

Ministério da Educação
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral
PPGEMinas

“MODELO PARA ANÁLISE DE TENSÕES GRAVITACIONAIS
A PARTIR DE CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DOS
MACIÇOS ROCHOSOS”

Carlos Torres da Silva
Engenheiro de Minas

Orientador: Prof. Dr. José Lins Rolim Filho

Recife, 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

“MODELO PARA ANÁLISE DE TENSÕES GRAVITACIONAIS
A PARTIR DE CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DOS
MACIÇOS ROCHOSOS”

Por

Carlos Torres da Silva
Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mineral – PPGEMinas/CTG/UFPE.

Recife, 2008

“MODELO PARA ANÁLISE DE TENSÕES GRAVITACIONAIS A PARTIR DE CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS”

DISSERTAÇÃO

Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEMinas da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Título de

MESTRE EM ENGENHARIA MINERAL

Área de concentração: Minerais e Rochas Industriais

Por

Carlos Torres da Silva

Engenheiro de Minas

Recife, 2008

S586m

Silva, Carlos Torres da.

Modelo para análise de tensões gravitacionais a partir de características geomecânicas dos maciços rochosos / Carlos Torres da Silva. - Recife: O Autor, 2008.
xiv, 70 folhas, il : tabs.,grafs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2008.

Inclui Bibliografia e Anexo.

1. Engenharia Mineral. 2.Tensões Gravitacionais. 3. Modelo Elástico. 4.Relacionamento Sondagem. 5.Tensões *in situ*. I. Título.

UFPE

623.26

BCTG/ 2009-023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**

Carlos Torres da Silva

**"MODELO PARA ANÁLISE DE TENSÕES GRAVITACIONAIS A PARTIR
DE CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DOS MACIÇOS
ROCHOSOS"**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MINERAIS E ROCHAS INDUSTRIAIS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do
Dr. José Lins Rolim Filho, considera o candidato.

Carlos Torres da Silva, Aprovado.

Recife, 05 de dezembro de 2008.

Dr. José Lins Rolim Filho (Orientador) UFPE

Dr. Felisbela Maria da Costa Oliveira (Terceiro Examinador Interno) – UFPE

Dr. Marcio Luiz de Siqueira Campos Barros (Segundo Examinador Externo) – UFPE

Dr. Belarmino Barbosa Lira (Terceiro Examinador Externo) – UFPE

“É graça divina começar bem. Graça maior persistir na caminhada certa. Mas graça das graças é não desistir nunca.”

Dom Hélder Câmara

AGRADECIMENTOS

Ao final dessa importante jornada em minha vida profissional, deixo aqui registrado o meu agradecimento às inúmeras pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço primeiramente a Deus, que foi minha fortaleza nos momentos mais difíceis da minha vida e por ter me dado saúde, disposição e coragem, principalmente durante a realização desse mestrado, para alcançar os meus objetivos e realizar os meus sonhos.

A toda minha família, em especial aos meus pais, irmãos, esposa e filhos, pelo apoio, incentivo, paciência e carinho em todos os momentos de minha vida e, principalmente, ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Lins Rolim Filho, meu orientador e grande mestre e amigo, por compartilhar seus conhecimentos, contribuindo para a minha formação pessoal e profissional, e pela confiança e parceria em todos os momentos ao longo da realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mineral (PPGMinas) da UFPE, na pessoa do seu coordenador Júlio César de Souza, por ter me aceitado como aluno do mestrado, dando-me a oportunidade de ter contato, novamente, com a profissão de Engenheiro de Minas, após vários anos afastado da mesma.

A Voleide Barros F. Gomes, secretária do PPGMinas, pela sua eficiência, dedicação, carinho e paciência, durante todo o período do mestrado.

Aos Professores do PPGMinas e dos departamentos de Engenharia de Minas e de Geologia: Áureo Octávio Del Vecchio Machado, Dorival de Carvalho Pinto, Eldemar de Albuquerque Menor, Evenildo Bezerra de Melo, Felisbela Maria da Costa Oliveira, Leonardo José do Nascimento Guimarães, Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros e Robson Ribeiro Lima que, direta ou indiretamente, colaboraram para o meu crescimento profissional e para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos: Achiles Dias Alves da Silva, Adelson Gomes do Prado, Adriana Mauricio Pereira da Silva, Carem Vieira Santana, Edna Santos, Ely Brasil de A. Luna, Farah Diba da Silva, José Carlos da Silva Oliveira, Julliana Valadares, Leila Magalhães Baltar, Oberdan José de Santana, Paulo de Tarso da Fonseca, Roseane Aparecida Moreira Peixoto, Suely Andrade da Silva, Thiago Pereira da Costa, Vanildo Almeida Mendes, Vinícius Dantas, pelo companheirismo, paciência e ajuda que me foi dada, direta ou indiretamente, durante todo o desenvolvimento do mestrado e deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
SUMÁRIO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE GRÁFICOS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
 CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	 1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Justificativa.....	1
1.3 - Proposta.....	1
1.4 - Estrutura da Dissertação.....	2
 CAPÍTULO 2: TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	 3
2.1 - Origem das Tensões nos Maciços Rochosos.....	3
2.2 - Determinação das Tensões.....	7
2.2.1 - Medições de Tensões <i>In Situ</i>	18
 CAPÍTULO 3: TEORIA DA DEFORMABILIDADE.....	 20
3.1 - Elasticidade e Deformabilidade dos Maciços Rochosos.....	20
3.2 - Constantes Elásticas dos Maciços Rochosos.....	21
3.3 - Fatores que Influenciam o Módulo de Elasticidade dos Maciços Rochosos.....	 28
 CAPÍTULO 4: IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	 31
4.1 - Ferramenta de Programação: CENTURA.....	31
4.2 - Metodologia Computacional para Cálculo de Tensões Planas em Profundidade.....	 34
4.2.1 - Características Técnicas do Programa.....	34
4.2.2 - Hipóteses Consideradas.....	34
4.2.3 - Organização do Programa.....	35
4.2.4 - Convenção da Numeração dos Nós das Malhas.....	37

4.2.5 - Arquivo dos Materiais.....	38
4.2.6 - Apresentação Detalhada do Programa.....	38
4.2.6.1 - Cadastro dos Materiais.....	39
4.2.6.2 - Cálculo das Tensões.....	40
4.2.6.3 - Geração dos Gráficos.....	43
CAPÍTULO 5: TESTES PARA VALIDAÇÃO DO PROGRAMA.....	46
5.1 - Áreas Trabalhadas e Valores Empíricos Utilizados nos Testes.....	46
5.2 - Dimensões das Malhas e Arquivos de Materiais.....	48
5.3 - Resultados Obtidos.....	49
5.3.1 - Área com 1 Material.....	49
5.3.2 - Área com 4 Materiais Dispostos em Camadas Horizontais...	52
5.3.3 - Área com 5 Materiais Dispostos Aleatoriamente.....	55
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	58
6.1 - Conclusões.....	58
6.2 - Sugestões.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXO.....	63
Código Fonte.....	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Origem e orientação das tensões tectônicas (Zoback <i>et al.</i> ,1989).....	6
Figura 2.2 - Tensões em maciços rochosos (adaptado de NUNES, 2000).....	7
Figura 2.3 - Tensões atuantes em um elemento infinitesimal de um maciço rochoso, considerando o eixo z vertical.....	9
Figura 2.4 - Influência da erosão sobre as tensões horizontais.....	11
Figura 2.5 - Dados de tensões verticais obtidos por diferentes técnicas de medidas <i>in situ</i> para vários locais da Terra (Hoek & Brown, 1980).....	16
Figura 2.6 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical para diferentes profundidades abaixo da superfície (Hoek & Brown, 1980).....	17
Figura 3.1 - Relações tensão-deformação das rochas. Farmer (1968).....	22
Figura 3.2 - Modelos de comportamento tensão-deformação. Vallejo <i>et al</i> (2002).....	23
Figura 3.3 - Curva generalizada tensão-deformação para rochas. Farmer (1968)..	24
Figura 3.4 - Relação entre o módulo de elasticidade e a constante de Poisson, módulo cisalhante e resistência à compressão uniaxial. Farmer (1968).....	28
Figura 3.5 - Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade (Judd e Huber). Farmer (1968).....	29
Figura 4.1 - Sistema de tensões atuantes em cada um dos mosaicos.....	36
Figura 4.2 - Exemplo de uma malha mostrando a convenção da numeração dos nós.....	37
Figura 4.3 - Exemplo do arquivo dos materiais.....	38

Figura 4.4 - Tela principal do programa.....	39
Figura 4.5 - Tela de cadastro dos materiais.....	39
Figura 4.6 - Tela de aviso mostrada quando algum dos campos da tela de cadastro dos materiais não é informado.....	40
Figura 4.7 - Tela para cálculo das tensões.....	41
Figura 4.8 - Tela de aviso mostrada quando algum dos campos da tela para cálculo das tensões não é informado.....	41
Figura 4.9 - Tela para selecionar o arquivo com os tipos de materiais.....	42
Figura 4.10 - Tela para salvar a planilha com os resultados dos cálculos.....	42
Figura 4.11 - Tela mostrada durante o cálculo das tensões.....	43
Figura 4.12 - Telas mostradas após o cálculo das tensões.....	43
Figura 4.13 - Tela para escolha do tipo de gráfico.....	44
Figura 4.14 - Tela para escolha das informações a serem mostradas no gráfico...	44
Figura 4.15 - Tela para selecionar um intervalo do gráfico.....	45
Figura 5.1 - Área trabalhada com um material.....	46
Figura 5.2 - Área trabalhada com quatro materiais dispostos horizontalmente.....	47
Figura 5.3 - Área trabalhada com cinco materiais dispostos aleatoriamente.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores aproximados do peso específico (γ) de rochas comuns na Terra (Goodman,1989).....	16
Tabela 3.1 - Constantes elásticas das rochas. Vallejo (2002).....	27
Tabela 5.1 - Valores das propriedades dos materiais utilizados para testar o programa.....	46
Tabela 5.2 - Valores obtidos para um dos furos (1 material).....	49
Tabela 5.3 - Valores obtidos para um dos furos (4 materiais).....	52
Tabela 5.4 - Valores obtidos para o furo 15 (5 materiais).....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Gráfico para toda a área com um único material. Cada reta corresponde a um furo de sondagem.....	50
Gráfico 5.2 – Gráfico correspondente à tabela 5.2.....	51
Gráfico 5.3 – Gráfico para toda a área com quatro materiais. Cada curva corresponde a um furo de sondagem.....	53
Gráfico 5.4 – Gráfico correspondente à tabela 5.3.....	54
Gráfico 5.5 – Gráfico para toda a área com cinco materiais. Cada curva corresponde a um furo de sondagem.....	56
Gráfico 5.6 – Tensões calculadas em sete diferentes furos de sondagem: furo 1 (azul), furo 10 (verde), furo 13 (azul celeste), furo15 (vermelho), furo 17 (rosa), furo 19 (amarelo) e furo 21 (azul marinho).....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

a : Raio da escavação;

c_2 : Coesão do material da camada 2;

c_N : Coesão do material da enésima camada;

E : Módulo de elasticidade estático;

E_d : Módulo de elasticidade dinâmico;

E_i : Módulo de elasticidade inicial;

E_{L2} : Módulo de elasticidade longitudinal do material da camada 2;

E_{LN} : Módulo de elasticidade longitudinal do material da enésima camada;

E_m : Módulo médio;

E_r : Módulo real;

E_s : Módulo secante;

E_t : Módulo tangente;

E_{T2} : Módulo de elasticidade transversal do material da camada 2;

E_{TN} : Módulo de elasticidade transversal do material da enésima camada;

g : Aceleração da gravidade;

G : Módulo cisalhante;

h : Espessura das camadas horizontais;

K : Módulo de Bulk;

k : Relação entre as componentes horizontal e vertical das tensões gravitacionais;

k_0 : Valor inicial de k ;

k_a : Limite inferior de k ;

k_p : Limite superior de k ;

L : Dimensão do mosaico;

r : Distância a partir da parede lateral da escavação;

z : Profundidade medida desde a superfície;

z_0 : Profundidade inicial de um elemento de rocha;

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$: Deformações cisalhantes;

γ_1 : Peso específico do material da camada 1;

γ_2 : Peso específico do material da camada 2;

γ_N : Peso específico do material da enésima camada;

Δz : Variação da profundidade;
 ε : Deformação;
 ε_{axial} : Deformação na mesma direção da força aplicada;
 ε_{L2} : Deformação longitudinal do material da camada 2;
 ε_{T2} : Deformação transversal do material da camada 2;
 ε_x : Deformação na direção x;
 ε_y : Deformação na direção y;
 ε_z : Deformação na direção z;
 θ_1 : Direção do plano principal maior;
 θ_2 : Direção do plano principal intermediário;
 θ_3 : Direção do plano principal menor;
 λ : Coeficiente de Lamé;
 ν : Coeficiente de Poisson;
 ν_2 : Coeficiente de Poisson do material da camada 2;
 ν_N : Coeficiente de Poisson do material da enésima camada;
 ρ : Densidade da rocha;
 σ_{axial} : Tensão axial aplicada;
 σ_c : Resistência compressiva uniaxial da rocha;
 σ_h : Tensão horizontal;
 σ_{L1} : Tensão longitudinal atuante na camada 1;
 σ_{L2} : Tensão longitudinal atuante na camada 2;
 σ_{N1} : Tensão normal atuante no ponto 1;
 σ_{N2} : Tensão normal atuante no ponto 2;
 σ_{NN} : Tensão normal atuante no ponto N;
 σ_{NN-1} : Tensão normal atuante no ponto N-1;
 σ_p : Resistência de pico;
 σ_r : Resistência residual;
 σ_{T2} : Tensão transversal atuante na camada 2;
 σ_v : Tensão vertical;
 σ_x : Tensão normal na direção x;

σ_{xx} : Tensão normal na direção x;

σ_y : Tensão normal na direção y;

σ_{yy} : Tensão normal na direção y;

σ_z : Tensão normal na direção z;

σ_{zz} : Tensão normal na direção z;

σ_1 : Tensão principal maior;

σ_2 : Tensão principal intermediária;

σ_3 : Tensão principal menor;

τ_{xy} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a x e na direção y;

τ_{xz} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a x e na direção z;

τ_{yx} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a y e na direção x;

τ_{yz} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a y e na direção z;

τ_{zx} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a z e na direção x;

τ_{zy} : Tensão cisalhante atuante no plano perpendicular a z e na direção y;

τ_2 : Tensão cisalhante atuante na camada 2;

φ_N : Ângulo de atrito interno do material da enésima camada;

φ_2 : Ângulo de atrito interno do material da camada 2.

RESUMO

As tensões atuantes em maciços rochosos podem ser tanto de origem natural como induzidas. As tensões de origem natural, ou tensões *in situ*, dividem-se em: gravitacionais, tectônicas, residuais e terrestres. Já as tensões induzidas, são ocasionadas pela ação de obras de engenharia, tais como escavações ou construções. Essas obras alteram o equilíbrio do estado de tensões pré-existente no maciço rochoso, o que implica a necessidade de instalação de um sistema de suporte que garanta a estabilidade e a segurança da estrutura. Este trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo matemático, para corpos elásticos ideais, com o objetivo de prever tensões em maciços rochosos puramente elásticos. Para isso, foi lançado mão da teoria da elasticidade e, por simplificação, considerados apenas os efeitos das tensões gravitacionais. Além disso, foi feita a combinação dos parâmetros físicos e geomecânicos de testemunhos de sondagem e a análise do estado plano de tensões em vários pontos ao longo dos furos de sondagem. No desenvolvimento do modelo proposto foi utilizado, como ferramenta de programação, o CENTURA, também conhecido como SQLWINDOWS, que é uma ferramenta de programação usada no desenvolvimento de sistemas cliente/servidor para o ambiente Microsoft Windows e outras plataformas GUI (Graphical User Interface). Na realização dos testes de validação do programa foram considerados três casos hipotéticos: no primeiro, a área trabalhada apresenta um único material; no segundo, a área trabalhada apresenta quatro materiais dispostos em camadas horizontais, e no terceiro, a área trabalhada apresenta cinco materiais dispostos de maneira aleatória.

Palavras - chave: Tensões gravitacionais, modelo elástico, relacionamento sondagem - tensões *in situ*.

ABSTRACT

Stresses acting on rock mass can be either of natural origin or induced. The natural origin stresses, or *in situ* stresses, are divided into: gravitational, tectonics, waste and land. The induced stresses are caused by the action of engineering works such as excavation or construction. These works alter the balance of the state of pre-existing stresses in the rock mass, which implies in installing a support system that ensures stability and security of the structure. This paper discusses the development of a mathematical model for ideal elastic bodies that aims to provide stresses in rock masses purely elastic. So, in order to achieve this, the theory of elasticity was chosen and, for simplicity, it was considered only the effects of gravitational stress. Furthermore, the combination of physical and geomechanics parameters were made with the drilling samples and the analysis of the state plan of stresses at various points along the drilling. In the development of the proposed model was used, as a tool for programming, the CENTURA, also known as SQLWINDOWS, which is a programming tool used in the development of client / server environment to Microsoft Windows and other platforms GUI (Graphical User Interface). By doing the validating tests of the program, it were considered three hypothetical cases: first, the worked area presents a unique material; second, the worked area presents four materials arranged in horizontal layers, and the third, the worked area presents five materials prepared random way.

Key words: Gravitational tensions, elastic model, relationship between drilling – *in situ* stresses.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

A abertura de uma cavidade na crosta terrestre, tanto a céu aberto como subterrânea, altera o equilíbrio do estado de tensão pré-existente no maciço rochoso, motivando, na maioria dos casos, a necessidade de instalação de um sistema de suporte que garanta a estabilidade e a segurança estrutural.

Segundo Hoek e Brown (1980), uma das principais causas de instabilidade, que pode vir a ocorrer, principalmente em obras subterrâneas, é a existência de excessivas tensões *in situ* (características de rochas rijas e não fraturadas formadas a elevadas profundidades) e/ou de cavidades com grandes dimensões. Assim, a importância da determinação destas tensões é de grande valia nos projetos básicos, executivos e construtivos.

1.2 - Justificativa

Uma das maiores dificuldades encontradas em obras mineiras, quando não instrumentadas, é exatamente a determinação das tensões residuais ou tensões virgens, o que leva, na maioria das vezes, a um super dimensionamento ou sub-dimensionamento dos métodos utilizados para tornar essas obras mais seguras e estáveis durante e após a sua execução.

A razão da não determinação prévia de tais tensões reside nos elevados custos envolvidos e na necessidade de um corpo técnico extremamente especializado para análise e interpretação dos dados então obtidos.

1.3 - Proposta

A proposta, aqui apresentada, é desenvolver um aplicativo (software), seguindo os conceitos da teoria da elasticidade e que, a partir dos conhecimentos de testemunhos de sondagem e levantamentos geoestruturais, associados às características físicas e geomecânicas dos materiais, permita determinar as tensões

virgens com razoável precisão, de modo que se possam dimensionar, de maneira muito mais exata e econômica, os suportes que darão segurança e estabilidade às intervenções. Convém salientar que tal trabalho tratar-se-á de um modelo bidimensional e não tridimensional. Entretanto, acredita-se que o aplicativo proposto, por sua simplicidade operacional e os baixos custos envolvidos na obtenção dos parâmetros elásticos, torne-se acessível a um corpo técnico menos especializado, além de fornecer respostas rápidas, eficientes e simplificadas.

1.4 – Estrutura da Dissertação

Neste primeiro capítulo são apresentadas algumas informações sobre a alteração do equilíbrio do estado de tensões em maciços rochosos, além da justificativa e da proposta apresentada para a realização deste trabalho.

No Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica sobre as tensões em maciços rochosos, onde são discriminadas a origem e os tipos das tensões, bem como as maneiras utilizadas para determiná-las.

O Capítulo 3 trata da elasticidade e deformabilidade dos maciços rochosos, apresentando as relações tensão-deformação existentes nas rochas, as constantes elásticas e os fatores que influenciam o módulo de elasticidade dos maciços rochosos.

O Capítulo 4, que trata da implementação computacional, apresenta uma breve descrição da ferramenta de programação utilizada neste trabalho, além da metodologia computacional usada no cálculo das tensões, onde são discriminadas as características técnicas do programa, as hipóteses consideradas, a organização do programa e a apresentação detalhada do mesmo.

O Capítulo 5 apresenta os testes realizados para a validação do programa, com os três casos hipotéticos considerados e os resultados obtidos para cada um deles.

No Capítulo 6 são relatadas as conclusões gerais do estudo realizado, além de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

2.1 - Origem das Tensões nos Maciços Rochosos

Os estados de tensões, aos quais os maciços rochosos existentes na crosta terrestre estão submetidos, podem ser tanto de formação como induzidos. A tensão de origem natural, ou tensão *in situ*, pode ser definida como sendo a tensão resultante da interação entre o peso próprio do maciço, que gera as tensões gravitacionais; o tectonismo, que gera as tensões tectônicas; os efeitos térmicos e os processos físico-químicos, como a precipitação mineral e a recristalização, que estão constantemente modificando a estrutura das rochas. Os movimentos tectônicos afetam o campo de tensões através da criação de falhas, fraturas e dobramentos, que afetados pela erosão, podem gerar um padrão complexo de direção das tensões tectônicas (Hayett *et al.*, 1986, Herget, 1988).

A tensão induzida é decorrente da redistribuição das tensões pré-existentes provocada pela perturbação do maciço com a implantação de obras de engenharia, como escavações ou construções, as quais são capazes de gerar tensões devido à retirada ou acúmulo de material, respectivamente. No caso das escavações, as tensões pré-existentes são perturbadas de tal forma que novas tensões são induzidas nas proximidades dessas obras. O novo campo de tensões, induzido pela abertura, pode ser representado através de trajetórias de tensões principais, como por exemplo, para um material existente em torno de uma abertura circular numa placa elástica, submetida a um campo de tensões uniaxial (Hoek & Brown, 1982).

As tensões principais são perturbadas nas proximidades da abertura, não sendo mais afetadas após uma determinada distância desta abertura, isto é, fora da zona de influência da escavação onde as tensões existentes são denominadas como tensões induzidas.

O estado de tensão natural das rochas (tensões pré-existentes) é perturbado quando são executadas escavações, as quais induzem a uma redistribuição de tensões, resultando no rompimento gradativo das rochas (convergências e/ou divergências da superfície escavada), desmoronamento de paredes de poços ou explosão da rocha em cavidades (Mioto e Coelho, 1998).

Tensão residual é o termo usado para qualificar o estado de tensão que permanece no maciço rochoso ao término do mecanismo que lhe deu origem. Este tipo de tensão é auto-equilibrado. Tanto o peso próprio do maciço como o tectonismo podem gerar tensão residual. Isto ocorre devido ao fato de que em profundidade, o nível de pressão e a temperatura em que são formadas as rochas muitas vezes diferem bastante das condições apresentadas pelo ambiente em que elas se encontram atualmente. Os maciços constituídos por rochas metamórficas, por exemplo, podem apresentar estruturas geológicas e conteúdos mineralógicos indicativos de que essas rochas se formaram em grandes profundidades e foram submetidas a altas pressões e temperaturas. Quando, por algum motivo, as rochas que se formaram em grandes profundidades se encontram em profundidades menores e submetidas a temperaturas mais baixas, as tensões, em muitos casos, não são totalmente aliviadas, restando ainda esforços "acumulados" nos maciços (as tensões residuais).

Um exemplo típico da ocorrência de tensões residuais pode ser observado em maciços submetidos a períodos de glaciação ou ciclos erosivos relativamente rápidos, nos quais a espessura do material preexistente origina tensões na superfície rochosa que não são totalmente aliviadas durante os períodos de degelo ou erosão, permanecendo, assim, tensões de alto valor. Como a origem dessas tensões pode estar relacionada a diferentes fontes, o conceito de tensões residuais tem sido utilizado de forma bem ampla, como tensões em equilíbrio, confinadas no interior de corpos finitos e na ausência de tensões superficiais externas, estas últimas podendo ser impostas às tensões residuais (Hoek & Brown, 1994).

Tensão gravitacional corresponde ao estado de tensão devido somente ao peso da rocha sobrejacente a um ponto ou ao plano do maciço rochoso. A tensão vertical pode ser determinada através dos registros de densidade (Bruce, 1990).

Desconsiderando-se o confinamento lateral, à medida que aumenta a profundidade em um maciço rochoso, o peso de uma coluna de rocha em um determinado ponto gera tensões que aumentam com a espessura e o peso do material sobreposto. Essas tensões, que têm direção normal com sentido para o centro da terra, podem ser consideradas, neste caso hipotético, como uma das

ensões principais, desde que não exista nenhum efeito provocado por processos tectônicos ativos, topografia ou estruturas geológicas.

A tensão tectônica corresponde ao estado de tensão devido ao deslocamento relativo entre placas litosféricas ou a outro processo geológico da dinâmica interna terrestre, sendo muito difícil de ser prevista, em relação à grandeza e à direção, a menos que tenham ocorrido recentes movimentos tectônicos e atividade sísmica. As tensões horizontais que são, com frequência, maiores que as tensões verticais, devido à presença de tensões tectônicas, podem ter seus valores máximos obtidos com bons conhecimentos das atividades tectônicas da área. Numa área tectonicamente relaxada é mais comum assumir que as tensões horizontais são equivalentes, isto é, $\sigma_2 \approx \sigma_3$. Num ambiente tectônico, em que as tensões são desiguais, a razão entre as tensões pode ser estimada pelo “breakout” do poço (ruptura do poço por excesso de tensões) ou por estimulação do movimento do campo tectônico (Herget, 1988).

As tensões tectônicas são originadas por um conjunto de processos geológicos que atuam na litosfera e refletem-se em sua camada mais superficial, que apresenta espessura entre 6 e 35 km e é denominada de crosta rígida (Park, 2002).

A orientação dessas tensões, obtida principalmente através de mecanismos focais de terremotos, análises de estruturas geológicas, análises de rupturas externas, medidas *in situ* e alinhamentos de vulcões ativos, tem sido relacionada aos diferentes ambientes geotectônicos existentes na crosta terrestre. Através da figura 2.1, Zoback *et al.* (1989) apresentam, de maneira simplificada, a origem e orientação das tensões tectônicas existentes na crosta rígida da Terra.

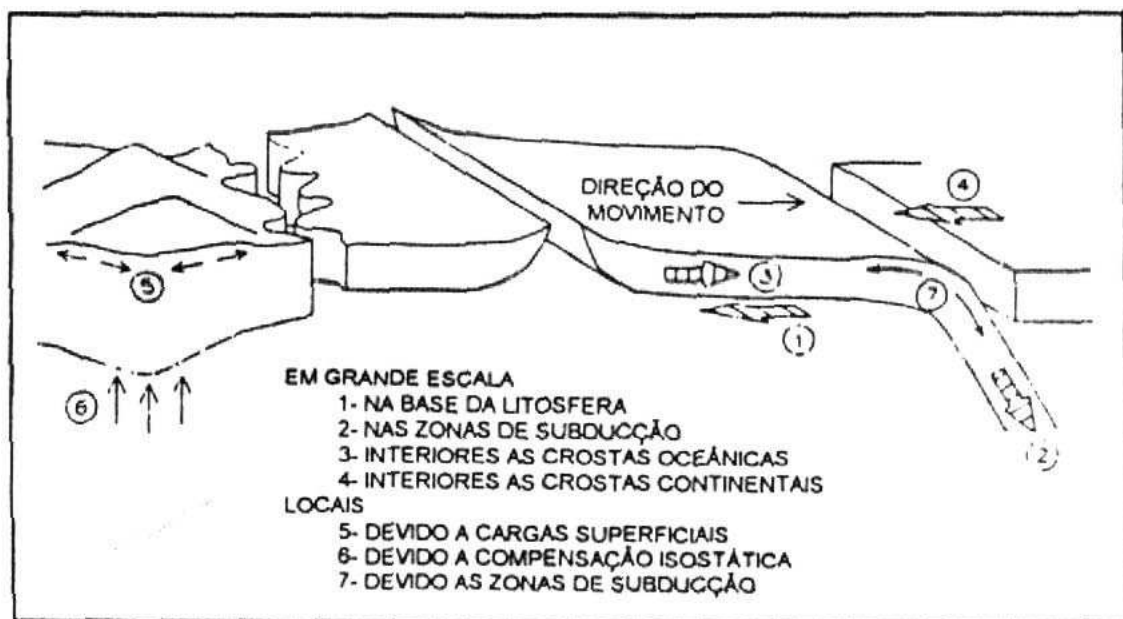


Figura 2.1 - Origem e orientação das tensões tectônicas (Zoback *et al.*, 1989).

Tensão térmica é um estado de tensões estabelecido pela variação de temperatura (Herget, 1988, Mito e Coelho, 1998), ou seja, o aquecimento e o resfriamento da superfície das rochas expostas a variações diurnas ou sazonais da temperatura ambiente, bem como o aquecimento devido a fontes de calor como a radioatividade ou ainda processos geológicos como intrusões magmáticas, por exemplo, geram tensões devido à expansão e à contração dos grãos minerais com diferentes propriedades termoelásticas. As tensões geradas devido à expansão volumétrica da água, quando congelada no interior de microfissuras existentes nas rochas, é um exemplo de tensões consideradas de origem térmica.

Segundo Goodman (1980), o estado de tensões da massa rochosa é espacialmente variável em função da presença de feições estruturais (tais como falhas) ou da variação local nas propriedades da rocha. O atual estado de tensões que atua em um determinado elemento da crosta terrestre deve ser função não apenas das condições atuais de carregamento, mas também do caminho de tensões definido pelo histórico geológico do maciço rochoso. As condições atuais de carregamento são a gravidade e os processos não tectônicos que atuam na crosta terrestre. Por sua vez, o caminho de tensões definido pela história geológica do maciço é função das variações térmicas, dos processos físico-químicos e dos movimentos tectônicos passados. Portanto, o estado natural de tensão resulta de sucessivos eventos, ocorridos durante a história geológica do maciço rochoso, correspondendo ao produto de vários estados de tensões anteriores.

Segundo Nunes (1998), são grandes as dificuldades de se medirem as tensões *in situ*, pois a distribuição destas varia consideravelmente nos maciços rochosos, sendo muitas vezes impossível de serem obtidas na escala de um problema de engenharia.

A figura 2.2 resume esquematicamente os tipos e as causas das tensões em maciços rochosos.

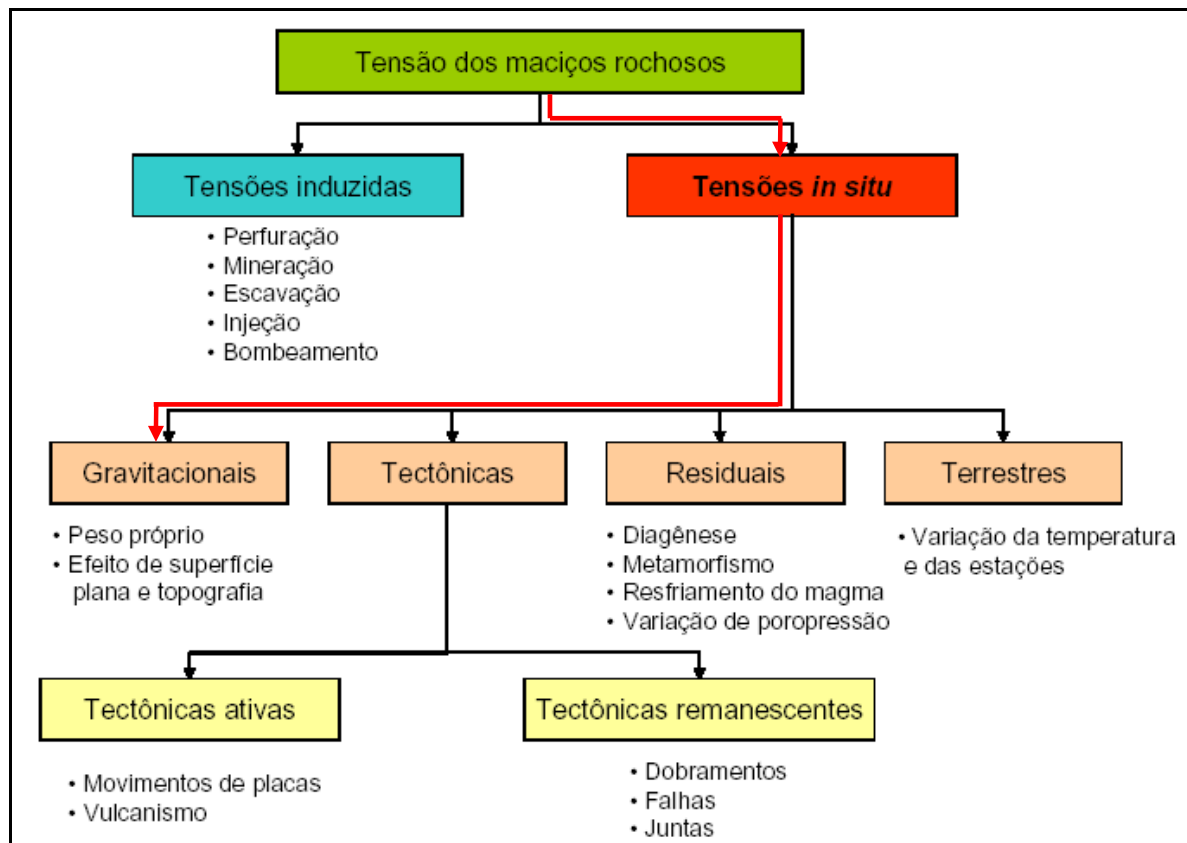


Figura 2.2 - Tensões em maciços rochosos (adaptado de NUNES, 2000).

O presente trabalho abordará as tensões *in situ* gravitacionais, como indicado pelas linhas vermelhas na figura 2.2.

2.2 – Determinação das Tensões

Um ponto no interior de um maciço rochoso está submetido a um estado tridimensional de tensões formado por várias componentes de diferentes origens. Assim, o termo tensões *in situ* é utilizado para denominar as tensões de qualquer natureza que estão presentes no interior de um maciço rochoso.

O estado de tensões em um ponto é completamente definido pela grandeza e direção das três componentes principais de tensão. Para isto, o problema pode ser formulado de duas maneiras: na primeira, é necessário conhecer as seis componentes de um tensor 3D (Eq.1), o que define completamente o tensor de tensões principais. Na segunda, é preciso conhecer as grandezas e as direções das três tensões principais (Eq.2), totalizando também seis incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}; \text{ onde } \tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx} \text{ e } \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \text{Direções principais} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para solucionar o problema exposto, isto é, para se determinar as tensões apresentadas anteriormente, normalmente utilizam-se modelos matemáticos ou métodos de medidas *in situ*. Os modelos matemáticos representam um conjunto de métodos para estimar as tensões, a partir de algumas hipóteses simplificadoras, estabelecidas, principalmente, quanto ao comportamento mecânico do maciço. Uma das vantagens dos modelos matemáticos é a de poder analisar, por exemplo, quais os efeitos provocados pela anisotropia, heterogeneidade e topografia do maciço rochoso.

As tensões gravitacionais representam um bom exemplo de componentes de tensão que podem ser determinadas por cálculo direto, utilizando um modelo matemático simplificado, aplicado a um meio contínuo, linear e elástico. Este modelo utiliza as equações de equilíbrio da elasticidade, aplicadas a um maciço submetido apenas à ação da gravidade. Considerando um elemento infinitesimal, para o qual se assume um sistema de eixos (x, y, z) com o eixo z na direção vertical (figura 2.3), Jaeger & Cook (1969) apresentam o cálculo da tensão na direção do eixo vertical, adotando a única hipótese de deformação uniaxial na direção vertical ($\varepsilon_z \neq 0$), não existindo nenhum deslocamento ou deformação horizontal ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$).

Assim, tomando-se as componentes das forças de massa nas direções X e Y como nulas e na direção Z como o peso das camadas de rocha sobrejacentes, as equações de equilíbrio elástico são então satisfeitas por:

$$\tau_{xy} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0 \text{ e } \sigma_z = \rho \cdot g \cdot z \quad (3)$$

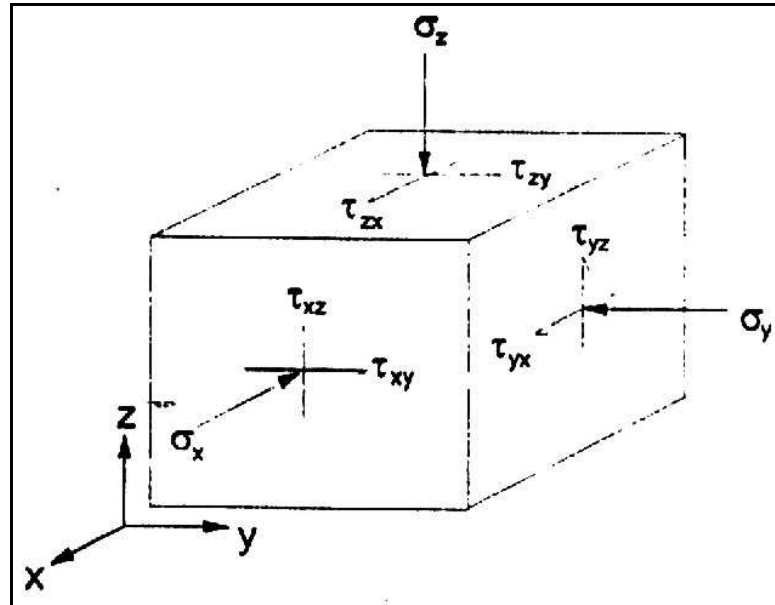


Figura 2.3 - Tensões atuantes em um elemento infinitesimal de um maciço rochoso, considerando o eixo z vertical.

Dessa forma, a grandeza da tensão gravitacional, na direção do eixo z, pode ser calculada diretamente através do produto do peso específico da rocha (γ) pela profundidade (z) abaixo da superfície até o ponto onde se deseja conhecer as tensões. Aplicando este mesmo raciocínio a um maciço rochoso, considerado como um espaço semi-infinito, com uma topografia plana horizontal, constituído por camadas horizontais de espessura h, a tensão vertical σ_v (na direção do eixo z) pode ser calculada como o somatório do produto do peso específico de cada camada por sua respectiva espessura (Eq. 4).

$$\sigma_v = \sum \gamma_i \cdot h_i, \quad \text{com } i = 1 \dots n \quad (\text{Eq. 4})$$

Adotando-se a formulação do problema como na equação 2, nota-se que a tensão vertical encontrada é uma tensão principal, pois, no plano horizontal não atuam tensões cisalhantes. Para definir completamente o tensor 3D resta calcular a tensão horizontal σ_h . Neste caso, se um ponto "P" qualquer está submetido apenas

à tensão vertical e não está confinado, podendo deformar-se horizontalmente, então o valor σ_v corresponde a uma tensão principal ocasionada por um campo de tensões gravitacionais unidimensional. No entanto, os pontos situados no interior do maciço rochoso estão confinados horizontalmente, de modo que as tensões verticais geram componentes horizontais (Eq. 5), em razão da deformação transversal que o corpo sofre, o que constitui um campo de tensões gravitacionais bidimensional.

$$\sigma_h = (\nu / (1 - \nu)) \cdot \sigma_v, \quad \text{onde } \nu \text{ é o coeficiente de Poisson (Eq. 5)}$$

Sendo assim, se a hipótese de deformação lateral nula é feita e considerando que o material é elástico, linear e isotrópico, tem-se que $\sigma_x = \sigma_y = (\nu / (1 - \nu)) \cdot \sigma_z$. Como ν varia entre 0 e 0,5 (material elástico), tem-se que $\sigma_x = \sigma_y \leq \sigma_z$ e, conseqüentemente $\sigma_v = \sigma_z = \sigma_1$ e $\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 = \sigma_3$.

A relação entre as componentes horizontal e vertical das tensões gravitacionais é determinada por uma constante k característica do local abordado, ou seja, $k = \sigma_h / \sigma_v$. O valor desta constante, segundo Terzaghi, depende da história geológica do maciço rochoso, podendo variar tanto com a profundidade, como na direção horizontal numa mesma profundidade. Este mesmo autor sugere que o valor de k dado anteriormente, $k = \nu / (1 - \nu)$, deve ser adotado apenas para regiões com topografia horizontal, com maciços apresentando um comportamento elástico e isotrópico, tectonicamente não perturbados, onde as tensões geradas no plano horizontal são iguais e não existem deformações nessas direções. A temperatura deve permanecer constante desde a deposição e as camadas não devem estar submetidas a cargas temporárias (gelo ou camadas removidas por erosão). Assim, se ν tem valor aproximado de 1/4, as tensões horizontais são da ordem de 1/3 das tensões verticais.

Se um maciço rochoso com as mesmas características dadas anteriormente tiver suas camadas removidas por erosão (figura 2.4), as tensões horizontais podem aumentar em relação à vertical. Considerando um elemento de rocha na profundidade z_0 e com valor inicial de $k = k_0$, tem-se o valor de σ_v inicial dado por $\gamma \cdot z_0$ e o valor de σ_h dado por $k_0 \cdot \gamma \cdot z_0$. Após a remoção do material sobreposto de

espessura Δz (variação da profundidade), o elemento de rocha encontra-se em uma nova profundidade z . Devido ao descarregamento da tensão vertical de $\gamma \cdot \Delta z$, a tensão horizontal tem seu valor reduzido de $\gamma \cdot \Delta z \cdot (\nu/(1-\nu))$.

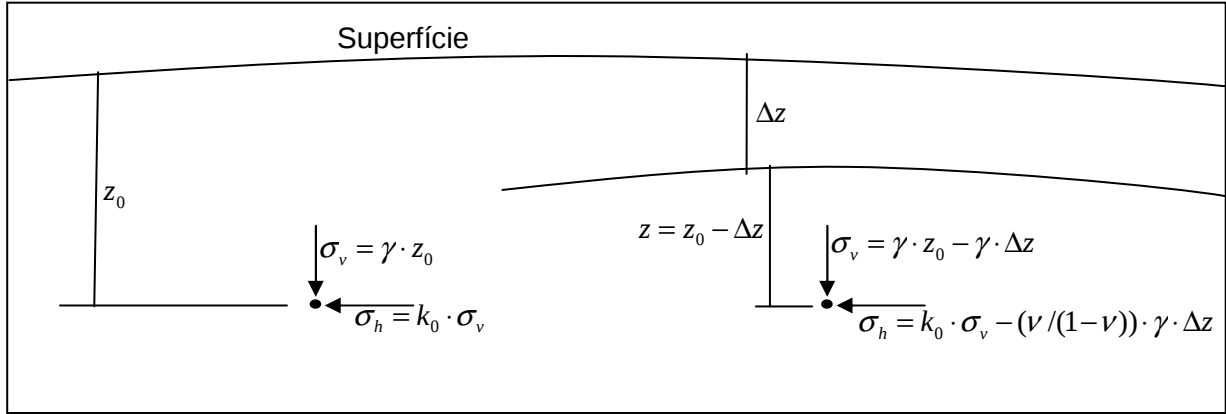


Figura 2.4 – Influência da erosão sobre as tensões horizontais.

Sendo assim, após a erosão, os valores das tensões vertical e horizontal são expressos de acordo com as equações 6 e 7 e o novo valor de k é dado pela equação 8 a seguir:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z_0 - \gamma \cdot \Delta z = \gamma \cdot z \quad (6)$$

$$\sigma_h = k_0 \cdot \gamma \cdot z_0 - (\nu/(1-\nu)) \cdot \gamma \cdot \Delta z \quad (7)$$

$$k(z) = \{[k_0 \cdot z_0 - (\nu/(1-\nu))] \cdot \Delta z\} / z \quad (8)$$

A erosão tende a aumentar o valor de k e a tensão horizontal torna-se maior do que a vertical, indicando, desde que não hajam esforços tectônicos envolvidos, a presença de tensões consideradas como residuais. Goodman (1989) demonstra que, embora o valor da tensão vertical seja sempre calculado como $\gamma \cdot z$, o valor da tensão horizontal situa-se num intervalo dado por dois extremos, onde o valor extremo inferior é dado por $k_a \cdot \sigma_v$ e o valor extremo superior é dado por $k_p \cdot \sigma_v$, o que correspondem respectivamente, aos limites no qual ocorre uma falha normal ou uma falha de empurrão. É importante notar que a presença de tensões horizontais maiores que as tensões verticais podem representar exclusivamente um descarregamento de tensões gravitacionais, sem qualquer influência de mecanismos tectônicos.

As tensões de origem tectônica podem ocorrer mesmo em regiões consideradas tectonicamente inativas ou estáveis. Termos como "tectonicamente não perturbadas", "passivas" ou "estáveis" não indicam ausência de tensões tectônicas, mas referem-se apenas a regiões que não apresentam atividade sismotectônica atual. O valor dessas tensões pode ser estimado através de modelos matemáticos, desde que, seja adotada uma série de aproximações. É importante salientar também que nos cálculos desses casos, são feitas várias hipóteses, como por exemplo, a de que as únicas tensões horizontais existentes são devido ao peso do maciço.

Nesses modelos, utilizados para calcular as tensões gravitacionais, residuais e tectônicas, vale lembrar que a temperatura deve permanecer constante desde a deposição das camadas geológicas, ou seja, desde a formação das rochas consideradas. Isto se deve ao fato de que, um meio sólido quando submetido a variações de temperatura pode transferir calor de um ponto a outro expandindo ou contraindo seu volume, dando origem a tensões térmicas. Considerando um maciço rochoso como um meio unicamente sólido, a condução de calor num ponto interior a esse meio, estabelecida pela Lei de Fourier, indica o fluxo de calor na direção da diminuição da temperatura, indo da superfície de maior temperatura para a de menor temperatura.

Conforme visto anteriormente, o cálculo das tensões naturais sejam elas de origem gravitacional, tectônica, residual ou térmica, pode ser feito através de modelos matemáticos, que possibilitem também o cálculo das tensões induzidas por escavações subterrâneas realizadas em maciços rochosos. Para uma escavação circular em um meio isotrópico e homogêneo, considerando uma situação de deformação plana, onde o campo de tensões é dado por σ_v e σ_h (vertical e horizontal), pode se determinar as tensões em qualquer ponto em torno da escavação. A influência da escavação no campo de tensões naturais, existentes na pré-escavação, diminui rapidamente a partir de um valor $r = 3a$ (onde a é o raio da escavação e r é a distância a partir da parede lateral da escavação) e a relação entre a tensão tangencial à escavação e a tensão vertical passa a ser muito próxima da unidade, ou seja, a essa distância da escavação, as tensões naturais não seriam mais perturbadas pela mesma (Hoek & Brown, 1982).

Uma outra situação comum é a existência de escavações com uma forma aproximadamente elíptica. Conforme apresentam Hoek & Brown (1982), o cálculo das tensões tangenciais nas proximidades de uma escavação em um meio elástico, homogêneo e isotrópico, submetido a um campo de tensões biaxial, pode ser feito através de equações, utilizando-se os raios de curvatura da seção elíptica da escavação.

A determinação das tensões de origem natural ou induzida através da utilização de modelos matemáticos tem possibilitado também uma avaliação dos aspectos que podem influenciar na grandeza e orientação das tensões *in situ*. Normalmente as rochas apresentam planos bem definidos, que podem contribuir para uma anisotropia dos parâmetros de deformabilidade. No caso de rochas sedimentares, essa anisotropia pode aparecer como função da presença de microestruturas formadas durante a sedimentação das camadas geológicas. Em rochas ígneas o comportamento anisotrópico deve-se à presença de foliações formadas pela orientação de minerais ou agregados de minerais ou no caso de rochas graníticas, a anisotropia relaciona-se diretamente à presença de microfissuras. Rochas metamórficas são normalmente as que apresentam maior anisotropia, pois possuem estruturas geradas por deformações que a rocha sofreu durante a sua formação.

A não consideração da anisotropia de deformabilidade no cálculo das tensões gravitacionais pode, teoricamente, introduzir erros significativos. Através de ensaios de laboratório ou campo, é possível verificar se a rocha apresenta diferentes propriedades de deformabilidade em direções distintas, possibilitando, assim, a utilização de um modelo que melhor represente esta anisotropia. Dentro deste contexto, Amadei *et al.* (1987, 1988), Amadei & Pan (1992) introduziram a anisotropia no cálculo das tensões gravitacionais, analisando maciços transversalmente isotrópicos. Nessas análises esses autores não consideram o efeito de uma superfície topográfica irregular, consideram o maciço rochoso com um comportamento linear elástico e homogêneo, com uma superfície topográfica horizontal.

Esses autores demonstram através de uma análise paramétrica que, dependendo das propriedades elásticas dos maciços anisotrópicos, bem como da

orientação dos planos de anisotropia, as componentes horizontais de tensão podem ser maiores, iguais ou menores que a componente vertical, resultado, este, bastante diferente do obtido para maciços isotrópicos.

Amadei *et al.* (1988) apresentam soluções analíticas para o cálculo das tensões de origem gravitacional em maciços heterogêneos constituídos por camadas horizontais homogêneas, isotrópicas ou transversalmente isotrópicas, demonstrando que o coeficiente k pode variar apenas entre 0 e 1, se a camada for considerada isotrópica. No entanto, este coeficiente pode ser maior, igual ou menor que a unidade, quando a camada for considerada transversalmente isotrópica. Este resultado, obtido adotando-se a hipótese de deformação uniaxial na direção vertical, significa que uma componente horizontal pode ser uma tensão principal maior em uma camada e ser uma tensão principal menor na camada inferior (Rolim Filho – comunicação pessoal).

É notório que a idealização de uma superfície topográfica horizontal, para o cálculo de tensões gravitacionais, pode introduzir erros significativos. Segundo Pan & Amadei (1993), nas regiões próximas à superfície, na ausência de cargas superficiais aplicadas, as tensões principais são paralelas e perpendiculares à superfície exposta do maciço rochoso, tendendo às direções vertical e horizontal em regiões profundas. Este efeito deve-se a influência da topografia sobre as tensões gravitacionais. Quando são aplicadas cargas superficiais, a trajetória das tensões principais sofre influência desse carregamento.

A influência da topografia do maciço rochoso no cálculo das tensões gravitacionais tem sido estudada por vários pesquisadores como Mctigue & Mei (1981), Savage *et al.* (1985), Liu *et al.* (1992), Pan & Amadei (1994) e Pan *et al.* (1994), e mostram que as expressões para obtenção das tensões gravitacionais em maciços isotrópicos e homogêneos, considerando a topografia representada por extensas e simétricas elevações e vales (condição de deformação plana), dependem tanto da geometria do maciço quanto do coeficiente de Poisson. Para maciços isotrópicos, esses autores mostram que tensões horizontais compressivas, com grandeza maior do que as tensões verticais podem desenvolver-se nas proximidades das linhas de crista das elevações, diminuindo em função do aumento do coeficiente de Poisson, e que tensões horizontais de tração, as quais se tornam

compressivas devido ao aumento do coeficiente de Poisson, podem desenvolver-se sob os vales topográficos.

Conforme visto, a determinação do campo de tensões gravitacionais deve levar em consideração os possíveis efeitos causados pela heterogeneidade e topografia. Além disso, em muitas regiões da Terra, o tectonismo não pode ser desprezado e deve ser adicionado na determinação das tensões existentes no interior dos maciços rochosos. Da mesma forma, que para as tensões gravitacionais, a anisotropia, a heterogeneidade e a topografia são aspectos que podem modificar o estado de tensões induzido pelo tectonismo.

O cálculo das tensões existentes no interior dos maciços rochosos através de modelos matemáticos tem possibilitado, sobretudo, uma avaliação dos efeitos causados pela anisotropia e pela topografia na grandeza e direção das tensões *in situ*. Entretanto, para o caso de maciços rochosos constituídos por rochas anisotrópicas e heterogêneas, apresentando uma topografia irregular, submetidos a tensões de diferentes origens, o cálculo das tensões torna-se bastante complexo. Nestes casos, técnicas de medidas *in situ* têm sido muito utilizadas, uma vez que elas determinam o estado absoluto de tensões existente no maciço, ou seja, as tensões totais que existem no interior do maciço rochoso.

Hoek & Brown (1980) apresentam uma compilação de várias medidas de tensões *in situ*, realizadas em várias regiões da Terra e utilizando diferentes técnicas de medição. Na figura 2.5, esses autores mostram a variação da tensão vertical (σ_z) com a profundidade (z), onde se pode verificar que as tensões verticais medidas seguem uma tendência dada por uma relação linear, na qual:

$$\sigma_z = 0,027 \cdot z; \quad \text{onde } \sigma_z \text{ (Mpa) e } z \text{ (m)} \quad (21)$$

Isso confirma, de certo modo, o cálculo através de $\gamma \cdot z$, visto que os valores de γ das rochas encontradas na crosta terrestre, de acordo com Goodman (1989), permanecem aproximadamente entre 0,020 MPa/m e 0,030 MPa/m (tabela 2.1). Ou seja, a grandeza das tensões verticais pode ser estabelecida, a grosso modo, como função do produto de uma constante (γ) pela profundidade.

Rocha	γ (MPa/m)
Sienito	0,025
Granito	0,026
Gabro	0,029
Sal	0,020
Calcário	0,020
Mármore	0,027
Anfibolito	0,029
Basalto	0,027

Tabela 2.1 - Valores aproximados do peso específico (γ) de rochas comuns na Terra (Goodman,1989).

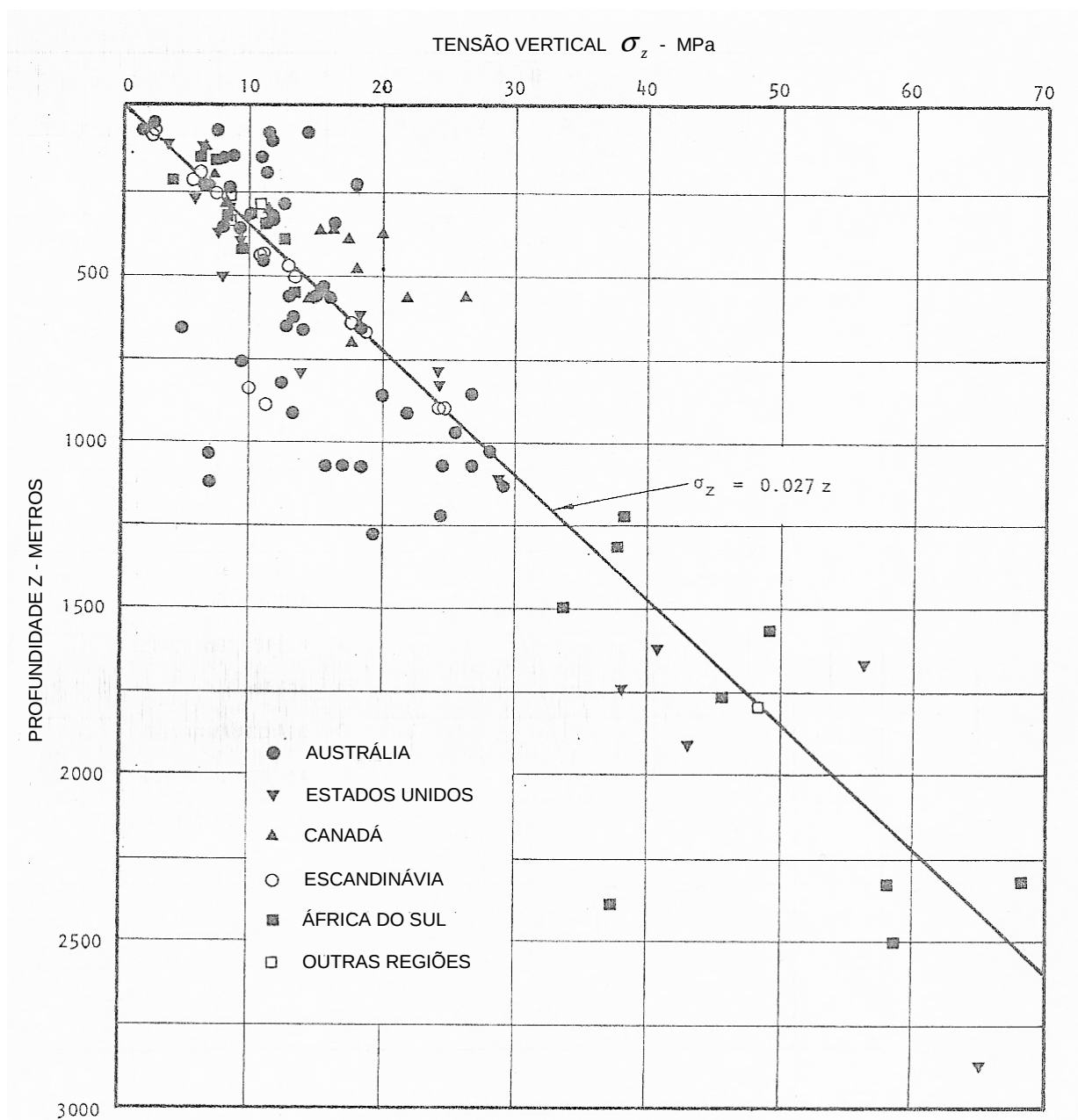


Figura 2.5 - Dados de tensões verticais obtidos por diferentes técnicas de medidas *in situ* para vários locais da Terra (Hoek & Brown, 1980).

Na figura 2.6 percebe-se uma grande dispersão dos valores para profundidades menores que 1000m, em que k pode variar de 0,5 até 3,5. Para as profundidades menores que 500m, as tensões horizontais apresentam valores significativamente maiores do que as tensões verticais.

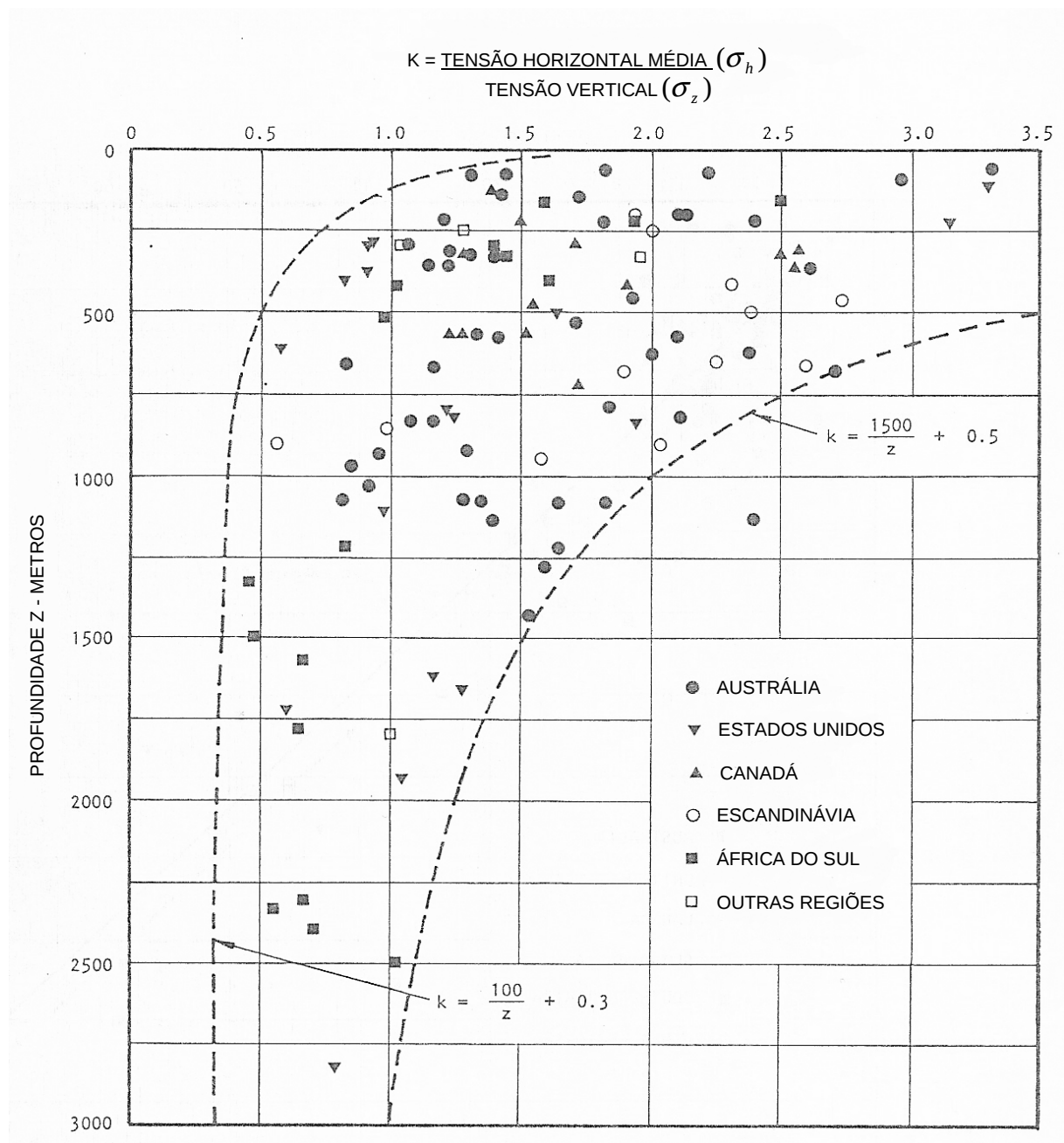


Figura 2.6 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical para diferentes profundidades abaixo da superfície (Hoek & Brown, 1980).

Cabe ressaltar que as tensões geradas no plano horizontal muitas vezes não são iguais. Em muitos casos existe uma diferença significativa entre as tensões horizontais em diferentes direções. Evidentemente quando as tensões no plano horizontal foram consideradas iguais e o valor de k sugerido da ordem de 1/3, fez-

se uma série de hipóteses simplificadoras sobre as características e comportamento do maciço. O aspecto mais importante a ser evidenciado aqui é a presença de tensões horizontais altas (maiores do que as componentes verticais) nas partes mais superficiais da crosta terrestre.

Apesar dos pesquisadores em Mecânica de Rochas atribuírem a presença de altas tensões horizontais na parte superficial da crosta terrestre a causas tectônicas, outros fatores podem também ser responsáveis pela ocorrência das mesmas, como por exemplo, a curvatura do planeta e a espessura da crosta rígida.

2.2.1 – Medições de Tensões *In Situ*

Os trabalhos pioneiros no desenvolvimento de técnicas de medição de tensões *in situ*, datam da década de 50 e 60, quando foram apresentadas as técnicas do fraturamento hidráulico, do macaco plano e técnicas baseadas na sobrefuração (ISRM, 1987). Pelo fato da tensão não ser medida diretamente, essas técnicas baseiam-se nas "respostas" dadas pelos maciços rochosos quando perturbados de alguma forma. Essas respostas geralmente são medidas em forma de deslocamento ou deformação.

Apresenta-se a seguir um resumo das técnicas de medidas *in situ* existentes atualmente, dividindo-as da seguinte maneira:

1) Técnicas baseadas no princípio do restabelecimento:

- Macaco Plano (Flat Jack - FJ);
- Mini Macaco Plano (Small Flat Jack - SFJ);

2) Técnicas baseadas no princípio da recuperação:

- Pinos de Referência;
- Variação do diâmetro dos furos:
 - Célula BDG (Borehole Deformation Gage) do U.S. Bureau of Mines;
 - Célula com Apalpadores;
 - Célula da Universidade de Liège;
 - Célula Japonesa (Central Research Institute of Electric Power

- Industry of Japan);
- Célula do CERCHAR (Centre de Recherches de Charbonnages);
- Deformação da parede dos furos:
 - Célula do CSIR (Council for Scientific and Industrial Research) ou Célula de Leeman;
 - Célula CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization);
 - Célula SSPB (Swedish State Power Board);
 - Célula LUH (Universidade de Tecnologia Lulea);
 - Borehole Slotter;
 - Jack Fracturing;
- Deformações no fundo dos furos:
 - Célula Doorstopper;
 - Célula CEJM (Cellule Extensométrique à Jauges Multiples);
 - Célula Hemisférica;

3) Técnicas baseadas no princípio do fraturamento:

- Fraturamento Hidráulico;
- Fraturamento Dilatométrico;
- Borehole Breakouts;
- Remaniement des carottes;

4) Técnicas baseadas em outros princípios:

- Velocidade Sônica;
- Efeito Kaiser.

Cada uma dessas técnicas obviamente possui vantagens e desvantagens, sobretudo em função do custo operacional, do grau de precisão, das limitações em relação ao grau de fraturamento, alteração ou saturação do maciço rochoso, da profundidade de realização das medidas, do conhecimento prévio da orientação das tensões principais e em relação ao modelo de interpretação. Este último refere-se, principalmente, a possibilidade ou não de se introduzir, na determinação das tensões principais (grandeza e direção), os efeitos que podem ser causados por um comportamento não linear anisotrópico ou heterogêneo do maciço rochoso.

CAPÍTULO 3: TEORIA DA DEFORMABILIDADE

3.1 - Elasticidade e Deformabilidade dos Maciços Rochosos

A deformabilidade é considerada um dos parâmetros mais importantes que rege o comportamento dos maciços rochosos. Vallejo *et al* (2002) define a deformabilidade como a propriedade que a rocha tem para alterar sua forma como resposta à ação de esforços. Dependendo da intensidade das forças e das características mecânicas da rocha, a deformação será permanente ou elástica. Neste último caso o corpo recupera sua forma original quando as forças aplicadas deixam de agir.

Na prática, o comportamento elástico ou não de um material depende fundamentalmente de três fatores: a homogeneidade, a isotropia e a continuidade.

Homogeneidade é a medida da continuidade física do corpo, por isso em um material homogêneo os constituintes estão distribuídos de tal forma que qualquer parte do corpo tenderá às propriedades representativas de todo o material (Vallejo *et al*, 2002).

A isotropia é a medida das propriedades direcionais do material, isto é, ela indica que o material possui propriedades iguais em qualquer direção. Assim, as rochas por terem uma orientação preferencial, em maior ou menor intensidade, dos minerais constituintes, seriam anisotrópicas e reagiriam diferentemente à ação de esforços aplicados, a depender das direções e do grau de anisotropia, e escala usada (Vallejo *et al*, 2002).

A continuidade pode ser tomada como referência para a quantidade de juntas, trincas e espaços entre os corpos constituintes de um maciço rochoso. O grau de continuidade afetará sua coesão e conseqüentemente a transmissão da distribuição de tensões através do corpo (Obert *et al*, 1967).

Nenhuma rocha é perfeitamente elástica, pois todas elas apresentam anisotropia, heterogeneidade e descontinuidades.

Os métodos para determinação da deformabilidade de um maciço rochoso podem ser classificados em diretos e indiretos. No primeiro, estão incluídos os ensaios *in situ* e no segundo, os métodos geofísicos associados a uma série de correlações empíricas envolvendo semelhanças com experimentos consagrados.

Amadei & Stephansson (1997), Vallejo *et al* (2002) mencionam que os métodos de determinação da deformabilidade mais adequados, num maciço rochoso, são os ensaios *in situ*, apesar dos diferentes métodos não estarem suficientemente estudados para reconhecer o grau de representatividade de todos eles.

Goodman (1989) discute a utilização do módulo de elasticidade no lugar do módulo de deformabilidade, indicando que as propriedades de deformabilidade englobam deformações recuperáveis (elásticas) e não recuperáveis (não elásticas), salientando que quando calculado no trecho virgem da curva de carregamento deve ser considerado como módulo de elasticidade, o que não é feito comumente na prática. Além disso, o módulo de elasticidade tem sido obtido na fase de descarregamento.

No descarregamento, a inclinação do módulo de elasticidade depende do carregamento aplicado.

3.2 - Constantes Elásticas dos Maciços Rochosos

Define-se o comportamento tensão-deformação de um corpo através da relação entre as tensões aplicadas e as deformações produzidas. Esta relação se refere à maneira como o corpo rochoso se deforma e como varia o seu comportamento durante a aplicação do carregamento.

As rochas apresentam relações não lineares entre as forças aplicadas e as deformações produzidas a partir de um determinado nível de tensões, obtendo-se diferentes modelos de curvas tensão-deformação para os distintos tipos de rochas.

O comportamento tensão-deformação das rochas é dividido, segundo Farmer (1968), em três tipos: um comportamento quase elástico, apresentado por rochas

maciças, compactas e de grão fino. Estas rochas (ígneas hipoabissais, extrusivas e algumas metamórficas de grão fino) aproximam-se de certa maneira das propriedades de um material elástico frágil apresentando um comportamento tensão-deformação quase linear até o ponto de falha (figura 3.1.a); as rochas menos elásticas são as rochas ígneas de grão mais grosso e as rochas sedimentares compactas de grão fino, as quais apresentam porosidade baixa e coesão em níveis razoáveis. Estas rochas são chamadas de rochas semi-elásticas e apresentam uma relação tensão-deformação no qual a inclinação da curva (que seria equivalente ao módulo de elasticidade com condições de carregamento definido) decresce com o incremento das tensões (figura 3.1.b).

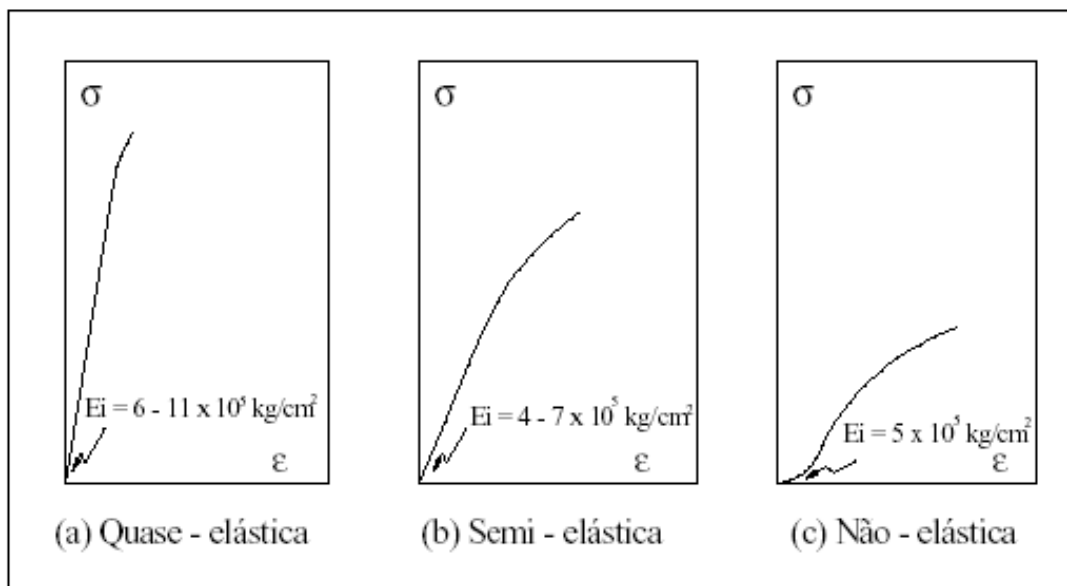


Figura 3.1 – Relações tensão-deformação das rochas. Farmer (1968).

As rochas não elásticas incluem as rochas menos coesivas, com porosidade alta, como as rochas sedimentares de resistência coesiva baixa. A curva (figura 3.1.c) geralmente exibe uma zona inicial caracterizada por um incremento da inclinação, conforme se aumenta o carregamento, o qual indica que a rocha começa a passar por um processo de compactação e fechamento das fissuras, antes que ocorra alguma deformação quase linear.

O comportamento tensão-deformação das rochas é classificado por Vallejo *et al* (2002), Goodman (1989), Brady & Brown (1994), *et al* a partir do que acontece quando o carregamento aplicado supera a resistência de pico (tensão máxima que uma rocha pode suportar em certas condições de carregamento) do material.

Quando a resistência da rocha diminui drasticamente até valores próximos de zero (figura 3.2.1) tem-se o comportamento frágil. Este comportamento é típico de rochas com alta resistência. A fratura frágil implica em uma perda quase instantânea da resistência da rocha através de um plano sem nenhuma ou com pouca deformação plástica.

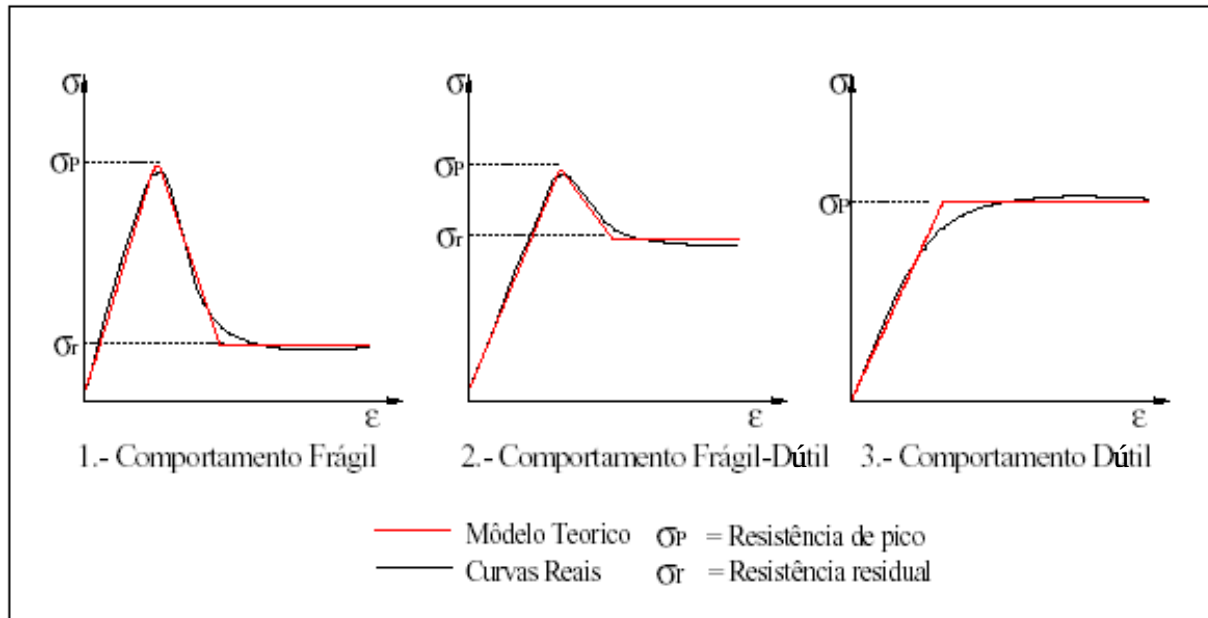


Figura 3.2 – Modelos de comportamento tensão-deformação. Vallejo *et al* (2002).

Em rochas com um comportamento frágil-dútil ou parcialmente frágil a resistência diminui até certo valor, depois de se ter alcançado valores importantes de deformação (figura 3.2.2). Como exemplo deste tipo, tem-se o comportamento apresentado pelas discontinuidades rochosas e pelos materiais argilosos pré-adensados.

No caso do comportamento dútil (figura 3.2.3), que ocorre em determinados tipos de materiais brandos como os evaporitos, a deformação continua aumentando sem que aconteça a perda de resistência, ou seja, a resistência mantém-se constante depois de grandes deformações.

Os principais comportamentos tensão-deformação das rochas podem ser generalizados na forma de uma curva com uma zona aproximadamente linear de inclinação máxima, a qual decresce progressivamente passando a ter um comportamento não linear quando são incrementadas as tensões e a resistência de pico é atingida (figura 3.3).

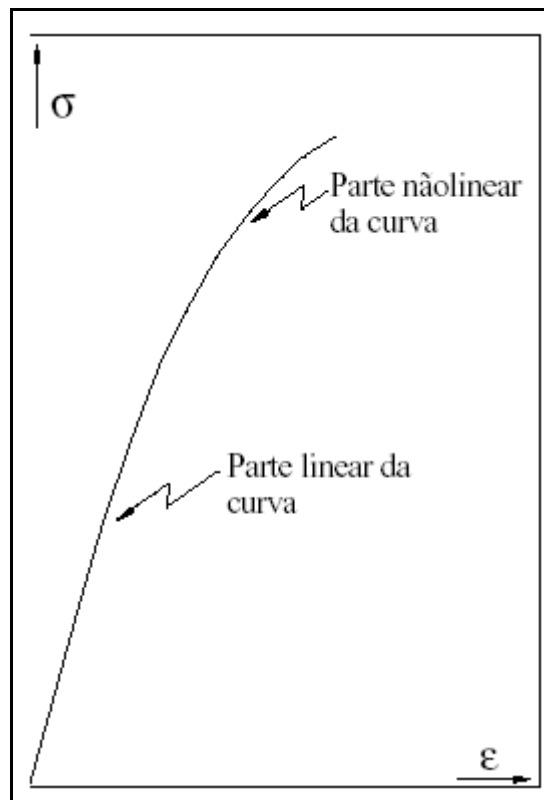


Figura 3.3 – Curva generalizada tensão-deformação para rochas. Farmer (1968).

Nesta curva, está representado o comportamento da rocha quando submetida a um ensaio de compressão uniaxial ou de compressão simples. No campo elástico (parte mais linear da curva), a deformação é proporcional à tensão como mostra a equação 3.1:

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{\epsilon_{axial}}, \quad 3.1$$

onde E é a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, σ_{axial} é a tensão axial aplicada e ϵ_{axial} é a deformação na mesma direção da força aplicada.

Apesar da curva ser representativa na fase elástica da rocha, existem dificuldades para se obter um valor satisfatório do módulo de elasticidade, o qual pode ser obtido de quatro formas:

- Módulo Tangente (E_t): é a inclinação da curva tensão-deformação em uma porcentagem fixa, geralmente 50% da resistência de pico;

- Módulo Médio (E_m): é dado pela inclinação média da porção linear da curva tensão-deformação;
- Módulo Secante (E_s): é dado pela inclinação da linha reta que une a origem da curva tensão-deformação com a resistência de pico;
- Módulo Real (E_r): é a tangente que interliga os pontos onde a relação entre as deformações unitárias transversal e longitudinal é constante, ou seja, onde o coeficiente de Poisson é constante (Rolim Filho – comunicação pessoal).

No campo das deformações elásticas, o material volta a sua configuração inicial quando a força aplicada é retirada. A partir de um determinado grau de deformação, a rocha não consegue manter o comportamento elástico e atingido o ponto em que começam a ocorrer deformações dúcteis ou plásticas, a teoria da relação linear entre a tensão e a deformação não mais se aplica.

O ponto onde ocorre uma inflexão da curva tensão-deformação recebe o nome de ponto de escoamento e a resistência nesse ponto é chamada de tensão de escoamento σ_y . A partir desse ponto, a rocha ainda pode sofrer deformações importantes antes de atingir o limite da sua resistência. Em rochas frágeis, os valores de σ_y e σ_p (tensão máxima que um material pode suportar antes de romper) estão muito próximos ou coincidem, o que não ocorre em rochas com comportamento dúctil. No estudo do comportamento de alguns tipos de rocha, a diferença entre estes valores é muito importante, pois indica a capacidade da rocha de conseguir suportar cargas após superar seu limite elástico e antes de atingir deformações inaceitáveis (Vallejo *et al* (2002), Jumikis (1983), *et al*).

Para se definir um material elasticamente, são necessárias pelo menos duas das seguintes constantes:

- E (módulo de elasticidade): é a relação entre a tensão normal e a deformação normal unitária para um material sob determinadas condições de carga (Coates, 1973);

- ν (coeficiente de Poisson): é a relação entre a deformação unitária normal transversal e a deformação unitária normal longitudinal de um corpo sob tensão uniaxial (Coates, 1973);
- λ (coeficiente de Lamé): é a relação entre a deformação unitária e a tensão aplicada a um material;
- G (módulo cisalhante): é a relação entre a tensão de cisalhamento e a deformação tangencial unitária para um material (Coates, 1973);
- K (módulo de Bulk): é o quociente entre a variação da tensão média e a variação do volume unitário correspondente (Coates, 1973).

Em problemas de engenharia, onde é exigida uma medida direta da rocha quando uma força é aplicada, E e ν são os indicados. Contudo, em quase todas as rochas elásticas ou semi-elásticas pode-se relacionar todas as constantes elásticas com uma boa precisão.

Usando como base os valores de constantes elásticas apresentados por vários autores (tabela 3.1), Vallejo *et al* (2002) fez uma compilação de valores dos módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos (obtidos através das velocidades de ondas elásticas) e do coeficiente de Poisson para diferentes rochas. Estes valores são apresentados em faixas de variação, as quais são, muitas vezes, amplas devido à alta variabilidade das propriedades físicas (porosidade, estrutura mineral, cimentação, etc.) e ao caráter anisotrópico de algumas rochas (presença de laminação, xistosidade, etc.). O coeficiente de Poisson varia, para a maioria das rochas, entre 0,25 e 0,33.

Rocha sã	Módulo de Elasticidade Estático, E kg/cm ² ($\times 10^5$)	Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d kg/cm ² ($\times 10^5$)	Coefficiente de Poisson, ν
Andesito	3,0-4,0		0,23-0,32
Anfibolito	1,3-9,2	4,6-10,5	
Anhidrito	0,15-7,6		
Arenito	0,3-6,1	0,5-5,6	0,1-0,4 (0,24-0,31)
Basalto	3,2-10	4,1-8,7	0,19-0,38 (0,25)
Calcário	1,5-9,0 (2,9-6,0)	0,8-9,9	0,12-0,33 (0,25-0,30)
Quartzito	2,2-10 (4,2-8,5)		0,08-0,24 (0,11-0,15)
Diabásio	6,9-9,6	6,0-9,8	0,28
Diorito	0,2-1,7	2,5-4,4	
Dolomita	0,4-5,1	2,2-8,6	0,29-0,34
Gabro	1-6,5		0,12-0,20
Gnaisse	1,7-8,1 (5,3-5,5)	2,5-10,5	0,08-0,40 (0,20-0,30)
Xisto	0,6-3,9 (2,0)		0,01-0,31 (0,12)
Granito	1,7-7,7	1,0-8,4	0,1-0,4 (0,18-0,24)
Grauvaca	4,7-6,3	2,3-10,7	
Siltito	5,3-7,5	0,7-6,5	0,25
Folhelho	0,3-2,2	1,0-7,0	0,25-0,29
Marga	0,4-3,4	1,0-4,9	
Mármore	2,8-7,2		0,1-0,4 (0,23)
Micaxisto	0,1-2,0		
Filito	0,5-3,0		
Sal	0,5-2,0		0,22
Turfa	0,3-7,6		0,24-0,29
Giz	1,5-3,6		

Valores máximos e mínimos. Valores médios entre parênteses.
 Dados selecionados a partir de Rahn (1986), Johnson e Degraff (1988), Goodman (1989), Walthan (1999) e Duncan (1999).

Tabela 3.1 – Constantes elásticas das rochas. Vallejo (2002).

Farmer (1968) menciona que as relações entre E e ν com outras constantes elásticas e físicas tem sido analisadas por Judd e Huber. Estes concluíram que em todas as rochas ensaiadas existe uma relação linear entre o módulo de elasticidade e o módulo de cisalhamento, e entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial. Algumas relações entre E e G , E e K ou λ e G sugerem que se a rocha fosse elástica, então o valor de ν deveria ser constante para todas as rochas independente do valor de E .

O gráfico que relaciona E e ν (figura 3.4) indica que esta afirmação poderia ser aplicada em rochas com módulo de elasticidade elevado, enquanto que, para

rochas com módulo de elasticidade baixo (rochas não elásticas), correspondem valores baixos e variáveis de ν . Estas evidências sugerem que a previsão da reação da rocha não deveria basear-se somente na teoria elástica.

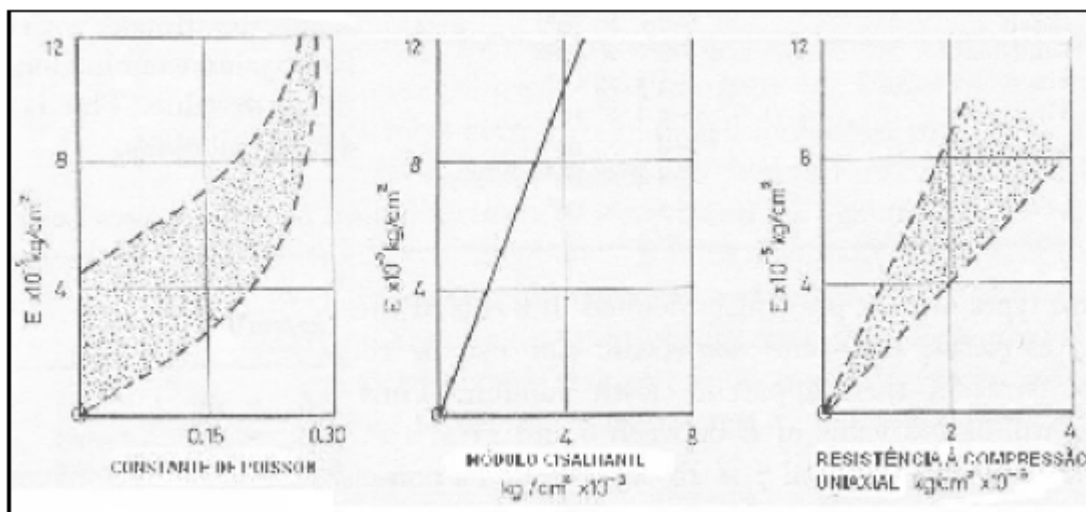


Figura 3.4 – Relação entre o módulo de elasticidade e a constante de Poisson, módulo cisalhante e resistência à compressão uniaxial. Farmer (1968).

Dessa forma, a relação estável-linear entre G e E é aproximadamente $E = 2,5G$, indicando um valor de ν constante e igual a 0,25. Pode-se assumir, então, na maioria dos trabalhos que envolvem análise elástica das rochas, o valor de 0,25 para o coeficiente de Poisson.

A relação linear existente entre a resistência compressiva uniaxial da rocha (σ_c) e os módulos elásticos E e G , ($E = 35 \cdot \sigma_c$ e $G = 140 \cdot \sigma_c$, de acordo com os gráficos apresentados na figura 3.4) é importante porque confirma que a resistência da rocha esta relacionada à rigidez da sua estrutura interna (E e G), Farmer (1968).

3.3 - Fatores que Influenciam o Módulo de Elasticidade dos Maciços Rochosos

O módulo de elasticidade sofre influência principalmente de: defeitos no maciço rochoso (juntas, fissuras, vazios); estrutura petrográfica (resistência interna das partículas minerais individuais, resistência das ligações entre os grãos minerais na matriz rochosa); orientação e mergulho da formação rochosa e das estruturas geológicas que a afetam; grau de intemperismo e alteração da rocha; propriedades elásticas e plásticas; grau de anisotropia; direção e magnitude das cargas atuantes

na rocha; grau de compressão ou descompressão; índice de vazios e porosidade; grau de saturação; tempo; estado das tensões dentro do maciço rochoso. Outros fatores de ordem secundária que também podem influenciar são: a temperatura; os efeitos vibratórios; geração de juntas e fissuras produzidas por detonação (no caso de escavações e perfurações na rocha) e fatores sísmicos (Pusch (1995) *et al*).

Outro fator importante mencionado por Jumikis (1983) é a influência da gênese da rocha. De acordo com os valores obtidos em diferentes ensaios com rochas intrusivas, conclui-se que as rochas vulcânicas de composição básica como o basalto tem um módulo de elasticidade maior que uma rocha ácida como o granito.

Farmer (1968) cita os trabalhos em rochas feitos por Judd e Huber, onde estes sugeriram, com base nos resultados de testes realizados, uma relação quase linear de G e E com a densidade aparente da rocha (figura 3.5). Os autores concluíram que como a maioria dos minerais que formam as rochas possui peso específico semelhante, as propriedades elásticas das rochas são afetadas pela sua estrutura interna, especialmente pelo tamanho, grau de compactação e presença de espaços no interior da rocha.

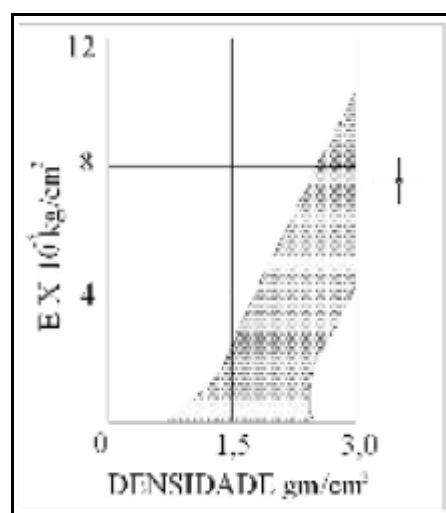


Figura 3.5 – Relação entre o módulo de elasticidade e a densidade (Judd e Huber). Farmer (1968).

Farmer (1968) mostra que a água gera uma diminuição no módulo de elasticidade, principalmente em rochas porosas. Obert *et al.* (1967) afirma que em rochas porosas como arenitos e calcários saturados, o valor de E é entre 80% e 60% do valor no estado seco. Para folhelhos e siltitos, o valor é semelhante ao

estado natural, enquanto que no caso de granitos e mármore o valor de E aumenta no estado saturado em 30%.

Jumikis (1983) dá uma explicação razoável para anomalias de deformação em rochas úmidas postulado por Booser *et al.* (1962) na base do efeito Reh binder (Reh binder *et al.*, 1948). Este postula que todo fenômeno ocasionado pela pressão de poros é causado pela redução da energia da superfície livre existente entre os constituintes da rocha, esta redução é gerada pelo processo de absorção. Em outras palavras, a estrutura coesiva da rocha é enfraquecida pela presença de líquido entre os poros, e desde que os processos de deformação e falha são em grande parte influenciados pela sua coesão, elas serão afetadas pela pressão do líquido presente; a resistência e o módulo de elasticidade decrescerão e a potencialidade do fluxo se incrementará.

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1 – Ferramenta de Programação: CENTURA

Segundo Amorim (2000), Centura (antes conhecido como SQLWindows) é uma ferramenta de programação utilizada no desenvolvimento de aplicações (sistemas) cliente/servidor para o ambiente Microsoft Windows e outras plataformas GUI (Graphical User Interface).

Aplicações desenvolvidas em Centura interagem com qualquer banco de dados SQL (Structured Query Language), o que permite criar, alterar e controlar os dados em uma base de dados relacional (conjunto de tabelas adequadamente estruturadas), como o Microsoft Access utilizado neste trabalho. Além disso, toda a codificação é automaticamente estruturada, o que reduz a possibilidade de erros, quando se está desenvolvendo a aplicação, e, principalmente, torna mais ágil a geração dos códigos.

Ainda de acordo com Amorim (2000), o Centura possui sua própria linguagem de programação, a SAL (SQLWindows Application Language). Ela é uma linguagem de alto nível, projetada especialmente para a construção de aplicações gráficas sob arquitetura cliente/servidor, que oferece os principais recursos de uma linguagem procedural como C e COBOL e que suporta ainda dois conceitos muito importantes:

- 1) Programação Orientada a Objetos (POO) – permite construir classes e fazer uso de conceitos fundamentais como os de herança simples e múltiplas;
- 2) É dirigida a eventos – os procedimentos em SAL são sempre disparados por algum evento. Quando o evento ocorre, gera mensagens para a aplicação que por sua vez, ao recebê-las, executa ações.

A seguir, é apresentada uma descrição sucinta de alguns conceitos utilizados na Programação Orientada a Objetos (POO), segundo Amorim, Pinheiro e Almeida Júnior (2000):

- Tipo de Dado Abstrato ou Classe: são os tipos de dados, criados pelo programador, que concretizam uma idéia. É a forma de se analisar e tratar os dados. Nas linguagens procedurais, dados e ações são duas partes bem distintas. As linguagens Orientadas a Objetos, apesar de implementarem os Tipos de Dados Abstratos de forma distinta, utilizam-nos com a mesma finalidade: juntar, em um único local, dados e ações, imitando, dessa forma, a vida real, onde as ações não são analisadas e executadas independentemente dos dados.
- Encapsulamento: consiste em esconder partes do código que não se deve ou não se quer disponibilizar para os usuários de um Tipo de Dado Abstrato. Os principais benefícios são: clareza de código, pois quem utiliza a classe só verá o que é estritamente necessário, e evitar a quebra de integridade da classe, já que o usuário não pode alterar os códigos ocultos.
- Polimorfismo: é a forma de se utilizar uma classe para vários tipos de trabalhos que se relacionam, mas manipulam dados distintos.
- Herança: consiste em passar as características de um Tipo de Dado Abstrato (SuperClasse) para outro Tipo de Dado Abstrato (SubClasse). É o conceito que melhor caracteriza a POO, pois é a partir da herança que as classes conseguem ter uma melhor exatidão no funcionamento, melhor extensibilidade na implementação e manutenção, e melhor potencialidade no tratamento de anormalidades. Isto é possível porque, com a herança, o usuário da classe pode aproveitar processos e dados já criados e testados, fazendo apenas as adaptações necessárias para que se obtenha a classe desejada.
- Herança Simples: são as características de uma classe (pai) passadas para outra classe (filha).
- Herança Múltipla: são as características de duas ou mais classes (pais) passadas para outra classe (filha).
- SuperClasse ou Classe-Pai: tipo de dado inicial usado para definir as características comuns a uma determinada classe de objeto/dado.

- SubClasse ou Classe-Filha: classe criada a partir de outra(s) classe(s), herdando as características da(s) classe(s)-pai.
- Objeto: é uma instância (cópia) de uma classe.
- Evento: é uma ação executada sobre um objeto, como, por exemplo, clicar sobre um botão.
- Mensagem: é a chamada e/ou envio de argumentos (variáveis) de uma classe para outra ou de uma classe para seu serviço (método).
- Método: é um serviço que uma classe oferece, equivalente a uma função ou rotina.

No Centura, uma janela é um objeto visual que recebe e processa mensagens. Por isso, aplicações geradas em Centura são dirigidas a eventos, os quais, quando executados pelo usuário, geram mensagens que são tratadas pelos objetos da aplicação. Dessa forma, as aplicações são desenvolvidas identificando-se os objetos em questão e codificando-se seus comportamentos para cada mensagem que possa receber.

4.2 - Metodologia Computacional para Cálculo de Tensões Planas em Profundidade

4.2.1 – Características Técnicas do Programa

O programa tem as seguintes características técnicas e computacionais:

- Arquitetura cliente/servidor com base de dados Access;
- Interface gráfica padrão Microsoft;
- Desenvolvimento utilizando CENTURA versão 1.5.1 32 bits;
- A instalação padrão do programa requer, como configuração mínima de hardware, um processador Athlon 900 Mhz, 1 GB de RAM, HD de 80 GB e monitor SGVA colorido, teclado e mouse;
- Sistema operacional: Windows XP.

4.2.2 – Hipóteses Consideradas

Para o desenvolvimento do programa foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Mosaicos (elementos) planos de espessura unitária;
- Mosaicos com lados iguais;
- Blocos não rígidos (se deformam quando submetidos à ação das forças);
- O módulo de elasticidade e o atrito interno dos materiais são isotrópicos (apresentam os mesmos valores em todas as direções);
- A parte superior da malha, isto é, a superfície do terreno, apresenta coesão e atrito interno nulos;
- Malha quadrada;

- A profundidade e o comprimento da malha são muito maiores que a sua espessura, o que configura um estado plano de tensões.

4.2.3 – Organização do Programa

O processo para determinação das tensões, realizado pelo programa, é dividido em três fases distintas:

1. Entrada de dados

Nessa fase, o usuário fornece ao programa as seguintes informações:

- Peso específico;
- Coesão;
- Atrito interno;
- Coeficiente de Poisson;
- Módulo de elasticidade;
- Comprimento e profundidade da malha;
- Lados dos mosaicos;
- O material correspondente a cada nó da malha, através do arquivo dos materiais.

2. Cálculo

A fase de cálculo é inicializada após o usuário informar o nome da planilha que será gerada no Excel, durante essa fase, e que servirá como arquivo de saída de dados.

Para obter a equação utilizada pelo programa no cálculo das tensões, foram utilizadas as equações a seguir, obtidas de acordo com o sistema de tensões, com modelo elástico puro, que atuam em cada um dos mosaicos (figura 4.1):

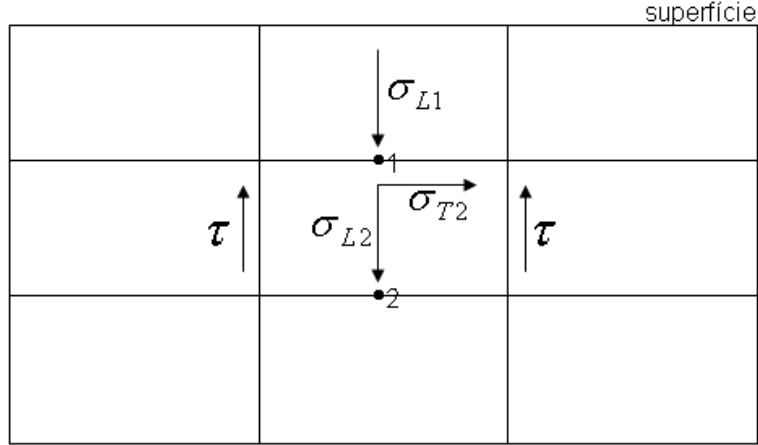


Figura 4.1 – Sistema de tensões atuantes em cada um dos mosaicos.

$$\sigma_{L1} = \gamma_1 \cdot L \quad (1)$$

$$\sigma_{L2} = \gamma_2 \cdot L \quad (2)$$

$$\sigma_{N2} = \sigma_{N1} + \sigma_{L2} - 2\tau_2 \quad (3)$$

$$\tau_2 = c_2 + \sigma_{T2} \cdot \operatorname{tg} \phi_2 \quad (4)$$

$$E_{T2} = \frac{\sigma_{T2}}{\varepsilon_{T2}} \Rightarrow \sigma_{T2} = E_{T2} \cdot \varepsilon_{T2} \quad (5)$$

$$E_{L2} = \frac{\sigma_{L2}}{\varepsilon_{L2}} \Rightarrow \varepsilon_{L2} = \frac{\sigma_{L2}}{E_{L2}} \quad (6)$$

$$\nu_2 = \frac{\varepsilon_{T2}}{\varepsilon_{L2}} \Rightarrow \varepsilon_{T2} = \nu_2 \cdot \varepsilon_{L2} \quad (7)$$

Substituindo (6) em (7), tem-se:

$$\varepsilon_{T2} = \nu_2 \cdot \frac{\sigma_{L2}}{E_{L2}} \quad (8)$$

Substituindo (8) em (5), tem-se:

$$\sigma_{T2} = E_{T2} \cdot \frac{\sigma_{L2}}{E_{L2}} \cdot \nu_2 \quad (9)$$

Substituindo (9) em (4), obtém-se:

$$\tau_2 = c_2 + E_{T2} \cdot \frac{\sigma_{L2}}{E_{L2}} \cdot \nu_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \quad (10)$$

Finalmente, substituindo (2) e (10) em (3), tem-se a equação utilizada no cálculo das tensões, nos instantes 1 e 2:

$$\sigma_{N2} = \sigma_{N1} + \gamma_2 \cdot L - 2 \cdot \left(c_2 + \frac{E_{T2}}{E_{L2}} \cdot \gamma_2 \cdot L \cdot \nu_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \right) \quad (11)$$

A equação geral terá, portanto, a seguinte forma:

$$\sigma_{NN} = \sigma_{NN-1} + \gamma_N \cdot L - 2 \cdot \left(c_N + \frac{E_{TN}}{E_{LN}} \cdot \gamma_N \cdot L \cdot \nu_N \cdot \operatorname{tg} \varphi_N \right) \quad (12)$$

3. Saída de dados

Nessa fase, os resultados dos cálculos realizados pelo programa são apresentados ao usuário de duas formas: diretamente na tela, através do preenchimento automático da tabela localizada à esquerda da tela (figura 4.7), e por meio da planilha Excel gerada na fase de cálculo.

4.2.4 – Convenção da Numeração dos Nós das Malhas

A figura 4.2 mostra a convenção adotada para a numeração dos nós de uma malha. Essa numeração, que corresponde à seqüência seguida pelo programa durante a realização dos cálculos, obedece à seguinte ordem: do topo para a base e da esquerda para a direita.

1	4	7	10
2	5	8	11
3	6	9	12

Figura 4.2 – Exemplo de uma malha mostrando a convenção da numeração dos nós.

4.2.5 – Arquivo dos Materiais

Esse arquivo (figura 4.3), que depende da área a ser trabalhada e das dimensões da malha e dos mosaicos utilizados, é formado por duas colunas: a primeira, com a numeração dos nós da malha e a segunda, com o código do material correspondente a cada nó.

A geração desse arquivo consome a maior parte do tempo gasto na preparação dos dados de entrada do programa, pois ela é feita manualmente. Entretanto, caso se queira alterar as dimensões da malha e dos mosaicos, pode-se usar o mesmo arquivo desde que as novas dimensões sejam proporcionais às utilizadas inicialmente.

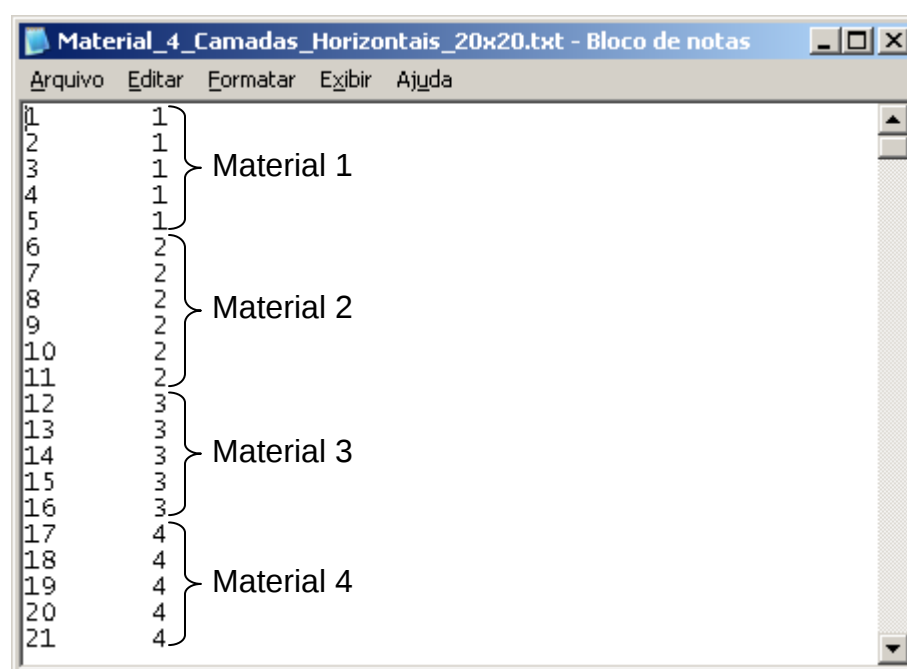


Figura 4.3 – Exemplo do arquivo dos materiais.

4.2.6 - Apresentação Detalhada do Programa

Ao iniciar o programa, visualiza-se a tela mostrada na figura 4.4. Essa tela contém os menus de acesso às telas de cadastro de materiais e cálculo das tensões, assim como o menu e o botão para finalizar o programa.

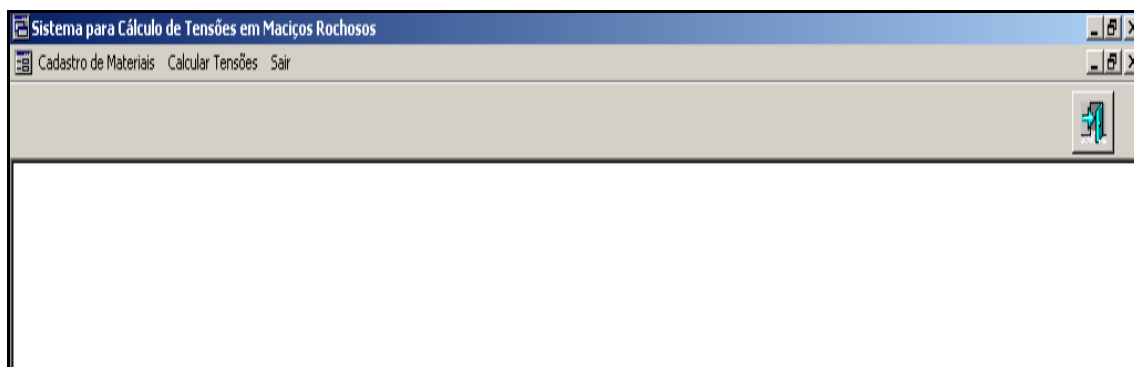


Figura 4.4 – Tela principal do programa.

4.2.6.1 – Cadastro dos Materiais

Através do menu “Cadastro de Materiais” (figura 4.4), o usuário tem acesso à tela onde poderá cadastrar os materiais que constarem na área a ser trabalhada, informando o nome do material e as seguintes propriedades: peso específico, coesão, atrito interno, coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade transversal e módulo de elasticidade longitudinal (figura 4.5). Todos esses valores são de preenchimento obrigatório e caso algum deles não seja informado, será exibida uma mensagem solicitando o preenchimento do campo em questão (figura 4.6). O código do material é o único campo que o usuário não precisa preencher, pois ele é criado automaticamente pelo sistema quando um novo material é cadastrado.

Figura 4.5 - Tela de cadastro dos materiais.

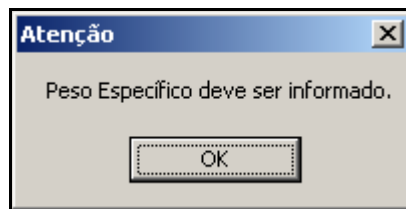


Figura 4.6 - Tela de aviso mostrada quando algum dos campos da tela de cadastro dos materiais não é informado.

Na tela da figura 4.5, o usuário realiza as seguintes operações:

- Inserir um novo material ou pesquisar os materiais já cadastrados: clicar em  ou , respectivamente;
- Limpar os campos e realizar uma nova pesquisa, excluir um material ou navegar entre os materiais pesquisados: clicar em ,  ou   ou  , respectivamente, os quais ficam habilitados após a pesquisa dos materiais;
- Salvar ou descartar as informações inseridas ou alteradas e não salvas: clicar em  ou , respectivamente, os quais ficam habilitados após a inserção ou alteração de alguma informação;
- Fechar a tela: clicar em .

4.2.6.2 – Cálculo das Tensões

Por meio do menu “Calcular Tensões” (figura 4.4), o usuário tem acesso à tela onde poderá realizar o cálculo das tensões e gerar os gráficos (figura 4.7).

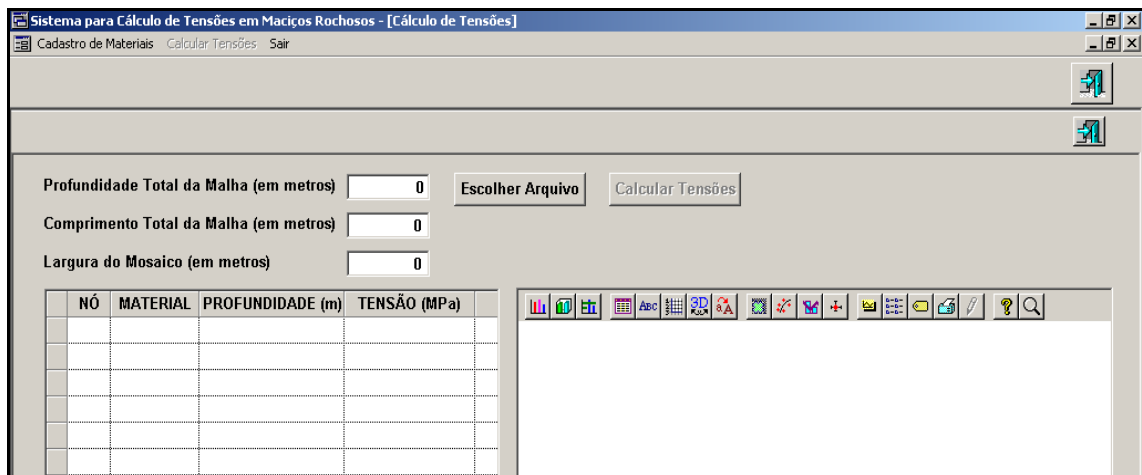


Figura 4.7 - Tela para cálculo das tensões.

Para calcular as tensões, o usuário deverá executar os seguintes passos:

1. Informar a profundidade total e o comprimento total da malha gerada na área a ser trabalhada, e a largura do mosaico (cada um dos elementos da malha). Caso o usuário deixe de informar algum desses valores, será exibida uma mensagem solicitando o preenchimento do campo em questão (figura 4.8);

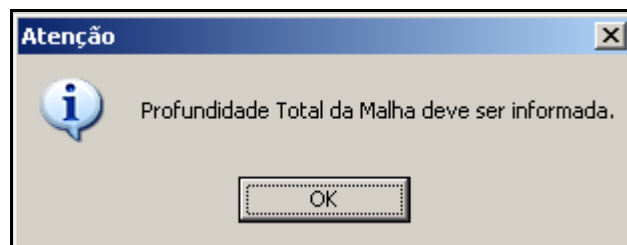


Figura 4.8 - Tela de aviso mostrada quando algum dos campos da tela para cálculo das tensões não é informado.

2. Clicar no botão “Escolher Arquivo”, selecionar, na tela que aparecerá (figura 4.9), o arquivo que contém os códigos dos materiais referentes a cada ponto (nó) da malha e clicar no botão “Abrir”. Somente após esse passo ter sido executado é que o botão “Calcular Tensões” ficará habilitado para o usuário executar o passo seguinte;

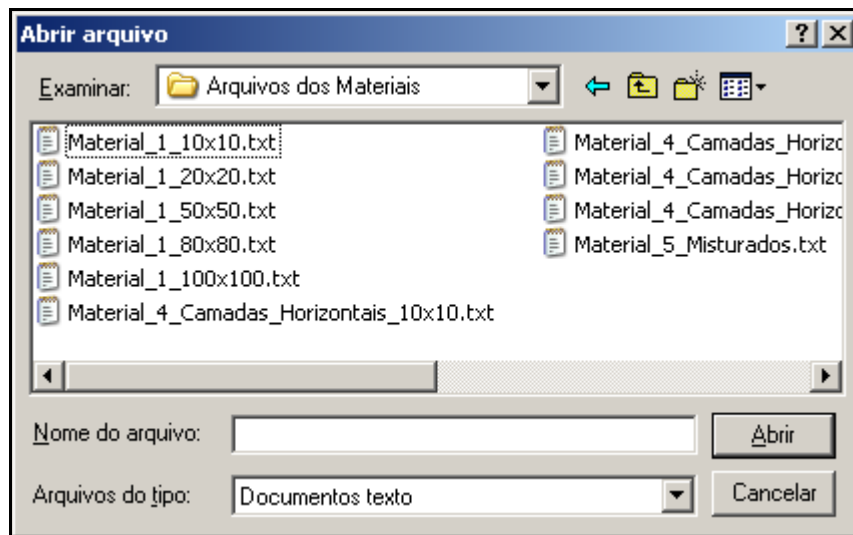


Figura 4.9 – Tela para selecionar o arquivo com os tipos de materiais.

3. Clicar no botão “Calcular Tensões” e informar o nome do arquivo do Excel no qual serão salvas as informações geradas pelo sistema (figura 4.10). Este arquivo servirá para o caso de se precisar fazer consultas posteriores a essas informações e gerar gráficos usando o Excel.

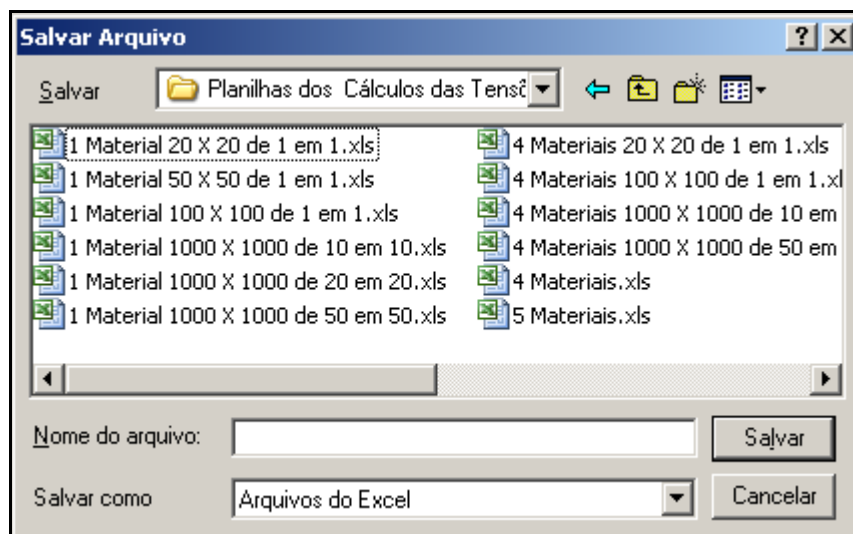


Figura 4.10 – Tela para salvar a planilha com os resultados dos cálculos.

Durante o cálculo das tensões e após o mesmo são visualizadas, respectivamente, as seguintes telas:



Figura 4.11 – Tela mostrada durante o cálculo das tensões.

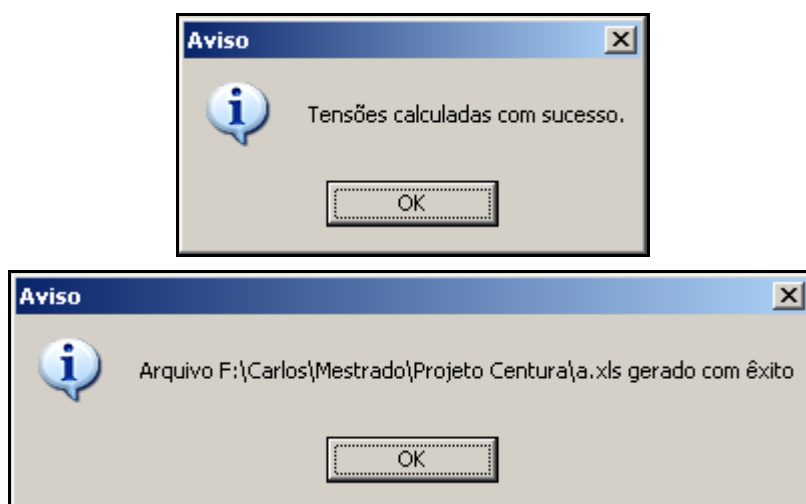


Figura 4.12 – Telas mostradas após o cálculo das tensões.

4.2.6.3 – Geração dos Gráficos

Após as tensões terem sido calculadas e visualizadas na tabela à esquerda da figura 4.7, o usuário poderá gerar os gráficos da seguinte maneira:

1. Na área à direita da tabela, deve-se clicar em  e, na aba "2D Gallery" (figura 4.13), selecionar o tipo de gráfico desejado. Para os casos estudados foi utilizado o gráfico de linhas;

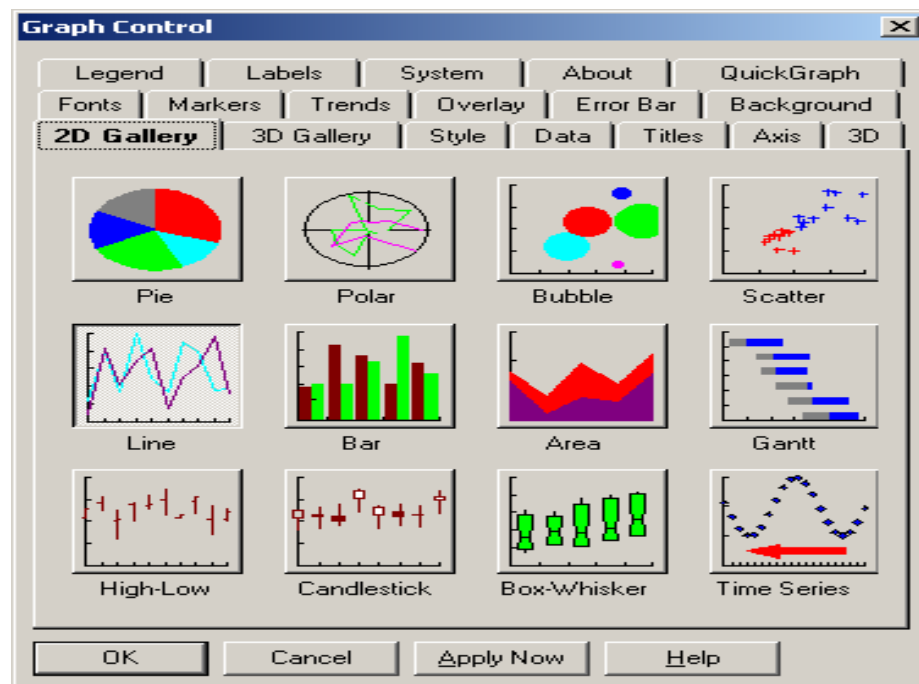


Figura 4.13 – Tela para escolha do tipo de gráfico.

2. Na aba “QuickGraph” (figura 4.14), o usuário escolhe a tabela, que fornecerá os dados para o gráfico, e os campos que servirão de ordenada e abscissa. Para visualizar o gráfico, com todos os pontos da tabela, basta clicar em “Apply Now”;

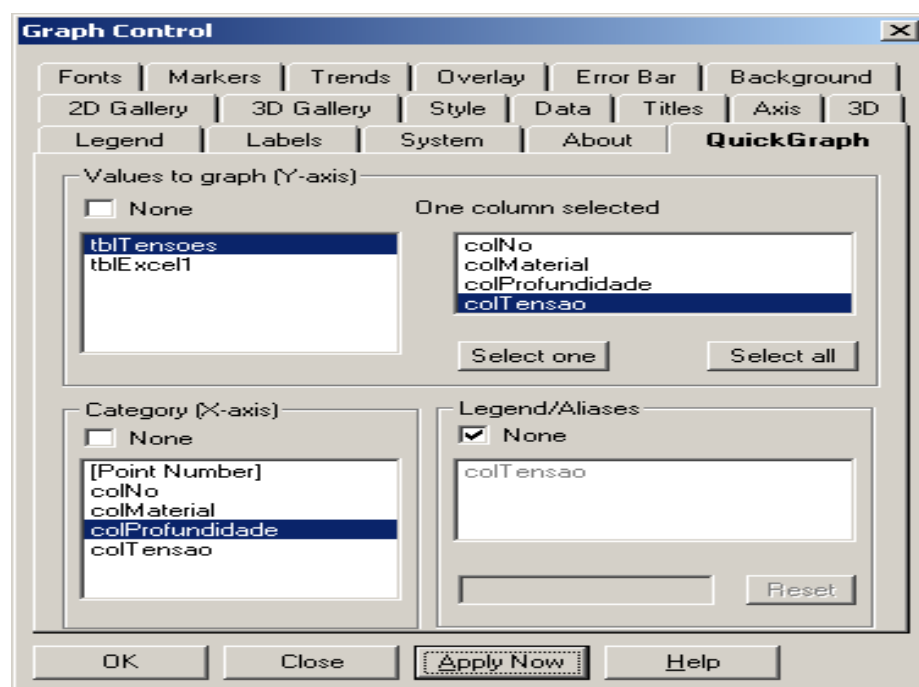


Figura 4.14 – Tela para escolha das informações a serem mostradas no gráfico.

3. Na aba “Data” (figura 4.15), o usuário pode selecionar um intervalo do gráfico. Para isso, basta preencher os campos “Range From” e “Range To”, com os números dos pontos que limitam o intervalo, e clicar em “Apply Now”;

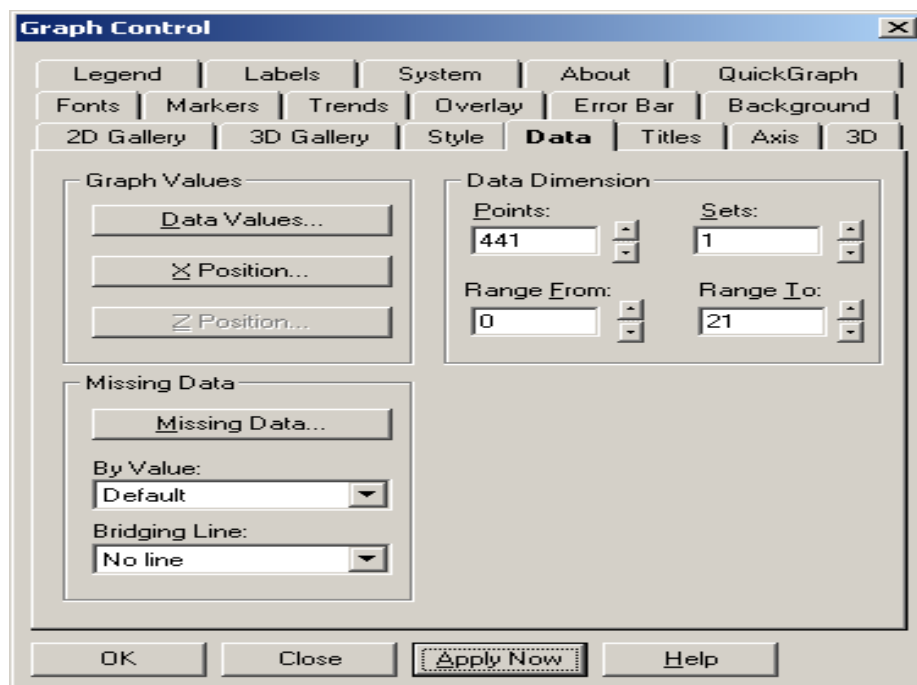


Figura 4.15 – Tela para selecionar um intervalo do gráfico.

CAPÍTULO 5: TESTES PARA VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

5.1 – Áreas Trabalhadas e Valores Empíricos Utilizados nos Testes

Para testar o programa foram considerados três casos hipotéticos:

1. A área trabalhada apresenta um único material (figura 5.1);
2. A área trabalhada apresenta quatro materiais dispostos em camadas horizontais (figura 5.2) e
3. A área trabalhada apresenta cinco materiais dispostos aleatoriamente como mostrado na figura 5.3.

Em cada um dos casos, foram usados os seguintes valores para as propriedades dos materiais:

Material	1	2	3	4	5
Massa Específica (ton/m ³)	2,60	5,00	2,72	1,60	2,56
Coesão (MPa)	0,29	0,39	0,00	0,59	0,55
Atrito Interno (graus)	5	10	1	45	40
Coeficiente de Poisson	0,15	0,20	0,20	0,17	0,45
Módulo de Elast. Transversal (MPa)	58840	68647	62047	7943	55153
Módulo de Elast. Longitudinal (MPa)	58840	68647	62047	7943	55153

Tabela 5.1 – Valores das propriedades dos materiais utilizados para testar o programa.

Convém destacar que foram utilizados valores fora dos padrões tradicionais para que houvesse uma discrepância visível dos resultados.

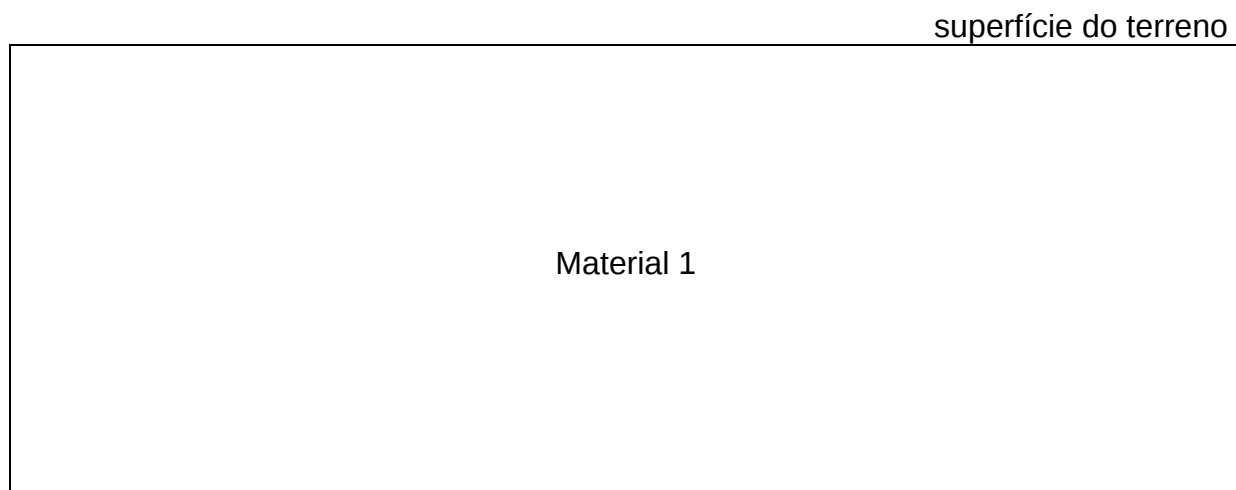


Figura 5.1 – Área trabalhada com um material.

superfície do terreno	
Material 1	
Material 2	
Material 3	
Material 4	

Figura 5.2 – Área trabalhada com quatro materiais dispostos horizontalmente.

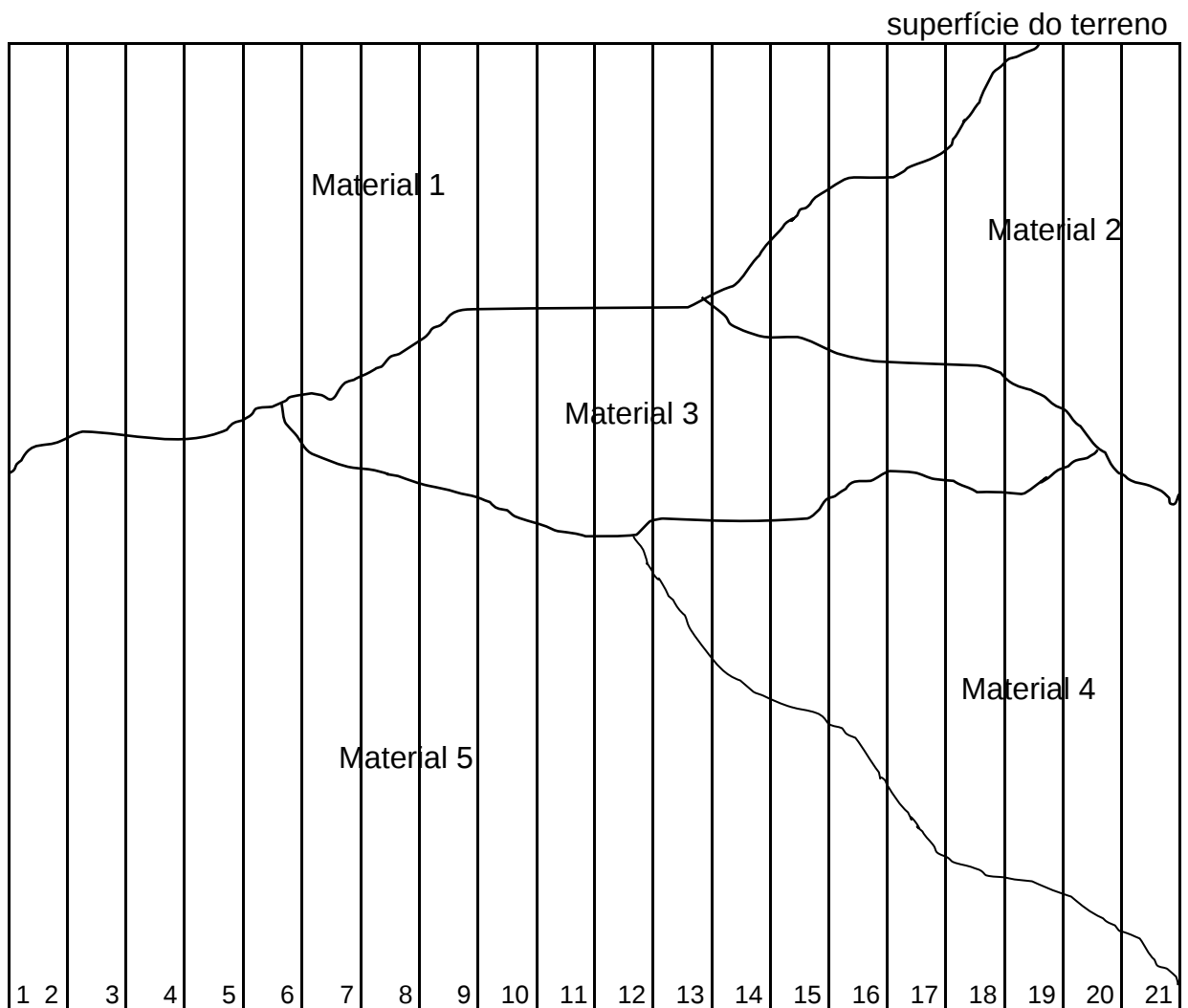


Figura 5.3 – Área trabalhada com cinco materiais dispostos aleatoriamente.

5.2 – Dimensões das Malhas e Arquivos de Materiais

Inicialmente, a malha a ser utilizada nos testes teria as seguintes dimensões:

- Profundidade total: 20 metros;
- Comprimento total: 20 metros;
- Largura do mosaico: 1 metro.

Entretanto, após alguns testes iniciais, verificou-se ser possível, devido a disposição dos materiais nas áreas trabalhadas, aumentar, proporcionalmente, essas dimensões, para os casos de 1 material e 4 materiais em camadas horizontais, sem precisar gerar novos arquivos de materiais. Dessa forma, para se obter uma visão mais ampla dos resultados, foram consideradas, para esses dois casos, as seguintes dimensões:

- Profundidade total: 1000 metros;
- Comprimento total: 1000 metros;
- Largura do mosaico: 50 metros.

No caso dos 5 materiais dispostos aleatoriamente, optou-se por se manter as dimensões iniciais, devido a dificuldade de se gerar um arquivo de materiais, para uma área mais ampla, que mantivesse as mesmas correspondências, existentes na malha inicial, entre os nós e os tipos de materiais.

Como arquivos de materiais foram utilizados os seguintes arquivos:

- Material_1_20x20.txt, para o caso de 1 material;
- Material_4_Camadas_Horizontais_20x20.txt (figura 4.3), para o caso de 4 materiais e
- Material_5_20x20.txt, para o caso de 5 materiais.

5.3 – Resultados Obtidos

5.3.1 – Área com 1 Material

Como toda a área é composta por um único material isotrópico e homogêneo, nas direções dos eixos X e Y, os resultados obtidos apresentam, de acordo com a profundidade, os mesmos módulos para todos os furos, razão pela qual é exposto apenas os valores de um dos furos (tabela 5.2).

NÓ	MATERIAL	PROFUNDIDADE (m)	TENSÃO (MPa)
1	Material 1	0	0,00
2	Material 1	50	0,01
3	Material 1	100	0,03
4	Material 1	150	0,04
5	Material 1	200	0,05
6	Material 1	250	0,06
7	Material 1	300	0,08
8	Material 1	350	0,09
9	Material 1	400	0,10
10	Material 1	450	0,11
11	Material 1	500	0,13
12	Material 1	550	0,14
13	Material 1	600	0,15
14	Material 1	650	0,17
15	Material 1	700	0,18
16	Material 1	750	0,19
17	Material 1	800	0,20
18	Material 1	850	0,22
19	Material 1	900	0,23
20	Material 1	950	0,24
21	Material 1	1.000	0,25

Tabela 5.2 – Valores obtidos para um dos furos (1 material).

O gráfico 5.1 representa uma visão geral de toda a área trabalhada, a qual é formada por um único material. Neste gráfico, onde cada reta corresponde a um furo de sondagem, pode-se observar que, devido a isotropia e homogeneidade da área, as retas apresentam os mesmos tamanhos e as mesmas inclinações, o que evidencia que, para uma mesma profundidade, todas as retas apresentam o mesmo valor de tensão.

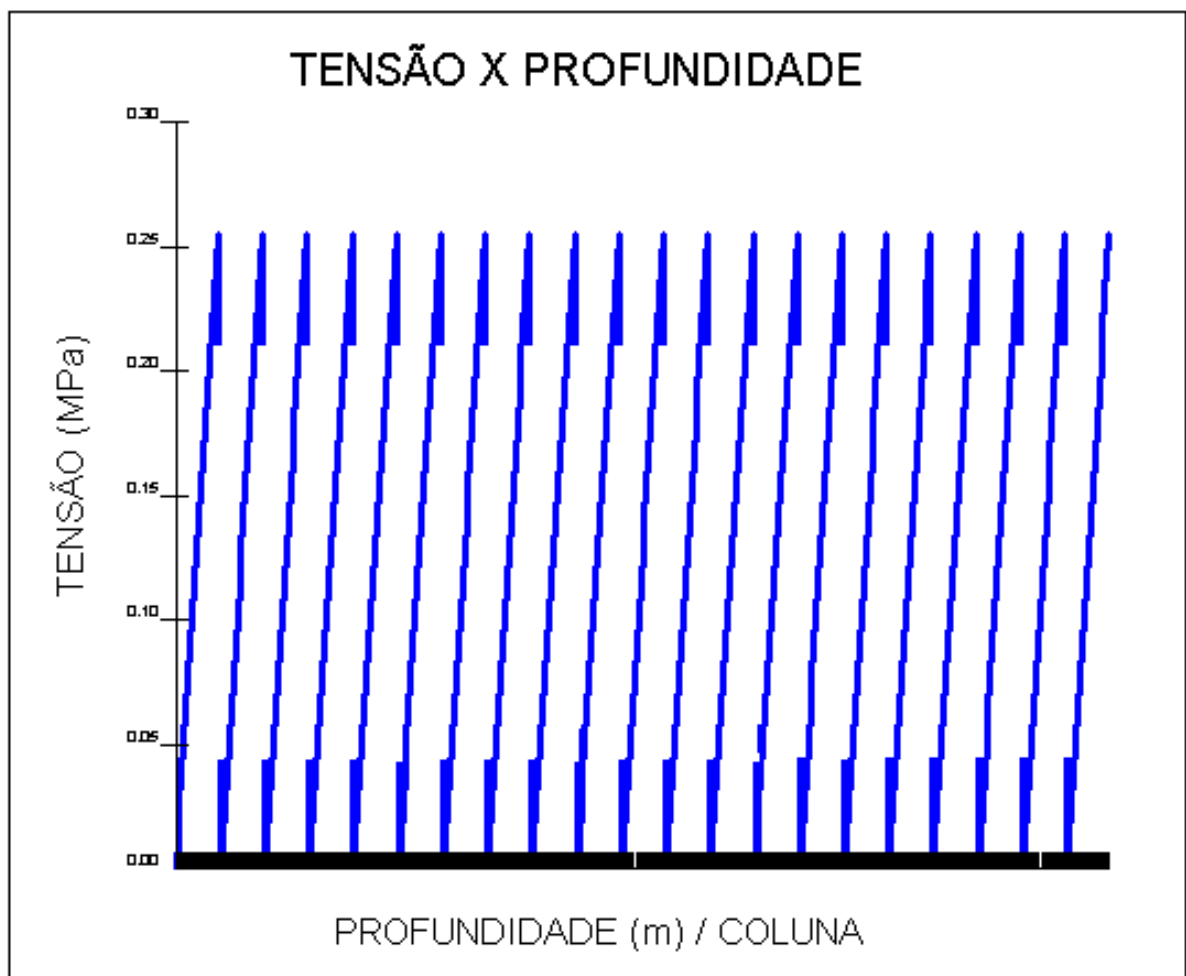


Gráfico 5.1 – Gráfico para toda a área com um único material. Cada reta corresponde a um furo de sondagem.

No gráfico 5.2, que representa um dos furos do gráfico 5.1, pode-se observar que a tensão vai aumentando à medida que a profundidade aumenta, o que já era esperado para o caso das tensões *in situ* gravitacionais. Como toda a área é formada por um único material isotrópico e homogêneo, a inclinação da reta permanece a mesma em toda a sua extensão.

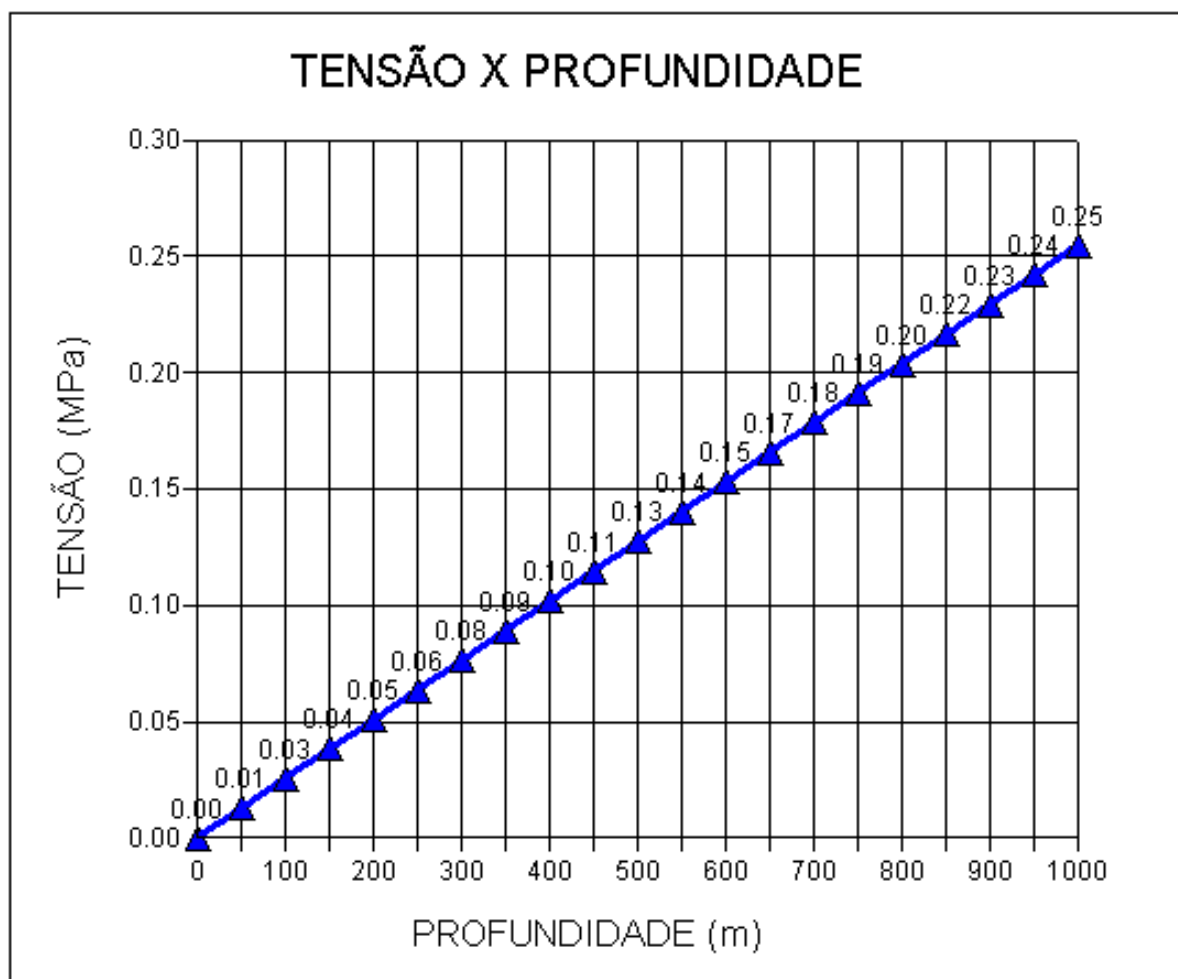


Gráfico 5.2 – Gráfico correspondente à tabela 5.2.

5.3.2 – Área com 4 Materiais Dispostos em Camadas Horizontais

Como cada um dos materiais é isotrópico e homogêneo, na direção do eixo X, os resultados obtidos são os mesmos para todos os furos. Nesse caso, é apresentado apenas o resultado de um dos furos (tabela 5.3).

NÓ	MATERIAL	PROFUNDIDADE (m)	TENSÃO (MPa)
1	Material 1	0	0,000
2	Material 1	50	0,013
3	Material 1	100	0,025
4	Material 1	150	0,038
5	Material 1	200	0,051
6	Material 2	250	0,075
7	Material 2	300	0,100
8	Material 2	350	0,125
9	Material 2	400	0,149
10	Material 2	450	0,174
11	Material 2	500	0,198
12	Material 3	550	0,211
13	Material 3	600	0,225
14	Material 3	650	0,238
15	Material 3	700	0,251
16	Material 3	750	0,264
17	Material 4	800	0,272
18	Material 4	850	0,280
19	Material 4	900	0,288
20	Material 4	950	0,296
21	Material 4	1.000	0,304

Tabela 5.3 – Valores obtidos para um dos furos (4 materiais).

No gráfico 5.3, que representa uma visão geral de toda a área trabalhada, a qual é formada por quatro materiais dispostos em camadas horizontais, tem-se, novamente, cada curva correspondendo a um furo de sondagem. Como, em virtude da disposição dos materiais, todos os furos compreendem os mesmos materiais e estes são isotrópicos e homogêneos na direção horizontal, todas as curvas apresentam o mesmo tamanho e as mesmas inclinações. Isso significa que, para uma mesma profundidade, todas as curvas apresentam o mesmo valor de tensão.

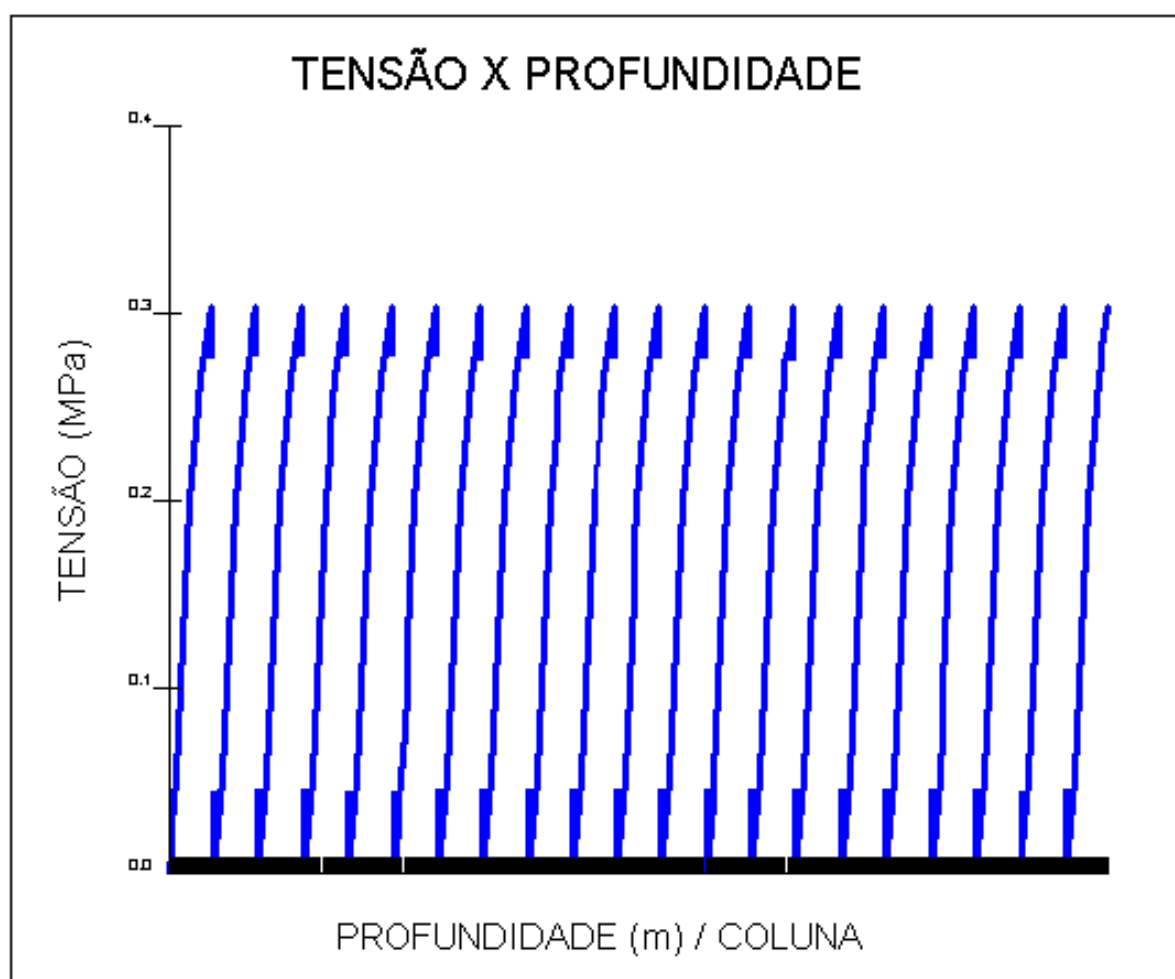


Gráfico 5.3 – Gráfico para toda a área com quatro materiais. Cada curva corresponde a um furo de sondagem.

O gráfico 5.4 representa um dos furos de sondagem do gráfico 5.3. Nele observa-se, novamente, que a tensão aumenta com o aumento da profundidade. Além disso, é possível determinar a quantidade de materiais que são atravessados pelo furo por meio da quantidade de mudanças ocorridas na inclinação da curva ao longo de toda sua extensão.

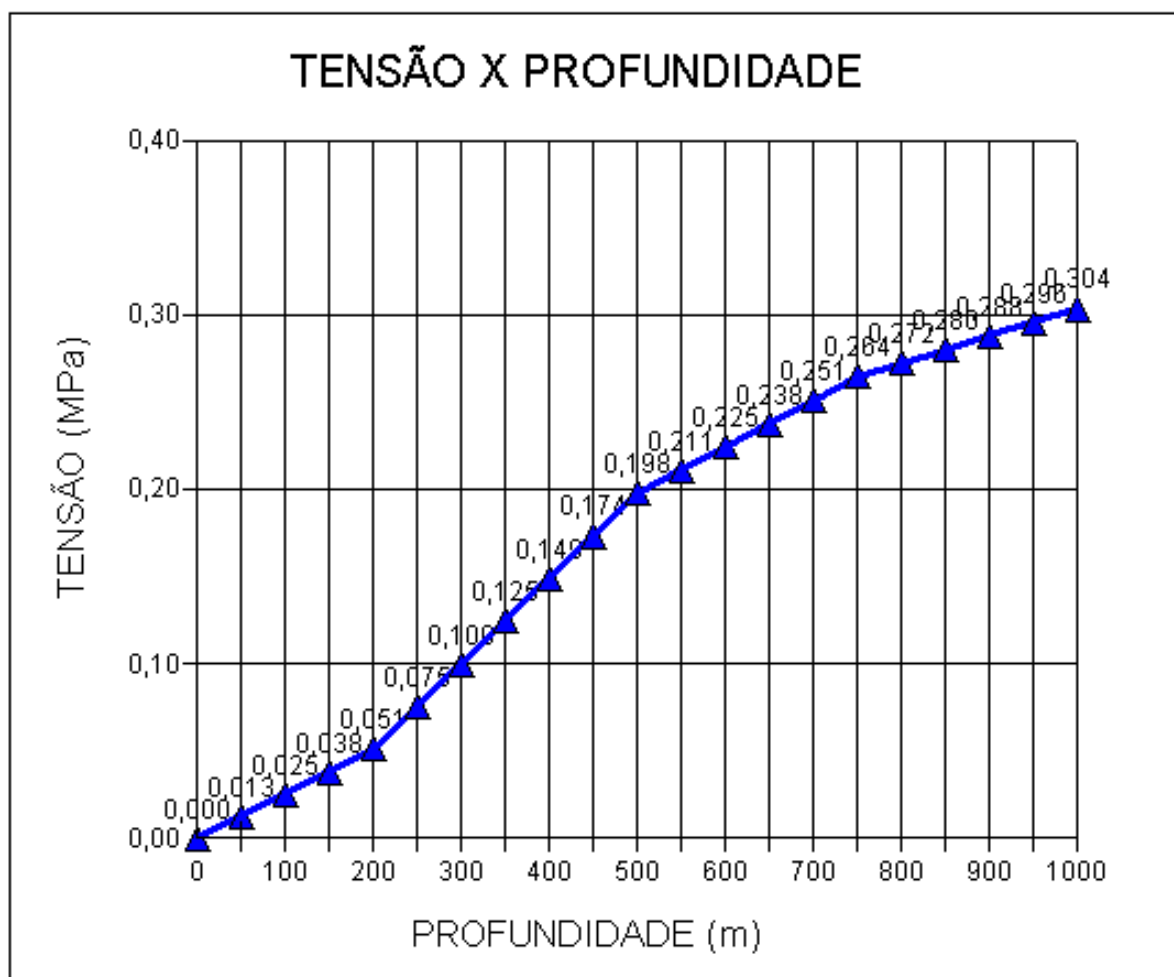


Gráfico 5.4 – Gráfico correspondente à tabela 5.3.

5.3.3 – Área com 5 Materiais Dispostos Aleatoriamente

Como a área trabalhada apresenta heterogeneidade de materiais tanto na direção X como na direção Y, é mostrado, como exemplo dos valores das tensões (tabela 5.4), o resultado obtido para o furo 15 mostrado na figura 5.3.

NÓ	MATERIAL	PROFUNDIDADE (m)	TENSÃO (MPa)
295	Material 1	0	0,00000
296	Material 1	1	0,00025
297	Material 1	2	0,00051
298	Material 1	3	0,00076
299	Material 2	4	0,00126
300	Material 2	5	0,00175
301	Material 2	6	0,00224
302	Material 3	7	0,00250
303	Material 3	8	0,00277
304	Material 3	9	0,00303
305	Material 4	10	0,00319
306	Material 4	11	0,00334
307	Material 4	12	0,00350
308	Material 4	13	0,00366
309	Material 4	14	0,00382
310	Material 5	15	0,00407
311	Material 5	16	0,00432
312	Material 5	17	0,00457
313	Material 5	18	0,00482
314	Material 5	19	0,00507
315	Material 5	20	0,00532

Tabela 5.4 – Valores obtidos para o furo 15 (5 materiais).

O gráfico 5.5 representa uma visão geral de toda a área trabalhada, a qual é formada por cinco materiais dispostos de forma aleatória. Como, em virtude da disposição dos materiais, cada furo de sondagem atravessa uma quantidade e tipos diferentes de materiais, as respectivas curvas apresentam tamanhos e inclinações diferentes. Dessa forma, deixa de existir, entre as curvas, o paralelismo que ocorre nos gráficos anteriores.

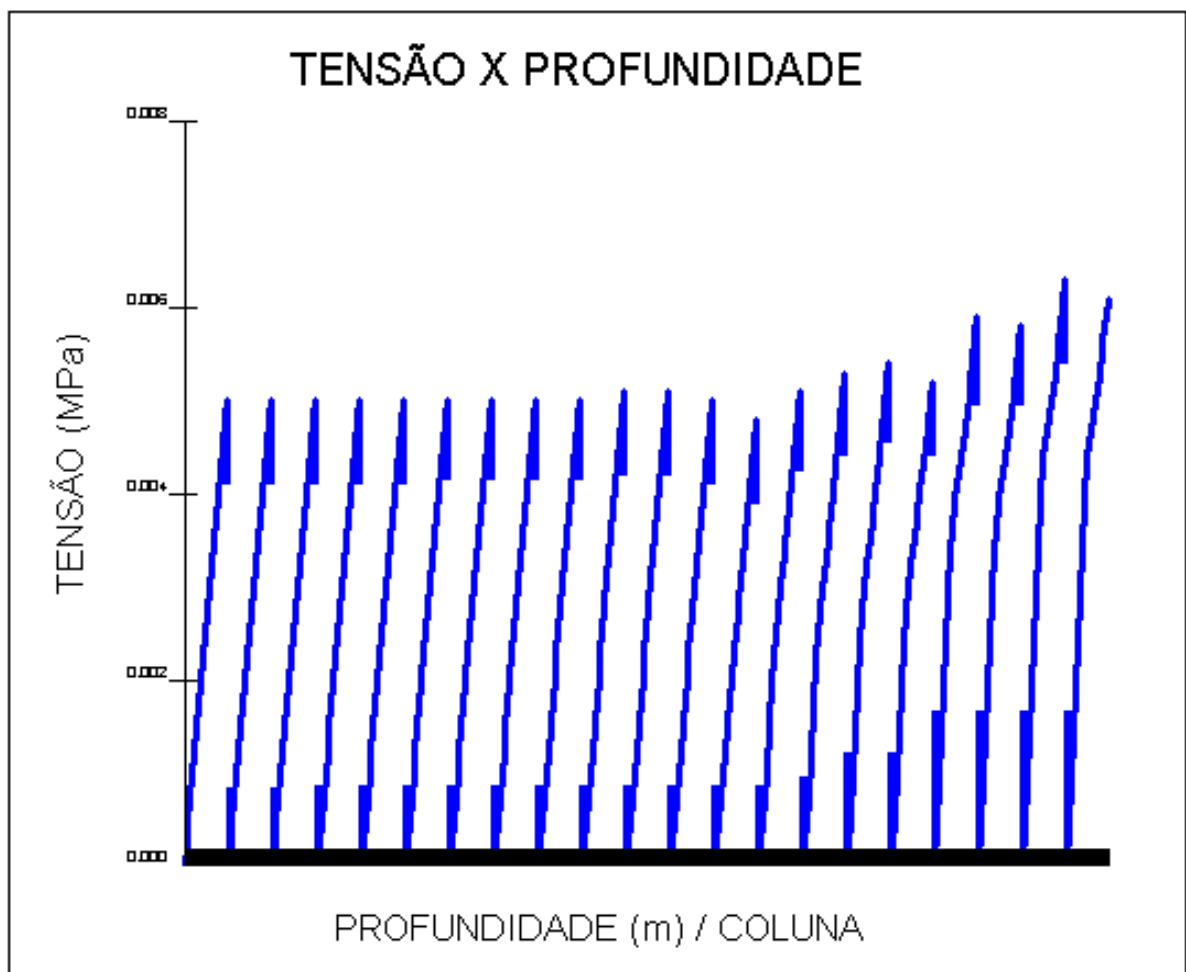


Gráfico 5.5 – Gráfico para toda a área com cinco materiais. Cada curva corresponde a um furo de sondagem.

No gráfico 5.6 são mostradas as curvas correspondentes a alguns furos de sondagem da figura 5.3. Neste gráfico, onde cada furo é representado por uma cor diferente: furo 1 (azul), furo 10 (verde), furo 13 (azul celeste), furo 15 (vermelho), furo 17 (rosa), furo 19 (amarelo) e furo 21 (azul marinho), observa-se, claramente, que, apesar da tensão aumentar com a profundidade em todas as curvas, dependendo do tipo de material atravessado pelo furo, as tensões apresentam, em cada uma das curvas, valores diferentes para uma mesma profundidade. Além disso, pode-se observar, novamente, que a quantidade de materiais atravessados pelos furos é determinada pela quantidade de mudanças ocorridas na inclinação das respectivas curvas.

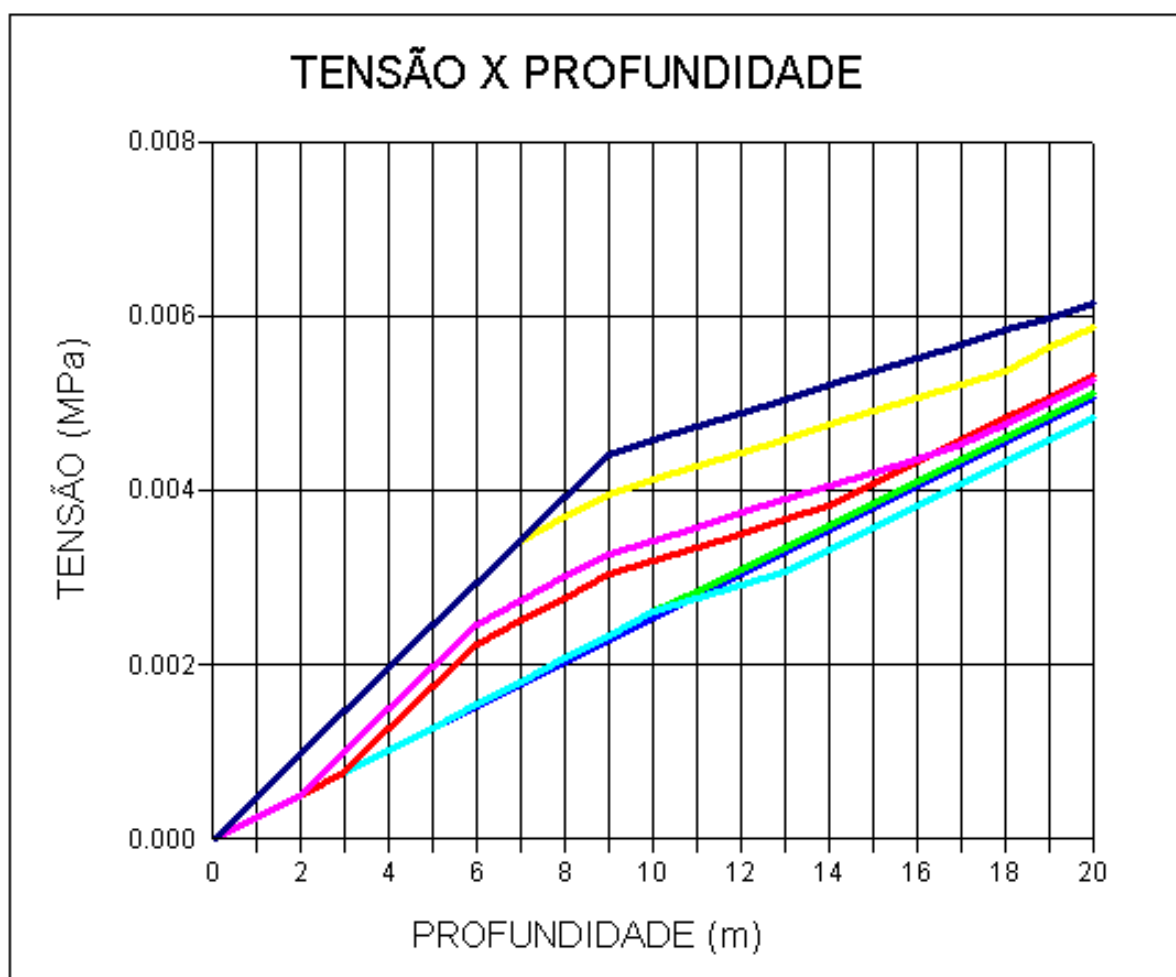


Gráfico 5.6 – Tensões calculadas em sete diferentes furos de sondagem: furo 1 (azul), furo 10 (verde), furo 13 (azul celeste), furo 15 (vermelho), furo 17 (rosa), furo 19 (amarelo) e furo 21 (azul marinho).

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – Conclusões

Nesse trabalho, demonstra-se ser possível calcular e prever, apesar de apresentar margens de erros, tensões *in situ* gravitacionais, mesmo que planas, a partir de testemunhos de sondagens realizadas para a execução de obras.

Demonstra-se, ainda, que, na execução de pré-projetos com o auxílio de informações simplificadas (furos de sondagens e análises de parâmetros geomecânicos), é possível avaliar custos operacionais de obras a serem desenvolvidas em profundidade, permitindo uma maior precisão nesta avaliação quando combinado com as classificações geomecânicas de Barton, Bieniawski, etc.

6.2 – Sugestões

Como sugestão para trabalhos futuros, é imprescindível o refino dos procedimentos até então utilizados, passando-se do estado plano de tensões para o triaxial, bem como a introdução de informações para a concepção de modelos reológicos plásticos, elasto-plásticos, viscoso, visco-elástico, visco-plástico e visco-elasto-plástico, de modo a tornar o sistema mais realista.

Sugere-se, ainda, a utilização de uma ferramenta de programação mais científica, com a finalidade de se obter os resultados com maior velocidade de cálculo e precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADEI B., SAVAGE W. Z. and SWOLFS H. S. (1987). Gravitational stresses in anisotropic rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 24, 5-14.

AMADEI B., SWOLFS H. S. and SAVAGE W. Z. (1988). Gravity induced stresses in stratified rock masses. *Rock Mech.* 21, 1-20.

AMADEI, B., and PAN, E. (1992). Gravitational Stresses in Anisotropic Rock Masses with Inclined Strata: *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr., Vol. 29: 225-236.*

AMADEI, B. & STEPHANSSON, O. (1997). *Rock Stress and Its Measurement.* Chapman & Hall, London, UK, p 490.

AMORIM, M. P. W. (2000). *SQLWindows, Módulo I, Ferramentas.* ITECI Cursos. Recife. PE. p 160.

_____ (2000). *SQLWindows, Módulo II, Programação Básica e Avançada.* ITECI Cursos. Recife. PE. p 159.

AMORIM, M. P. W., PINHEIRO, A. F., ALMEIDA JÚNIOR, L. (2000) *SQLWindows, Módulo III.* ITECI Cursos. Recife. PE. p 112.

BOOZER G. D., HILLER K. H., SERDENGECTI, S. (1962). The effect of pore fluids on the deformation behaviors of rocks subjected to triaxial compression. In: *Proceedings of the 5th symposium on rock mechanics*, pp 579–626

BRADY, B. H. G & BROWN, E. T. (1994). *Rock Mechanics for Underground Mining.* Second Edition. Chapman & Hall ed. p 571.

BRUCE, S. (1990). "A Mechanical Stability Log", 1990 IADC/SPE Drilling Conference, SPE 19942, 275-281, Houston, Texas, USA, 27- 2 March.

COATES, D. F. (1973). *Fundamentos de Mecânica de Rochas*, Madrid. p 577.

FARMER, I. W. (1968). Engineering Properties of Rocks. Spon Editors, London.

GOODMAN, R.E. (1980), Introduction to Rock Mechanics, 2 ed. New York, John Wiley & Sons. p 562.

GOODMAN, R. E. (1989). Introduction to Rock Mechanics. Second Edition. John Wiley & Sons. p 562.

HAYETT, A.J., DYKE, C.G., HUDSON, J.A. (1986). A Critical Evaluation of Basic Concepts Associated with the existence and Measurement of In-Situ Stress. In: International Symposium on Rock Stresses and Rock Stress Measurements, Stockholm, p.387-396.

HERGET, G. (1988). Stresses in Rock, 1a. ed. Rotterdam, Balkema.

HOEK, E. & BROWN, E. T. (1980) Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, p 527.

HOEK, E. & BROWN, E. T. (1982) Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, p 527.

HOEK, E. & BROWN, E. T. (1994) Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, p 527.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM), Commission on Testing Methods, Suggested Methods for Rock Stress Determination (1987). K Kim and J Franklin, Joint Coordinators, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 24, No 1, pp 53-73.

JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. (1969). Fundamentals of Rock Mechanics. Ed. Methuen, London.

JUMIKIS, A. R. (1983). Rock Mechanics. Trans Tech, p 613.

LIU, L., and M. D. ZOBACK (1992). The Effect of Topography on the State of Stress in the Crust: Application to the Site of the Cajon Pass Scientific Drilling Project, J. Geophys. Res. 97(B4), 5095–5108.

McTIGUE, D.F. & MEI, C.C. (1981). Gravity-induced stresses near topography of small slope, J. Geophys. Res., 86, 9268-9278.

MIOTO, J.A., COELHO, L.F.M. (1998). “Estado de Tensões em Maciços Rochosos”. In: Geologia de Engenharia, 1 ed. Capítulo 10

NUNES, A.L.L.S. (1998). “Medidas de Tensões em Maciços Rochosos”. In: Anais do 1º Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Sul, GEOSUL, pp. 239-266, Porto Alegre.

NUNES, A.L.L.S. (2000). Mecânica das Rochas Aplicada, In: Notas da Aula da Disciplina de Estudos Especiais em Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

OBERT, L, DUVAL, W. (1967). Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons. p 650.

PAN, E., and AMADEI, B. (1993). Gravitational Stresses in Long Asymmetric Ridges and Valleys in Anisotropic Rock: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Abstr., Vol. 30 No. 7: 1005-1008.

PAN, E. and AMADEI, B. (1994). Stresses in an anisotropic rock mass with irregular topography: Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers, v. 120, p. 107- 119.

PAN, E., AMADEI, B, and SAVAGE, W.Z. (1994). Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys in anisotropic rock: International Journal of Rock Mechanics, Mining Science, and Geomechanical Abstracts, v. 31, p. 293-3 12.

PARK, H.J. and WEST, T.R. (2002). Sampling Bias of Discontinuity Orientation Caused by Linear Sampling Technique. Engineering Geology, 66: p 99-110.

PUSH, R. (1995). Rock Mechanics on a Geological Base, Elsevier, Amsterdam, p 498.

REHBINDER, P. A., SCHREINER, L. A. and ZHIGACH, K. F., (1948). Hardness Reducers in Drilling, Translation of 1944 Russian Book. Melbourne: Council for Scientific and Ind. Res., 78.

SAVAGE, W. Z., SWOLFS, H. S. and POWERS, P. S. (1985). Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys: Int. J. Rock Mech. Soc. Geomech. Abstr., 22, 291-302.

SERTÃ, M. B. (1986). Aspectos Geológicos e Geotécnicos do Solo Residual do Campo Experimental II da PUC-RJ. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

VALLEJO, L. I. G., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid, p 374-390.

ZOBACH, M. L., *et al* (1989). Global patterns of tectonic stress. Nature, 341, p 291–298.

ANEXO

Código Fonte

Botão: Escolher Arquivo

On SAM_Click

Set asFiltro[0] = 'Documentos texto'

Set asFiltro[1] = '*.txt'

Set nFiltro = 2

Set nIndex = 1

Set sArquivo = "

Set sPath = "

If Not SalDlgOpenFile(hWndForm, 'Abrir arquivo', asFiltro, nFiltro, nIndex, sArquivo, sPath)

Call SalMessageBox('Falha na escolha do arquivo', 'Arquivo', 0)

Else

Call SalFileOpen(fHArquivo, sPath , OF_Read)

Call SalFileSeek(fHArquivo, 0, FILE_SeekEnd)

Set nFileSize = SalFileTell(fHArquivo)

If nFileSize = 0

Call SalMessageBox('O arquivo ' || sArquivo || ' está vazio.', 'Atenção', MB_IconExclamation | MB_Ok)

Else If nFileSize < 0

Call SalMessageBox('Erro de Arquivo', 'Atenção', MB_IconExclamation | MB_Ok)

Call SalFileSeek(fHArquivo, 0, FILE_SeekBegin)

Call SalFileGetStr(fHArquivo, sLinha, nFileSize+1)

Call SalEnableWindow(pbCalculaTensoes)

Botão: Calcular Tensões

On SAM_Click

```
If dfProfundidadeTotal = 0 or dfProfundidadeTotal = NUMBER_Null
    Call SalMessageBox( 'Profundidade Total da Malha deve ser
informada!', 'Aviso', MB_Ok|MB_IconInformation )
    Call SalSetFocus( dfProfundidadeTotal )
    Return FALSE

Else If dfComprimentoTotal = 0 or dfComprimentoTotal = NUMBER_Null
    Call SalMessageBox( 'Comprimento Total da Malha deve ser
informado!', 'Aviso', MB_Ok|MB_IconInformation )
    Call SalSetFocus( dfComprimentoTotal )
    Return FALSE

Else If dfLarguraMosaico = 0 or dfLarguraMosaico = NUMBER_Null
    Call SalMessageBox( 'Largura do Mosaico deve ser informada!', 'Aviso',
MB_Ok|MB_IconInformation )
    Call SalSetFocus( dfLarguraMosaico )
    Return FALSE

Else
    Set strArquivo = dlgFileSave( )
    Call SalWaitCursor( TRUE )
    Call SalCreateWindow( frmAguarda, hWndForm )
    Call SalSendMsg( frmCalculaTensoes.tblTensoes, PAM_Carrega,
wParam, lParam )
    Call Gera_TXT( tblExcel1, TRUE, TRUE )
    Call SalTblReset( tblExcel1 )
    Call SalDisableWindow( pbCalculaTensoes )
    Set nCont = 1
```

Tabela: tblTensoes

On PAM_Carrega

Set nX = 0

Set nY = 0

Set nProfundidade = 0

Set nIndice = 0

Set nParc1 = 0

Set nParc2 = 0

Set nComprimentoTotal = dfComprimentoTotal

Set nProfundidadeTotal = dfProfundidadeTotal

Set nLarguraMosaico = dfLarguraMosaico

! Total de espaços na horizontal

Set nTotalX = nComprimentoTotal/nLarguraMosaico

! Total de espaços na vertical

Set nTotalY = nProfundidadeTotal/nLarguraMosaico

! Total de nós na horizontal

Set nNoX = nTotalX + 1

! Total de nós na vertical

Set nNoY = nTotalY + 1

! Leitura do Arquivo do Tipo de Material

Call SalFileSeek(fHArquivo, 0, FILE_SeekBegin)

Call SalFileGetStr(fHArquivo, sLinha, nFileSize+1)

While SalStrLength(sLinha)>0

Set nMatCodigo = NUMBER_Null

Set nNo = SalStrToNumber(SalStrLeftX(sLinha , SalStrScan(sLinha , '
')))

Set nMatCodigo = SalStrToNumber(SalStrRightX(sLinha , 1))

Call SqlImmediate("select MatDescricao, MatPesoEspecifico,

MatCoesao, MatAtritoInterno,

MatCoefPoisson, MatElasticidadeTrans,

MatElasticidadeLong, MatLargura,

MatComprimento

from Material where matcodigo = :nMatCodigo

into :asMaterial[nNo], :anPesoEspec[nNo],

:anCoesao[nNo], :anAtritoInt[nNo], :anPoison[nNo],

```

:anElasticidadeTrans[nNo],
:anElasticidadeLong[nNo], :anLargura[nNo],
:anComprimento[nNo]" )

Call SalFileGetStr(fhArquivo, sLinha, nFileSize+1)

Set nNo = 0
Set nContador = 0
Call SqlImmediate( 'Delete from Tensoes' )
Call SqlClearImmediate( )

! Cálculo das Tensões

While nX < nNoX
    Set nProfundidade = 0
    While nY < nNoY
        ! If nX = 0 or nX = nTotalX or nY = 0 or nY = nTotalY
        If nY = 0
            Set nNo = nNo + 1
            Set anTensao[nNo] = 0
        Else
            Set nNo = nNo + 1
            Set anPesoEspec[nNo] = anPesoEspec[nNo]/1000
            Set nParc1 = (anTensao[nNo - 1] + anPesoEspec[nNo] *
                nLarguraMosaico)
            Set nParc2 = (2 * (anCoesao[nNo] +
anElasticidadeTrans[nNo] * ((anPesoEspec[nNo] * nLarguraMosaico) /
anElasticidadeLong[nNo]) * anPoison[nNo] * SalNumberTan( anAtritoInt[nNo] )))
            If nParc2 > nParc1
                Set nParc2 = 0
            Set anTensao[nNo] = nParc1 - nParc2

! Criação do Arquivo Excel
Call SalTblInsertRow( tblExcel1, nContador )
Set tblExcel1.colNo = nNo
Set tblExcel1.colMaterial = asMaterial[nNo]
Set tblExcel1.colProfundidade = nProfundidade
Set tblExcel1.colTensao = anTensao[nNo]
Set nContador = nContador + 1

! Inserção na Base de Dados

```

```

        Call SqlImmediate( 'Insert into Tensoes (TenNo, TenMat,
TenProf, Tensao) values (:nNo, :asMaterial[nNo], :nProfundidade, :anTensao[nNo])' )
        Call SqlClearImmediate( )
        !
        Set nProfundidade = nProfundidade + dfLarguraMosaico
        Set nY = nY + 1
    Set nY = 0
    Set nX = nX + 1

```

Função: Gera_TXT

Descrição: Gera arquivo texto com separador TAB para ser importado pelo Excel.

Set sArquivoExcel = strArquivo

! Força a gravação do título da coluna na primeira linha

```

        Set bTitulo = TRUE
        Call SalWaitCursor( TRUE )
        If SalFileOpen( hFile, sArquivoExcel, OF_Create | OF_ReadWrite )
            Call SalTblSetContext( hWndTabela, 0 )
            Call SalTblQueryScroll( hWndTabela, nLinhaSelect,
nLinhaInicial, nLinhaFinal )
            Set nLinhaSelect = nLinhaInicial
            While nLinhaSelect <= nLinhaFinal
                If SalTblQueryRowFlags( hWndForm, nLinhaSelect,
ROW_Selected ) Or bTodasLinhas
                    If bTitulo
                        Set nColumns = 1
                        Set lsLinhaExcel = "
                        While SalTblGetColumnWindow(
hWndTabela, nColumns, COL_GetID ) != hWndNULL
                            Call SalTblGetColumnNameTitle(
SalTblGetColumnWindow( hWndTabela, nColumns, COL_GetID ), sCelulaExcel, 32 )
                            If SalIsWindowVisible(
SalTblGetColumnWindow( hWndTabela, nColumns, COL_GetID ) ) Or
bIncluiColunasHide
                                ! Se houver TABs na coluna,
troca por brancos

```

```

While SalStrScan(
sCelulaExcel, SalNumberToChar( 9 ) ) != -1
Set sCelulaExcel =
SalStrReplaceX ( sCelulaExcel, SalStrScan( sCelulaExcel, SalNumberToChar( 9 ) ),
1, '' )
! Se houver CTRL+Enter nos
Titulos, troca por brancos
While SalStrScan(
sCelulaExcel, SalNumberToChar( 13 )||SalNumberToChar( 10 ) ) != -1
Set sCelulaExcel =
SalStrReplaceX ( sCelulaExcel, SalStrScan( sCelulaExcel, SalNumberToChar( 13
)||SalNumberToChar( 10 ) ), 2, '' )
Set IsLinhaExcel = IsLinhaExcel
|| sCelulaExcel || SalNumberToChar( 9 )
Set nColumns = nColumns + 1
Call SalFileWrite( hFile, IsLinhaExcel,
SalStrLength( IsLinhaExcel ) )
Call SalFilePutChar( hFile, 13 )
Call SalFilePutChar( hFile, 10 )
Set bTitulo = FALSE
Set nColumns = 1
Set IsLinhaExcel = "
While SalTblGetColumnWindow( hWndTabela,
nColumns, COL_GetID ) != hWndNULL
Call SalTblGetColumnText( hWndTabela,
nColumns , sCelulaExcel )
If SalIsWindowVisible(
SalTblGetColumnWindow( hWndTabela, nColumns, COL_GetID ) ) Or
bIncluiColunasHide
! Se houver TABs na coluna, troca por
brancos
While SalStrScan( sCelulaExcel,
SalNumberToChar( 9 ) ) != -1

```

```

Set sCelulaExcel =
SalStrReplaceX ( sCelulaExcel, SalStrScan( sCelulaExcel, SalNumberToChar( 9 ) ),
1, '' )

Set IsLinhaExcel = IsLinhaExcel ||
sCelulaExcel || SalNumberToChar( 9 )

Set nColumns = nColumns + 1
Call SalFileWrite( hFile, IsLinhaExcel, SalStrLength(
IsLinhaExcel ) )

Call SalFilePutChar( hFile, 13 )
Call SalFilePutChar( hFile, 10 )
Set nLinhaSelect = nLinhaSelect + 1
Call SalTblSetContext( hWndTabela, nLinhaSelect )
Call SalFileClose( hFile )
Call SalWaitCursor( FALSE )
Call SalMessageBox( 'Arquivo '||sArquivoExcel||' gerado com
êxito', 'Aviso', MB_IconInformation + MB_Ok )
! Call SalDestroyWindow( frmAguarda )
Return TRUE
Else
Call SalWaitCursor( FALSE )
Call SalMessageBox( "Arquivo não pode ser gerado! ",
"Atenção", MB_IconQuestion | MB_Ok )
Return FALSE

```