

## **PROGRAMAS AUXILIARES DE PROCESSAMENTO DE DADOS E DE RESULTADOS DE DOIS PROGRAMAS QUE PERMITEM A SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TÚNEIS 2D E 3D**

**Francisco F. Martins\* e Bruno D. S. S. Valente\*\***

\* Departamento de Engenharia Civil  
Escola de Engenharia da Universidade do Minho  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães  
e-mail: [ffm@civil.uminho.pt](mailto:ffm@civil.uminho.pt)

\*\* AFA – Avelino, Farinha e Agrela, L.da  
Calheta, Madeira  
e-mail: [bvalente@netmadeira.com](mailto:bvalente@netmadeira.com)

**Palavras-chave:** Túneis, Geração de malhas, Pré-processamento, Pós-processamento.

**Resumo.** *Neste trabalho são apresentados dois programas auxiliares no pré-processamento dos dados (MALHAS2D e MALHAS3D) e no pós-processamento dos resultados (MALHAS3D) de dois programas de simulação numérica de túneis a duas e três dimensões. Estes programas, escritos na linguagem de programação Visual Basic, permitem gerar a malha de elementos finitos e definir os diferentes estratos do terreno, o suporte do túnel, a posição do nível freático e as condições de fronteira do problema. Podem ser considerados túneis de secção circular, de secção elíptica e com paramentos verticais ou circulares nos hasteais. Os dois programas permitem ainda a visualização da malha de elementos finitos inicial. No caso do programa MALHAS3D é ainda possível ver a malha deformada bem como definir cortes com isocurvas de deslocamentos. Os programas geram um ficheiro de dados com o nome definido pelo utilizador e um ficheiro com a extensão DXF que contém a geometria do problema e permitem ao utilizador importar e visualizar a malha em AutoCAD. O programa MALHAS3D também permite exportar para o AutoCAD cortes horizontais, verticais e transversais ao eixo do túnel.*

## 1. INTRODUÇÃO

Na análise por elementos finitos de problemas de engenharia, o tratamento em tempo útil de grandes volumes de informação relacionados com os dados e com os resultados só é possível através de programas de pré-processamento e de pós-processamento.

Neste trabalho são apresentados programas auxiliares de pré-processamento (MALHAS2D e MALHAS3D) e de pós-processamento (MALHAS3D) que permitem tratar os dados e os resultados de dois programas de elementos finitos, um bidimensional e outro tridimensional, usados na simulação numérica de túneis. Os programas usados na simulação numérica de túneis [1,2] estão direccionados para o cálculo geotécnico permitindo simular a escavação de túneis com a consideração das diversas fases construtivas de forma separada e sequencial e modelar o comportamento mecânico dos vários materiais e suas interfaces através de vários modelos constitutivos de complexidade variável.

Os programas de cálculo auxiliar aqui apresentados foram escritos em linguagem Visual Basic e permitem a geração da malha de elementos finitos inicial a duas e três dimensões para túneis com qualquer secção circular ou elíptica, com ou sem paramentos verticais, bem como a criação automática das condições de fronteira e dos vários estratos do terreno.

O programa MALHA3D também permite a obtenção de cortes horizontais, verticais e transversais ao eixo do túnel. Esses cortes, que contêm os pontos nodais que intersectam, permitem visualizar os deslocamentos nodais, a deformada da malha e isocurvas dos deslocamentos para cada direcção (x,y,z).

O sistema de eixos considerado pelos programas de cálculo existentes foi adoptado para os novos programas desenvolvidos, permitindo assim coerência nos dados correspondentes às coordenadas dos nós dos elementos (Fig. 1).

Os planos de corte (xy, xz e yz) são definidos a partir da extracção dos nós que estão contidos nesse corte, sendo gerados posteriormente elementos planares com a designação dos elementos que são intersectados pelo respectivo corte. Para cada corte extraído é possível obter-se a deformada da malha correspondente, os valores dos pontos nodais bem como isocurvas que são calculadas a partir dos valores obtidos pelo programa de cálculo nos pontos nodais.

Os programas desenvolvidos são apresentados a seguir de uma forma mais detalhada.

## 2. PROGRAMA MALHAS2D

### 2.1. Descrição geral do programa

O programa MALHAS2D permite gerar malhas a duas dimensões, para simulação numérica da escavação de túneis em maciços estratificados ou não, permitindo a definição das condições de fronteira e a definição da posição do nível freático.

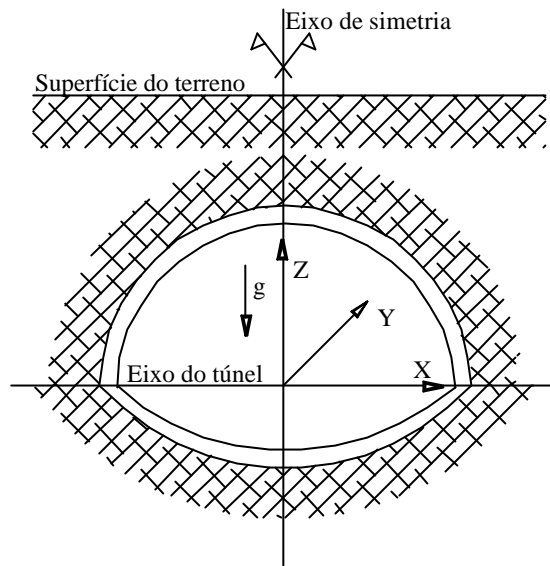


Figura 1. Sistema de eixos usado pelo programa.

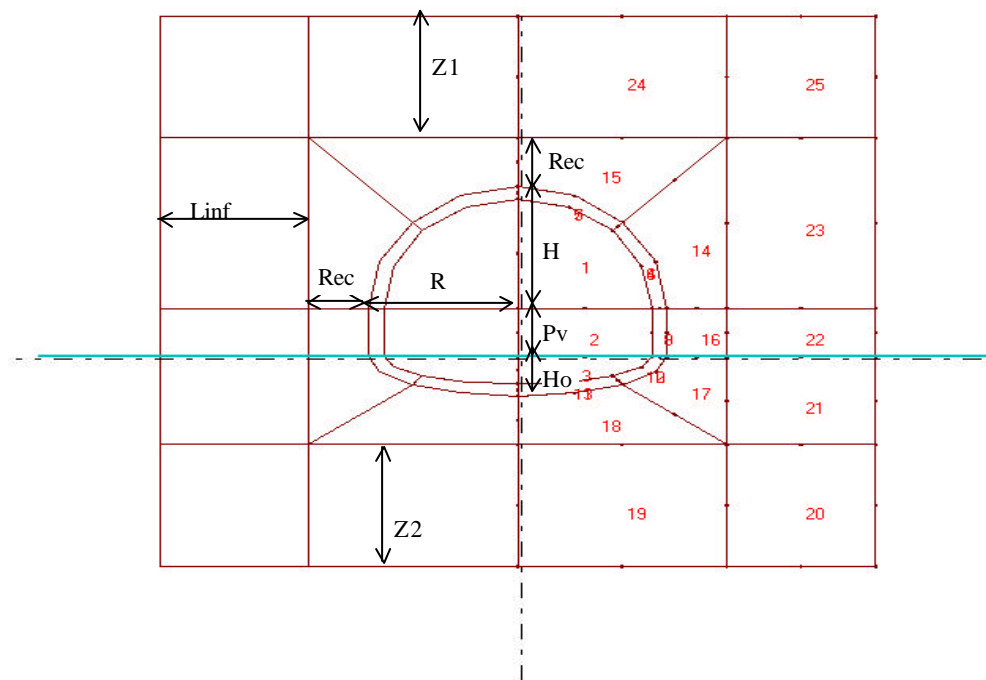


Figura 2. Zonas base e variáveis necessárias à definição da geometria do problema.

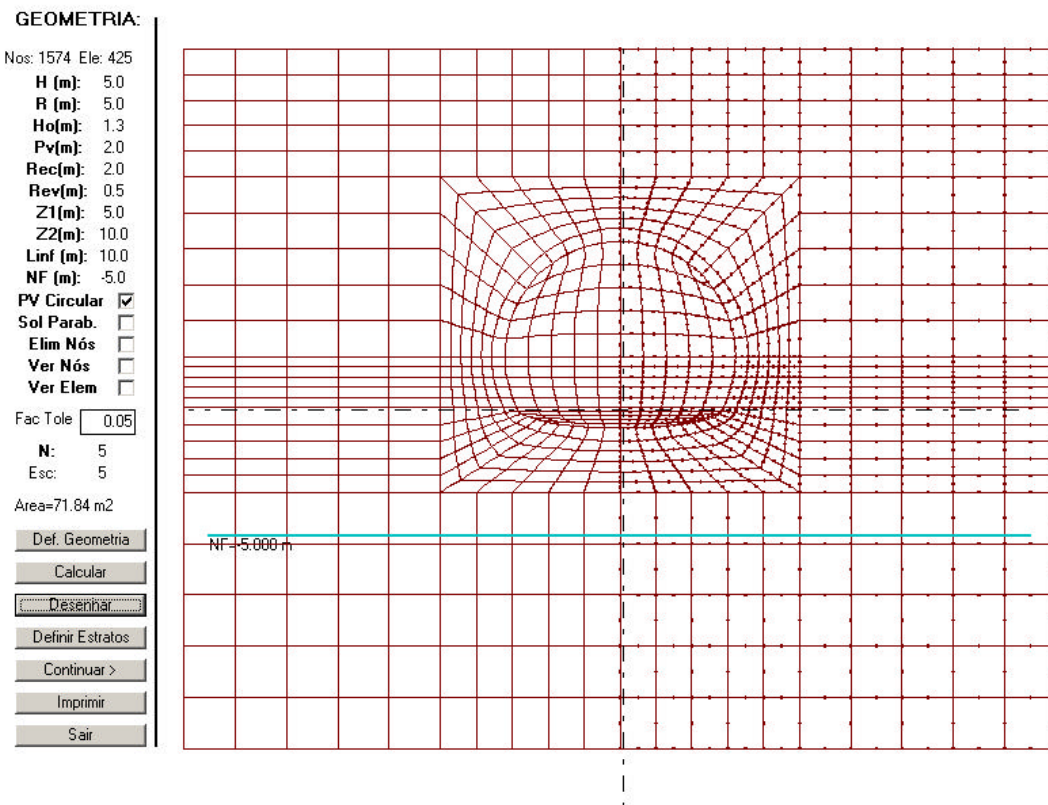


Figura 3. *Layout* das variáveis e rotinas necessárias à definição da malha de elementos finitos.

De uma forma geral, a criação de um modelo em elementos finitos compreende basicamente quatro blocos distintos de variáveis: a designação e coordenadas dos nós da malha de elementos finitos; a designação e definição dos elementos através da numeração sequencial dos nós pertencentes ao mesmo elemento, com as respectivas características; as condições de fronteira do modelo e os parâmetros de controlo do cálculo.

Atendendo às especificidades da secção de um túnel, e do seu maciço envolvente, a malha de elementos finitos é gerada a partir de blocos predefinidos (Fig. 2), os quais podem ser subdivididos de forma a obter-se o refinamento pretendido.

Para a definição da geometria da malha e da secção de túnel pretendida, o utilizador tem à disposição um conjunto de parâmetros, cuja alteração dos valores predefinidos permite obter as dimensões geométricas do problema. Na Figura 3 estão representados os parâmetros que permitem a definição da geometria do problema, bem como a definição da secção e do revestimento do túnel. As subrotinas que permitem a construção faseada da geometria do modelo estão inseridas em botões de comando. Serão de seguida apresentadas quatro dessas subrotinas:

*Def. Geometria* - Desenha a malha base, com as dimensões das zonas básicas apresentadas na Figura 2, após a alteração dos parâmetros definidores da mesma.

*Calcular* - Após a definição da geometria da malha e a atribuição do grau de refinamento (N), as zonas básicas são subdivididas em  $N \times N$  vezes, sendo calculadas pelo programa as coordenadas dos respectivos pontos nodais, bem como a geração dos elementos e nós constituintes. Devido à forma como o programa foi estruturado, no cálculo das coordenadas dos pontos nodais da malha, é gerada duplicação de nós na fronteira das zonas básicas coincidentes. Assim, foi criada uma subrotina que faz a detecção dos nós sobrepostos e procede à sua eliminação. Após a eliminação de cada nó sobreposto, é feita a renumeração dos nós. Para que esta tarefa seja realizada é necessário que esteja seleccionada a opção “Elim Nós”, procedendo-se depois ao cálculo da malha.

*Definir Estratos* - Este botão contém uma subrotina que permite a introdução de estratos no maciço. É pedido ao utilizador o número de estratos e depois, para cada estrato, a cota superior e o peso volúmico.

*Desenhar* - É uma subrotina que redesenha a malha após a alteração da escala, sem necessitar de proceder novamente ao cálculo.

Seguidamente serão descritos de uma forma sucinta todos os parâmetros utilizados pelo programa (MALHAS2D) para gerar a malha (Fig. 3).

## **2.2. Definição das características da malha**

A geometria da malha é definida através dos parâmetros apresentadas na Figura 2 (H, R, Ho, Pv, Rec, Z1, Z2 e Linf) e ainda pela espessura do revestimento (Rev) e posição do nível freático. Existem ainda subrotinas que permitem transformar o paramento vertical dos hasteais em circular (PvCircular), definir uma equação parabólica para a forma da soleira (Sol Parab), visualizar os números dos nós da malha (Ver Nós), visualizar os números dos elementos (Ver Elem) e alterar a escala do desenho (Esc).

## **2.3. Definição de estratos**

Além das variáveis anteriormente apresentadas e que permitem a obtenção da geometria do problema, foram desenvolvidas rotinas que permitem subdividir o maciço em vários estratos. Para tal basta apenas fixar a posição superior de cada estrato em relação ao eixo do túnel, bem como definir as suas características. Os estratos são considerados sempre horizontais (Fig.4).

Para a atribuição das características aos elementos que compõem cada estrato é verificada a coordenada do centro de gravidade de cada elemento. Se o centro de gravidade dos elementos estiver abaixo da linha que define o estrato é atribuído a esses elementos as características do estrato.

## **2.4. Tipos de secções**

Os tipos de secções admitidos pelo programa desenvolvido são variados, permitindo obter uma secção simples ou composta por elementos circulares e elípticos. Seguidamente serão apresentados alguns tipos de secções que o programa permite definir. O programa permite a definição de malhas que contemplem túneis de secção circular, túneis de secção elíptica e túneis com paramentos verticais ou circulares. O utilizador pode facilmente alterar a geometria da malha bem como a

geometria da secção do túnel. Em torno da secção de túnel é definida uma malha mais apertada e com elementos de faces radiais por forma a permitir na envolvente do túnel uma análise dos deslocamentos e das tensões em direcções radiais.

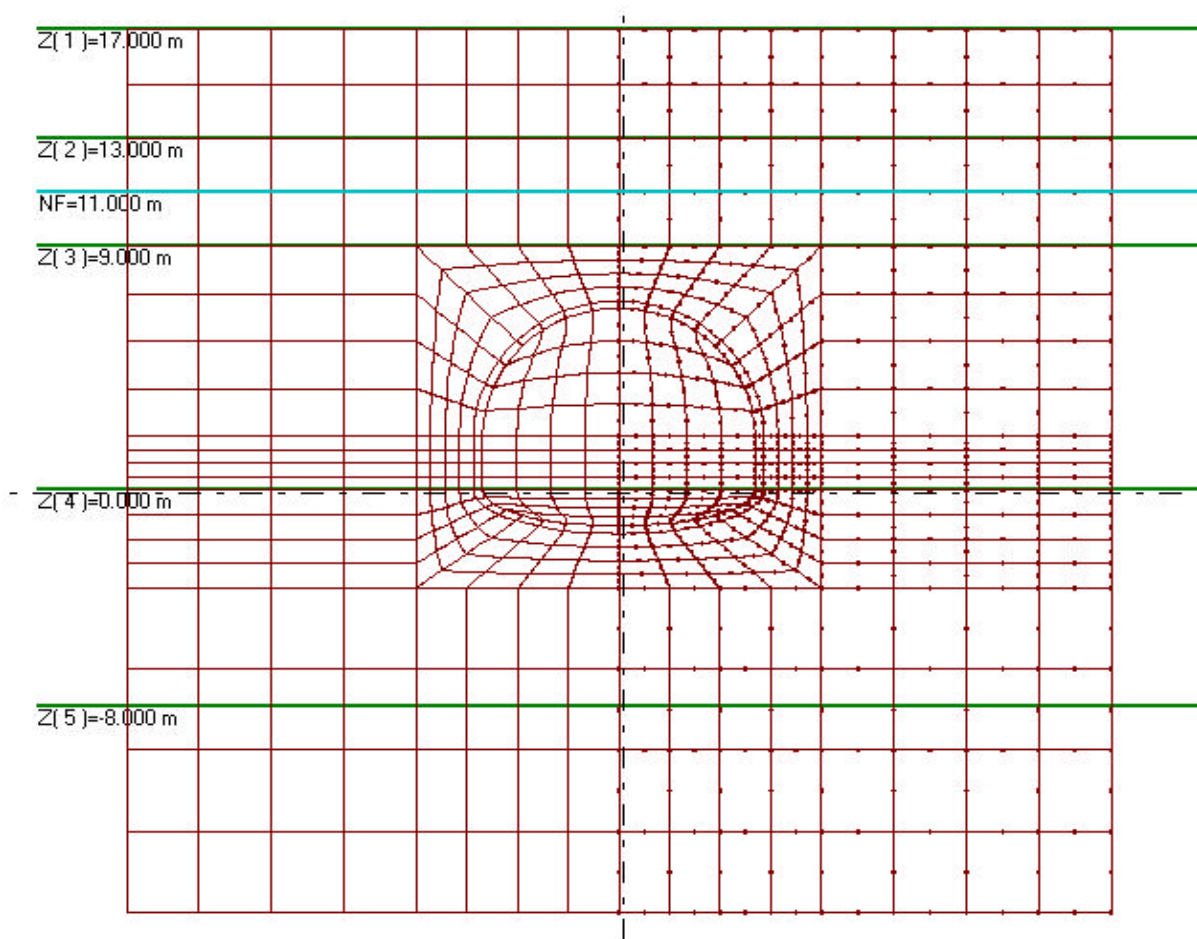


Figura 4. Malha bidimensional, gerada no programa MALHAS2D, representativa de um maciço com cinco estratos e túnel com secção com paramentos verticais, abóbada circular e rebaixo em forma elíptica.

As malhas geradas pelo programa MALHAS2D podem ter o refinamento que o utilizador desejar bastando para isso o aumento do parâmetro N que define o grau de refinamento da malha. Para cada aumento unitário de N o programa aumenta o número de elementos totais da malha. Assim o grau de refinamento considerado nas malhas representadas nas Figuras 5 e 6 é igual a quatro, significando que cada área base, identificada na Figura 2 com um número, foi dividida em 4 X 4 elementos.

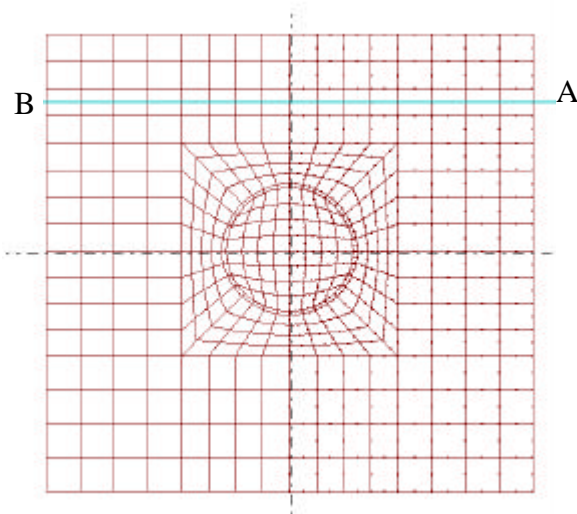


Figura 5. Malha definida com túnel de secção circular.

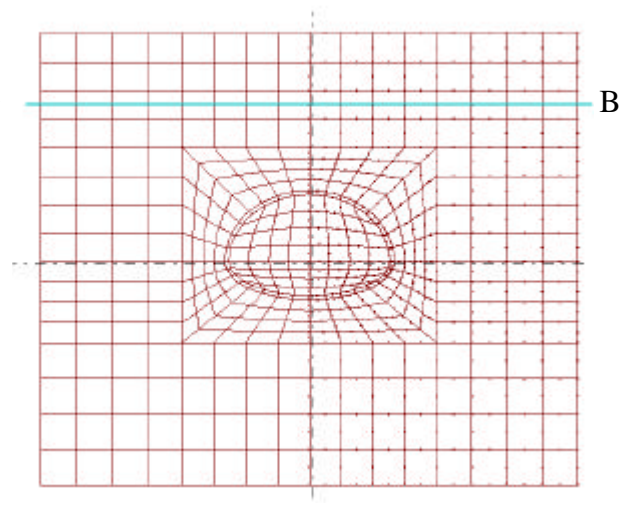


Figura 6. Malha definida com túnel de secção elíptica.

Os elementos gerados, são elementos de 8 nós. A linha AB visualizada nas Figuras 5 e 6 representa a posição do nível freático relativamente ao eixo do túnel, sendo definida pelo utilizador. É a partir desta linha que o programa determina a altura de água em cada ponto nodal, mediante a subtracção da coordenada nodal  $z$  à cota do nível freático. Caso o problema em estudo não necessite da consideração do nível freático, deve ser atribuído um valor a NF negativo inferior ou igual à soma de  $(H_o + Rec + Z_2)$ .

## 2.5. Definição das condições de fronteira

As condições de fronteira são definidas automaticamente pelo programa através de rotinas que fazem a extracção dos nós que contêm as coordenadas dos pontos de fronteira da malha. O programa considera impedidos os deslocamentos dos nós nas direcções perpendiculares às fronteiras laterais das malhas. O limite superior da malha é sempre considerado como livre e o limite inferior é sempre considerado impedido em ambas as direcções (Fig. 7).

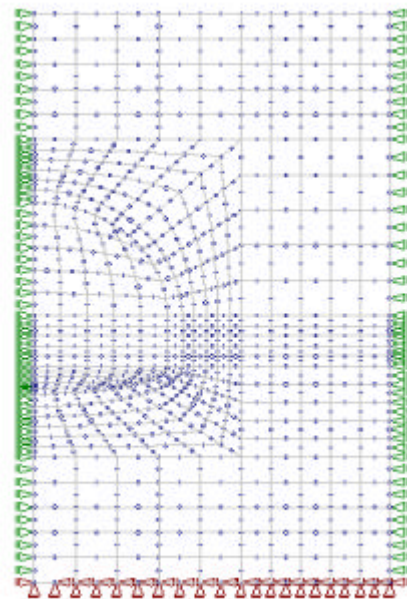


Figura 7. Condições de fronteira admitidas pelo programa.

Assim, através da pesquisa dos nós com coordenada  $y$  igual a zero e coordenada  $x$  igual à largura da malha são obtidos os nós com deslocamentos impedidos na direcção  $x$ . Através da pesquisa dos nós com coordenada  $z$  igual ao limite inferior da malha são obtidos os nós com deslocamentos impedidos nas direcções  $x$  e  $z$ .

## **2.6. Propriedades dos materiais e definição do revestimento**

Foi igualmente desenvolvida uma subrotina que permite definir as propriedades dos materiais por forma a orientar o utilizador na definição dos parâmetros exigidos pelo programa.

O revestimento do túnel só é gerado pelo programa caso seja definida a sua espessura pelo utilizador. Os elementos gerados para o revestimento são duplicados por exigência do programa de cálculo.

## **2.7. Exportação da malha para AutoCAD**

O programa gera um ficheiro de dados com o nome definido pelo utilizador e um ficheiro com a extensão DXF que contém a geometria do problema e permite ao utilizador importar e visualizar a malha em AutoCAD (Fig. 8). Para cada estrato distinto o programa atribui-lhe uma cor distinta.

Com este programa é possível, de uma forma automática e simplificada, gerar vários tipos de secções com refinamentos diferentes e características resistentes distintas, obtendo-se no final o ficheiro de dados que será processado no respectivo programa de cálculo numérico.

# **3. PROGRAMA MALHAS3D**

## **3.1. Descrição geral do programa**

O desenvolvimento deste programa teve como principal propósito o auxílio à saída de resultados, tendo, no entanto, sido introduzidas duas subrotinas que permitem a geração da malha tridimensional a partir de uma malha plana de elementos de quatro nós, bem como a geração automática das condições de fronteira.

Para a análise dos resultados dos programas de simulação numérica de túneis 2D e 3D, foram introduzidas nos referidos programas algumas linha de código que permitem a geração de ficheiros individuais com formato próprio e que contém os dados correspondentes a cada fase de cálculo. Estes ficheiros podem conter os deslocamentos nodais, as forças nodais ou as tensões nos pontos de Gauss.

Na Figura 9 está representado o *layout* do programa MALHAS3D com os menus que foram desenvolvidos. A cada menu corresponde uma subrotina específica.

O programa está estruturado em rotinas, que permitem a execução individual de cada tarefa, permitindo desta forma uma variedade de soluções conforme o problema abordado.



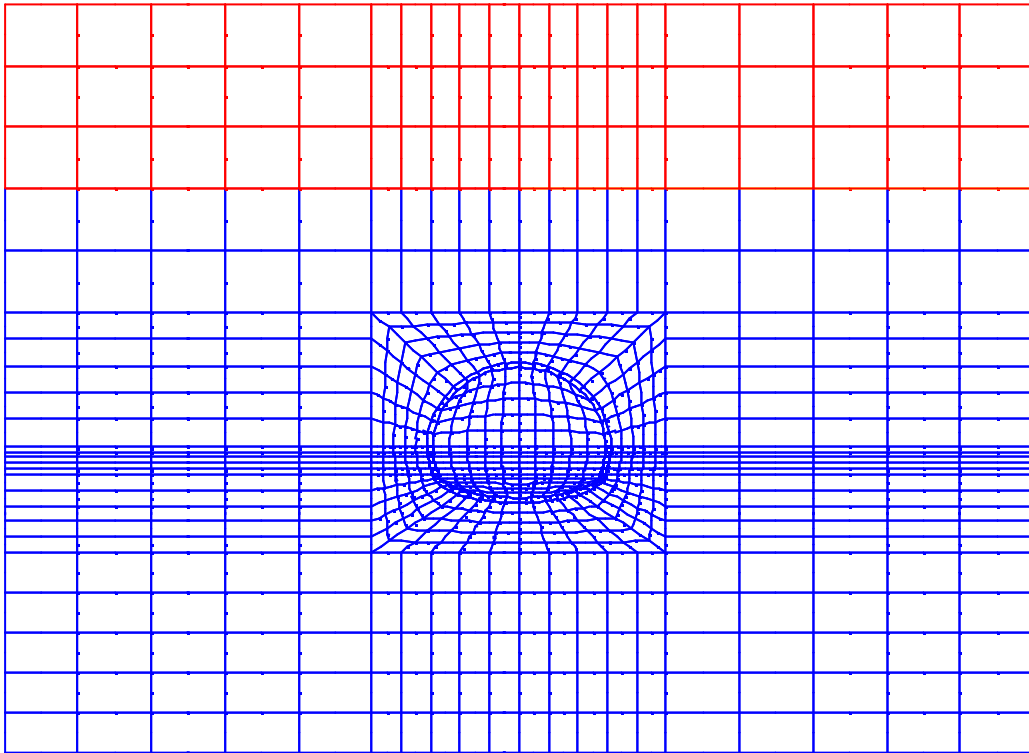


Figura 8. Malha 2D gerada pelo programa em ficheiro DXF (exemplo em que são considerados dois estratos).

### 3.2. Descrição das subrotinas (menus)

As subrotinas, identificadas na Figura 9 por menus, que permitem a análise e visualização gráfica dos resultados do cálculo, bem como a geração de uma malha tridimensional a partir de uma malha bidimensional de elementos de quatro nós, são as seguintes:

<Ficheiros>*Novo* - Permite a criação manual de um novo ficheiro no editor de texto do programa.

*Abrir* - Permite abrir, editar e alterar qualquer tipo de ficheiro em formato de texto.

*Eliminar* - Permite a eliminação do ficheiro que está seleccionado na lista de Ficheiros (FileListBox). Esta operação é irreversível não sendo possível recuperar o ficheiro após a sua eliminação. Para tal é exibida uma mensagem perguntando ao utilizador se quer mesmo eliminar o ficheiro.

*Imprimir Malha* - Permite a impressão da malha bidimensional ou tridimensional que está sendo visualizada pelo programa.

*Imprimir Contorno* - Permite a impressão de isocurvas de deslocamentos em qualquer corte definido na direcção dos eixos considerados.

<Ver> *Ver Ficheiro* - Permite a edição e visualização do ficheiro de dados, em alternância com o desenho da malha.

*Ver Malha* - Permite a visualização da malha definida no ficheiro de dados.

<Malha>Gerar Malha 3D - Permite a geração de malhas tridimensionais constituídas por elementos de oito nós a partir de uma malha base bidimensional definida com elementos de quatro nós. A geração da malha tridimensional é feita pela duplicação dos nós da malha base segundo a direcção do eixo do túnel (eixo y), sendo necessário introduzir o afastamento entre cada novo plano. Desta forma o programa gera automaticamente os elementos que estão compreendidos entre dois planos consecutivos de nós.

Ordenar Malha – Esta rotina foi introduzida com o propósito de, após a eliminação de alguns nós, fazer a reordenação dos nós e a sua substituição nos elementos correspondentes.

Eliminar Nós - Esta rotina permite a detecção de nós livres que após a eliminação de elementos não fiquem a pertencer a nenhum elemento da malha.

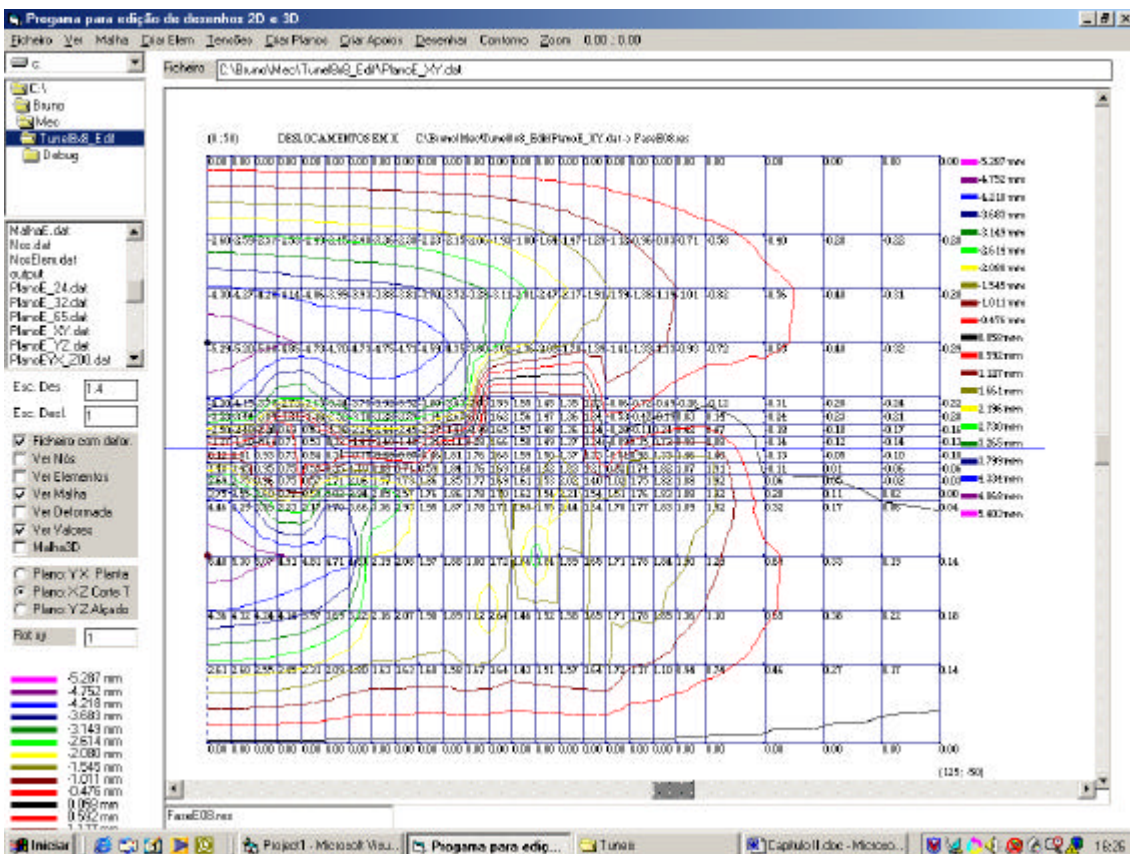


Figura 9. Layout do programa Malhas3D. Visualização dos deslocamentos obtidos à superfície do maciço.

*Definir estratos* – Após a definição da malha tridimensional é possível a definição de vários estratos, sendo apenas necessário fornecer as cotas superior e inferior de cada estrato. A rotina faz depois a pesquisa dos nós e respectivos elementos que estão compreendidos entre as cotas do estrato.

<*Criar Planos*> - Esta rotina permite a obtenção de planos a partir do ficheiro que contém a malha tridimensional. Estes planos são posteriormente utilizados na visualização de isocurvas de deslocamentos, forças ou tensões, incluindo os valores dos pontos nodais ( Fig.9).

<*Criar Elementos*> - Após a extracção dos nós que estão contidos no plano definido em <*Criar Planos*>, esta rotina permite a geração automática de elementos para qualquer conjunto de nós ortogonais que definam um plano.

<*Criar Apoios*> - Esta rotina foi desenvolvida para auxiliar na definição das condições de fronteira. Permite a geração automática das condições de apoio, sendo necessário fornecer o plano onde se pretende impedir os deslocamentos.

<*Desenhar*> - Permite a visualização das malhas tridimensionais. Se o ficheiro activo não corresponder a uma malha tridimensional, o programa emite uma mensagem dizendo “Erro de cálculo. Verifique o ficheiro de dados ou as opções de cálculo”

<*Contorno*> – Calcula isocurvas dos valores dos deslocamentos nas várias direcções, que estão armazenados nos ficheiros com a designação Fase0i.Res, e traça-as sobre os planos que foram definidos na rotina *Criar Planos* (ver Fig. 10). Esta rotina é a mais utilizada para a análise dos resultados decorrentes da simulação numérica. Permite ainda mostrar os valores dos deslocamentos obtidos nos pontos nodais, bastando para isso estar seleccionada a opção *Ver valores* .

### 3.3. Descrição das opções do programa

Existe ainda um conjunto de opções que podem ser activadas ou desactivadas por escolha do utilizador e que permitem a visualização de nós, elementos, deformada e valores dos deslocamentos obtidos em cada nó e em cada direcção.

No caso de malhas tridimensionais podem ser escolhidos três planos distintos: plano em planta, yx (Fig. 10); plano em corte transversal, xz (Fig. 11); plano em corte longitudinal, yz (plano paralelo ao eixo do túnel) (Fig. 13). Ainda está disponível uma outra opção que permite a obtenção de uma perspectiva isométrica a 45° sendo necessário fornecer a escala pretendida para a terceira dimensão.

Para que o programa calcule as isocurvas é necessário escrever o nome do ficheiro que contém os valores dos deslocamentos dos pontos nodais correspondentes a uma determinada fase. A caixa de texto designada por Rot xy permite escolher o tipo de deslocamento (1-x, 2-y, 3-z, 4-módulo dos deslocamentos). O módulo dos deslocamentos é definido pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos deslocamentos segundo as três direcções.

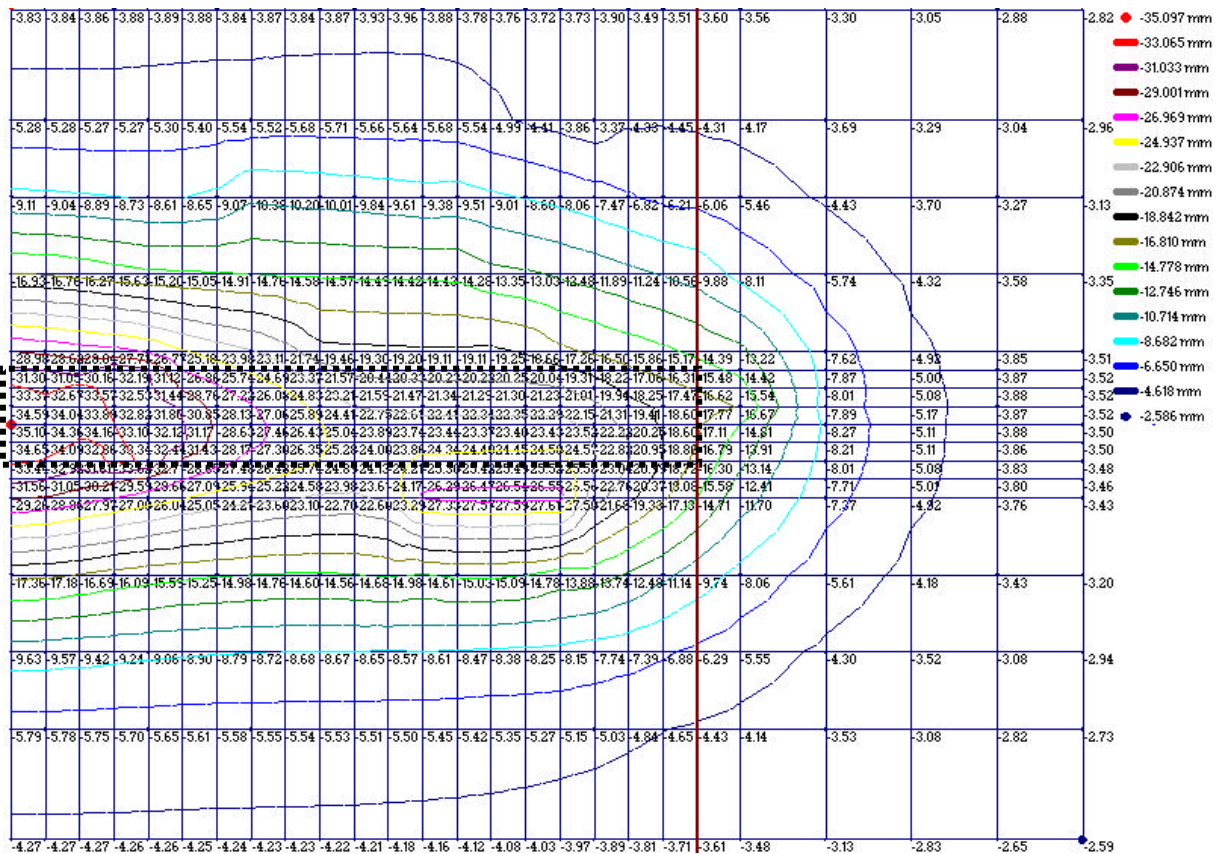


Figura 10. Representação de um plano em planta,  $yx$ , apresentando curvas de igual valor para os assentamentos superficiais (segundo o eixo dos  $zz$ ).

Existe um conjunto de outras opções que permite o controlo, manuseamento e visualização dos dados dos vários ficheiros activos. Estas opções permitem ver a numeração dos nós e dos elementos, ver a malha deformada conjuntamente com a malha inicial (Fig. 11), ver a malha com isocurvas e ver os valores dos deslocamentos nos pontos nodais.

Além do cálculo das isocurvas, são indicados do lado direito do ecrã os valores que cada isocurva assume em função da sua cor. São ainda indicados os valores máximos e mínimos das coordenadas dos pontos nodais da malha e, na parte superior do desenho, é indicada a direcção dos deslocamentos que estão a ser mostrados bem como o nome do ficheiro que contém os nós e elementos do plano, e o ficheiro que contém os valores dos deslocamentos. Na Figura 11 é mostrado um plano vertical transversal ao eixo do túnel, com a malha deformada no plano  $xz$ .

A Figura 12 mostra um plano vertical transversal ao eixo do túnel, com o cálculo das isocurvas dos valores dos deslocamentos na direcção  $x$ . São ainda identificados dois pontos que localizam a zona onde ocorre o máximo deslocamento positivo (ponto A) e o máximo deslocamento negativo (ponto V). Lateralmente são listados os valores que assumem as isocurvas.

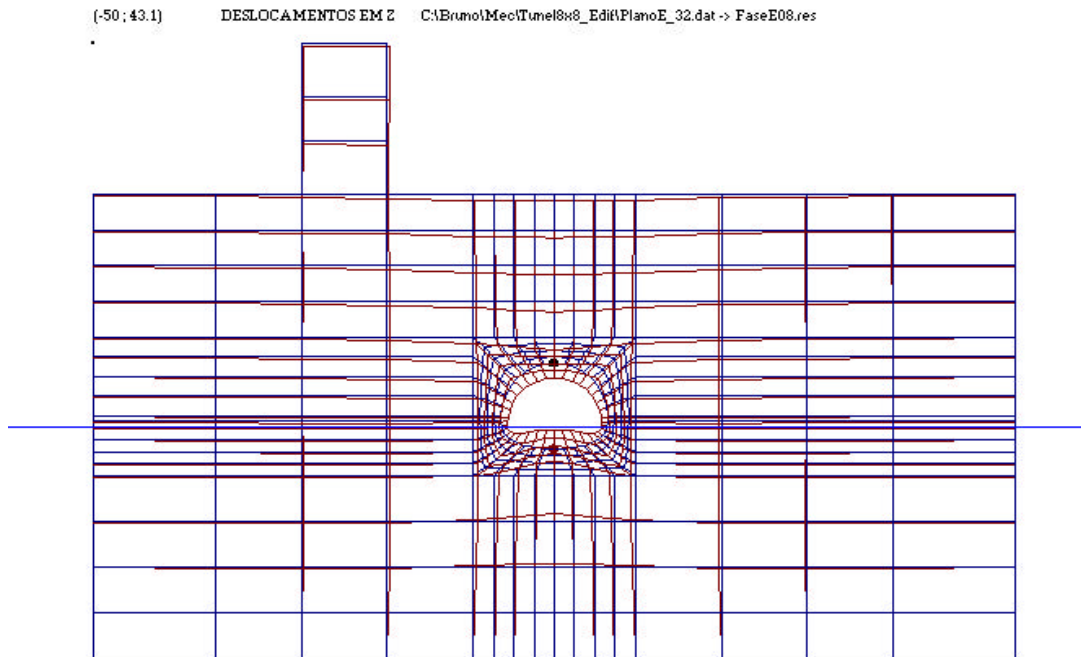


Figura 11. Representação da malha deformada no plano transversal ao eixo do túnel, xz.

A escala do desenho é controlada pela caixa de texto com a denominação *Esc. Des*. Quanto maior for o número inscrito na caixa de texto maior será o tamanho do desenho. Em combinação com a escala, podem ser utilizadas as barras de deslocamento que permitem movimentar o desenho.

Para variar a escala dos deslocamentos existe uma caixa de texto denominada *Esc. Desl*.

A Figura 13 mostra um plano vertical, ao longo do eixo do túnel, com a respectiva deformada. A deformada é obtida a partir dos deslocamentos no plano yz que são adicionados às coordenadas nos nós que definem o plano.

O programa MALHAS3D gera automaticamente, um ficheiro com a extensão DXF, podendo os planos e as malhas tridimensionais ser exportados para o AutoCAD. A Figura 14 mostra uma malha tridimensional gerada pelo programa MALHAS3D e exportada para AutoCAD.

#### 4. CONCLUSÕES

Os programas apresentados são preciosos auxiliares no pré-processamento de dados e pós-processamento dos resultados de dois programas de simulação numérica de túneis a duas e três dimensões. A utilização destes programas permite economizar muito tempo na preparação de dados e análise de resultados relacionados com a simulação numérica de túneis.

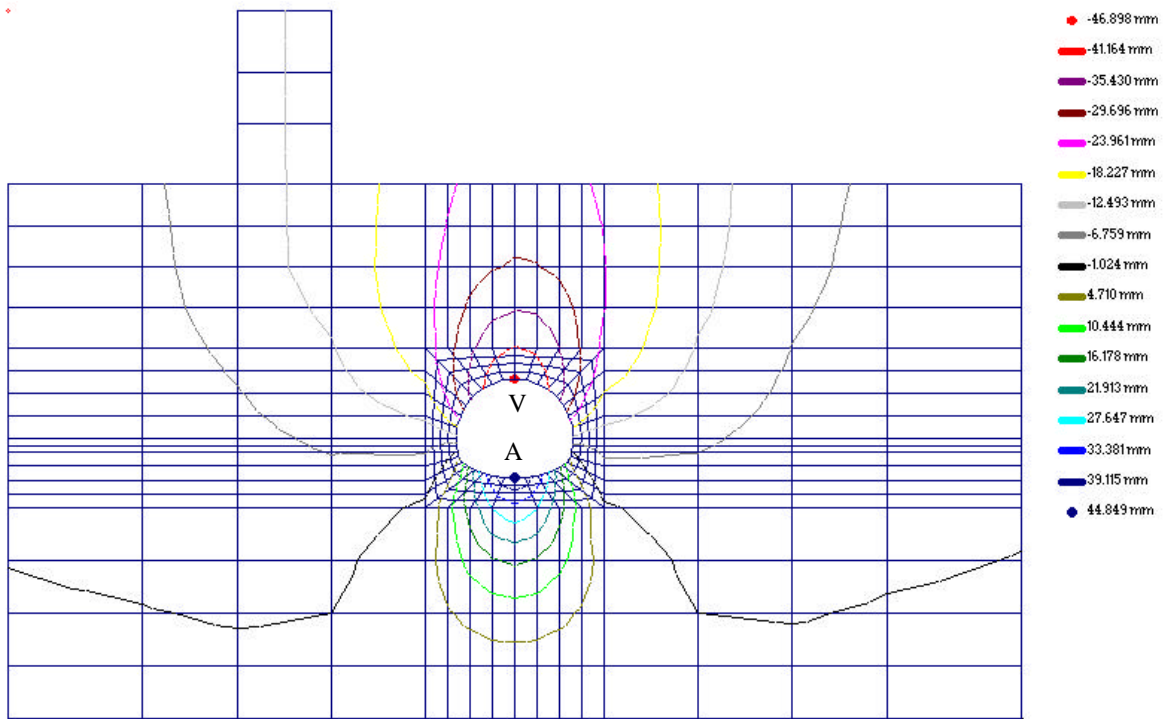


Figura 12. Representação de isocurvas no plano transversal ao eixo do túnel, xz, para deslocamentos segundo o eixo dos xx.

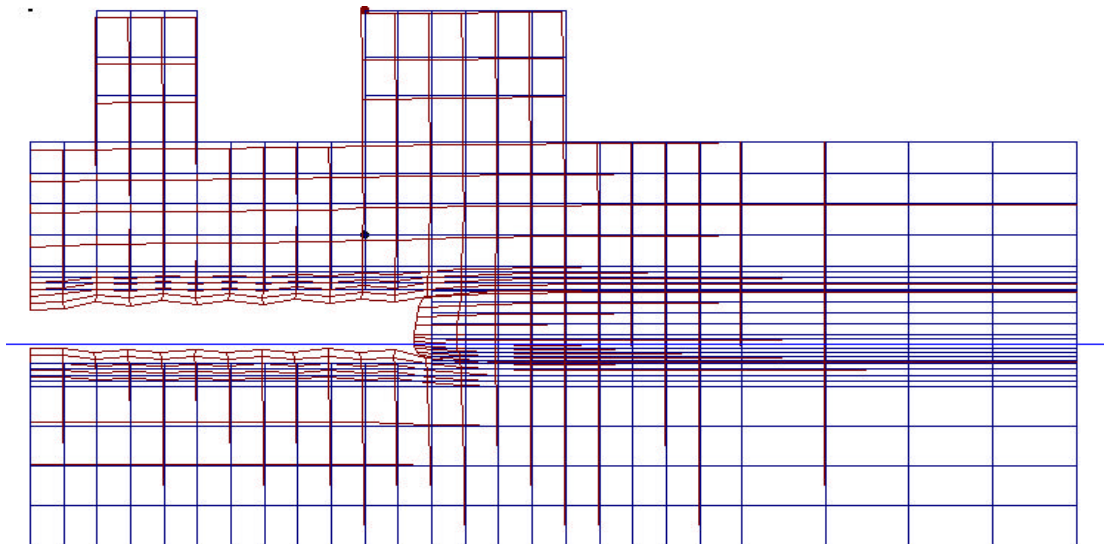


Figura 13. Representação da malha deformada no plano longitudinal, yz.

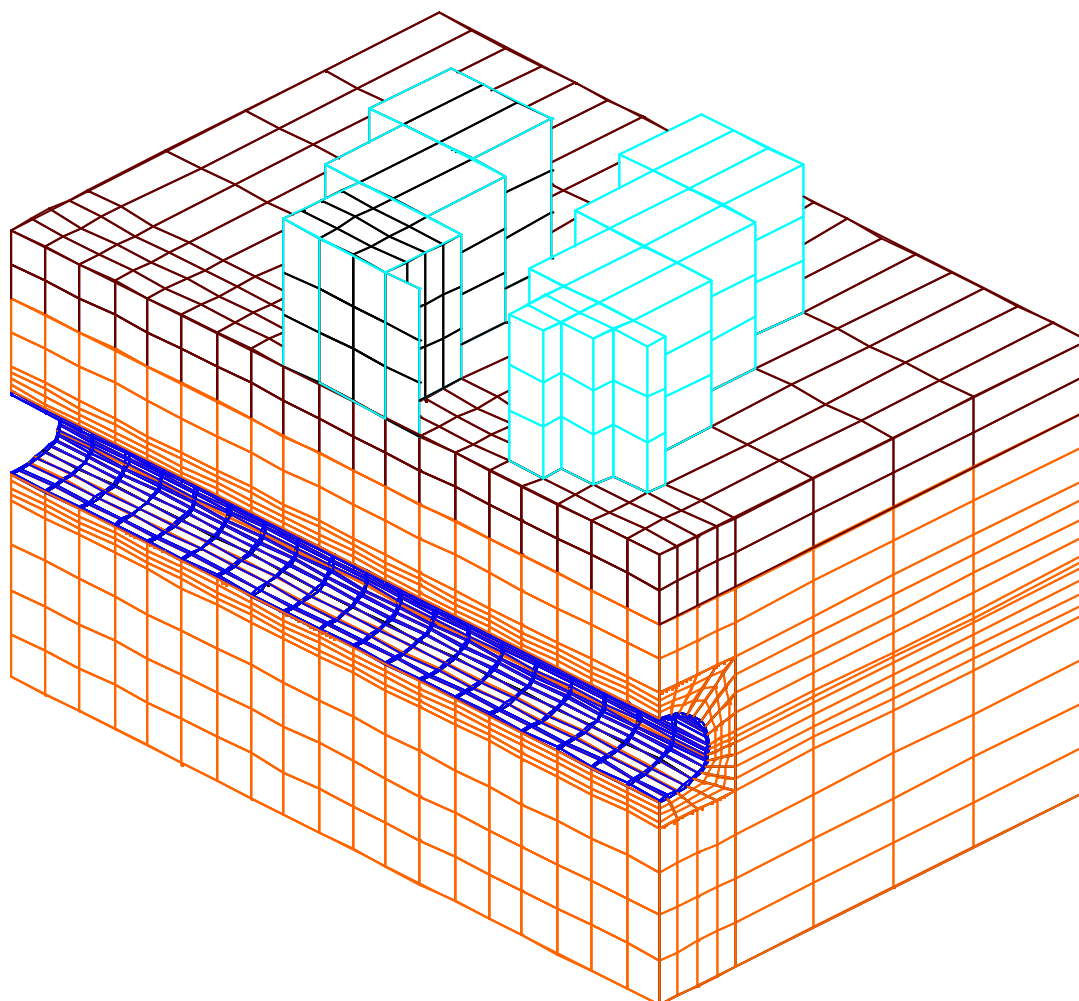


Figura 14. Representação em AutoCAD de uma malha tridimensional.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia – Programa POCTI/ECM/2521/95 – Concepção, Projecto e Reabilitação de Túneis em Obras Viárias.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Almeida e Sousa, *Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Modelação Numérica*. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra (1998).
- [2] A. S. Cardoso, *A Técnica das Pregagens em Solos Aplicadas em Escavações. Métodos de Análise e Dimensionamento*. Tese de doutoramento. Universidade do Porto (1987).