Para liberar novamente as colunas das coordenadas, basta fazer novamente o processo.

Pontos de análise e resultados

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ex (m/m)	Ey (m/m)	Ez (m/m)
1	0,0000	0,0000	0,0000	3,41831e-05	2,11348e-04	-1,209
2	2,7027	0,0000	0,0000	4,87671e-05	2,12258e-04	-1,285
3	5,4053	0,0000	0,0000	1,07026e-04	2,37777e-04	-1,698
4	16,2000	0,0000	0,0000	1,67931e-04	2,22096e-04	-1,019
5	26,9947	0,0000	0,0000	9,50862e-05	1,97813e-04	-1,442
6	36,9947	0,0000	0,0000	1,96960e-06	1,18205e-04	-5,919
7	46,9947	0,0000	0,0000	-7,23644e-06	8,58043e-05	-3,869
8	66,9947	0,0000	0,0000	-1,93658e-05	5,24718e-05	-1,630
9	86,9947	0,0000	0,0000	-2,40014e-05	3,40313e-05	-4,940
10	106,9947	0,0000	0,0000	-2,35734e-05	2,25681e-05	4,951
11	0,0000	0,0000	3,7500	7,32636e-05	5,94575e-05	-5,775
12	2,7027	0,0000	3,7500	7,39969e-05	5,75660e-05	-5,243
13	5,4053	0,0000	3,7500	5,84511e-05	5,32390e-05	-1,765
14	16,2000	0,0000	3,7500	3,69548e-05	5,18032e-05	3,199
15	26,9947	0,0000	3,7500	3,80488e-05	4,40443e-05	-4,170
16	36,9947	0,0000	3,7500	2,39570e-05	4,65766e-05	-3,327

LIMPAR TABELA

Ao finalizar as análises, e caso seja do interesse do projetista limpar a tabela **Resultados**, existe a função *Limpar tabela de pontos* no botão **Ferramentas**. Ao ser acionado, todos os dados contidos na tabela **Resultados** serão apagados. Certifique-se que tenha salvo o trabalho antes de usar esta função.

Pontos de análise e resultados

Calcular		Ferramentas >>	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1			
2			
3			
4			
5			

- Gerar pontos automaticamente
- Congelar coordenadas
- Limpar tabela de pontos
- Exportar para o Excel

EXPORTAR

Esta opção permite exportar os dados da análise, referentes à estrutura, carregamento e os resultados para uma planilha Excel. O formato do arquivo gerado é *.csv que o Excel ou outra planilha abre normalmente.

Pontos de análise e resultados						
Calcular		Ferramentas >>				
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)			
1	0,0000	0,0000	0,0000			
2	2,7027	0,0000	0,0000			
3	5,4053	0,0000	0,0000			
4	16,2000	0,0000	0,0000	-18,29719	0,00000	665,!
5	26,0047	0,0000	0,0000	-27,65616	0,00000	610,!

CALCULAR

O botão **Calcular** deve ser acionado quando todas as informações foram inseridas nos quadros. Ele pode ser acionado quantas vezes o projetista desejar. Esse botão chama a rotina interna da biblioteca do AEMC, para cada linha de coordenadas inserida na tabela **Resultados**, e calcula as tensões, deformações e deslocamentos.

Lembre-se de salvar sempre o trabalho. Cada alteração de dados faz com que o programa apague a tabela **Resultados**.
