



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA
ESTIMATIVA DE TENSÕES *IN SITU* EM MACIÇOS ROCHOSOS
PARA LAVRA EM MINAS**

MATHEUS STEPHANNE SOUZA

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-430/2026

BRASÍLIA/DF

01/2026

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA
ESTIMATIVA DE TENSÕES *IN SITU* EM MACIÇOS ROCHOSOS
PARA LAVRA EM MINAS**

MATHEUS STEPHANNE SOUZA

Dissertação de mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre.

APROVADA POR:

**GERMÁN MARCELO MARTINS VINUEZA FREIRE, Dr. rer. nat. (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)**

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ANDRE CEZAR ZINGANO, PhD. (DEMIN/UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Brasília, 27 de janeiro de 2026.

FICHA CATALOGRAFICA

SOUZA, MATHEUS STEPHANNE

Avaliação Crítica Dos Métodos Utilizados Para Estimativa De Tensões *In Situ* Em Maciços Rochosos Para Lavra Em Minas [Distrito Federal] 2026

xx, 153 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Comportamento do maciço rochoso 3. Estado de tensões

2. Mecânica das rochas 4. Mineração

I. ENC/FT/UNB

II. MESTRE

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Souza, M. S. (2026). Avaliação Crítica Dos Métodos Utilizados Para Estimativa De Tensões *In Situ* em Maciços Rochosos para Lavra em Minas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-430/2026, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Matheus Stephanne Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação Crítica Dos Métodos Utilizados Para Estimativa De Tensões *In Situ* em Maciços Rochosos para Lavra em Minas

GRAU/ANO: Mestre / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Matheus Stephanne Souza

Avenida Sebastião Afonseca e Silva, n.º 121, Santa Terezinha
38183-258 - Araxá/MG - Brasil

DEDICATÓRIA

Dedicado ao meu avô,

Geraldo

e ao meu pai,

Raimundo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, pela excelência na condução das disciplinas, pela dedicação ao ensino e pela atenção com que recebem os alunos, compartilhando generosamente seus conhecimentos.

Aos amigos Mariana, Taciana e Heuler, pelo constante incentivo, apoio e encorajamento ao longo dessa jornada.

Ao orientador Germán Vinueza, a quem manifesta imensa gratidão pela orientação cuidadosa, gentil e profissional, pelo compartilhamento de conhecimentos e pelo apoio em todas as etapas do desenvolvimento deste estudo.

Aos professores André Brasil e André Zingano, pela participação na banca de qualificação, cujas contribuições foram fundamentais para o direcionamento e aprimoramento do tema desta pesquisa.

Ao professor André Assis, por aceitar participar da banca de defesa deste trabalho, pelas valiosas contribuições ao longo do curso por meio das aulas ministradas, e a quem o autor manifesta profunda admiração.

Aos colegas e alunos do Programa de Pós-Graduação, pela troca de experiências, conhecimentos e pela parceria construída ao longo dessa trajetória.

À Universidade de Brasília, por disponibilizar a estrutura e as condições adequadas para o desenvolvimento do curso e desta dissertação.

Aos meus sobrinho Enzo e Raphaela, por sempre tornarem meus dias mais felizes.

Ao meu pai e minha mãe por incentivarem e apoiarem meus estudos.

RESUMO

AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA ESTIMATIVA DE TENSÕES *IN SITU* EM MACIÇOS ROCHOSOS PARA LAVRA EM MINAS

Intervenções em maciços rochosos constituem práticas amplamente empregadas na engenharia ao longo da história. Considerando a rocha tanto como material de extração quanto como elemento de suporte ou estrutura em si, a exemplo de túneis, galerias e câmaras subterrâneas, torna-se imprescindível o conhecimento detalhado das características do maciço, bem como das condições geológicas e geomecânicas às quais está submetido, a fim de viabilizar essas intervenções de forma segura e eficiente. Nesse contexto, um fator essencial para o planejamento e a execução de obras em maciços rochosos é a determinação do estado de tensões *in situ*. A avaliação dessas tensões ainda representa um dos principais desafios da Mecânica das Rochas, dada a complexidade dos fenômenos envolvidos e as limitações impostas pelas condições naturais do terreno. O estado de tensões de um maciço rochoso tem sido objeto de estudo por várias décadas, impulsionando o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de diferentes métodos de investigação, cada qual com suas características, simplificações, vantagens e limitações. Alguns baseiam-se na indução de perturbações no maciço, como deslocamentos ou deformações, analisando-se a resposta da rocha a essas alterações, enquanto outros buscam avaliar o comportamento natural do terreno sem a interferência de agentes externos. O presente estudo tem como objetivo realizar um levantamento dos principais métodos utilizados para a estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos, destacando suas características, aplicabilidades, incertezas e limitações. Busca-se promover uma análise crítica sobre a adequação de cada método a diferentes contextos de mineração, considerando fatores como a geologia local, a profundidade das investigações e a confiabilidade dos resultados obtidos. A pesquisa fundamenta-se em revisão bibliográfica e na análise de casos publicados, abrangendo estimativas realizadas em lavras a céu aberto e subterrâneas. São consideradas as restrições decorrentes da disponibilidade de dados, das simplificações adotadas e das incertezas inerentes a cada procedimento. Além disso, apresentam-se um quadro comparativo e um fluxograma com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão quanto à escolha do método mais adequado para cada tipo de lavra, contribuindo para o aprimoramento de projetos futuros. Nesse contexto, ao planejar intervenções em maciços rochosos em atividades de mineração, evidencia-se a importância da determinação das tensões *in situ*, bem como a necessidade de um guia mais aprofundado para a seleção do método a ser empregado. Dessa forma, torna-se possível obter

dados consistentes que auxiliem na escolha do método de lavra, no posicionamento das geometrias das estruturas e na seleção dos dispositivos de suporte, quando necessários, resultando em uma operação mais segura e eficiente.

ABSTRACT

CRITICAL EVALUATION OF METHODS USED TO ESTIMATE *IN SITU* STRESSES IN ROCK MASSES FOR MINING OPERATIONS

Interventions in rock masses have long been widely employed in engineering. Whether rock is used as a raw material or serves as a foundation and support element (such as in tunnels, galleries, and underground chambers) detailed knowledge of the characteristics of the rock mass and its geological and geomechanical conditions is essential to ensure safe and efficient design and execution. In this context, determining the *in situ* stress state is a key factor for planning and conducting works in rock masses. The assessment of these stresses remains one of the major challenges in Rock Mechanics due to the complexity of the associated phenomena and the limitations imposed by natural ground conditions. The stress state of rock masses has been the subject of study for several decades, driving the development and refinement of different investigative methods, each with its own characteristics, simplifications, advantages, and limitations. Some approaches are based on inducing perturbations in the rock mass, such as displacements or deformations, and analysing the rock's response, whereas others seek to evaluate the natural behaviour of the rock mass without external interference. This study aims to review the main methods used to estimate *in situ* stresses in rock masses, highlighting their characteristics, applicability, uncertainties, and limitations. A critical analysis is presented regarding the suitability of each method to different mining contexts, considering factors such as local geology, investigation depth, and the reliability of the results. The research is based on a literature review and analysis of published case studies, including stress estimations conducted in both open-pit and underground mining operations. The limitations arising from data availability, the simplifications adopted, and the uncertainties inherent in each procedure are considered. In addition, a comparative table and a flowchart are presented to assist decision-making regarding the selection of the most appropriate method for each type of mining, contributing to the improvement of future projects. In this context, when planning interventions in rock masses in mining activities, the importance of determining *in situ* stresses becomes evident, as well as the need for a more in-depth guideline for selecting the method to be employed. Thus, it becomes possible to obtain consistent data that support the choice of the mining method, the positioning of structural geometries, and the selection of support systems, when necessary, resulting in a safer and more efficient operation.

SUMÁRIO

CAPITULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO DA PESQUISA	2
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
CAPITULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. CONCEITO DE TENSÕES	4
2.2. TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS	6
2.3. TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS E MINERAÇÃO.....	20
2.4. ESTIMATIVA DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	25
2.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	34
2.5.1. MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSÕES EM SUPERFÍCIES	34
2.5.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS	37
2.5.3. FRATURAMENTO COM REVESTIMENTO FLEXÍVEL (<i>SLEEVE FRACTURING</i>)	48
2.5.4. MÉTODOS DE ALÍVIO EM FUROS DE SONDAÇÃO OU SOBREFURAÇÃO (<i>OVERCORING</i>).....	49
2.5.5. <i>BREAKOUTS</i>	79
2.5.6. <i>DISCINGS</i>	84
2.5.7. MÉTODO DE ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DIAMETRAL DE TESTEMUNHO (<i>DIAMETRICAL CORE DEFORMATION ANALYSIS, DCDA</i>)	87
2.5.8. MÉTODOS GEOFÍSICOS	90
2.5.9. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO.....	98
2.5.10. MÉTODOS DE RETROANÁLISE - ALÍVIO EM GRANDES VOLUMES DE ROCHA (<i>RELIEF OF LARGE ROCK VOLUMES</i>)	103
2.5.11. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS	106
2.5.12. MECANISMOS FOCALIS DE TERREMOTOS	108

2.6. CONTROLE DE QUALIDADE EM ESTIMATIVAS DE TENSÕES EM ROCHAS	
109	
CAPITULO 3. METODOLOGIA DE PESQUISA E ANÁLISE	114
CAPITULO 4. AVALIAÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DOS MÉTODOS	116
4.1. MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSOES EM SUPERFICIES	117
4.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS.....	119
4.3. FRATURAMENTO COM REVESTIMENTO FLEXÍVEL.....	120
4.4. MÉTODOS DE ALÍVIO EM FUROS DE SONDAÇÃO.....	121
4.5. <i>BREAKOUTS</i>	124
4.6. <i>DISCINGS</i>	125
4.7. MÉTODO DE ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DIAMETRAL DE TESTEMUNHO	
126	
4.8. MÉTODOS GEOFÍSICOS	127
4.9. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO	127
4.10. MÉTODOS DE RETROANÁLISE - ALÍVIO EM GRANDES VOLUMES DE ROCHA	
128	
4.11. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS	129
4.12. SINTESE DOS MÉTODOS AVALIADOS.....	130
CAPITULO 5. CONCLUSÕES.....	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Carregamento arbitrário de uma rocha de forma qualquer. (b) A força normal e a força de cisalhamento, atuando sobre uma pequena área em qualquer ponto da superfície de um corte arbitrário através da rocha carregada (Hudson & Harrison, 2000).	4
Figura 2.2 - Os componentes do tensor de tensões atuando em um cubo infinitesimal dentro de um maciço rochoso.....	5
Figura 2.3 - Fontes de forças tectônicas (modificado - Zoback <i>et al.</i> 1989).....	8
Figura 2.4 - Terminologia de tensões (adaptado - Amadei & Stephansson, 1997).....	9
Figura 2.5 - A terminologia das tensões em rochas em três níveis hierárquicos. O Nível 1 separa maciços rochosos homogêneos (AB) de heterogêneos (CD) e rocha intacta (AC) de maciços rochosos escavados (BD). O Nível 2 separa as tensões <i>in situ</i> (A) de acordo com suas forças de origem, como gravidade (A1), tectônica (A2), residual (A3) e maré (A4). O Nível 3 separa as tensões tectônicas de acordo com seu domínio coerente em tensões de primeira ordem (escala de placa), segunda ordem (escala de cadeia montanhosa) e terceira ordem (escala de falha) (traduzido - Zang & Stephansson, 2010).	12
Figura 2.6 - Gráfico da tensão vertical em função da profundidade, z, abaixo da superfície (modificado de Brown & Hoek, 1978, citado por Amadei & Stephansson, 1997).....	15
Figura 2.7 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade, z, abaixo da superfície (modificado de Brown & Hoek, 1978, citado por Amadei & Stephansson, 1997).	15
Figura 2.8 - O <i>World Stress Map</i> (WSM) 2025 (Heidbach <i>et al.</i> , 2025).	19
Figura 2.9 - (a) Condições pré-escavação ao redor de um corpo mineral, e (b) consequências mecânicas das escavações de mineração no corpo mineral. (traduzido - Brady & Brown, 2004).	22
Figura 2.10 - Variabilidade dos valores medidos em função do volume da amostra, ilustrando o REV. (a) Conceito geral (b) Exemplo de dispersão dos dados. (traduzido – Hudson & Harrison, 2000).	30
Figura 2.11 - Esquema do ensaio do macaco plano (traduzido - ASTM D4729-19, 2019).....	35
Figura 2.12 - Solução de Kirsch (1898) relacionando a tensão circunferencial com as tensões horizontais máximas e mínimas na prede de um furo (modificado - Sano <i>et al.</i> 2005).....	39
Figura 2.13 - Configuração de estimativa de tensões por fraturamento hidráulico em furos profundos (modificado de Rutqvist <i>et al.</i> , 2000).	40

Figura 2.14 - O princípio da técnica clássica de medição de tensões por fraturamento hidráulico com o primeiro e segundo ciclos de pressurização. A pressão do poço e o fluxo de injeção da bomba são apresentados em função do tempo, e o poço e a fratura são ilustrados em seções horizontais (modificado de Rutqvist <i>et al.</i> , 2000).....	41
Figura 2.15 - Esquema do HTPF (traduzido - Gaines, <i>et al.</i> 2012, citado por Lin <i>et al.</i> , 2018).	45
Figura 2.16 - Medição das tensões na rocha pelo método de ensaios hidráulicos em fraturas pré-existentes (HTPF) (a), comparado ao fraturamento hidráulico (b). (Traduzido - Ljunggren e Raillard, 1987, citados por Amadei e Stephansson, 1997).....	46
Figura 2.17 - Esquema das etapas típicas do método de sobrefuração em furos pilotos: (a) perfuração de um furo de maior diâmetro até a profundidade desejada de medição; (b) avanço de um furo piloto de pequeno diâmetro a partir do fundo do furo principal; (c) instalação do instrumento de medição no furo piloto; (d) prolongamento do furo principal por <i>overcoring</i> para alívio completo das tensões; (e) vista em seção transversal da medição de tensões pelo método de <i>overcoring</i> . (Lin <i>et al.</i> , 2019).....	54
Figura 2.18 - Geometria da célula CSIRO HI. (a) Seção transversal, (b) orientação dos nove medidores de deformação, (c) ângulos de orientação de cada medidor de deformação (traduzido - Amadei & Stephansson, 1997).	57
Figura 2.19 - Sonda de ensaio CSIRO HI (Adach-Pawelus & Pawelus, 2021).....	59
Figura 2.20 - Sonda Borre utilizada no método de <i>overcoring</i> (Sjoberg & Klasson, 2003). ...	60
Figura 2.21 - Configuração dos medidores de deformação da sonda Borre (traduzido - Sjöberg & Klasson, 2003).....	61
Figura 2.22 - Procedimento de instalação e medição para sobrecorte com a sonda Borre (Sjöberg & Klasson, 2003).....	62
Figura 2.23 - Módulo de aquisição de dados acoplado à célula triaxial (Brandani <i>et al.</i> 2016).	67
Figura 2.24 - Ferramenta IST3D no testemunho após o <i>overcoring</i> (Gray e Keloth, 2025)....	70
Figura 2.25 - Passos envolvendo a instalação do Doorstopper (modificado - Documentação INTERFELS citado por Amadei & Stephansson, 1997).....	72
Figura 2.26 - Visão esquemática do CCBO (traduzido - Sugawara & Obara, 1998).	74
Figura 2.27 - Vista em corte do arranjo do método de abertura de fendas em furos (traduzido - Lin, Zou & Sun, 2019).....	76
Figura 2.28 - Fenômeno de <i>breakout</i> em um poço vertical (Amadei & Stenphansson, 1997).80	

Figura 2.29 - Características do <i>borehole breakout</i> com as tensões representadas para um furo orientado verticalmente (traduzido – Leriche <i>et al.</i> , 2017).....	81
Figura 2.30 - Breakouts típicos em forma de “orelhas de cachorro” (em V), observados em imagens de luz polarizada de seções transversais de furos de sondagem em dois granitos: (a) Lac du Bonnet ($\sigma_h/\sigma_H/\sigma_v = 30/190/30$ MPa) e (b) Westerly ($\sigma_h/\sigma_H/\sigma_v = 50/210/60$ MPa) (Haimson, 2007).....	82
Figura 2.31 - Exemplo de caixa de testemunhos com ocorrência de <i>discings</i> em mina de <i>Bench Stopping</i> (Bustos & Villaescusa, 2024).....	87
Figura 2.32 - Diagrama esquemático mostrando como a expansão do testemunho é causada pelo alívio de tensões durante a perfuração (traduzido - Funato & Ito, 2017).....	89
Figura 2.33 - Amostra de granito instrumentada com extensômetros para ensaios do Efeito Kaiser (Lehtonen <i>et al.</i> , 2012).....	96
Figura 2.34 - Instrumento para medições ASR em um testemunho de sondagem (três pares de transdutores indutivos de deslocamento radial e um transdutor axial são utilizados para medir a resposta anelástica de uma amostra de testemunho) - (traduzido - Ljunggren <i>et al.</i> , 2003). ...	99
Figura 2.35 - Disposição dos extensômetros na superfície do testemunho de rocha (Wang <i>et al.</i> , 2012).	100
Figura 2.36 - Fluxograma da retroanálise para determinação do campo de tensões <i>in situ</i> . (traduzido - Wang <i>et al.</i> , 2025).	106
Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.	115
Figura 4.1 - Fluxograma dos métodos para estimativa de tensões <i>in situ</i> em maciços rochosos a partir do meio de análise (furos de sondagem, análise de dados e superfícies).	137
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia proposta para avaliação do estado de tensões.	141
Figura 4.3 – Métodos de estimativa de tensões <i>in situ</i> considerando a condição do maciço rochoso.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Atividades que requerem o conhecimento das tensões <i>in situ</i> (modificado - Amadei & Stephansson, 1997)	26
Tabela 2.2 - Métodos físicos para a determinação de tensões em materiais deformáveis, com aplicação a rochas e minerais (traduzido - Zang & Stephansson, 2010).....	27
Tabela 2.3 - Métodos de medição de tensões em rochas classificados pelo tipo operacional e pelo volume de rocha envolvido em cada método. (modificado - Ljunggren <i>et al.</i> 2003).	33
Tabela 2.4 – Critérios de qualidade a serem considerados ao estimar tensões em rochas (traduzido - Christiansson & Hudson, 2003)	110
Tabela 4.1 - Sumarização dos métodos estudados.	130

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

NOMEMCLATURAS

AECL	Empresa de Energia Atômica do Canadá
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANZI	Australia New Zealand Inflatable
ANZSI	Auckland New Zealand Soft Inclusion
ASR	Recuperação de Deformação Anelástica
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATV	Acoustic Televiwer
BEM	Método do Elementos de contorno
BHCS-P	Sonda Borehole Chain-Saw Probe
BHFJ	Borehole Flat Jack
CCBO	Sobrefuração De Furo Com Extremidade Cônica Compacta
CMS	Sistema de monitoramento de cavidade
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DCDA	Análise da Deformação Diametral do Testemunho
DCDT	Transformador Diferenciais De Corrente Direta
DD	Diluição modelada
DEM	Método dos Elementos Discretos

DRA	Análise de taxa de deformação
DSCA	Análise diferencial da curva de deformação
EA	Emissão acústica
FEM	Método dos Elementos Finitos
FJ	Flat-jack
FRANC2D/L	Código computacional de mecânica da fratura
GIF	Geotechnical Engineering Bureau Prof. Fecker & Partners
GLP	Gás Liquefeito De Petróleo
HF	Fraturamento Hidráulico
HTPF	Testes Hidráulicos Em Fraturas Pré Existentes
IAM	Módulo de Aquisição Inteligente
IGD	Dados geotécnicos integrados
ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas
LiDAR	Detecção e alcance por luz
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	Transdutor de deslocamento
MAD	Módulo de Aquisição de Dados
OC	Sobrefuração
PGE	Elementos do grupo da platina
QA	Garantia da qualidade
REV	Volume elementar representativo

RQD	Designação de qualidade da rocha
SSPB	Swedish State Power Board
STT	Tubo de tensor de tensões
TA	Auditoria técnica
TEBAR	Terminal Almirante Barroso
URL	Laboratório de Pesquisa Subterrâneo
USBM	United States Bureau of Mines
WSM	World Stress Map

SIMBOLOS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
Au	Ouro
Cu	Cobre
D	Deslocamento
d_{\max}	Diâmetro máximo
d_{\min}	Diâmetro mínimo
E	Módulo de elasticidade
EX	Diâmetro de sondagem 38 mm
$F_1, F_2... F_n$	Forças externas atuando em um corpo rochoso

F_n	Forças normais
F_s	Forças de cisalhamento
g	Aceleração da gravidade
h	horas
Kg/cm^2	Unidade de tensão em quilograma a cada centímetro quadrado
km	Quilômetros
m	metros
min	minutos
mm	milímetros
MPa	Megapascais
N	Newton
n_1, n_2, n_3	Direções principais
Ni	Níquel
$^{\circ}C$	Temperatura, Graus Celsius
P	Pressão
P_0	Poropressão na fratura rochosa
P_b	Pressão de ruptura
P_r	Pressão de reabertura
P_s	Pressão de fechamento
P_w	Pressão no poço
Q_w	Vazão de injeção da bomba

s	Segundos
S_w	Armazenamento do poço
ΔA	Área
ΔS	Tensão diferencial
ε	Deformação
θ	Ângulo medido
μ	Micro
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Peso específico
σ	Tensão
σ	Tensão normal
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
σ_h	Tensão principal horizontal mínima
σ_H	Tensão principal horizontal máxima
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_v	Tensão principal vertical
σ_{xx}, σ_{yy} e σ_{zz}	Tensões normais agindo nos respectivos planos
σ_θ	Tensão circunferencial
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{xy}, τ_{yz} e τ_{zx}	Tensões de cisalhamento agindo nos respectivos planos e orientações

τ_{xz}

Tensão de cisalhamento atuando no plano x com direção z

Ω

Operador transdutor

CAPITULO 1. INTRODUÇÃO

Intervenções em maciços rochosos constituem práticas consolidadas na engenharia geotécnica. Seja a rocha utilizada como fonte de materiais de construção ou como suporte natural para obras de engenharia, essas atividades exigem planejamento cuidadoso para garantir sua execução adequada. A compreensão detalhada das características do maciço e das condições geológicas e geomecânicas do local é indispensável para assegurar tanto a segurança quanto a viabilidade dos trabalhos realizados nesse ambiente.

A determinação do estado de tensões atuante no maciço rochoso, juntamente com a caracterização geológica local, constitui um elemento essencial para compreender seu comportamento diante de intervenções. No entanto, avaliar as tensões *in situ* continua sendo um dos maiores desafios da Mecânica das Rochas. Conforme apontado por Leeman (1959a), a tensão não pode ser medida de forma direta, o que se pode obter são estimativas derivadas de medições indiretas de grandezas correlatas, como a deformação induzida por uma modificação do estado de tensões, sendo tais medições realizadas por meio de métodos específicos. No entanto, cabe ressaltar que, a tensão existe e manifesta-se por meio de diversos fenômenos físicos, como *rockbursts*, entre outros. Trata-se, portanto, de uma grandeza extremamente útil e real do ponto de vista físico, mas que não é passível de medição direta por um único instrumento.

Nas operações de mineração, as tensões *in situ* constituem a principal forma de carregamento que atua sobre as escavações subterrâneas (Bawden, 1993). À medida que a lavra avança, ocorre uma redistribuição dessas tensões, a qual desempenha papel determinante nas deformações e nos mecanismos de ruptura do maciço. A instabilidade resultante pode acarretar consequências graves, incluindo acidentes com vítimas, danos a equipamentos e impactos significativos sobre a continuidade e a eficiência da produção (Amadei & Stephansson, 1997).

O presente estudo tem como finalidade analisar os métodos empregados na estimativa do estado de tensões *in situ* em operações de mineração, abrangendo tanto lavras a céu aberto quanto subterrâneas, com o intuito de destacar a relevância desse tema para a essa atividade, visando menor impacto econômico, ambiental, maximizando a segurança das operações e consequente saúde do trabalhador e tornando a produção mineral mais efetiva.

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro de 2024, publicado pela Agência Nacional de Mineração (ANM) em abril de 2025, existiam no Brasil, à época, 222 minas a céu aberto e 33 minas subterrâneas.

Diante desse cenário, torna-se indispensável o estudo e a aplicação de técnicas que permitam viabilizar a mineração subterrânea, a céu aberto ou mesmo as etapas de transição entre esses métodos. Para que as operações sejam projetadas, executadas e operadas com segurança e eficiência econômica, é fundamental uma compreensão precisa do comportamento do maciço rochoso. Esse conhecimento é essencial para mitigar riscos associados a processos de ruptura de taludes, à ocorrência de fenômenos como o *rockburst* e ao colapso de estruturas subterrâneas.

Para isso, é fundamental conhecer com clareza os métodos disponíveis para a estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos, identificando quais são os mais utilizados e difundidos no mercado. Também é fundamental compreender suas principais características, vantagens, desvantagens, limitações e as simplificações adotadas em cada abordagem.

Para alcançar esse objetivo, o estudo apresenta inicialmente o conceito de tensões a partir dos fundamentos da mecânica dos sólidos. Em seguida, aborda os diferentes tipos de tensões presentes em maciços rochosos, com aprofundamento específico nas tensões *in situ*. Discute-se também como essas tensões influenciam diretamente as operações de mineração e, por fim, são analisados os principais métodos utilizados para estimá-las.

1.1. OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste estudo é pesquisar, examinar, comparar e avaliar os principais métodos utilizados para a estimativa do estado de tensões *in situ* em maciços rochosos empregada na mineração, tanto em operações a céu aberto quanto subterrâneas para auxiliar na tomada de decisões para a execução da atividade, otimização projetos e consequente segurança operacional.

Com os principais métodos disponíveis na literatura devidamente identificados e analisados, busca-se caracterizar cada um deles em termos de suas propriedades essenciais, incluindo vantagens, limitações, níveis de confiabilidade e condições de aplicabilidade.

Ao reunir e sistematizar essas informações, o estudo busca demonstrar a relevância da adequada estimativa das tensões *in situ* para o planejamento, a segurança e a eficiência das operações minerárias, contribuindo para a mitigação de riscos geotécnicos, para a otimização e adequação dos projetos e para a adoção de práticas mais apropriadas no setor.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este estudo inicia-se, no Capítulo 1, trazendo um parâmetro geral da pesquisa desenvolvida e do seu objetivo final.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica que aborda primeiramente o conceito geral de tensões. Em seguida, apresenta o contexto das tensões em maciços rochosos, discutindo suas causas, origens, definições e os principais fatores que as influenciam. Essa contextualização conduz ao foco central da pesquisa, as tensões *in situ* nesse meio.

No Capítulo 3, são apresentados os métodos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, bem como a forma de organização e condução das análises realizadas.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos métodos utilizados para a estimativa das tensões *in situ*, considerando todo o conteúdo pesquisado e discutindo individualmente cada técnica abordada. Além disso, é realizada uma síntese das principais vantagens, desvantagens e limitações desses métodos, organizada em forma de tabela. Também é incluído um fluxograma que indica em que condição cada método é aplicado.

Por fim, o capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nas análises, bem como discute a relevância e a importância do tema no contexto das operações de mineração.

CAPITULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCEITO DE TENSÕES

Considerando um corpo rochoso submetido às forças externas $F_1, F_2... F_n$ (Figura 2.1a) e um plano real ou imaginário que o atravessa, o equilíbrio do sistema é mantido pela atuação de forças normais (F_n) e de cisalhamento (F_s) sobre uma unidade de área, originando as tensões normal (σ) e de cisalhamento (τ) (Figura 2.1b). Como essas forças dependem da orientação da área (ΔA) no interior do corte, torna-se mais apropriado analisar a tensão normal ($\Delta N/\Delta A$) e a tensão de cisalhamento ($\Delta S/\Delta A$) à medida que essa área se reduz progressivamente, aproximando-se de zero (Hudson & Harrison, 2000).

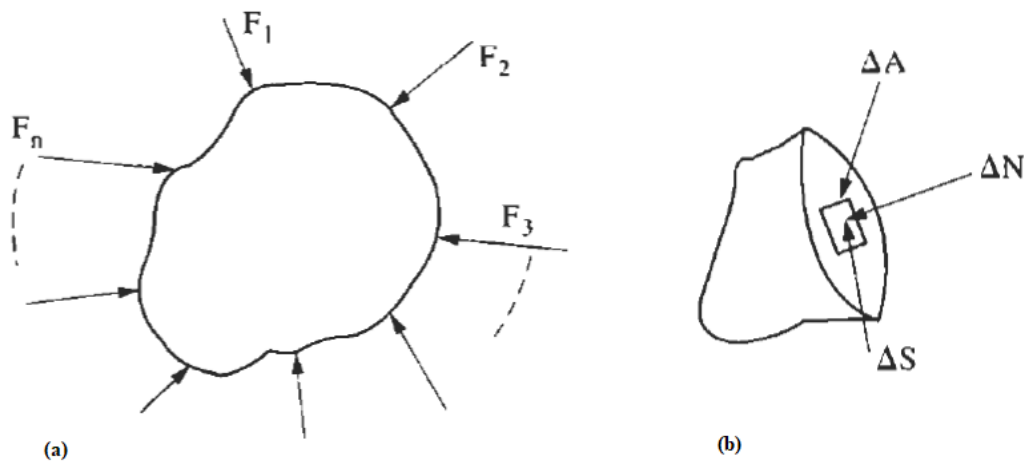


Figura 2.1 - (a) Carregamento arbitrário de uma rocha de forma qualquer. (b) A força normal e a força de cisalhamento, atuando sobre uma pequena área em qualquer ponto da superfície de um corte arbitrário através da rocha carregada (Hudson & Harrison, 2000).

Dessa forma, as tensões normal e de cisalhamento passam a ser tratadas como propriedades pontuais no interior do corpo, podendo, a partir disso, ser formalmente definidas como:

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad (1)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta A} \quad (2)$$

Considere agora um elemento cúbico infinitesimal no interior do maciço rochoso, no qual atuam tensões normais e de cisalhamento em todos os seus planos. Para essa análise, adota-se usualmente um sistema de coordenadas cartesianas x-y-z. A partir do cubo infinitesimal e de seus planos de referência, as tensões atuantes podem ser decompostas em três componentes de tensão normal e seis componentes de tensão de cisalhamento, considerando uma orientação específica. A Figura 2.2 ilustra esse sistema. A convenção adotada estabelece que o primeiro subscrito identifica o plano sobre o qual a tensão atua, enquanto o segundo indica a direção de atuação do componente de tensão. Com base nesse conceito, as nove componentes de tensão podem ser organizadas em uma matriz, na qual as linhas representam as componentes atuantes em cada plano e as colunas correspondem às direções de atuação das respectivas tensões, conforme exemplificado na seguinte equação:

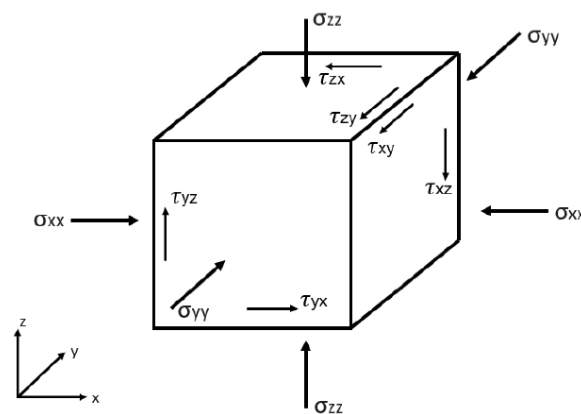


Figura 2.2 - Os componentes do tensor de tensões atuando em um cubo infinitesimal dentro de um maciço rochoso.

$$\text{Matriz de Tensões} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

A análise da matriz de tensões evidencia que o estado de tensões em um ponto é completamente definido por seis componentes independentes, sendo três tensões normais (σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz}) e três tensões de cisalhamento (τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx}). Esse fato é de grande importância, pois implica que qualquer método de estimativa de tensões deve ser capaz de fornecer informações suficientes para a determinação dessas seis componentes (Hudson & Harrison, 2000).

As tensões principais são definidas como os componentes normais de tensão que atuam em direções nas quais as tensões de cisalhamento se anulam, correspondendo aos seus valores máximos e mínimos. A representação do estado de tensões por meio dessas tensões é vantajosa, pois permite identificar diretamente esses valores extremos, sendo indispensável, contudo, a definição de suas respectivas orientações.

As tensões principais têm importância especial na engenharia de rochas, pois todas as superfícies de escavações não suportadas, tanto na superfície quanto no subsolo, não estão sujeitas a tensões de cisalhamento e, portanto, constituem planos de tensões principais. Em conformidade com a Terceira Lei de Newton (a toda ação corresponde uma reação igual e oposta) e desprezando a pressão atmosférica, o componente de tensão normal na interface ar-rocha é nulo, assim como os demais componentes de tensão. Além disso, essa interface pode corresponder a fraturas abertas no maciço rochoso, de modo que a estrutura do maciço exerce influência significativa na distribuição local das tensões.

2.2. TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

A distribuição de tensões em maciços rochosos é uma preocupação central da mecânica das rochas, tanto no que diz respeito à compreensão de processos geológicos básicos, como a tectônica de placas e os terremotos, quanto ao projeto de estruturas de engenharia construídas sobre ou no interior de maciços rochosos. Ao contrário de outros materiais utilizados em projetos de engenharia, a rocha já se encontra submetida a um estado prévio de tensões (tensões virgens), cuja magnitude e orientação são, em geral, desconhecidas. O problema do projeto em rocha é ainda mais complicado pelo fato de que feições estruturais como juntas, fraturas e planos de estratificação podem exercer influência significativa na capacidade do maciço rochoso de resistir a essas forças, isto é, na resistência do maciço rochoso, avaliada em regiões frequentemente extensas afetadas por essas estruturas. Isso pode comprometer a estabilidade da

estrutura de engenharia (Fairhurst, 2003). Segundo o autor, o interesse aprofundado pela deformabilidade e pela resistência da rocha *in situ*, bem como pelas cargas externas aplicadas à rocha e pelas alterações na distribuição dessas cargas decorrentes das atividades de engenharia, foi impulsionado principalmente por diversos avanços paralelos na engenharia de rochas, dentre os quais se destacam:

- a expansão progressiva das atividades de mineração para maiores profundidades, especialmente em formações geológicas estratificadas, como carvão, minério de ferro e sal na Europa, e ouro na Índia e na África do Sul, onde a ocorrência de explosões violentas de rocha (“rockbursts”) e a perda de vidas humanas tornaram-se cada vez mais frequentes;
- operações mais profundas de exploração e produção na engenharia de petróleo, bem como a busca por métodos aprimorados de recuperação de óleo e gás;
- grandes obras públicas, como túneis em terrenos difíceis, câmaras subterrâneas de usinas, taludes rochosos e grandes barragens.

Segundo Zoback *et al.* (1989), o estado de tensões na porção superior e elástica da litosfera terrestre, que se estende aproximadamente da superfície do terreno até profundidades entre 10 e 35 km, é controlado por duas categorias principais de forças. A primeira corresponde às tensões tectônicas, associadas a processos de grande escala, incluindo as forças responsáveis por impulsionar ou resistir ao movimento das placas tectônicas, ilustradas pela Figura 2.3, bem como as forças decorrentes de processos geodinâmicos, como a flexão regional da litosfera causada por cargas superficiais e subsuperficiais e por variações na distribuição de densidade, além das forças termoelásticas relacionadas ao resfriamento da crosta oceânica. A segunda categoria está associada a efeitos locais, tais como a topografia, a anisotropia da resistência ou das propriedades elásticas das rochas, bem como os efeitos da erosão e das escavações, que resultam na geração de tensões locais ou induzidas.



Figura 2.3 - Fontes de forças tectônicas (modificado - Zoback *et al.* 1989).

De acordo com Hoek & Brown (1980), o estado de tensão em um maciço rochoso não perturbado resulta, predominantemente, do peso das camadas sobrejacentes, bem como dos processos relacionados à sua história geológica. De acordo com esses autores, quando há ações antrópicas no maciço rochoso, causando perturbação ao meio, há uma indução de tensões que podem ser suficientemente altas para exceder a resistência da rocha e gerar instabilidade ao meio, causando desabamentos, destacamento em lâmina ou em casos extremos, explosões de rochas (“rockbursts”) que são rupturas violentas e instantâneas do maciço rochoso quando há liberação de grandes quantidades de energia no entorno de escavações neste meio.

Pinto (1989) alega que as tensões existentes nos maciços rochosos podem ser de origem natural, como as devidas à ação da gravidade, chamadas tensões litostáticas, e as devidas a outras causas naturais, como, por exemplo, as de origem tectônica, chamadas tensões latentes, ou podem ser devidas à atividade humana, denominadas então tensões induzidas. O conjunto das tensões litostáticas e das tensões latentes forma as tensões virgens ou tensões iniciais.

Amadei & Stephansson (1997) classificam as tensões em rochas em tensões *in situ* e tensões induzidas. As tensões *in situ*, também denominadas naturais, primitivas ou virgens, são aquelas presentes na rocha antes de qualquer perturbação e resultam da acumulação de eventos ao longo de sua história geológica. Por sua vez, as tensões induzidas surgem devido a modificações artificiais, como escavação, perfuração, bombeamento e carregamento, ou por alterações nas

condições naturais, como secagem, inchamento e consolidação. De acordo com os autores, diversos pesquisadores propuseram classificações diferentes para as tensões *in situ*, resultando em uma terminologia ainda variada. Voight (1966), por exemplo, dividiu as tensões *in situ* (virgens) em dois grupos: gravitacionais e tectônicas, sendo que estas últimas foram subdivididas em componentes atuais e residuais. Já Obert (1968) categorizou as tensões *in situ* em tensões externas, compostas por tensões gravitacionais e tectônicas, e tensões internas, correspondentes às tensões residuais. As tensões externas também são conhecidas como tensões regionais (Fairhurst, 1968).

Na Figura 2.4 é apresentada uma terminologia para as tensões em rochas consolidada por Amadei & Stephansson (1997) baseada nas propostas de Bielenstein & Barron (1971), Hyett *et al.* (1986) e Price & Cosgrove (1990). As tensões induzidas foram ampliadas para englobar tanto aquelas originadas por ações artificiais quanto as resultantes de alterações nas condições naturais, como inchamento, consolidação e outros processos físico-químicos. Além disso, foi incluída uma lista de fenômenos tectônicos, de escala ampla e local, capazes de gerar tensões tectônicas ativas, como empuxo de dorsais, tração de placas (*slab pull*), sucção em fossas, arraste do manto, tensões membranas, vulcanismo, fluxo de calor e migração de tensões.

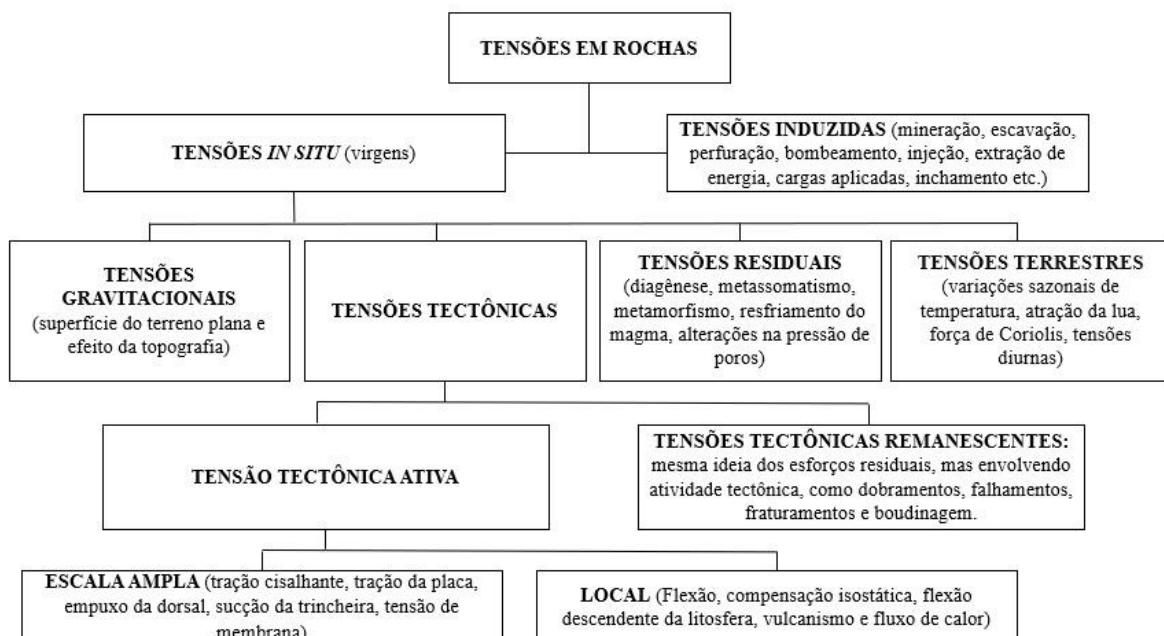


Figura 2.4 - Terminologia de tensões (adaptado - Amadei & Stephansson, 1997).

As tensões tectônicas remanescentes são consideradas como tensões residuais nas quais houve influência de processos tectônicos, como dobramentos, falhamentos, fraturamentos ou boudinagem. Além disso, Amadei & Stephansson (1997) incluíram as tensões terrestres como um grupo distinto dentro das tensões *in situ*, as quais são provocadas por variações diárias e sazonais de temperatura, pela atração lunar e pela força de Coriolis. Embora a contribuição desses componentes de tensão para as medições de tensões *in situ* seja frequentemente negligenciada, ela pode ter relevância significativa, sobretudo em medições realizadas em profundidades rasas ou muito rasas (Voight, 1966; Hooker & Duvall, 1971; Clark & Newman, 1977; Scheidegger, 1982; Sbar et al., 1984; Berest et al., 1992; Swolfs & Walsh, 1990; Swolfs, comunicação pessoal citados por Amadei & Stephansson, 1997).

Hyett *et al.* (1986) apresentaram um glossário dos termos utilizados para referir à tensão *in situ*, são eles:

- Tensão natural: é o estado de tensão que existe na rocha antes de qualquer distúrbio artificial. Sinônimos incluem tensão virgem, tensão primitiva e tensão ativa.
- Tensão induzida: é o estado de tensão decorrente das redistribuições de tensões naturais nos maciços rochosos quando perturbado por obras de engenharia.
- Tensão residual: é o estado de tensão remanescente no maciço rochoso, após o mecanismo de origem ter cessado.
- Tensão tectônica: é o estado de tensão devido à dinâmica interna do planeta, relacionada, principalmente, ao deslocamento relativo das placas litosféricas.
- Tensão gravitacional: é o estado de tensão devido ao peso do maciço rochoso sobreposto a um ponto.
- Tensão termal: é o estado de tensão resultante da variação de temperatura.
- Tensão físico-química: é o estado de tensão estabelecido por mudanças físico-químicas na rocha.
- Paleotensão: é o estado de tensão geologicamente há pouco tempo ativo ou ainda ativo, podendo ser inferida a partir de estruturas geológicas, como por exemplo as falhas.
- Campo de tensão proximal (*near field stress*): é o estado de tensão perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.
- Campo de tensão distal (*far field stress*): é o estado de tensão não perturbado por uma heterogeneidade, anisotropia ou descontinuidade.
- Tensão regional: é o estado de tensão em um domínio geológico relativamente grande.

- Tensão local: é o estado de tensão em um domínio geológico pequeno, usualmente das dimensões de obras de engenharia.

Essas definições possuem caráter essencialmente qualitativo e referem-se a termos que vêm sendo utilizados com maior ou menor subjetividade, o que evidencia a complexidade e a falta de entendimento da origem e do significado das tensões. Essas tensões resultam de uma interação complexa de quatro fatores fundamentais: carregamento gravitacional, forças tectônicas, variações de energia térmica e processos físico-químicos.

Zang & Stephansson (2010), com base em um diagrama originalmente publicado por Amadei & Stephansson (1997), modificaram a terminologia utilizada para a classificação das tensões em rochas, apresentando essa proposta de forma esquemática na Figura 2.5.

No primeiro nível hierárquico, as tensões em rochas podem ser classificadas em quatro grandes grupos (Fig. 2.5, A–D), sendo dois associados a maciços rochosos homogêneos (Fig. 2.5, A–B) e dois a materiais rochosos heterogêneos ou anisotrópicos (Fig. 2.5, C–D), considerando a escala do componente de tensão analisado. A tensão *in situ*, também denominada virgem, primária, pré-mineração, natural ou primitiva, corresponde ao estado de tensões existente no maciço rochoso antes de qualquer perturbação antrópica (Fig. 2.5, A), enquanto a tensão antrópica, também chamada de induzida, secundária ou de mineração, representa a perturbação desse estado natural causada por atividades de engenharia, como escavações, explosões, perfurações e bombeamento, sendo denominada tensão *in situ* perturbada (Fig. 2.5, B). Em materiais rochosos anisotrópicos ou heterogêneos, utilizam-se os termos tensão estrutural e tensão estrutural perturbada para descrever, respectivamente, o estado natural e o estado modificado de tensões (Fig. 2.5, C–D).

No segundo nível hierárquico, a tensão *in situ* (assim como qualquer componente de tensão dos grupos de primeiro nível B, C ou D) é classificada em quatro tipos principais, de acordo com as forças que lhes dão origem (Fig. 2.5, A1–A4). A tensão gravitacional (Fig. 2.5, A1) resulta da ação da gravidade terrestre e é determinada pelo peso do maciço rochoso subjacente. A tensão tectônica (Fig. 2.5, A2) decorre de campos de forças amplos associados à tectônica ativa ou a eventos tectônicos pretéritos, caracterizando tensões remanescentes. As tensões residuais (Fig. 5, A3) são observadas tanto na escala de grãos, em agregados granulares cimentados, quanto na escala da geologia estrutural, como no dobramento de maciços rochosos estratificados durante a formação de cadeias montanhosas, sendo atribuídas a efeitos físico-

químicos. Por fim, as tensões terrestres (Fig. 5, A4) são induzidas por variações diurnas e sazonais de temperatura, pela atração gravitacional da Lua e pela ação da força de Coriolis.

No terceiro nível hierárquico, as tensões tectônicas ativas, originadas da deformação atualmente imposta à crosta terrestre, são subdivididas em tensões tectônicas globais, relacionadas ao deslocamento relativo das placas tectônicas (Fig. 5, A2a), e tensões tectônicas locais, associadas à flexão das placas litosféricas ou a processos isostáticos (Fig. 2.5, A2b).

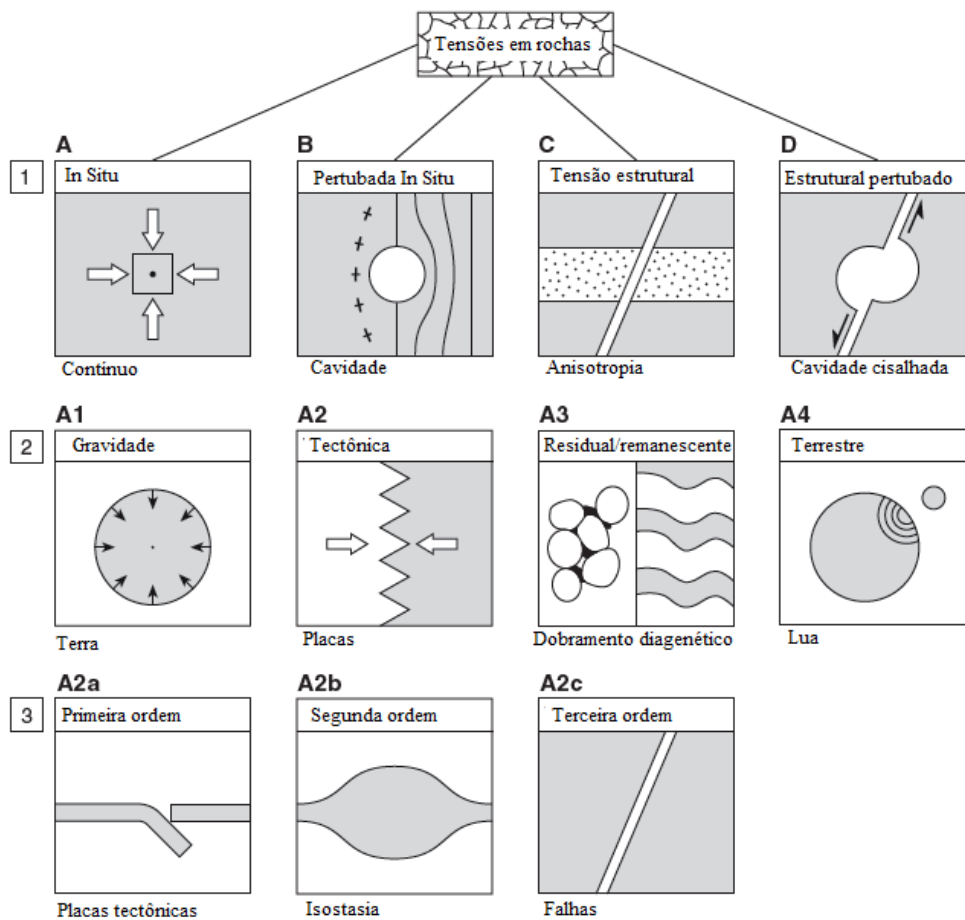


Figura 2.5 - A terminologia das tensões em rochas em três níveis hierárquicos. O Nível 1 separa maciços rochosos homogêneos (AB) de heterogêneos (CD) e rocha intacta (AC) de maciços rochosos escavados (BD). O Nível 2 separa as tensões *in situ* (A) de acordo com suas forças de origem, como gravidade (A1), tectônica (A2), residual (A3) e maré (A4). O Nível 3 separa as tensões tectônicas de acordo com seu domínio coerente em tensões de primeira ordem (escala de placa), segunda ordem (escala de cadeia montanhosa) e terceira ordem (escala de falha) (traduzido - Zang & Stephansson, 2010).

Pinto (1989) destaca os principais fatores que influenciam o estado de tensões inicial de um maciço rochoso, são eles:

- Heterogeneidade: a presença de diferentes tipos de rocha ou alterações internas provoca alívio de tensões em rochas mais deformáveis e aumento em rochas mais rígidas. Essa variabilidade, associada à compartimentação, também gera anisotropia, influenciando a distribuição de tensões e orientando as direções principais do estado de tensão segundo planos normais ou paralelos às famílias de descontinuidade do maciço;
- Topografia: provoca concentração de tensões em vales, surgimento de trações em zonas escarpadas ou cavernas, e rotação das direções principais, que tendem a alinhar-se paralelas ou normais às encostas;
- Ação da água: altera o estado de tensões por variações do nível freático (aumentando ou diminuindo o peso específico das rochas), ao circular em temperaturas muito diferentes da rocha circundante pode provocar variações de volume dos constituintes das rochas (alterando o estado de tensões) e o congelamento nos poros ou nas fissuras da rocha dá origem a trações que modificam o estado de tensões e conduzem a quebra e desagregação do maciço;
- Efeito das propriedades físicas: a diferente deformabilidade dos minerais que constituem a rocha faz com que o estado de tensões varie significativamente entre eles, com os minerais mais rígidos sendo submetidos a tensões mais elevadas do que os mais deformáveis. Nos minerais mais fracos, o processo de ruptura pode gerar falhas localizadas, provocando a redistribuição das tensões. Além disso, as variações térmicas, que diferem de mineral para mineral e de rocha para rocha, também contribuem para alterar o estado de tensões;
- Ação do homem: atividades como escavações, aterros, construção de barragens, edifícios, pontes, obras subterrâneas e exploração mineral promovem alterações significativas no estado de tensões.

Segundo Pinto (1989), se a terra fosse perfeitamente esférica e formada por um material isotrópico, elástico, linear e homogêneo, o peso próprio daria origem a uma pressão litostática com tensões principais σ_v e σ_h , respectivamente vertical e horizontal, com valor dado pelas equações:

$$\sigma_v = \rho g z \quad (4)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v \quad (5)$$

Onde:

- ρ é o peso específico do maciço rochoso;
- g é a aceleração da gravidade;
- ν é o coeficiente de Poisson do maciço rochoso;
- z é a profundidade.

No entanto, as Equações 4 e 5 somente seriam válidas caso a Terra estivesse submetida a um carregamento único e idealizado, sem a ocorrência de processos geológicos como soerguimentos, erosão, deposição ou outras perturbações ao longo do tempo.

Entretanto, esses valores teóricos diferem da realidade prática, uma vez que os maciços rochosos não apresentam comportamento isotrópico, homogêneo, elástico ou linear, além de a superfície do terreno raramente ser horizontal. Ainda assim, a tensão vertical costuma permanecer relativamente próxima do valor teórico proposto, embora desvios significativos possam ocorrer, especialmente em profundidades de até cerca de 1000 m. Em contraste, as tensões horizontais tendem a apresentar variações muito mais pronunciadas em relação aos valores esperados teoricamente (Pinto, 1989).

Amadei & Stephansson (1997) destacam que diversos pesquisadores propuseram relações para descrever a variação das magnitudes das tensões *in situ* verticais e horizontais com a profundidade, tanto para áreas específicas quanto para diferentes regiões do planeta, sendo que a maioria dos dados disponíveis corresponde a profundidades inferiores a 3000 m. Segundo esses autores, Rummel (1986) realizou uma ampla revisão da literatura sobre a variação das tensões com a profundidade, com base em medições obtidas por fraturamento hidráulico em grandes profundidades, conduzidas em distintas partes do mundo. Como ilustração desse comportamento, as Figuras 2.6 e 2.7 apresentam, respectivamente, a variação da tensão vertical e da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical em função da profundidade, conforme proposto por Brown & Hoek (1978).

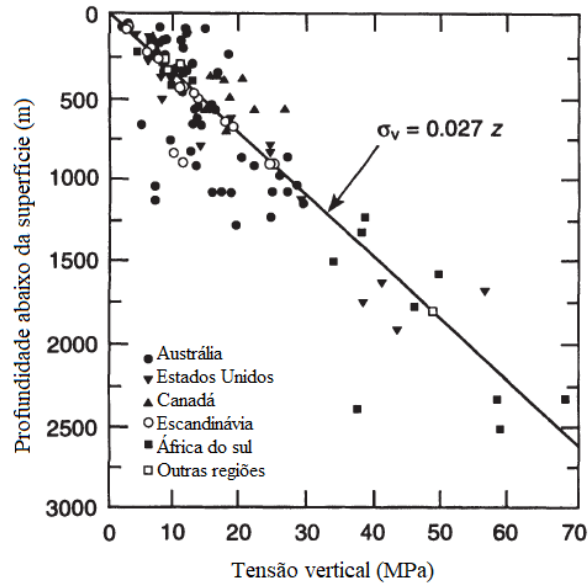


Figura 2.6 - Gráfico da tensão vertical em função da profundidade, z , abaixo da superfície (modificado de Brown & Hoek, 1978, citado por Amadei & Stephansson, 1997).

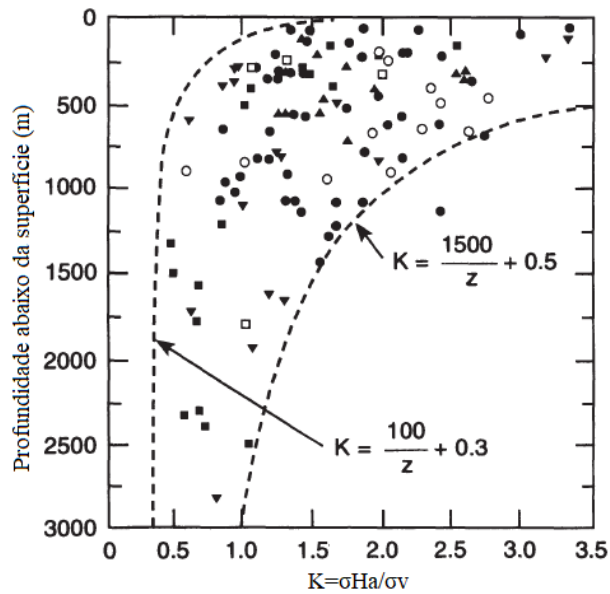


Figura 2.7 - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade, z , abaixo da superfície (modificado de Brown & Hoek, 1978, citado por Amadei & Stephansson, 1997).

No entanto, cabe ressaltar que as tensões principais podem ser consideradas verticais e horizontais em campos praticamente planos e sob condições afastadas de influências topográficas pronunciadas, tais como escarpas, montanhas, vales de rios e cânions.

De acordo com Cornet (1993), as tensões em um maciço rochoso apresentam variação ao longo do tempo independentemente do tipo de rocha e da localização. Na ausência de perturbações artificiais, essas variações são controladas por processos geológicos, como erosão, compactação, rebote glacial e os diversos mecanismos da tectônica de placas, ocorrendo em escalas de tempo que variam desde alguns milhões de anos, no caso de fenômenos tectônicos lentos, até poucos segundos, no caso da queda de tensões associada a terremotos. Entretanto, as tensões também variam no tempo em decorrência da atividade humana, podendo estar relacionadas à dependência temporal da resposta mecânica de um maciço rochoso a uma determinada perturbação mecânica, bem como a atividades humanas contínuas, como aquelas desenvolvidas em minas ou campos petrolíferos, ou ainda a perturbações antrópicas de longo prazo, como nas proximidades de repositórios de rejeitos nucleares.

Hudson & Harrison (2000) destacam fatores geológicos que influenciam o comportamento das rochas e dos maciços rochosos. No contexto dos problemas mecânicos, devem ser considerados tanto o material quanto as forças que atuam sobre ele. A rocha intacta é seccionada por descontinuidades que definem a estrutura do maciço rochoso, o qual já se encontra submetido a um estado de tensões *in situ*. Ao estado de tensões *in situ*, somam-se ainda as influências dos fluidos nos poros, do fluxo de água e do tempo, sendo todos esses aspectos fortemente condicionados pela história geológica, que modifica tanto as características do material quanto o regime de esforços atuantes.

Ademais, os autores destacam três razões básicas para um engenheiro compreender tensões no contexto de mecânica das rochas, são elas:

- Existe um estado de tensões pré-existente no maciço rochoso (que é necessário ser compreendido) que influencia diretamente a análise e o projeto, mesmo em situações em que não há aplicação de novas cargas, como na escavação de túneis não suportados, pois ocorre redistribuição das tensões.
- A intervenção de engenharia altera significativamente o estado de tensões devido à remoção de rocha e à redistribuição das cargas. A maioria dos critérios de engenharia está relacionada à deformabilidade ou à resistência da rocha ou do maciço rochoso, e a análise desses

aspectos envolve tensões. Por exemplo, quase todos os critérios de ruptura são expressos em função de determinadas grandezas de tensão.

- A tensão não é um conceito familiar, pois constitui uma grandeza tensorial, diferente das quantidades comumente encontradas no cotidiano. Um tensor de segunda ordem, por exemplo, possui nove componentes, dos quais seis são independentes; valores que são propriedades pontuais; valores que dependem da orientação em relação a um conjunto de eixos de referência; seis dos nove componentes tornando-se zero em uma orientação particular; três componentes principais; e, por fim, requisitos complexos de redução de dados, pois dois ou mais tensores, em geral, não podem ser obtidos simplesmente pela média das respectivas tensões principais.

Além disso, os autores pontuam que a compreensão do estado de tensões *in situ* em maciços rochosos é motivada, fundamentalmente, por dois aspectos principais: a necessidade de obter um conhecimento básico do campo de tensões para fins de engenharia, permitindo identificar a direção e a magnitude da maior tensão principal, avaliar os efeitos de tensão que afetam as estruturas, prever os modos mais prováveis de ruptura da rocha e, em condições semelhantes, inferir a direção preferencial do fluxo de água subterrânea e a necessidade de dispor de um conhecimento específico e formal das condições de contorno utilizadas nas análises de tensões desenvolvidas durante a fase de projeto de obras de engenharia de rochas.

O campo de tensões corresponde à forma como as tensões variam no espaço e pode ser definido como a distribuição das forças internas em um corpo que equilibram as forças externas aplicadas, sendo caracterizado pelas magnitudes e orientações de seus componentes. Em qualquer ponto de um corpo deformável, o estado de tensão é completamente descrito por três tensões principais (σ_1 , σ_2 , σ_3) e suas respectivas direções (n_1 , n_2 , n_3), os eixos principais de tensão, definidos em relação a um sistema de coordenadas global (x-y-z). Na crosta terrestre, essas tensões são geralmente expressas em termos de tensões principais, podendo uma delas ser associada ao campo gravitacional da Terra e, portanto, orientada verticalmente, denominada tensão vertical (σ_v), enquanto as outras duas correspondem às tensões horizontais mínima (σ_h) e máxima (σ_H), que juntas definem de forma inequívoca o campo de tensões crustais (Zang & Stephansson, 2010).

O *World Stress Map* (WSM) é o único projeto global que compila informações sobre o estado de tensões da crosta terrestre. É uma iniciativa colaborativa de domínio público, envolvendo

academia e indústria, com os objetivos de caracterizar os padrões de tensões crustais e compreender as fontes dessas tensões (Heidbach *et al.*, 2018).

Segundo Heidbach *et al.* (2018), as primeiras compilações globais de tensões crustais foram realizadas por Hast (1973), Ranalli & Chandler (1975), Brown & Hoek (1978) e Richardson *et al.* (1979), com até 150 registros, e, juntamente com a compilação sistemática de mecanismos focais de terremotos (Dziewonski *et al.*, 1981) e o uso de *borehole breakouts* como indicadores de tensão (Bell & Gough, 1979; Plumb & Hickman, 1985; Zoback *et al.*, 1985), deram origem ao *World Stress Map* (WSM) em 1986, com foco em tensões intraplaca e padrões de longa escala. A segunda fase (1996–2008), realizada na *Heidelberg Academy of Sciences and Humanities*, expandiu a compilação para dados de poços e zonas de limite de placas (Heidbach *et al.*, 2010; Sperner *et al.*, 2003), tornando os dados públicos em 1998 por meio do serviço online CASMO (Heidbach *et al.*, 2004) e, posteriormente, com a ferramenta interativa CASMI (Heidbach & Höhne, 2008). A versão WSM de 2008, com 21.750 registros, evidenciou que forças de limite de placas não explicam totalmente a orientação da tensão horizontal máxima (σ_H) (Heidbach *et al.*, 2007; Heidbach *et al.*, 2010; Tingay *et al.*, 2005). A terceira fase, iniciada em 2009 no *Helmholtz Centre Potsdam*, intensificou a colaboração internacional e integrou compilações nacionais de vários países, resultando na versão WSM 2016, com 42.870 registros (mais de 22.000 novos e revisão de 2.000 antigos), marcando o 30º aniversário do projeto e o lançamento da nova *World Stress Map*.

O banco de dados WSM reúne indicadores de tensão provenientes de diferentes fontes:

- Mecanismos focais de terremotos (como mecanismos focais individuais e inversão de tensão de múltiplos mecanismos);
- Registros geofísicos, incluindo *borehole breakouts* e fraturas induzidas por perfuração;
- Métodos de engenharia, como fraturamento hidráulico e sobrefuração;
- Dados geológicos, como análise de deslizamento de falhas e alinhamentos vulcânicos.

O banco de dados também inclui registros de métodos que são atualmente pouco utilizados (como compósitos de mecanismos focais, *borehole slotter*, e fraturas centrais de pétala) ou relativamente recentes (como cisalhamento de ondas em poços).

Cada registro de dados é classificado segundo o sistema de qualidade WSM, que vai de A a E:

- Qualidade A: orientação de σ_H precisa dentro de $\pm 15^\circ$;

- Qualidade B: dentro de $\pm 20^\circ$;
- Qualidade C: dentro de $\pm 25^\circ$;
- Qualidade D: dentro de $\pm 40^\circ$;
- Qualidade E: registros com informações incompletas ou pouco confiáveis, ou quando o desvio padrão excede $\pm 40^\circ$;

A Figura 2.8 ilustra o *World Stress Map (WSM) 2025*:

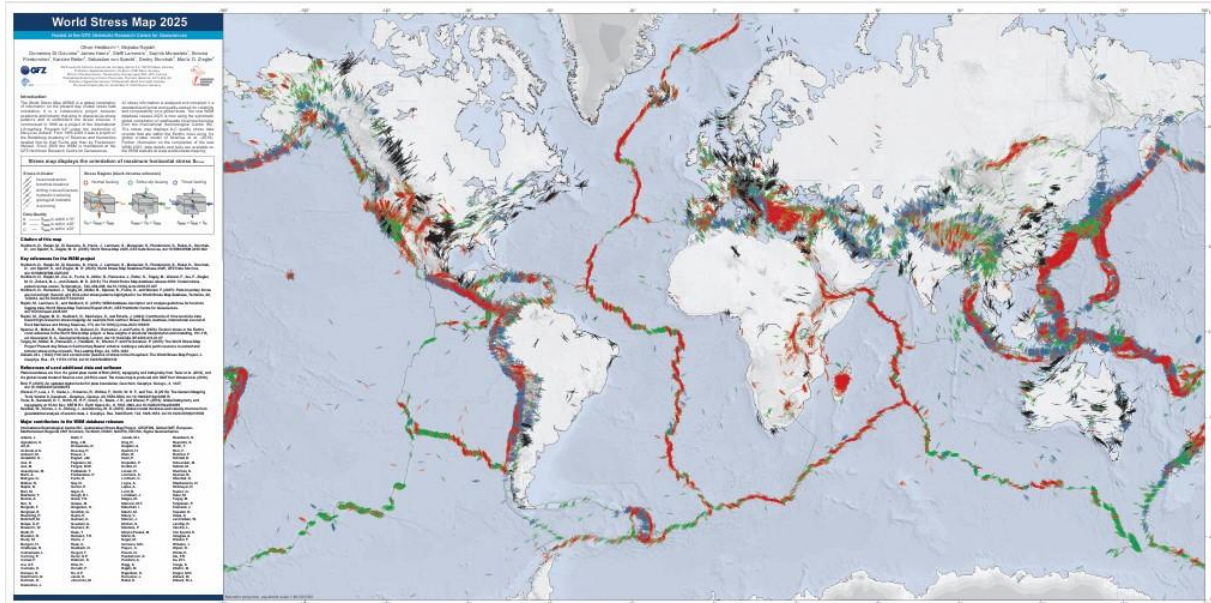


Figura 2.8 - O *World Stress Map (WSM) 2025* (Heidbach *et al.*, 2025).

Magalhães (1999) apresentou as determinações de tensões obtidas por meio de análises de falhas, estimativas *in situ*, estudos de contextos geológico-estruturais, tratamentos estatísticos de fotoalinhamentos de drenagem, entre outros métodos, realizados no Brasil na época. São eles:

- Usina Hidrelétrica Serra da Mesa, norte de Goiás (fraturamento hidráulico, sobrefuração e análise de falhas);
- Mina subterrânea de Baltar e mina a céu aberto de Salto, municípios de Votorantim e Salto de Pirapora, SP, respectivamente (sobrefuração e análise de falhas);
- Projeto de cavernas para armazenamento de gás liquefeito de petróleo (GLP) no Terminal Almirante Barroso (TEBAR), Município de São Sebastião, SP (fraturamento hidráulico e análise de falhas);

- Mina subterrânea do Morro da Usina, Município de Vazante, MG (sobrefuração e análise de fotoalinhamentos de drenagem);
- Mina subterrânea e a céu aberto de Caraíba, Município de Jaguarari, BA (sobrefuração e análise de falhas);
- Usina Hidrelétrica Porto Primavera, Rio Paraná, SP/MS (análise de falhas e ensaios hidráulicos tridimensionais);
- Usina Hidrelétrica Salto Santiago, Rio Iguaçu, PR (análise de falhas);
- Usina Hidroelétrica Canoas I, Rio Paranapanema, SP/PR (análise de falhas);
- Mina a céu aberto de Jacupiranga, Município de Cajati, SP (análise de falhas);
- Planalto de Poços de Caldas, MG (análise de falhas).

Adicionalmente, Armelin (2010) citando Mafra (2001) menciona que no Brasil, o problema das tensões *in situ* nos maciços rochosos foi pouco tratado até à época, e acrescenta mais dois casos:

- UHE Queimado (MG) (sobrefuração);
- Canal de Pereira Barreto (SP), (método de cancelamento de deformações utilizando almofadas planas de pequena área desenvolvidas especialmente para rochas sedimentares).

2.3. TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS E MINERAÇÃO

Conforme destacado por Amadei & Stephansson (1997), naquele momento a mecânica das rochas havia se consolidado como uma ferramenta essencialmente prática para a operação de minas, tanto a céu aberto quanto subterrâneas. Em função do expressivo desenvolvimento das técnicas de modelagem numérica, da aplicação sistemática de classificações de maciços rochosos e da melhoria significativa dos métodos de determinação das tensões atuantes nas rochas esse tema se tornou mais amplamente discutido e tratado. As tensões *in situ* representam o mecanismo básico de carregamento das escavações subterrâneas (Bawden, 1993), e sua redistribuição decorrente do avanço da mineração é o principal fator responsável pelas deformações e pelos processos de ruptura do maciço rochoso. Tais instabilidades podem gerar consequências severas, como acidentes com vítimas, danos a equipamentos e, conseqüentemente, prejuízos à continuidade e à eficiência da produção.

De acordo com os autores, diversos fatores inerentes à atividade de mineração, como a profundidade da lavra, a geometria da mina e a taxa e o volume de material extraído,

influenciam diretamente a redistribuição das tensões no maciço rochoso e, conseqüentemente, a ocorrência de estouros de rocha (*rockbursts*) e de sismicidade induzida pela mineração (Cook, 1976; McGarr & Wiebols, 1977). Na mineração por câmaras e pilares (*room and pillar*), as tensões atuantes nos pilares condicionam tanto a taxa global de extração quanto a estabilidade e a configuração geral da mina.

Com o avanço das operações para maiores profundidades, os engenheiros de minas passaram a lidar com campos de tensões *in situ* progressivamente mais elevados, e a combinação de minas mais profundas com aberturas de maior porte contribuiu para o aumento da frequência e da severidade da sismicidade de mina e dos colapsos de aberturas subterrâneas, sendo a sismicidade definida, essencialmente, como a ruptura da rocha decorrente da alteração do estado de tensões virgens provocada pela abertura das escavações. Nesse contexto, o conhecimento prévio das zonas de fraqueza existentes nos maciços rochosos, aliado à caracterização do campo de tensões *in situ*, constitui uma ferramenta fundamental para a identificação de áreas mais suscetíveis à ocorrência de grandes falhas induzidas pela mineração e de eventos sísmicos associados (Amadei & Stephansson, 1997).

A adoção dos fundamentos da mecânica das rochas na engenharia de minas subterrâneas apoia-se em pressupostos básicos, porém fundamentais. Inicialmente, assume-se que o maciço rochoso pode ser descrito por propriedades mecânicas representativas, determinadas por meio de ensaios normalizados ou estimadas a partir de metodologias consolidadas. Além disso, considera-se que a atividade de mineração subterrânea gera uma estrutura rochosa composta por vazios, elementos de suporte e pilares de contenção (*abutments*), cujo comportamento mecânico pode ser analisado à luz dos princípios da mecânica clássica. Por fim, entende-se que a possibilidade de antecipar e controlar a resposta mecânica do maciço rochoso hospedeiro é um fator determinante para garantir a segurança operacional e a viabilidade econômica da mina. Embora esses conceitos possam parecer intuitivos, a aplicação sistemática da mecânica no projeto e no dimensionamento de escavações subterrâneas representa um avanço relativamente recente na prática da engenharia de minas (Hood & Brown, 1999 citados por Brady & Brown, 2004).

A Figura 2.9a ilustra uma seção transversal de um corpo mineral plano e homogêneo, a partir da qual é possível compreender alguns dos principais processos mecânicos associados à escavação de rochas na mineração subterrânea. Os volumes delimitados por ABCD e EFGH

correspondem a blocos de minério destinados à lavra. No estado anterior à mineração, o material contido nesses limites exerce forças de sustentação sobre o maciço rochoso adjacente. Com a remoção do minério, conforme mostrado na Figura 2.9b, essas forças deixam de atuar. Desse modo, o processo de lavra pode ser interpretado, do ponto de vista estático, como a aplicação de um conjunto de forças nas superfícies ABCD e EFGH com a mesma magnitude, porém com sentido oposto àquelas existentes no estado original.

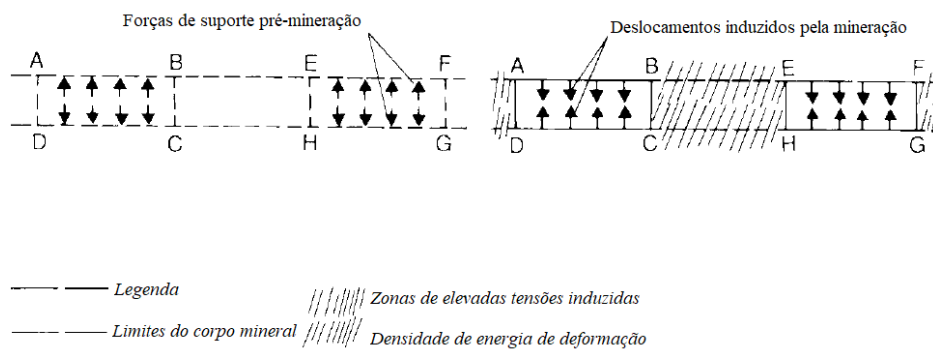


Figura 2.9 - (a) Condições pré-escavação ao redor de um corpo mineral, e (b) consequências mecânicas das escavações de mineração no corpo mineral. (traduzido - Brady & Brown, 2004).

Como resultado da atuação das forças geradas pela atividade de mineração, o maciço rochoso passa a sofrer uma série de alterações mecânicas. Inicialmente, a rocha encaixante adjacente tende a se deslocar em direção às cavidades escavadas, enquanto tensões e deslocamentos decorrentes da redistribuição do campo de tensões se desenvolvem tanto no pilar central quanto nos pilares de contenção. As tensões finais atuantes nesses elementos estruturais decorrem da superposição das tensões induzidas pela lavra com o campo de tensões pré-existente no maciço rochoso. Adicionalmente, a interação entre as forças de superfície induzidas e os deslocamentos correspondentes provoca um incremento da energia de deformação no maciço, a qual se concentra localmente nas regiões onde ocorrem maiores níveis de concentração de tensões (Brady & Brown, 2004).

O desenvolvimento relativamente recente da mecânica das rochas como uma ciência aplicada à mineração resulta da convergência de diversos fatores, entre os quais se destaca o aumento das dimensões das escavações e das taxas de produção nas operações subterrâneas,

impulsionado pela busca de maior rentabilidade por meio do ganho de escala de produção. Esse cenário elevou o nível de capitalização dos projetos, exigindo, maior confiabilidade no desempenho das minas ao longo de sua vida útil e, conseqüentemente, a adoção de métodos mais sistemáticos e rigorosos no projeto, no planejamento e na programação das operações. Paralelamente, a ampliação da escala física das minas subterrâneas intensificou a necessidade de um projeto estrutural mais eficiente, uma vez que o potencial para falhas extensas tende a aumentar com o tamanho do domínio ativo da lavra.

Além disso, a exploração de recursos minerais em condições geológicas e geomecânicas desfavoráveis, associada ao avanço contínuo da mineração para maiores profundidades em diversas regiões do mundo, estimulou pesquisas voltadas ao comportamento dos maciços rochosos submetidos a elevados níveis de tensão. Por fim, preocupações sociais mais recentes relacionadas à conservação de recursos naturais e à segurança industrial também exerceram influência significativa, refletindo-se em esforços para maximizar a recuperação das reservas minerais e em uma análise mais criteriosa das práticas e técnicas necessárias para garantir ambientes de trabalho subterrâneos seguros e estáveis, o que ampliou as demandas sobre a capacitação técnica e a competência das empresas de mineração e de suas organizações de suporte (Brady & Brown, 2004).

De acordo com Brady & Brown (2004), o projeto de uma estrutura subterrânea em rocha difere de outros tipos de projeto estrutural quanto à natureza das cargas que atuam no sistema. Em estruturas convencionais de superfície, a geometria da estrutura e sua função operacional definem as cargas impostas ao sistema. Em uma estrutura subterrânea em rocha, o meio rochoso encontra-se submetido a um estado inicial de tensões antes da escavação. O estado final de tensões na estrutura, após a escavação, é o resultado da combinação entre o estado inicial de tensões e as tensões induzidas pela escavação. Como as tensões induzidas estão diretamente relacionadas às tensões iniciais, torna-se evidente que a especificação e a determinação do estado de tensões pré-escavação constituem um requisito fundamental para qualquer análise de projeto.

Com frequência, é possível obter determinar da ordem de grandeza das tensões e de suas direções. Entretanto, sem estimativas complementares, não há como garantir a precisão ou conhecer a margem de erro dessas determinações. Embora esse tipo de estimativa seja amplamente utilizado na mineração, seu alto custo faz com que não seja prática comum na

engenharia civil. Ainda assim, há diversas situações nessa área em que compreender o estado de tensões é fundamental, ou em que a ausência dessa informação pode acarretar custos tão elevados que a implementação de um programa detalhado de estimativa de tensões se torna plenamente justificável (Goodman, 1989).

Por exemplo, na definição da orientação de uma caverna, busca-se evitar que seu eixo principal fique disposto de forma perpendicular à maior tensão principal. Quando as tensões iniciais apresentam valores elevados, a geometria da escavação deve ser definida prioritariamente com o objetivo de reduzir concentrações de tensão. A compreensão do regime de tensões na rocha também é fundamental para o planejamento de obras subterrâneas de maior complexidade. Uma casa de força subterrânea, por exemplo, é composta por um sistema tridimensional de escavações, que pode incluir salão de máquinas, galeria de transformadores, poços de cabos de baixa tensão, túneis de pressão, poços de oscilação, armadilhas de rocha, túneis de acesso, túneis de ventilação, túneis de transporte de material escavado, condutos forçados, tubos de sucção, entre outras aberturas. Fraturas que se iniciam em uma dessas escavações não devem se propagar até as demais. Como as fraturas tendem a se desenvolver em planos perpendiculares a σ_3 , o conhecimento da orientação das tensões possibilita a definição de um arranjo que minimize esse risco (Goodman, 1989).

Esse exemplo ilustra apenas parte dos casos em que a compreensão do estado de tensões pode ser incorporada ao projeto de engenharia. De forma mais ampla, o estado de tensões constitui uma propriedade fundamental da rocha, cujas magnitudes e orientações influenciam a resistência global, a permeabilidade, a deformabilidade e outras características relevantes do maciço rochoso. Dessa maneira, ao trabalhar com rochas *in situ*, o conhecimento do estado inicial de tensões dificilmente pode ser considerado irrelevante.

Li *et al.* (2021) realizam uma abordagem abrangente sobre os métodos de determinação das tensões *in situ* e suas principais aplicações na engenharia de minas. O estudo contempla, entre outros aspectos, a otimização do projeto de lavra, os mecanismos e a previsão de estouros de rocha (*rockbursts*), o controle da estabilidade do maciço rochoso, a análise da estabilidade de falhas, a exploração e o aproveitamento do metano em camadas de carvão, a previsão de explosões de carvão e gás, a avaliação de influxos de água provenientes do piso das camadas carboníferas e as técnicas de fragmentação de rochas sob elevados níveis de tensão. Os autores

concluem que esses avanços são essenciais para garantir a recuperação dos recursos minerais de forma segura, econômica e eficiente.

Cai *et al.* (2000) apresentaram as técnicas de estimativa de tensões *in situ* e os resultados destas, realizadas em cinco minas de metal localizadas em diferentes regiões da China, ilustrando as características do estado de tensões *in situ* nas cinco minas. Os autores também apresentam a aplicação dos resultados das estimativas de tensões no projeto de mineração das minas.

2.4. ESTIMATIVA DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

A rocha na crosta terrestre está submetida a um estado de tensões *in situ* e, quando uma escavação é realizada na rocha, essas tensões são perturbadas e redistribuídas nas proximidades da escavação. Antes que a distribuição de tensões ao redor de qualquer escavação artificial em rocha possa ser calculada, o estado de tensões pré-existente deve ser estimado (Hoek & Brown, 1980).

Tensões em maciços rochosos são grandezas de difícil estimativa quando comparadas a outras propriedades das rochas. De acordo com Leeman (1959) citado por Amadei & Stephansson (1997) é impossível medir a tensão diretamente, pois, na realidade, trata-se de uma grandeza não diretamente mensurável; só é possível deduzir as tensões em um corpo sólido a partir dos resultados de medições obtidas por meio de métodos indiretos.

Amadei e Stephansson (1997) destacam que a compreensão do estado de tensões *in situ* na crosta terrestre é fundamental para a análise e a solução de diversos problemas envolvendo rochas nas áreas da engenharia civil, de minas, de petróleo e de energia, assim como na geologia e na geofísica. Os autores também apresentam uma relação de atividades nas quais as tensões *in situ* exercem influência decisiva, conforme mostrado na Tabela 2.1.

De modo geral, os problemas de estabilidade associados às tensões tendem a se intensificar com o aumento da profundidade, mas também podem ocorrer em escavações rasas (0-200 m) devido à presença de elevadas tensões horizontais *in situ*. Escavações em rochas altamente tensionadas são mais complexas e demandam estratégias específicas para reduzir os efeitos dessas tensões, que podem resultar em fenômenos como flambamento do piso, lascamento (*spalling*), esmagamento (*squeezing*), deslocamentos das paredes da escavação e explosões de rocha (*rockbursts*). Tais efeitos adversos podem afetar diversas obras de engenharia, incluindo canais,

pontes, escavações a céu aberto, poços, túneis e atividades de mineração, além de dificultar operações de perfuração. Por outro lado, um efeito positivo das altas tensões é a maior compacidade da rocha, o que reduz a infiltração de água em obras subterrâneas e limita o transporte de contaminantes.

Tabela 2.1 - Atividades que requerem o conhecimento das tensões *in situ* (modificado - Amadei & Stephansson, 1997)

Engenharia civil e de minas	Estabilidade de escavações subterrâneas (túneis, minas, cavernas, poços, realces, galerias) Perfuração e desmonte por explosivos Dimensionamento de pilares Projeto de sistemas de suporte Previsão de <i>rockbursts</i> Fluxo de fluidos e transporte de contaminantes Barragens Estabilidade de taludes
Desenvolvimento energético	Estabilidade e desvio de poços Deformação e ruptura de poços Fraturamento e propagação de fraturas Fluxo de fluidos e problemas geotérmicos Gestão da produção de reservatórios Extração e armazenamento de energia
Geologia / Geofísica	Orogênese Previsão de terremotos Tectônica de placas Neotectônica Geologia estrutural Vulcanologia Glaciação

De acordo com Fairhurst (2003) uma das principais dificuldades em muitos projetos de engenharia de rochas consiste em estimar a resistência e a deformabilidade do maciço rochoso na escala das escavações ou das estruturas envolvidas, sendo o desafio central compreender a interação entre o estado de tensões *in situ* (e as alterações induzidas pelas atividades de engenharia) e a capacidade da rocha de suportar as tensões que lhe são aplicadas.

As tensões não podem ser determinadas de maneira direta, sendo sua avaliação realizada de forma indireta, como por meio da medição das deformações. Os valores de deformação observados em um corpo fora do equilíbrio, que tende ao equilíbrio, associados ao conhecimento teórico do seu comportamento constitutivo (relação entre tensão-deformação), possibilitam a estimativa do estado de tensões atuante em um corpo deformável. A física envolvida na medição de tensões pode ser organizada em seis metodologias distintas, conforme disposto na Tabela 2.2. No caso de rochas e minerais, essas técnicas, originalmente desenvolvidas para as ciências dos materiais, requerem adaptações específicas. (Zang & Stephansson, 2010).

Tabela 2.2 - Métodos físicos para a determinação de tensões em materiais deformáveis, com aplicação a rochas e minerais (traduzido - Zang & Stephansson, 2010).

	Método	Parâmetro físico	Relação matemática	Referência
1	Mecânico	Variação no comprimento relativo, ΔL ; efeito das fraturas (trincas) nos módulos elásticos	$\sigma = E \frac{\Delta L}{L_0}$	Walsh (1965, 1980), O'Connell & Budiansky (1974)
1A	Mecânica da fratura	Resistência à fratura frágil por tração, T_0	$T_0 = \frac{K_{Jc}}{F(\frac{c}{R})\sqrt{c\pi}}$	Abou-Sayed <i>et al.</i> (1978)
2	<i>Strain Gauges</i>	Variação da resistência elétrica relativa, ΔR	$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta L}{L_0}$	Nichols (1975)
2A	Análise de Deformação Diferencial	Deformações de fechamento de fraturas a partir de ΔR	Análogo ao método 2, com três rosetas de extensômetros	Simmons <i>et al.</i> (1974), Dey & Brown (1986)
3	Difração de Raios X	Variação no ângulo de difração, $\Delta\theta$	$\varepsilon(d) = -\cot(\theta)\Delta\theta$	Krawitz (2001)
3A	Difração de nêutrons	(a) Método dispersivo em ângulo, $\Delta\theta$ (b) Tempo de voo (TOF), Δt	Análogo ao 3 $\varepsilon_{kkl} = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{t - t_0}{t_0}$	Hutchings <i>et al.</i> (2005), Daymond (2006)
4	Fotoelasticidade	Número n de franjas isocromáticas	$nS = D(S_1 - S_2)$	Frocht (1941), Hawkes (1971)
4A	Interferometria holográfica	Intensidade da luz laser, I, com número de franjas	$I = UU^*$	Hecht & Zajac (1979), Bass <i>et al.</i> (1986), Schmitt <i>et al.</i> (2006)

5	Método ultrassônico	Velocidades das ondas ultrassônicas, v	$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{4G + n}{8G^2} (S_2 - S_3)$	Murnaghan 1951
5A	Análise da velocidade das ondas	Efeito das fraturas (trincas) na velocidade das ondas em um vaso de pressão	$v = v(\varphi, p_c)$	Birch (1960), Ren & Hudson (1985)
6	Método micromagnético	Campo magnético B(H) — histerese	Histerese B(H)	Peiter (1992), Theiner (1997)

O estado de tensões em um ponto de um maciço rochoso é normalmente descrito pelas magnitudes e orientações das tensões principais (lembrando que esse estado é completamente caracterizado por seis parâmetros independentes) assim, qualquer método empregado para estimar as tensões *in situ* deve necessariamente envolver, no mínimo, seis determinações independentes (Hudson e Harrison, 2000).

A estimativa de tensões distingue-se de outras medições na engenharia de rochas porque a tensão é um conceito formulado no contexto da mecânica do contínuo e não corresponde a uma grandeza física diretamente mensurável. Dessa forma, somente a tensão média em uma região finita do maciço rochoso pode ser determinada, desde que exista uma relação conhecida entre essa tensão e um efeito observável, por meio de um operador capaz de converter a grandeza medida em tensão (Eq. 6). Todas as técnicas de determinação de tensões fundamentam-se nesse princípio, e a confiabilidade dos resultados depende diretamente do grau em que o operador adotado representa adequadamente a relação real entre a tensão inferida e o efeito medido (Fairhurst, 2003).

$$\sigma = \Omega \varepsilon \quad (6)$$

Onde Ω é o operador que traduz a grandeza medida na tensão desejada.

O exemplo mais simples de um operador é o módulo de elasticidade E de um corpo de prova isotrópico e elástico submetido à compressão uniaxial, que gera a deformação uniaxial medida ε . A aplicação do operador, conforme indicado, permite determinar a tensão uniaxial σ .

Para a realização da análise estatística de dados de tensões, Hudson e Harrison (2000) destacam que, como o tensor de tensões é descrito por uma matriz com seis componentes independentes (Eq. 3), o cálculo da média estatística não deve ser feito a partir das médias das tensões principais e de seus respectivos desvios-padrão, como ocorre no caso de grandezas escalares. Para correlacionar múltiplas medições de tensões realizadas em uma mesma região, deve-se considerar que o estado de tensões é definido pelas magnitudes e orientações das tensões principais. Assim, o procedimento correto consiste em expressar todos os componentes de tensão em um sistema de referência comum, calcular a média desses componentes e, posteriormente, determinar as tensões principais a partir dos seis valores médios obtidos.

O volume elementar representativo para tensão (*Representative Elemental Volume – REV*) corresponde ao volume mínimo de rocha que contém heterogeneidades suficientes para que os valores médios de tensão obtidos sejam estatisticamente consistentes em ensaios repetidos, reduzindo a dispersão observada nas medições. Em ensaios realizados em rochas, essa dispersão decorre tanto da heterogeneidade natural do material quanto, principalmente, da influência das descontinuidades pré-existentes. À medida que o volume da amostra aumenta, o conjunto de descontinuidades torna-se progressivamente mais representativo do ponto de vista estatístico, até que o REV seja alcançado, conceito aplicável a todas as propriedades das rochas influenciadas por descontinuidades e particularmente relevante — e paradoxal — no caso das tensões, que são definidas como propriedades pontuais, associadas à volume nulo. Esse paradoxo surge porque, embora se busque estimar tensões *in situ* atuantes em volumes maiores que o REV, necessárias como condições de contorno em análises numéricas de estruturas de engenharia, máximos locais de tensão em escala sub-REV, atuando sobre pequenos volumes de rocha, podem ser decisivos para a estabilidade global da estrutura. A variabilidade do estado de tensões em função do volume amostrado tem fortes implicações para as estratégias de estimativa de tensões, para a redução dos dados e para sua apresentação (Hudson e Harrison, 2000). A Figura 2.10 demonstra a variabilidade dos valores medidos em função do volume da amostra.

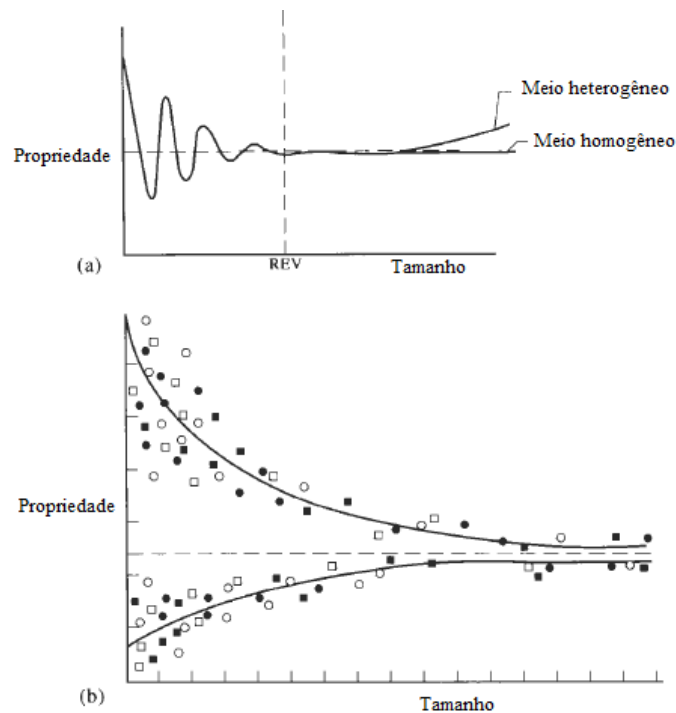


Figura 2.10 - Variabilidade dos valores medidos em função do volume da amostra, ilustrando o REV. (a) Conceito geral (b) Exemplo de dispersão dos dados. (traduzido – Hudson & Harisson, 2000).

Amadei & Stephansson (1997) listam os fatores que devem ser considerados ao planejar um programa de estimativa de tensões *in situ*:

- Geologia e ambiente do local: Devem ser devidamente identificados, incluindo topografia, tipo de rocha, estruturas geológicas, anisotropia, heterogeneidades e probabilidade de ocorrência de altas tensões. Esses fatores são importantes para auxiliar na seleção do método de estimativa mais adequado, na escolha da localização das medições e na interpretação dos resultados. Outros aspectos relevantes incluem a presença de água, a temperatura da rocha e da água e a possível influência de condições externas.
- Objetivos das medições: Devem estar claramente definidos, especialmente quanto à forma como os resultados serão integrados ao projeto em questão. Isso influencia a escolha da técnica, a localização dos pontos e o número de estimativas e as direções e profundidades a serem avaliadas.
- Equipamentos e equipe: É necessário avaliar os recursos disponíveis para a execução das estimativas.

- Acesso e serviços: O acesso ao local e os serviços disponíveis devem ser identificados.
- Orçamento e tempo: Devem ser considerados para garantir que o programa de estimativas seja viável dentro das limitações do projeto.
- Métodos múltiplos e consistência: Para um mesmo projeto, as tensões podem ser determinadas utilizando-se vários métodos, diretos ou indiretos, no mesmo local ou em diferentes locais. Essa abordagem é recomendada, pois permite avaliar a consistência e confiabilidade dos dados. Os resultados de cada método podem ser analisados separadamente para verificar se as suposições de cada técnica foram atendidas ou combinados para impor restrições mais rigorosas ao campo de tensões *in situ*. A combinação de dados é especialmente útil quando o número de medições disponíveis para cada método é limitado.

Na engenharia de obras subterrâneas, o estado de tensões *in situ* exerce papel fundamental no projeto das escavações e nas decisões técnicas essenciais. A magnitude e a distribuição dessas tensões condicionam a geometria, a forma, as dimensões, a orientação e a sequência de execução das aberturas subterrâneas, além de orientar a escolha e o dimensionamento dos sistemas de suporte (Amadei & Stephansson, 1997).

A estimativa do estado de tensões em rochas pode ser complexa e, em determinadas situações, envolver custos elevados. Por isso, é fundamental que os benefícios esperados das medições sejam avaliados de forma criteriosa e que o programa de investigação seja adequadamente planejado. Resultados obtidos em conjunto com medições de deformação, microsismicidade e métodos geofísicos complementares oferecem uma interpretação mais robusta do que quando considerados de forma isolada. O principal propósito dessas estimativas é caracterizar o estado de tensões e sua variação espacial em uma região, já que estimativas pontuais, realizadas em um número limitado de locais, dificilmente permitem extrapolações confiáveis para áreas mais amplas, sobretudo em ambientes complexos, como regiões montanhosas, onde os efeitos topográficos podem provocar variações locais significativas nas tensões (Fairhurst, 2003).

Amadei & Stephansson (1997) propõem que, antes de se estimar as tensões virgens utilizando os métodos disponíveis, é recomendável realizar uma caracterização prévia do campo de tensões *in situ*. Essa caracterização pode ser obtida por meio de relações tensão-profundidade, observações de estimativas de tensões realizadas anteriormente na região de interesse, extrapolação de áreas com condições geológicas e tectônicas semelhantes, além da análise da

topografia, geologia, estrutura da rocha, histórico de carregamento, movimentos iniciais de terremotos, ocorrência de fenômenos de liberação de tensões (como fluência, *pop-ups* e flambagem), rompimentos em furos de sondagem, túneis e poços, explosões de rocha (*rockbursts*), e da presença de estratificação, heterogeneidades ou estruturas geológicas como falhas, dobras, zonas de cisalhamento, discordâncias, condutos vulcânicos e diques. Essa avaliação é especialmente útil nas fases iniciais do projeto de engenharia, no planejamento das obras e na definição dos métodos e locais de estimativa das tensões.

Li, Wu & Cai (2021) alegam que, a forma mais direta e eficaz para compreender o estado de tensões *in situ* em uma determinada área de interesse é estimar as tensões no próprio local. Segundo os autores, desde que o conceito de tensões *in situ* foi proposto, a aplicação de sua estimativa em obras de engenharia e em pesquisas em ciências da Terra tem recebido atenção crescente.

Após várias décadas de desenvolvimento, uma ampla gama de métodos para a estimativa das tensões *in situ* foi criada e aplicada mundialmente, incluindo macacos planos (*flat jacking*), fraturamento hidráulico, sobrefuração (*overcoring*), recuperação de deformações, colapso de poços (*borehole breakout*), análise diferencial de curvas de deformação, emissão e observação acústica, além de métodos geofísicos (Cai *et al.*, 2002), cada um com vantagens, limitações e condições de aplicação específicas; no âmbito da engenharia de minas, entretanto, destacam-se como os mais utilizados o sobrefuração e o fraturamento hidráulico, por serem técnicas amplamente consolidadas e recomendadas pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas (ISRM) para a caracterização confiável do estado real de tensões no maciço rochoso.

Ljunggren *et al.* (2003) apresenta a Tabela 2.3, onde os métodos podem ser classificados pelo seu tipo operacional, e pelo volume de rocha normalmente envolvido em cada teste. Os autores sugerem que ao realizar medições de tensões, recomenda-se conduzir uma série de testes para garantir resultados precisos e confiáveis, seja em um local específico ou dentro de um intervalo de profundidade pré-determinado.

Tabela 2.3 - Métodos de medição de tensões em rochas classificados pelo tipo operacional e pelo volume de rocha envolvido em cada método. (traduzido - Ljunggren *et al.* 2003).

Categoria	Método	Volume de Rocha (m³)
Métodos realizados em furos de sondagem	Fraturamento hidráulico	0,5–50
	Sobrefuração	$10^{-3} - 10^{-2}$
	HTPF	1-10
	<i>Breakouts</i>	$10^{-2} - 100$
Métodos realizados em testemunhos de perfuração	Métodos de recuperação de deformação	10^{-3}
	<i>Core-discing</i>	10^{-3}
	Métodos acústicos (efeito Kaiser)	10^{-3}
Métodos realizados em superfícies rochosas	Métodos de <i>jacking</i>	0,5 – 2
	Métodos de alívio de superfície	1 – 2
	Mecanismos focais de terremotos	10^9
	Análise de deslizamento de falhas	10^8
	Alívio de grandes volumes de rocha (<i>back analysis</i>)	$10^2 - 10^3$

No contexto da mineração, a demanda por avaliações confiáveis do estado de tensões existente antes do processo de mineração tem motivado um esforço significativo no desenvolvimento de equipamentos e procedimentos voltados à estimativa de tensões. Os métodos atualmente disponíveis baseiam-se em princípios diversos e independentes, embora, em sua maioria, utilizem furos de sondagem como meio de acesso ao ponto de medição (Brady & Brown, 2004).

Embora campanhas de estimativa de tensões frequentemente forneçam informações de grande relevância para projetos de engenharia, é fundamental compreender claramente como esses dados serão utilizados, uma vez que, em determinadas situações, mesmo sendo o estado de tensões um fator dominante, outras medições podem ser mais eficazes para a compreensão ou o controle do problema; nesse contexto, determinações de tensões realizadas em conjunto com medições de deformação, monitoramento microssísmico e técnicas geofísicas associadas tendem a produzir resultados mais informativos do que quando empregadas isoladamente. Em geral, o objetivo dessas estimativas é compreender o estado de tensões e sua variabilidade em uma região, sendo insuficiente, na maioria dos casos, a realização de apenas uma ou duas

medições pontuais para permitir extrapolações confiáveis, sobretudo em ambientes como áreas montanhosas, onde os efeitos topográficos podem induzir variações locais significativas (Fairhurst, 2003).

No capítulo seguinte são apresentados e discutidos, baseados em uma revisão bibliográfica, os métodos utilizados para estimar tensões em maciços rochosos, apresentando as vantagens, desvantagens, estudos realizados e seus respectivos resultados e conclusões obtidas etc.

2.5. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

Neste capítulo são apresentados os principais métodos de estimativa de tensões em maciços rochosos discutidos na literatura, com ênfase na aplicação desses métodos em práticas de mineração.

2.5.1. MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSÕES EM SUPERFÍCIES

Os métodos de alívio de tensões em superfícies foram as primeiras técnicas utilizadas para determinar as tensões *in situ* em paredes de escavações subterrâneas (Amadei & Stephansson, 1997). Considerando métodos de alívio de tensões em superfícies, pode-se citar o método do macaco plano (*flat jack method*).

Normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) por meio da norma ASTM D4729-19 — *Standard Test Method for In Situ Stress and Modulus of Deformation Using the Flat Jack Method*, o método baseia-se no alívio de tensões em uma superfície rochosos provocado pela abertura de um entalhe (*slot*) com o auxílio de uma serra diamantada ou uma série de furos sobrepostos. A deformação resultante da abertura do entalhe e do alívio de tensões é registrada por meio de extensômetros. Em seguida, o macaco plano (*flat jack*) é inserido no entalhe. Nessa etapa, devem ser observados alguns cuidados: caso o corte apresente largura excessiva ou irregularidades na superfície, o espaço entre o equipamento e as paredes do entalhe deve ser preenchido com graute para garantir uma adequada transmissão de pressões. Após a instalação, o macaco plano é pressurizado gradualmente até que o deslocamento inicial medido na superfície seja anulado ou compensado. A pressão registrada pelo equipamento é considerada aproximadamente igual à tensão *in situ* existente no maciço rochoso na direção

perpendicular ao plano do entalhe. A Figura 2.11 ilustra os equipamentos e o procedimento citado.

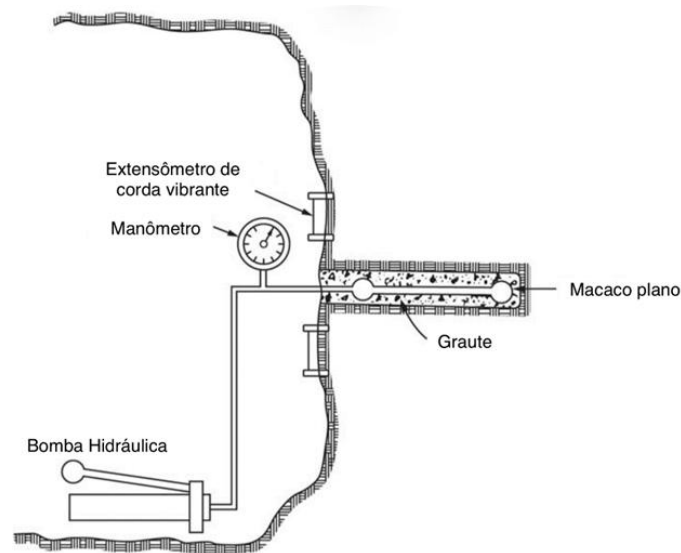


Figura 2.11 - Esquema do ensaio do macaco plano (traduzido - ASTM D4729-19, 2019).

O método parte do pressuposto de que a relação entre a tensão normal e a deformação gerada durante o alívio das tensões é equivalente àquela observada na fase de pressurização do *flat jack*, admitindo-se um comportamento elástico da rocha. No entanto, por ser aplicado na superfície de escavações, região de máxima concentração de tensões e onde a rocha está mais sujeita a sobrecargas, pode haver o desenvolvimento de deformações inelásticas. Sendo assim, o ensaio pode apresentar histerese entre os ciclos de carregamento e descarregamento, o que pode fazer com que a pressão medida não represente com precisão a tensão efetivamente aliviada (Fairhurst, 2003). Assim, considerando o aspecto citado anteriormente, em materiais não homogêneos e altamente fraturados, o comportamento elástico pode não ser totalmente verdadeiro.

Para determinar o estado completo de tensões em um maciço rochoso, é necessária a realização de seis ensaios com o macaco plano, em direções diferentes para compor o tensor de tensões por completo (Sarwade *et al.*, 2009).

Entre as principais vantagens do método, destaca-se o fato de não exigir o conhecimento prévio das constantes elásticas da rocha, além de permitir a avaliação da deformabilidade e do estado

de tensões do maciço rochoso, tanto nas fases de projeto de novas obras quanto em estruturas já existentes (Sarwade *et al.*, 2009; ASTM, 2019).

Como desvantagem temos que, a pressão aplicada pode não representar a pressão totalmente transmitida pelo equipamento, principalmente nas bordas. Sarwade *et al.* (2009) cita que a diferença entre pressões pode chegar até 18%.

Outra desvantagem refere-se ao fato de que o desempenho dos instrumentos utilizados para a medição de deformações pode ser comprometido pela presença de umidade e poeira e a necessidade de correção da abertura já realizada, onde os macacos são executados em suas paredes. Além disso, as deformações ou deslocamentos são registrados na superfície exposta da rocha, a qual pode ter sido alterada ou danificada em decorrência do intemperismo ou do próprio processo de escavação (Amadei & Stenphansson, 1997, citado por Armelin, 2010).

Majeed *et al.*, (2023) aplicaram o método de determinação de tensões *in situ* em três projetos de mineração subterrânea de sal-gema no Paquistão, realizando estudos de campo e investigações laboratoriais, combinados com o cálculo da resistência dos pilares e da tensão *in situ* por meio de uma abordagem empírica. As tensões foram determinadas utilizando o método de alívio de tensões em superfícies, empregando o macaco plano (*flat jack*), com equipamento de 0,40 m de comprimento, 0,20 m de largura e 0,0015 m de espessura, operando a uma pressão máxima de 40 MPa. Para a medição das deformações da rocha, foram utilizados instrumentos com precisão de 0,001 mm.

O local selecionado para a execução dos ensaios correspondia a um local seguro, afastado das atividades operacionais, com uma superfície de rocha não perturbada. Devido às condições de rocha relativamente macia, a abertura do entalhe foi realizada por meio de furos contíguos. O equipamento, desenvolvido localmente, necessitou de calibração prévia em laboratório. Durante os ensaios, além do registro da pressão aplicada, foram coletadas as deformações axiais a cada incremento de aproximadamente 2 MPa, permitindo a determinação do módulo de elasticidade dos pilares testados. As tensões teóricas dos pilares foram calculadas considerando o peso das camadas subjacentes. Para os testes laboratoriais, blocos representativos de sal-gema foram coletados.

A análise do estudo concentrou-se na estabilidade dos pilares, considerando tanto as tensões quanto o fator de segurança, em cenários *in situ* e estimados. Adicionalmente, foram

desenvolvidas relações estatísticas entre o módulo de elasticidade *in situ* e laboratorial, bem como entre a tensão *in situ* do pilar e a razão largura/altura da abertura da mina, incluindo a influência da altura da sobrecarga. Por fim, realizou-se uma análise de otimização dos pilares com o objetivo de sugerir o comprimento efetivo do pilar, considerando o fator de segurança para uma largura de pilar específica.

2.5.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS

Recomendado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas (ISRM), por meio do documento técnico *ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)*, os métodos que existem para estimativa de tensões que utilizam a hidráulica como mecanismo ativo para estimular a rocha ao redor de um furo e, assim, determinar o estado de tensões *in situ* são o fraturamento hidráulico (*Hydraulic Fracturing*, HF) e os testes hidráulicos em fraturas pré-existentes (*Hydraulic Tests on Pre-Existing Fractures*, HTPF). Ambos fazem uso de equipamentos semelhantes, como elementos vedantes (*straddle packers*), dispositivos para registrar a forma e a orientação das fraturas (*impression packers*) e bombas de alta pressão, responsáveis por gerar água sob elevada pressão durante a criação de novas fraturas ou a reabertura de fraturas pré-existentes (Ljunggren, 2003).

O domínio de aplicação do método de fraturamento hidráulico (HF) foi ampliado com o desenvolvimento do método HTPF, que permite a avaliação do tensor completo de tensões (seis componentes), independentemente da orientação do furo ou das propriedades do material. Sempre que possível, os dois métodos devem ser combinados para obter resultados mais precisos. HF e HTPF são empregados rotineiramente na caracterização de sítios para grandes estruturas subterrâneas de engenharia, no planejamento de campos petrolíferos e geotérmicos, e em furos científicos profundos (Haimson & Cornet, 2003).

2.5.2.1. FRATURAMENTO HIDRÁULICO (HYDRAULIC FRACTURING, HF)

O método de fraturamento hidráulico (HF) surgiu na década de 1940 com o objetivo inicial de aumentar a produtividade de reservatórios petrolíferos de baixa permeabilidade.

Posteriormente, em 1957, Hubbert e Willis desenvolveram seu conceito clássico, permitindo sua adaptação para a determinação das tensões *in situ* (Sazid *et al.*, 2023).

O método exige apenas um único furo e não depende de parâmetros elásticos da rocha, necessitando de equipamentos simples. Essa característica é especialmente relevante em estudos de previsão de terremotos, que demandam a avaliação de tensões a vários quilômetros de profundidade. Por isso, nas ciências da Terra, o fraturamento hidráulico tornou-se uma técnica amplamente utilizada para determinar o estado de tensões em grandes profundidades (Sano *et al.*, 2005).

Na China, o fraturamento hidráulico tem se mostrado um método eficiente para medir tensões *in situ* em grandes profundidades, sendo amplamente aplicado em obras de hidrelétricas, rodovias e ferrovias, embora historicamente pouco utilizado na engenharia de minas. Nos últimos anos, passou a ser utilizada em engenharia de minas para estimar as tensões *in situ* na fase de exploração do minério, o que representa um progresso importante para que os administradores das minas obtenham informações sobre o estado de tensões antes do projeto e da construção da mina, representando um avanço importante, já que nessa etapa não há acessos subterrâneos para métodos como o sobrefuração. O fraturamento hidráulico oferece uma alternativa econômica e prática, pois aproveita os próprios furos de sondagem, evitando custos adicionais. A técnica também tem sido aplicada com sucesso em minas a céu aberto profundas, onde o conhecimento das tensões *in situ* é indispensável para análises numéricas mais completas, especialmente quando a geometria da cava é complexa. (Cai & Peng, 2011).

O fraturamento hidráulico é uma técnica amplamente utilizada para medir tensões em furos profundos. O método consiste em determinar a tensão normal à fratura a partir da pressão do fluido que a sustenta, durante o processo de pressurização hidráulica, realizado com equipamentos especializados para injeção de alta pressão (Rutqvist *et al.*, 2000).

O método é bidimensional, determinando apenas as tensões normais máxima e mínima no plano perpendicular ao eixo do furo, que em furos verticais correspondem às tensões horizontais máxima e mínima. Em regiões tectonicamente estáveis e com topografia plana, essas componentes podem ser assumidas como duas das tensões principais. O método é eficiente para medir o campo de tensões 2D, especialmente em estágios iniciais de projetos sem acesso subterrâneo e em grandes profundidades, pois não é significativamente afetado pelos processos de perfuração. No entanto, exige equipamentos grandes e espaço adequado, e as limitações

teóricas indicam que os testes devem ser feitos preferencialmente em furos verticais ou subverticais (Ljunggren, 2003).

Segundo Sano *et al.* (2005), a tensão circunferencial (σ_θ) que se desenvolve na parede do furo sob a ação das tensões horizontais máxima (σ_H) e mínima (σ_h) é descrita pela solução clássica de Kirsch (1898). Para um meio homogêneo, impermeável e com comportamento elástico linear e isotrópico, essa tensão é dada pela Equação 7, em que θ representa o ângulo medido em relação à direção da tensão principal máxima. A Figura 2.12 apresenta uma ilustração desse comportamento.

$$\sigma_\theta = -\sigma_h + \sigma_H - 2(\sigma_h - \sigma_H)\text{sen}^2\theta \quad (7)$$

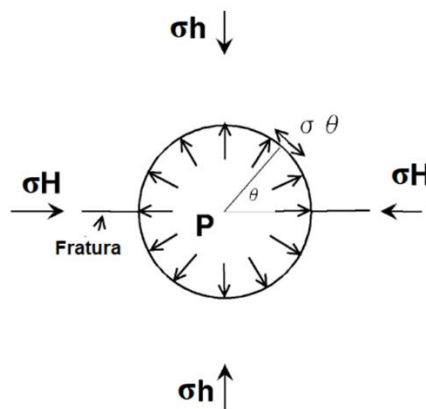


Figura 2.12 - Solução de Kirsch (1898) relacionando a tensão circunferencial com as tensões horizontais máximas e mínimas na prede de um furo (modificado - Sano *et al.* 2005).

A Figura 2.13 apresenta a configuração do sistema empregado no método de fraturamento hidráulico. Nesse processo, o furo é pressurizado pela injeção de fluido por meio de uma bomba situada na superfície. A vazão de injeção da bomba, Q_w , é registrada na superfície, enquanto a pressão no poço, P_w , pode ser monitorada no interior furo. Entre a bomba e o elemento de vedação posicionado no fundo do furo, podem existir várias centenas de metros de tubos de água ou mangueiras hidráulicas, que se expandem durante a pressurização, fornecendo um armazenamento do poço, S_w . Essa expansão faz com que a vazão que chega à fratura possa diferir significativamente da vazão injetada pela bomba (Rutqvist *et al.*, 2000).

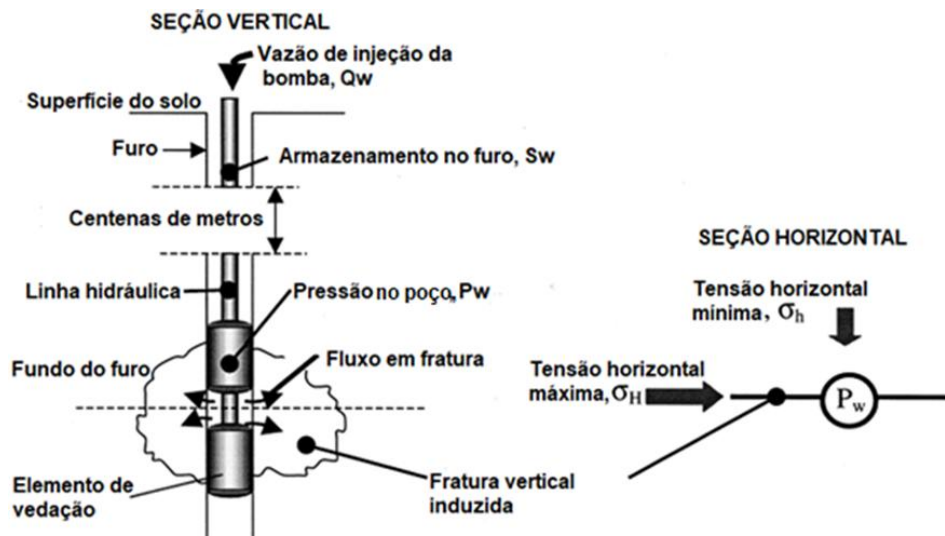


Figura 2.13 - Configuração de estimativa de tensões por fraturamento hidráulico em furos profundos (modificado de Rutqvist *et al.*, 2000).

Uma fratura hidráulica vertical é criada em um furo perpendicular à tensão horizontal mínima e propagada por injeção de água a vazão constante. Durante a injeção, a pressão do furo aumenta até a ruptura da parede deste, gerando a pressão de ruptura (P_b), quando ocorre perda de fluido para a formação rochosa (Etapa 2). Nesse momento, a pressão do furo diminui bruscamente devido à propagação instável da fratura. A injeção é então interrompida e a linha hidráulica é isolada pelo fechamento de uma válvula e a pressão de fechamento (P_s) é registrada para avaliar a tensão horizontal mínima (σ_h) (Etapa 3). Após o fechamento, a pressão continua a diminuir devido ao vazamento de fluido para a rocha circundante. Alguns minutos após o fechamento, a válvula é aberta para restaurar a pressão ambiente na fratura antes do início de um teste de reabertura. No teste de reabertura, o fluido é injetado na mesma vazão do ciclo anterior. A pressão do poço aumenta enquanto a fratura permanece fechada e, ao reabrir, se estabiliza antes de cair levemente, devido à perda de água para a fratura (Etapa 4), sendo esse ponto interpretado como a pressão de reabertura (P_r). Em seguida, a injeção é interrompida e a linha hidráulica é mantida isolada. Os procedimentos e as etapas citadas estão ilustrados na Figura 2.14.

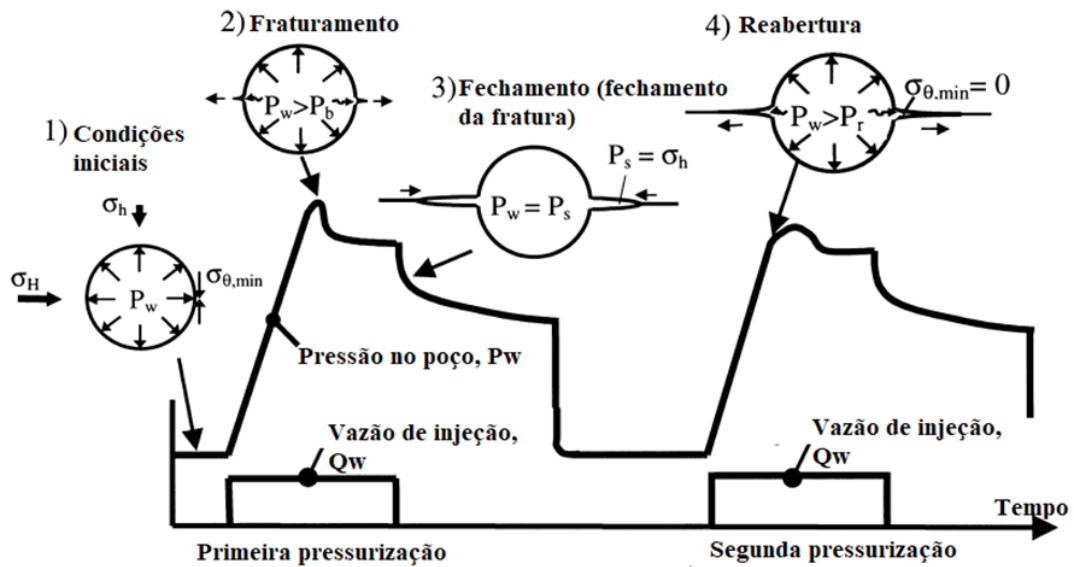


Figura 2.14 - O princípio da técnica clássica de medição de tensões por fraturamento hidráulico com o primeiro e segundo ciclos de pressurização. A pressão do poço e o fluxo de injeção da bomba são apresentados em função do tempo, e o poço e a fratura são ilustrados em seções horizontais (modificado de Rutqvist *et al.*, 2000).

De acordo com Rutqvist *et al.*, (2000), a tensão horizontal mínima, σ_h , é determinada a partir da pressão de fechamento (P_r) e a tensão horizontal máxima, σ_H , pode ser avaliada usando a equação 8:

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_r - P_0 \quad (8)$$

Onde, P_r é a pressão de reabertura e P_0 é a poropressão na fratura.

Esta equação é obtida a partir da solução de Kirsch para um furo circular submetido a pressão interna em um meio isotrópico, homogêneo e linearmente elástico. Considera-se que a fratura se reabre quando a pressão do fluido na parede do poço se torna suficientemente alta para neutralizar a tensão tangencial mínima, gerada pelas duas tensões horizontais remotas.

A pressão de reabertura (P_r) é determinada a partir de mudanças abruptas na curva pressão/tempo durante o ciclo de recarga. Contudo, uma queda súbita como a ilustrada na Fig. 3 nem sempre ocorre; nesse caso, P_r é definida pelo ponto em que a curva se afasta da

linearidade sob condições de vazão constante. Com a utilização de P_r , o método de fraturamento hidráulico pode ser repetido várias vezes nos mesmos pontos da parede do furo, permitindo também a estimativa de variações de tensão a partir das mesmas fraturas previamente geradas (Sano *et al.* 2005).

O fraturamento hidráulico permite a medição direta da menor tensão no plano perpendicular ao furo, normalmente a menor tensão horizontal, σ_h , com boa precisão ($\approx \pm 5\%$). A tensão horizontal máxima é calculada a partir de equações que incluem um critério de ruptura e parâmetros avaliados dos dados de pressão em campo. A precisão é menor para a tensão horizontal máxima ($\approx \pm 10\text{--}20\%$ ou mais) (Ljunggren, 2003).

A orientação da fratura pode ser determinada por meio de um *impression packer* com bússola ou por métodos geofísicos como *formation microscanner* ou *borehole televiewer* (Ljunggren, 2003).

O fraturamento hidráulico clássico requer seções do furo livres de fraturas. Essas seções devem ter pelo menos alguns metros, para que as fraturas induzidas não interajam com fraturas existentes. O método pode ser difícil de aplicar com taxa de sucesso aceitável em domínios rochosos com tensões muito elevadas, como quando o *core discing* é observado no testemunho da perfuração. Feições geológicas como planos de foliação em rochas gnáissicas podem também afetar as chances de sucesso, pois atuam como planos de fraqueza e podem controlar a direção da fratura iniciada (Ljunggren, 2003).

O fraturamento hidráulico é amplamente utilizado para determinar tensões *in situ*, mas a interpretação dos resultados pode ser enganosa. Por exemplo, quando o furo é vertical e se observa uma fratura vertical, isso não garante que a tensão vertical corresponda a uma tensão principal. Caso exista, por exemplo, uma tensão de cisalhamento atuando paralelamente ao eixo do furo (τ_{xz}), as tensões σ_H e σ_h seriam, na realidade, tensões principais secundárias (σ_1 e σ_2). A distribuição das concentrações máximas e mínimas de tensão no plano horizontal (xy) ao redor do furo permanece semelhante àquela em que σ_H e σ_h são realmente tensões principais. No entanto, a presença do cisalhamento provoca uma rotação na orientação das tensões máximas e mínimas em relação à fratura observada. (Fairhurst, 2003).

Lakirouhani *et al.*, (2016) reavaliaram a determinação do estado de tensões *in situ* em rochas por meio do fraturamento hidráulico, destacando que fatores como o campo de tensões próximo

ao poço, a compressibilidade do sistema de injeção e o escoamento viscoso do fluido podem reduzir a precisão das estimativas. Para isso, os autores utilizam um modelo numérico acoplado, que inclui a compressibilidade do sistema de injeção e o escoamento de um fluido viscoso em uma fratura hidráulica em deformação plana se estendendo a partir de um furo, em uma rocha impermeável e na presença de um campo de tensões *in situ* não isotrópico. O modelo permite estimar a magnitude desses efeitos, fornece diretrizes baseadas em parâmetros adimensionais para garantir precisão em modelos idealizados e possibilita correções de primeira ordem quando essas diretrizes não podem ser atendidas em campo. Em essência, o estudo propõe um método mais abrangente e rigoroso para melhorar a confiabilidade das medições de tensões *in situ*, quantificando efeitos muitas vezes negligenciados em abordagens tradicionais.

O fraturamento hidráulico (HF) é um método eficaz e econômico para estimar tensões *in situ*, permitindo medições diretas e precisas em profundidades não acessíveis por outros métodos. Ele possibilita a medição de tensões em múltiplas orientações, proporcionando uma análise abrangente do campo de tensões e de seus impactos (Sazid *et al.*, 2023). Até o momento, o HF já foi utilizado com sucesso para medir tensões *in situ* a profundidades de até 9 km (Brudy *et al.*, 1997). Uma vantagem importante desse método é que ele pode ser aplicado rotineiramente a profundidades de vários milhares de metros a partir da superfície (Fairhurst, 2003).

Uma das desvantagens do fraturamento hidráulico é que, na presença de fragilidades pré-existentes na região do teste, o fluido injetado tende a reabrir e penetrar fraturas existentes em vez de gerar novas fraturas no plano paralelo à tensão mínima, o que reduz a confiabilidade da estimativa do campo de tensões horizontais. Dessa forma, o método não é adequado para rochas já fraturadas ou com descontinuidades (Lin *et al.*, 2018). Além disso, o fraturamento hidráulico é uma técnica de medição bidimensional (2D); para determinar o estado tridimensional (3D) das tensões, é necessário realizar medições em três furos ortogonais e que não sejam paralelos, condição difícil de ser satisfeita na prática (Cai & Peng, 2011).

Penido *et al.* (2020) discutem aspectos operacionais e dificuldades em uma primeira tentativa de medir tensões *in situ* (magnitudes e orientações) ao redor de um talude de cava de mineração no Quadrilátero Ferrífero, por meio de ensaios de fraturamento hidráulico. Após a análise detalhada das litologias de cada furo de sondagem, apenas dois furos se mostraram adequados para a realização dos ensaios. O estudo ressalta a importância de um planejamento prévio detalhado, incluindo orçamento, contrato específico, fornecimento de sonda desde a perfuração

até a execução dos testes, e o envolvimento dos responsáveis para garantir a estrutura necessária das diversas áreas de interface.

Sun *et al.* (2025) caracterizaram o campo de tensões da Mina Jinchuan nº 2, na China, utilizando o método de fraturamento hidráulico, realizando dezessete medições de fraturamento hidráulico e sete testes de impressão em três furos para estimar o estado de tensões e suas variações a 1000 m de profundidade. Os resultados indicaram que o campo de tensões é dominado pela relação $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, típica de um regime de falhamento transcorrente, sinalizando a predominância de esforços horizontais compressivos no campo regional, além de permitir a determinação das magnitudes e orientações das tensões principais horizontais. Os autores também analisaram as grandes deformações por “*squeezing*” (deformações grandes e progressivas da massa rochosa em direção a uma escavação subterrânea) e realizaram uma avaliação de risco das galerias profundas em rocha branda, destacando que os resultados são fundamentais para a compreensão dos mecanismos de grandes deformações e para a definição de tecnologias de suporte adequadas às condições geomecânicas da Mina Jinchuan nº 2.

Cai, Peng e Ji (2008) realizaram determinações de tensões *in situ* na Mina de Carvão Wanfu, na província de Shandong, China, utilizando fraturamento hidráulico em um contexto geológico altamente complexo, marcado por uma camada de solo de cobertura extremamente espessa (726 m em média) e veios de carvão situados a mais de 1100 m de profundidade, condições que elevam significativamente o estado de tensões e afetam a estabilidade das estruturas de mineração. As medições, conduzidas em trinta e sete pontos distribuídos em sete furos, a maioria com profundidade superior a 1000 m, enfrentaram desafios típicos de grandes profundidades, como a baixa capacidade de resistência à pressão dos obturadores tradicionais, o aumento da pressão da água subterrânea e a dificuldade operacional do sistema hidráulico de duplo circuito, que tende a ficar preso ao atravessar espessas camadas de solo.

Para superar essas limitações, os autores desenvolveram melhorias no método e no equipamento: um novo obturador capaz de suportar até 70 MPa, suficiente para medições em profundidades de até 2000 m; um sistema de circuito único utilizando as hastes de perfuração como tubulação de alta pressão; uma válvula automática de alívio de baixa pressão, acoplada ao comutador; o uso de dois conjuntos de monitores de pressão para garantir leituras precisas; e um sistema de carregamento/descarga totalmente automatizado. Essas inovações tornaram o fraturamento hidráulico mais seguro e confiável para medições em grandes profundidades,

permitindo alcançar 1105 m e estabelecer o estado de tensões da mina, fornecendo base técnica essencial para o projeto e a construção das obras de lavra.

2.5.2.2. TESTES HIDRÁULICOS EM FRATURAS PRÉ-EXISTENTES (*HYDRAULIC TESTS ON PRE-EXISTING FRACTURES, HTPF*)

O método Testes Hidráulicos em Fraturas Pré-Existentes foi originalmente proposto por Cornet & Valette (1984) como uma alternativa para superar as limitações do fraturamento hidráulico convencional. Diferentemente da abordagem tradicional, o HTPF concentra-se na reabertura de fraturas pré-existentes dentro da seção isolada do furo. Essa técnica permite determinar as tensões normais que atuam perpendicularmente a essas fraturas, as quais são inferidas a partir da pressão de fechamento registrada durante a injeção de fluido. Assim, é crucial identificar com precisão as localizações e orientações das fraturas antes do início da injeção (Lin *et al.*, 2018). Uma ilustração do método é mostrada na Figura 2.15.

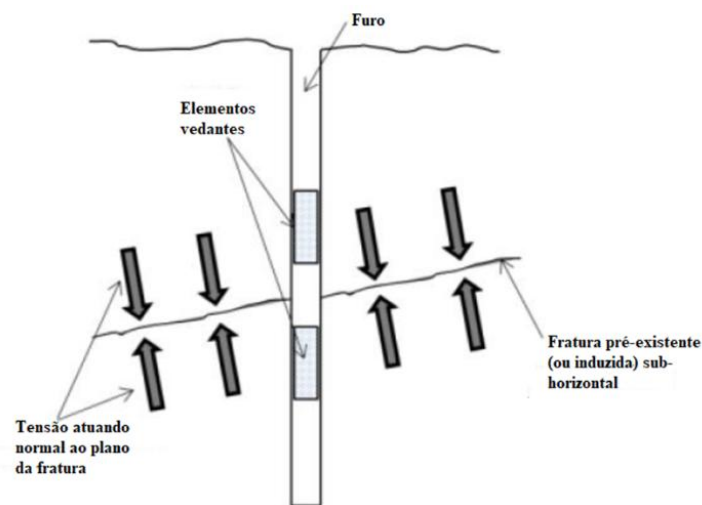


Figura 2.15 - Esquema do HTPF (traduzido - Gaines, *et al.* 2012, citado por Lin *et al.*, 2018).

Para a aplicação do HTPF, a fratura testada deve ser suficientemente grande para que a tensão normal seja considerada uniforme e sua geometria precisa ser planar. O método utiliza apenas quatro parâmetros de campo (profundidade, pressão de fechamento, mergulho e direção da fratura) sendo a pressão de fechamento equivalente à tensão normal no plano fraturado. Com um conjunto adequado de fraturas com diferentes orientações, é possível determinar o estado de tensões em 2D ou 3D. Embora a solução 2D exija teoricamente seis fraturas, recomenda-se testar dez a doze para garantir redundância; já a solução 3D, que requer menos suposições e

não impõe que a tensão vertical seja principal, envolve doze incógnitas e demanda cerca de dezoito a vinte testes bem-sucedidos para uma determinação confiável do campo de tensões tridimensional (Ljunggren, 2003).

Em comparação ao fraturamento hidráulico convencional, o método apresenta menos limitações geológicas, pois não exige determinar a resistência à tração da rocha nem é influenciado pela pressão de poros, e ainda permite medições confiáveis mesmo na presença de planos de fraqueza, desde que exista variação de direção e mergulho das fraturas. Contudo, é mais demorado, já que o equipamento precisa ser posicionado com precisão na profundidade de cada fratura, exigindo boa calibração. Além disso, ao contrário do fraturamento hidráulico, não fornece resultados preliminares: somente após a conclusão de todos os testes e do processamento completo dos dados é possível obter interpretações (Ljunggren, 2003).

A Figura 2.16 (a) e (b) ilustra os dois métodos.

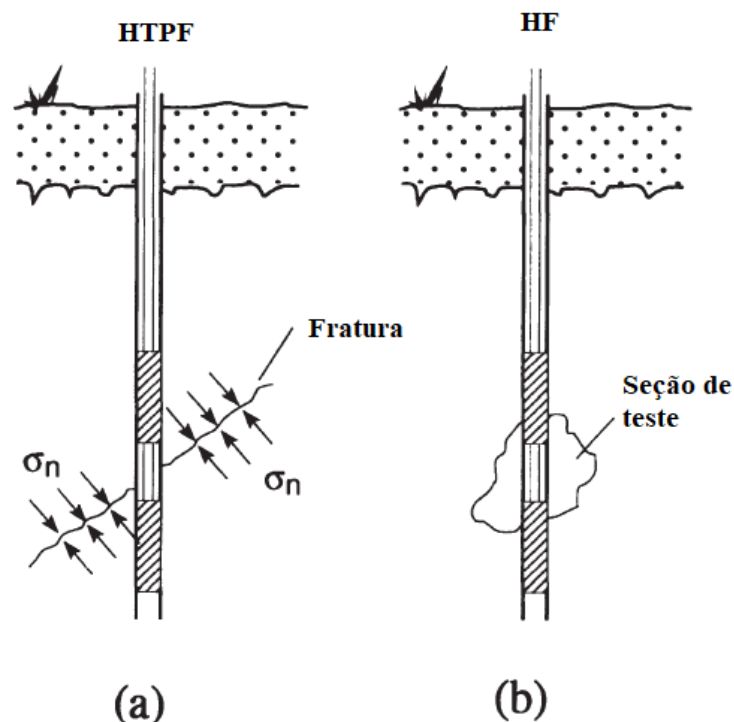


Figura 2.16 - Medição das tensões na rocha pelo método de ensaios hidráulicos em fraturas pré-existentes (HTPF) (a), comparado ao fraturamento hidráulico (b). (Traduzido - Ljunggren e Raillard, 1987, citados por Amadei e Stephansson, 1997).

Cornet (1988) demonstrou a aplicação do método HTPF em dois contextos distintos: o dimensionamento do revestimento de túneis e condutos forçados em uma usina subterrânea a 1200 m de profundidade e a avaliação da viabilidade de mineração por solução de um depósito de potássio situado a mais de 1500 m. No primeiro caso, o método HTPF forneceu uma estimativa da tensão principal mínima significativamente menor do que a obtida pela técnica clássica de fraturamento hidráulico. Enquanto a teoria clássica de hidrofraturamento utiliza a média das pressões de *shut-in*, o HTPF adota o menor valor observado. No segundo caso, a teoria clássica foi aplicada e os resultados indicaram que, em determinados intervalos de profundidade, era possível desenvolver fraturas hidráulicas horizontais, ou seja, perpendiculares à tensão principal intermediária. As medições da razão σ_h/σ_v pelo método HTPF confirmaram essa possibilidade para raios de fratura de até 4–5 m, embora, para volumes maiores de injeção, a propagação das fraturas ocorra em um plano vertical.

Cornet *et al.* (1997) realizaram medições de tensões em um furo com testemunho de 1155 m de profundidade e inclinação de 60° em uma região montanhosa, no contexto de um programa de reconhecimento realizado antes da construção do túnel rodoviário Mercantour, nos Alpes entre França e Itália. O objetivo do furo era fornecer meios para determinar o campo completo de tensões que seria encontrado em regiões com maior espessura de cobertura rochosa. As medições foram conduzidas utilizando o método HTPF, e devido ao pequeno diâmetro do furo (100 mm), uma nova ferramenta foi especialmente desenvolvida para essas medições. Foram realizados vinte testes completos no intervalo entre 850 m e 1150 m. A interpretação dos dados HTPF exigiu o desenvolvimento de uma nova técnica de inversão, considerando as variações de tensões ao longo do eixo do furo. Os resultados da determinação de tensões são consistentes com a orientação dos *breakouts* observados no furo. Eles revelam que o local apresenta alta concentração de tensões relacionada à topografia, com nenhuma direção principal vertical e uma diminuição da tensão principal máxima ao longo da profundidade medida.

Gao *et al.*, (2024) modificaram o método HTPF ao considerar a tensão de cisalhamento em cada fratura pré-existente, aumentando o número de equações para a determinação do tensor de tensões e reduzindo o número de testes necessários. As tensões de cisalhamento foram atribuídas a diferentes fraturas por amostragem aleatória, e os tensores de tensões foram obtidos buscando a solução ótima via mínimos quadrados com o método de Monte Carlo, sendo posteriormente restringidos pelos critérios de resistência à tração, compressão e tensão vertical. Duas campanhas de medição, em Weifang (China) e no túnel rodoviário Mercantour (França),

demonstraram que o método modificado (M-HTPF) permite a inversão do tensor de tensões com apenas três a quatro testes em fraturas pré-existentes, obtendo resultados confiáveis e estáveis, mostrando-se viável e eficiente para determinação completa do tensor de tensões em um único furo.

2.5.3. FRATURAMENTO COM REVESTIMENTO FLEXÍVEL (*SLEEVE FRACTURING*)

Semelhante ao fraturamento hidráulico, este método consiste no posicionamento de um equipamento em profundidade específica e na pressurização deste. A distinção entre os métodos reside no mecanismo de fraturamento: em vez da ação direta de um fluido pressurizado, utiliza-se uma membrana expansível. É a força exercida pela dilatação desta membrana contra o maciço rochoso que induz a tensão necessária para gerar fraturas no maciço.

Segundo Amadei & Stephansson (1997), o método de fraturamento com revestimento flexível foi inicialmente proposto por Stephansson (1983). O ensaio consiste na inserção de uma membrana de neoprene (borracha rígida) no interior do furo, a qual é posteriormente pressurizada. Quando a pressão interna excede a resistência à tração da rocha, ocorre a iniciação de uma fratura na parede do furo, que se propaga na direção perpendicular à menor tensão horizontal *in situ*. A determinação das tensões principais máxima e mínima no plano perpendicular ao furo é realizada a partir das pressões de ruptura e de reabertura de uma fratura induzida simples ou dupla, aplicando-se a solução de Kirsch. Já a orientação da fratura é obtida por meio do uso de *impression packers*. Os autores destacam como principal vantagem do método, em relação ao fraturamento hidráulico convencional, o fato de que nenhum fluido penetra no maciço rochoso durante o ensaio.

Entretanto, o método apresenta algumas limitações. A pressão de ruptura não é bem definida, o que dificulta a interpretação dos resultados de campo. Além disso, as fraturas geradas tendem a não se propagar muito além da parede do furo, restringindo a extensão da região investigada.

O sistema de fraturamento por luva (*sleeve fracturing*) permite determinar, em um único ensaio, dois parâmetros fundamentais do maciço rochoso. Inicialmente, a luva é pressurizada até um nível em que ainda não ocorre a iniciação de fraturas axiais. Nesse intervalo, a porção linear da curva pressão–volume é utilizada para determinar o módulo de rigidez do maciço. Conhecendo-

se ou estimando-se o coeficiente de Poisson da rocha, é possível então calcular o módulo de elasticidade (E). Com o aumento da pressão, duas fraturas axiais são induzidas e registra-se a pressão de ruptura da luva, sendo que a orientação dessas fraturas revela a direção da tensão máxima em um plano perpendicular ao eixo do furo de sondagem. Realizando-se uma segunda pressurização, obtém-se a pressão de reabertura da fratura, e, combinando esse valor com a resistência à tração da rocha, torna-se possível determinar a magnitude das tensões principais *in situ* (Ljunggren & Stephansson, 1986).

A pressão de ruptura obtida pelo método de fraturamento com luva tende a representar de forma mais fiel o estado de tensões do maciço do que aquela medida pelo fraturamento hidráulico, pois a presença da luva impede a interação do fluido com defeitos, microfraturas e juntas ao longo do furo (Stephansson, 1983).

Charsley *et al.*, Martin & McCreath (2003) investigaram as limitações do método de fraturamento com luva por meio de modelagem numérica utilizando o código de mecânica da fratura FRANC2D/L, destacando que o método foi escolhido por sua portabilidade e simplicidade operacional. Os autores concluíram que seu sucesso depende da geração das fraturas e da correta interpretação das condições que as originam, além da determinação razoavelmente precisa de sua orientação. As análises indicaram que as curvas pressão–deslocamento (P–D), tradicionalmente usadas na interpretação dos resultados, podem ser difíceis de analisar devido à dificuldade em identificar pontos de inflexão, etapa fundamental para estimar adequadamente as tensões *in situ*. Devido à heterogeneidade dos maciços rochosos, essas curvas obtidas em campo tendem a ser ainda mais complexas do que as produzidas nos modelos numéricos, o que sugere valor limitado do método em muitos contextos geológicos. Ademais, a modelagem mostrou que a iniciação e a propagação das fraturas discretas são controladas pela razão entre as tensões *in situ* no plano.

2.5.4. MÉTODOS DE ALÍVIO EM FUROS DE SONDAGEM OU SOBREFURAÇÃO (OVERCORING)

O método tem seu pioneirismo científico estabelecido por Hast (1958), sendo sua aplicação difundida e padronizada por Leeman (1964). Desde então, diversas variações e aprimoramentos da técnica têm sido desenvolvidas.

Recomendado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas (ISRM), por meio do documento técnico *ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation — Part 2: Overcoring Methods*, o método de sobrefuração (*overcoring*) é relativamente madura e consistente para estimar o estado tridimensional de tensões em um ponto específico de um maciço rochoso, ainda que exija melhores condições geológicas quando comparadas a outros métodos. O método baseia-se no princípio da recuperação, pelo qual a deformação elástica registrada pelo instrumento de medição durante o processo de alívio de tensões é utilizada para calcular o tensor de tensões (Li *et al.*, 2025).

O método de sobrefuração foi desenvolvido para superar diversas limitações dos métodos de alívio em superfície, tais como a exposição dos instrumentos de medição a condições ambientais agressivas (como umidade e poeira), as perturbações causadas pelo processo de escavação e a necessidade de assumir fatores de concentração de tensões para relacionar as tensões medidas nas paredes da escavação às componentes de tensão do campo distante. Assim, os métodos de alívio em furos de sondagem, também denominados métodos de sobrefuração, tornaram-se as técnicas de alívio mais amplamente utilizadas para a estimativa de tensões *in situ* (Amadei & Stephansson, 1997).

Segundo estatísticas, aproximadamente 80% dos dados de tensões *in situ* em todo o mundo são obtidos por esse método (Li *et al.*, 2023).

Nesses métodos, perfura-se o maciço rochoso até a profundidade desejada, instalam-se instrumentos capazes de registrar deformações ou deslocamentos e o registro destes, provocadas por uma perturbação no maciço rochoso (a sobrefuração), são registradas e correlacionadas com as tensões *in situ*.

No contexto de mineração subterrânea, o método de sobrefuração é amplamente utilizado por ser uma técnica econômica e confiável para estimar tensões *in situ*, uma vez que a própria infraestrutura da mina, composta por túneis e câmaras, permite o acesso direto aos pontos de realização dos ensaios. Entretanto, sua forma convencional, fundamentada na elasticidade linear, torna-se limitada diante das condições encontradas em grandes profundidades, onde o maciço rochoso apresenta comportamento não linear, heterogêneo e anisotrópico, além de maior degradação e temperaturas elevadas. Como os extensômetros de resistência são sensíveis a variações térmicas, mudanças de temperatura alteram sua resistência elétrica, produzindo deformações artificiais e erros significativos nas medições. Os extensômetros tradicionais de

inclusão oca não conseguem compensar adequadamente esses efeitos, e os métodos tradicionais de compensação térmica são insuficientes para ambientes profundos e geologicamente complexos. Assim, medições de tensões *in situ* em grandes profundidades exigem aprimoramentos técnicos para garantir precisão e confiabilidade (Li *et al.*, 2023).

Li *et al.* (2023) realizaram campanhas multietapas de estimativa de tensões em uma mina de ouro no norte da China, aplicando uma técnica aprimorada de *overcoring*, o método de recuperação de deformação anelástica e o fraturamento hidráulico, o que resultou em um conjunto extenso e confiável de dados de tensões *in situ*. A mina, cercada pelo mar em três lados, explora corpos de minério totalmente abaixo do nível do mar, com profundidade média de lavra superior a 1000 m, inserida em um ambiente estrutural geológico complexo e sujeito a sismicidade frequente. Esse contexto, associado às perturbações geradas pela atividade de engenharia, favorece a ocorrência de desastres dinâmicos, como sismos de rocha, e torna o suporte de galerias extremamente desafiador, representando um risco significativo para a lavra profunda. Para compreender esse cenário, os autores determinaram as características do campo de tensões atual por meio da integração dos três métodos de estimativa de tensões *in situ* empregados e investigaram sistematicamente sua relação com a atividade tectônica por meio de análise estrutural geológica. Tais esforços são essenciais para avaliar de forma confiável a dinâmica da lavra e a estabilidade do sistema de mineração, embora garantir uma operação segura e eficiente ainda constitua um grande desafio.

A técnica aprimorada para garantir que deformações adicionais geradas por variações térmicas consiste em: incorporação de uma câmera interna no furo para observar danos no maciço, avaliar a qualidade da rocha e evitar instalações inadequadas; o desenvolvimento de uma técnica completa de compensação térmica proposta por Cai *et al.*, (2010), que resultou em um extensômetro de inclusão oca aprimorado; a implementação de um sistema automático de medição e registro contínuo de deformações, capaz de operar com alta precisão; e a criação de um programa tridimensional independente para inversão das tensões, baseado em dupla iteração, permitindo determinar parâmetros elásticos da rocha e calcular tensões *in situ* com maior confiabilidade.

A aplicação das novas tecnologias, dispositivos e abordagens elevou significativamente a precisão das medições, aumentando de forma substancial a confiabilidade dos resultados obtidos. Isso porque a técnica aprimorada de sobrefuração, conforme descrito por Li *et al.*

(2023), passa a considerar de forma mais fiel as características reais do maciço rochoso e possibilita a compensação térmica completa.

Li *et al.* (2025) destacam os principais desafios para a estimativa de tensões *in situ* em grandes profundidades utilizando a técnica de sobrefuração, que incluem:

- A anisotropia da rocha: Rochas naturais apresentam poros, fraturas, descontinuidades e variações mineralógicas que resultam em comportamento anisotrópico em diferentes escalas. Quando essa anisotropia não é considerada, os erros na estimativa das tensões podem chegar a 50%–80% na magnitude e 90°–100° na direção, tornando os resultados impraticáveis. Embora existam métodos analíticos e numéricos para interpretar esse comportamento, a caracterização precisa da anisotropia permanece um desafio, e os modelos constitutivos utilizados ainda dependem de simplificações;
- Temperatura da rocha: a técnica de sobrefuração utiliza extensômetros elétricos para medir deformações, porém esses sensores são altamente sensíveis à temperatura: variações térmicas alteram a resistência elétrica, gerando sinais falsos que se traduzem em deformações falsas. Métodos tradicionais de compensação não são eficazes em extensômetros cimentados, e mudanças de temperatura também afetam os fios condutores, podendo adicionar dezenas de microdeformações para cada variação de 1 °C. Em grandes profundidades, onde as rochas podem atingir temperaturas acima de 70 °C, o resfriamento provocado pela circulação de fluidos de perfuração cria ainda alterações reais no estado de tensões. Por exemplo, uma queda de 10 °C pode induzir mudanças superiores a 5 MPa no campo de tensões. Apesar disso, a influência da temperatura na redistribuição de tensões ao redor do furo é pouco estudada, e faltam modelos analíticos adequados, o que limita a precisão das análises tradicionais de *overcoring*;
- Determinação dos parâmetros de deformabilidade da rocha: os parâmetros de deformabilidade, como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, são essenciais para calcular o tensor de tensões a partir das deformações medidas. O módulo de elasticidade é especialmente crítico, pois qualquer erro na sua determinação amplifica a incerteza nos valores de tensão, podendo tornar os resultados inválidos. Embora a teoria tradicional considere as rochas linearmente elásticas e com parâmetros constantes, na prática, rochas profundas exibem comportamento não linear, com módulo de elasticidade variando positivamente com o nível de tensão. A determinação desses parâmetros por testes de calibração sob pressão confinante é recomendada, mas equipamentos disponíveis

normalmente simulam baixas pressões (<60 MPa), dificultando a representação das condições reais de tensões em profundidade e podendo gerar inconsistências nos cálculos;

- **Influência da perfuração:** A perfuração em rochas profundas provoca vibrações e impactos que geram microfraturas artificiais ao redor do furo, principalmente próximas à parede do furo. Essas microfraturas reduzem a resistência e a deformabilidade da rocha e aumentam sua anisotropia, tornando as propriedades mecânicas não uniformes e podendo distorcer significativamente os resultados da estimativa de tensões. Portanto, o efeito da perfuração não pode ser negligenciado;
- **Efeito do tempo:** Rochas profundas apresentam forte fluência devido a altas temperaturas e pressões. Essa fluência faz com que a relação entre tensão e deformação deixe de seguir a lei elástica, fazendo com que uma mesma deformação possa corresponder a múltiplos valores de tensão. Durante a perfuração e sobrefuração, que podem durar horas, a fluência da rocha ao redor do furo pode gerar erros significativos nos cálculos de tensão, chegando a dezenas de megapascais, comprometendo a validade das medições;
- **Água subterrânea:** é um dos principais ambientes de ocorrência das rochas e afeta suas propriedades de duas formas: efeitos físicos e químicos (alterando composição e estrutura) e efeitos mecânicos (pressão hidrostática e pressão de fluxo). Em rochas profundas, alta pressão da água altera o comportamento mecânico da rocha e o ambiente de tensões. Durante a sobrefuração, a perfuração provoca não apenas o alívio de tensões, mas também a perda de água nos poros, alterando a distribuição de pressão de água, parâmetros mecânicos da rocha (resistência, módulo de elasticidade), campo de permeabilidade e campo de tensões, afetando os resultados da medição. Em particular, mudanças na pressão de poros geram alterações significativas nas tensões *in situ*, principalmente nas tensões horizontais principais. Contudo, os efeitos da água subterrânea sobre tensões e pressões de poros ainda não foram totalmente estudados;
- **Rochas macias:** A técnica de sobrefuração apresenta limitações em rochas moles, especialmente profundas, devido à fluência pronunciada e redistribuição de tensões durante a perfuração. Gradientes de tensão e deformações inelásticas podem causar subestimação das tensões calculadas, tornando necessária a adaptação da técnica ou dos modelos de cálculo para medições precisas nesse tipo de rocha.

Ljunggren (2003), organiza os métodos de alívio em furos de sondagem em três subgrupos:

- Sobrefuração de células em furos piloto;

- sobrefuração de células no fundo do furo;
- corte por ranhura em furo de sondagem (*borehole slotting*).

2.5.4.1. SOBREFURAÇÃO DE CÉLULAS EM FUROS PILOTO:

O método baseia-se no princípio de realizar a sobrefuração de um furo piloto onde o instrumento de medição de deformações ou deslocamentos é instalado (Figura 2.17). Os instrumentos utilizados dividem-se em três grupos: células de inclusão macia, medidores de deformação que registram os deslocamentos da parede durante o sobrefuração e células de inclusão rígida/sólida.

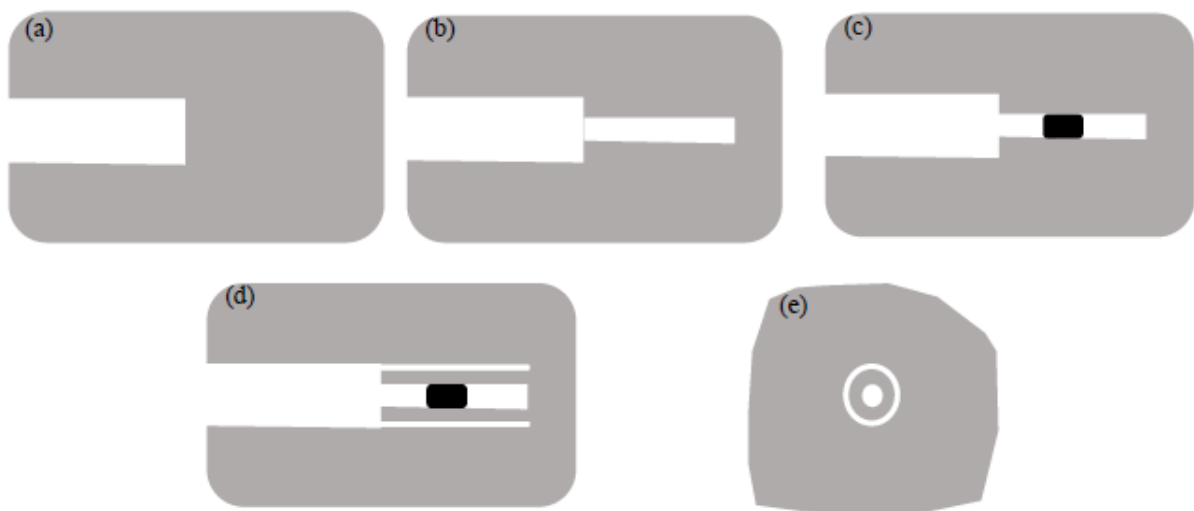


Figura 2.17 - Esquema das etapas típicas do método de sobrefuração em furos pilotos: (a) perfuração de um furo de maior diâmetro até a profundidade desejada de medição; (b) avanço de um furo piloto de pequeno diâmetro a partir do fundo do furo principal; (c) instalação do instrumento de medição no furo piloto; (d) prolongamento do furo principal por *overcoring* para alívio completo das tensões; (e) vista em seção transversal da medição de tensões pelo método de *overcoring*. (Lin *et al.*, 2019).

Células rígidas ou sólidas são menos utilizadas que os outros dois tipos e enfrentam uma limitação importante devido à diferença entre as propriedades do material da rocha e as do material de inclusão (Amadei & Stephansson, 1997 citados por Ljunggren, 2003).

As células de inclusão macias são fundamentadas na teoria da elasticidade linear para rochas contínuas, homogêneas e isotrópicas, e medem os seis componentes de deformação em um único furo (Ljunggren, 2003).

O funcionamento das células de tensão macias baseia-se na instalação de extensômetros altamente sensíveis na rocha ao redor do furo de sondagem, utilizando adesivos específicos para determinada temperatura, de forma que os sensores se incorporem rapidamente à rocha. Durante a execução da sobrefuração, tanto a rocha circundante quanto os extensômetros podem sofrer deformações semelhantes, permitindo que, posteriormente, o campo de tensões seja estimado a partir dos dados fornecidos pelos extensômetros (Lin *et al.*, 2018).

Como vantagens, o método permite estimar o estado de tensões em um maciço rochoso a partir de uma única medição em um furo, sendo que algumas células possibilitam uma estimativa tridimensional, por meio de registro contínuo e rotacional, com exceção da célula CSIR. Entretanto, apresenta desvantagens: as células são difíceis de recuperar em comparação com instrumentos como o USBM ou o SIGRA IST, a espessura do adesivo e os efeitos de temperatura podem influenciar os resultados e são necessários testemunhos de rocha intactos e relativamente longos para medições bem-sucedidas, o que costuma ser difícil de obter devido à presença de fraturas pré-existentes, discagem ou juntas (Lin *et al.*, 2018). Os instrumentos mais comuns baseados nesse princípio são CSIR, CSIRO e sonda Borre.

A célula de deformação triaxial CSIR, originalmente proposta por Leeman & Hayes em 1966, passou por diversas modificações ao longo dos anos, especialmente no que se refere ao número e à disposição dos extensômetros. Entre essas atualizações destaca-se a versão apresentada por Van Heerden (1976), baseada nas recomendações de Gray & Toews (1974), na qual a célula passou a possuir um corpo de nylon equipado com três rosetas de extensômetros de quatro componentes, cada uma com 10 mm de comprimento e espaçadas a 120°. Além disso, foi incorporado ao modelo um extensômetro fictício destinado à compensação de temperatura. A célula é projetada para instalação em furos de diâmetro EX (38 mm), enquanto a sobrefuração é normalmente executada em furos NXCU, utilizando brocas de 90 mm ou maiores. A configuração padrão da célula não permite monitoramento contínuo das deformações, uma vez que as leituras são realizadas apenas antes e após a sobrefuração; contudo, versões modificadas foram desenvolvidas para viabilizar o registro contínuo. Para garantir medições confiáveis, a

parede do furo piloto EX deve estar limpa e, preferencialmente, seca, e a sobrefuração deve possuir comprimento mínimo de 500 mm (Amadei & Stephansson, 1997).

Herget (1973) ressalta que é essencial que o fundo do furo NXCU seja lixado de forma plana para garantir o correto alinhamento do furo EX e permitir o centramento da ferramenta de instalação. Se a ferramenta não estiver centrada, as rosetas podem ser pressionadas obliquamente contra a parede do furo EX, resultando em colagem parcial.

A principal vantagem da célula triaxial CSIR é a capacidade de determinar o campo completo de tensões a partir de um único furo. Por outro lado, o método apresenta limitações importantes, entre as quais se destacam: a necessidade de limpeza das paredes do furo piloto; a impossibilidade de monitoramento contínuo das deformações durante a sobrefuração na célula padrão; o fato de a célula não ser recuperável, exceto quando utilizado o método de Cai e Blackwood (1991); sua configuração como instrumento de quarto de ponte; o longo e variável tempo de cura do adesivo, que pode exigir de 1 a 10 horas, ou até 20 horas, conforme as condições do furo e o tipo de cola; e a necessidade de realizar sobrefurações longas, o que pode representar um desafio em rochas fracas, laminadas ou submetidas a altos níveis de tensão (Amadei & Stephansson, 1997).

Herget (1973) apresentou resultados obtidos em testes com a célula triaxial CSIR com o objetivo de auxiliar potenciais usuários na aplicação do método. O equipamento foi testado a uma profundidade de 1870 pés em uma mina de ferro em Wawa, Ontário, em rocha do tipo xisto quartzosericítico. Esses primeiros ensaios demonstraram que a célula triaxial CSIR, quando associada às análises adequadas, é capaz de fornecer estimativas realistas do tensor de tensões *in situ*, desde que as constantes elásticas do material sejam determinadas com precisão e que o maciço no local de ensaio se aproxime do comportamento de um meio homogêneo, elástico e isotrópico.

A célula CSIRO HI, desenvolvida no início da década de 1970 e apresentada inicialmente por Worotnicki & Walton (1976), passou por diversas modificações desde então, embora seu projeto básico permaneça essencialmente o mesmo. Projetada para instalação em furos EX de 38 mm de diâmetro, consiste em um tubo de parede fina em epóxi, com diâmetros externo e interno de 36 mm e 32 mm, respectivamente. A célula contém três rosetas de extensômetros triplos espaçadas a 120°, totalizando nove extensômetros de 10 mm de comprimento posicionados a 0,5 mm da superfície externa, dois paralelos ao eixo da célula, três tangenciais

e quatro orientados a $\pm 45^\circ$. Como estão totalmente encapsulados em epóxi, os extensômetros são protegidos contra umidade e poeira. Existe também uma versão com três rosetas de quatro componentes, contendo 12 extensômetros, que fornece maior redundância por incluir dois sensores circunferenciais adicionais e um a 45° . A sobrefuração é normalmente realizada com coroas de 150 mm, embora coroas de 100 mm sejam adequadas em boas condições de perfuração, e resultados de sobrefurações satisfatórias geralmente são obtidos com comprimentos entre 200 e 400 mm. Uma característica importante da célula é sua conexão permanente ao cabo de leitura, permitindo a obtenção e o monitoramento contínuo dos dados de alívio de tensões durante todo o processo (Amadei & Stephansson, 1997). A Figura 2.18 mostra a geometria da célula CSIRO HI apontando sua seção transversal, a orientação dos nove medidores de deformação e os ângulos de orientação de cada um destes.

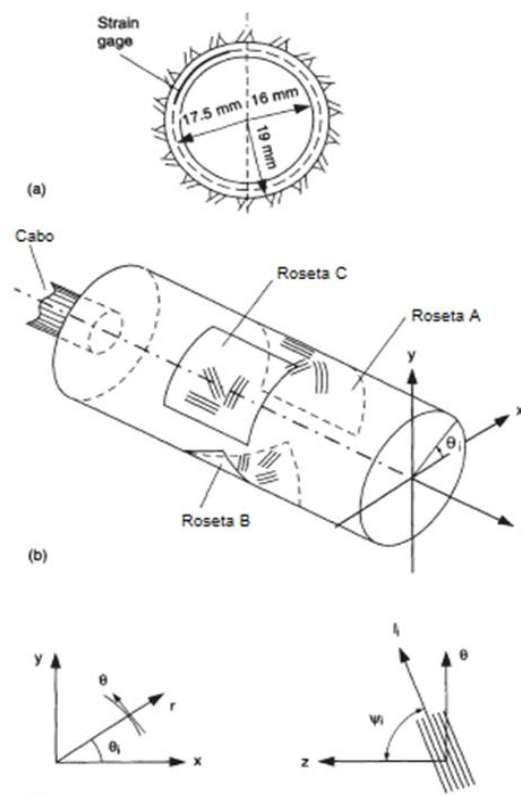


Figura 2.18 - Geometria da célula CSIRO HI. (a) Seção transversal, (b) orientação dos nove medidores de deformação, (c) ângulos de orientação de cada medidor de deformação (traduzido - Amadei & Stephansson, 1997).

A principal vantagem da célula CSIRO HI é sua capacidade de determinar o campo completo de tensões a partir de um único furo, além de permitir o monitoramento contínuo durante a

sobrefuração e apresentar baixas tensões de ligação; ademais, tem mostrado alta taxa de sucesso em campo, especialmente em rochas isotrópicas e em temperaturas entre 15°C e 40°C, embora apresente desempenho limitado em condições abaixo de 10°C ou acima de 40°C. Contudo, o método apresenta limitações importantes: o custo é cerca do dobro do da célula triaxial CSIR, exige sobrefurações longas e intactas, difíceis de obter em rochas fracas, estratificadas ou altamente tensionadas, utiliza configuração de quarto de ponte, e, até o início dos anos de 1990, não permitia a recuperação da célula. Além disso, o adesivo epóxi requer longos períodos de cura (10–20 horas) e apresenta dificuldades de uso em ambientes frios ou úmidos; em temperaturas abaixo de 10°C, seu amolecimento na interface célula–rocha pode gerar escoamento e levar à superestimação das tensões principais paralelas ao eixo do furo, problema parcialmente corrigido posteriormente (Amadei & Stephansson, 1997).

De Lucia *et al.* (2025) apresentaram um estudo voltado à estimativa dos estados de tensão *in situ* e à modelagem numérica para subsidiar análises científicas e verificações de estabilidade em uma pedreira de mármore nos Alpes Apuanos, Itália, utilizando o método de sobrefuração triaxial CSIRO HI, ensaios de compressão biaxial, levantamentos geomecânicos *in situ* e modelagem pelo Método dos Elementos Discretos (DEM). O modelo numérico 3D, desenvolvido a partir de nuvens de pontos e dados LiDAR, foi calibrado com medições obtidas pela célula CSIRO HI e empregado para simular futuras escavações. A integração entre dados geomecânicos de campo e informações prévias permitiu identificar variações significativas no estado de tensões e na qualidade do maciço, influenciadas pelo complexo sistema de descontinuidades. O modelo calibrado possibilitou analisar tensões em qualquer ponto do maciço com elevada precisão, aumentando a confiabilidade das avaliações de estabilidade, além de oferecer uma ferramenta de alta resolução capaz de auxiliar no monitoramento em tempo real e na previsão de condições críticas, contribuindo para o gerenciamento proativo de riscos e para a segurança durante as operações de escavação.

Adach-Pawelus & Pawelus (2021) investigaram a estabilidade de galerias subterrâneas nas minas de cobre da Polônia utilizando determinações *in situ* do campo de tensões por meio do método de sobrefuração com o instrumento CSIRO HI (Figura 2.19), combinadas com modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) e parâmetros de rocha baseados na classificação de Hoek–Brown. As determinações *in situ* permitiram identificar a magnitude e a direção das tensões horizontais, fatores cruciais para a estabilidade das galerias. Os resultados indicaram que a direção de avanço das galerias em relação ao componente

máximo de tensão horizontal influencia diretamente a estabilidade, destacando a importância de um mapeamento preciso do campo de tensões na área de mineração para o desenvolvimento de métodos preventivos otimizados.



Figura 2.19 - Sonda de ensaio CSIRO HI (Adach-Pawelus & Pawelus, 2021)

Wang *et al.* (2013) realizaram medições das tensões *in situ* na mina de carvão de Tingnan, em galerias subterrâneas no nível de -450 m, utilizando o método de sobrefuração. Para isso, a célula do tipo KX-81 foi empregada na medição dos quatro pontos de tensões *in situ*. A célula KX-81 é uma versão aprimorada da célula tipo CSIRO, desenvolvida pelo Instituto de Geomecânica da Academia Chinesa de Ciências Geológicas.

O corpo principal da célula consiste em um cilindro oco de resina epóxi com 3 mm de espessura, diâmetro externo de 36 mm e diâmetro interno de 30 mm, enquanto a parte central possui diâmetro de 35 mm. Três rosetas de extensômetros são dispostas na mesma circunferência, equidistantes entre si, e cada roseta é composta por quatro medidores de deformação distribuídos em quatro direções diferentes, com intervalos de 45°. A impermeabilidade e alta sensibilidade da célula de deformação de inclusão oca a tornam atualmente a sonda de medição mais amplamente utilizada para medição de tensões *in situ* em minas de carvão (Yang *et al.*, 2015).

Além disso, a KX-81 permite obter o estado tridimensional das tensões em um único processo de alívio de tensões, apresentando excelente desempenho à prova d'água (Han, Zhang, Li, & Song, 2012).

Sjöberg & Klasson (2003) descrevem o desenvolvimento da célula do *Swedish State Power Board* (SSPB), desenvolvida na Suécia pela Vattenfall–SSPB, cuja primeira versão foi apresentada em 1976 por Hiltcher *et al.*, (1979). O estudo detalha também a versão atual da célula e o procedimento de medição associado. Atualmente, a célula de tensões é conhecida como sonda Borre e é comercialmente utilizada pela empresa de consultoria *SwedPower AB*, sendo a única célula de sobrecorte tridimensional capaz de realizar medições em furos profundos preenchidos com água, com profundidades de 500 m ou mais.

A sonda Borre (Figura 2.20) é uma célula de tensões “macia”, pois apenas as deformações geradas pela sobrefuração, além da orientação da sonda no furo, são suficientes para determinar o tensor completo de tensões. Como a rigidez dos medidores de deformação da sonda é desprezível em relação à rigidez da rocha, as deformações da sobrefuração refletem o relaxamento total do núcleo.



Figura 2.20 - Sonda Borre utilizada no método de overcoring (Sjoberg & Klasson, 2003).

A sonda Borre foi projetada para furos piloto de 36 mm de diâmetro e sobrecorte de 76 mm, menor que o de muitas outras células de sobrefuração, permitindo perfuração de furos profundos, embora o cilindro de rocha formado seja mais fino (62 mm externo e 36 mm interno), tornando a concentricidade essencial. A sonda é cilíndrica, com cerca de 54 mm de diâmetro externo e 550 mm de comprimento, sendo recuperável, deixando apenas os medidores de deformação colados na parede do furo. Possui nove medidores de deformação elétrica

organizados em três rosetas, cada uma com três medidores de deformação orientados paralela, perpendicular e a 45° em relação ao eixo do furo, conforme ilustrado na Figura 2.21. As rosetas são fixadas a três braços em balanço de plástico na extremidade inferior. Os braços são espaçados 120° e com orientação conhecida em relação ao corpo principal. Os nove medidores de deformação formam uma matriz que representa sete direções espaciais e fornecem dados redundantes para medir seis direções independentes.

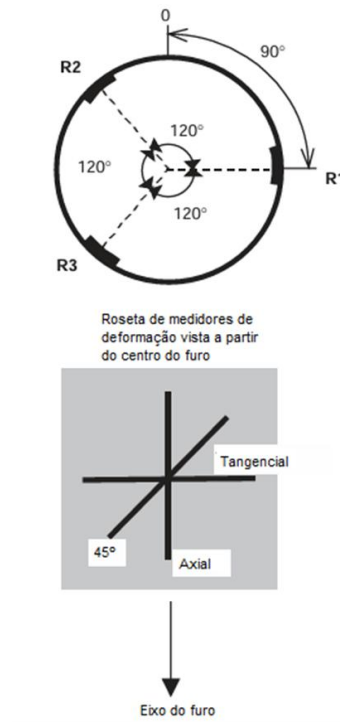


Figura 2.21 - Configuração dos medidores de deformação da sonda Borre (traduzido - Sjöberg & Klasson, 2003)

A sonda também inclui um termistor e um medidor *dummy* para avaliar efeitos de temperatura, com todos os medidores de deformação a 160 mm de profundidade, conectados a um registrador de dados interno alimentado por bateria que grava 11 canais em intervalos predefinidos; a versão mais recente armazena mais de 10 horas de dados em intervalos de 3 s, enquanto a versão antiga registra 8 horas em intervalos de 1 min, sendo gradualmente substituída. Antes da instalação, o registrador é programado via computador portátil com o horário de início da medição, dispensando qualquer conexão adicional, e após a sobrefuração, a sonda é recuperada com a amostra do núcleo dentro do tubo de amostragem. Antes da remoção da amostra e da

desconexão dos medidores de deformação, a sonda é novamente conectada ao computador portátil e os dados registrados são recuperados por meio de um programa de comunicação.

A Figura 2.22 demonstra os seis estágios do procedimento de medição da sonda Borre: no estágio 1, o furo de 76 mm é perfurado até a profundidade de medição escolhida; no estágio 2, o furo piloto de 36 mm é perfurado a partir do fundo do furo de 76 mm; no estágio 3, a sonda é inserida no furo junto com a ferramenta de instalação e contrapeso; no estágio 4, a ponta da sonda é posicionada no furo piloto; no estágio 5, a ferramenta de instalação é retirada e a sonda é fixada no local; e no estágio 6, a sonda é sobrecortada com broca de 76 mm a uma taxa constante, garantindo que o alívio de tensões ocorra de forma controlada e que os medidores não sejam afetados pela perfuração, minimizando o risco de fraturas em camadas fracas.

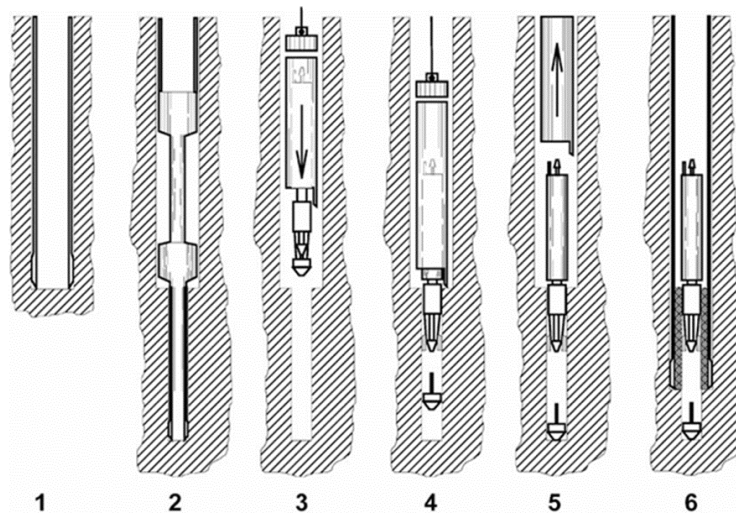


Figura 2.22 - Procedimento de instalação e medição para sobrecorte com a sonda Borre (Sjöberg & Klasson, 2003)

Para cada estágio, os autores destacam cuidados específicos: no estágio 1, o nivelamento da base do furo para torná-la plana e garantir a concentricidade; no estágio 2, a limpeza da área de instalação dos medidores de deformação, assegurando que esteja livre de detritos para garantir boa adesão à parede do furo piloto; nos estágios 3 e 4, a correta instalação e posicionamento da sonda; no estágio 5, o tempo necessário para o endurecimento do adesivo; e no estágio 6, a estabilização da temperatura da rocha antes do início da sobrefuração.

Aplicações recentes da sonda Borre destacaram algumas fontes de erro que merecem atenção, incluindo a espessura da cola e o tempo de cura, sendo recomendado que o adesivo endureça por pelo menos 6–8 horas antes do início da sobrefuração; o desalinhamento dos medidores de

deformação; e a ocorrência de microtrincas. Embora as microtrincas não sejam exclusivas da sonda Borre e ocorram em todos os métodos tridimensionais de sobrefuração, elas se tornam mais críticas em furos profundos, onde se esperam altas tensões, e o cilindro de rocha mais fino criado pela sonda aumenta sua suscetibilidade, exigindo atenção especial. Outra questão frequentemente discutida é o efeito da temperatura nas leituras dos medidores de deformação (Sjöberg & Klasson, 2003).

Estudos realizados com a sonda Borre demonstram sua aplicação prática na caracterização de tensões *in situ* em projetos geotécnicos e nucleares. Sjöberg, Bertilsson & Christiansson (2008) descrevem experiências com o uso do instrumento no programa de investigação de sítios da *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*, que visa avaliar a adequação de locais para o descarte final de combustível nuclear. De forma semelhante, Lindfors & Perman (2007) utilizaram a sonda Borre para caracterizar o campo completo de tensões *in situ* no maciço rochoso intacto no sítio de Oskarshamn, na Suécia, realizando medições em três níveis de profundidade: 250 m, 400 m e 500 m de comprimento do furo.

Mills e Puller (2017) descrevem a evolução da célula *Australia, New Zealand Inflatable* (ANZI), utilizada em furos de exploração profundos para obter medições confiáveis de tensões *in situ*. Sua origem remonta à célula *Auckland New Zealand Soft Inclusion* (ANZSI), desenvolvida entre 1980 e 1983 por Mills e Pender para estimar tensões tridimensionais em carvão, reduzindo as tensões de tração na parede do furo que, em rochas macias, podem causar ruptura durante a sobrefuração. Inicialmente com 38 mm de diâmetro e nove extensômetros, a ANZSI foi aplicada com sucesso em minas de carvão da Nova Zelândia, Austrália e Reino Unido, além de projetos de engenharia em rocha dura. Em 1990, passou por uma modernização significativa: seu diâmetro foi ampliado para 56 mm, adotou um corpo tubular oco, recebeu 18 extensômetros e passou a ser denominada ANZI, refletindo seu aprimoramento técnico e maior eficiência operacional.

Os extensômetros são fixados diretamente na rocha na parede de um furo de sondagem por meio de uma membrana inflável de material maleável, semelhante à borracha, com vários extensômetros expostos em sua superfície externa. A membrana contém dezoito extensômetros elétricos de resistência, orientados em diferentes direções e montados de forma nivelada. Durante a instalação, quando a membrana é inflada os extensômetros tornam-se cimentados à parede do furo permitindo a medição direta das variações de deformação. Toda a fiação é

incorporada à própria membrana, garantindo impermeabilidade ao instrumento. Extensômetros de referência que não variam, orientação do instrumento, pressão de inflação, pressão da água no furo e temperatura também são rotineiramente monitorados.

O método de medição de tensões STT (*Stress-Tensor-Tube*), desenvolvido inicialmente no LNEC na década de 1960 e aplicado em diversos estudos que resultaram numa experiência relativamente extensa, consiste na inserção de uma inclusão no maciço, colando-se a célula num furo de pequeno diâmetro (37 mm) e procedendo-se depois a uma sobrefuração de maior diâmetro (120 mm), durante a qual se registram as deformações resultantes do alívio das tensões. A célula original, um cilindro maciço de resina epóxi contendo 10 extensômetros embebidos ao longo do seu eixo, revelou-se excessivamente rígida, conforme demonstrado experimentalmente pelo LNEC e confirmado por estudos teóricos (Fama, 1979), motivando a sua substituição por um tubo da mesma resina com parede de 2 mm, onde os extensômetros passaram a ser colocados a meia espessura segundo três rosetas. Contudo, esta disposição introduzia uma anisotropia significativa, com observações superabundantes ao longo de determinados eixos, o que levou Loureiro Pinto a estudar uma distribuição otimizada dos extensômetros, concluindo que a configuração ideal, mantendo 10 sensores, seria a correspondente às faces de um icosaedro regular centrado na origem, descrita mais tarde por Charrua-Graça (1982) e agora utilizada nas novas células. Além dessa alteração geométrica, a nova célula apresenta também um comprimento substancialmente inferior ao anterior (redução de 47 cm para 25 cm), o que diminui o risco de insucesso decorrente do encontro de descontinuidades na rocha, já que um comprimento menor reduz a probabilidade de a célula atravessar zonas que possam gerar deformações excessivas durante a sobrefuração (Charrua-Graça, 1984).

Armelin (2010) avaliou diferentes métodos de determinação de tensões *in situ* e selecionou os métodos da sobrefuração e do cancelamento de deformações, considerando sua aplicabilidade tanto em maciços rochosos quanto em estruturas de concreto e o uso de dispositivos padronizados e de fácil disponibilidade, o que reduz custos. No método de sobrefuração, o autor desenvolveu uma célula triaxial aprimorada a partir do modelo utilizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa.

Durante o desenvolvimento dessa célula, Armelin (2010) realizou uma análise detalhada dos pontos passíveis de melhoria na célula de referência, buscando ampliar o número de direções

de medida de sete para doze, igualar o ângulo sólido amostrado por cada roseta garantir que os extensômetros de uma mesma roseta atuem em igual diversidade cristalina, aumentar a sensibilidade do sistema por meio da redução da espessura da parede da célula, assegurar o alívio simultâneo das tensões nos doze extensômetros durante a passagem da ferramenta de perfuração, reduzir o comprimento da célula com vistas a diminuir o tempo e o custo do processo de sobrefuração, além de incorporar equipamentos convencionais de sondagem e integrar um Módulo de Aquisição de Dados (MAD) para agilizar a instalação ao eliminar cabos e hastes. O autor também incorporou um sensor de temperatura com o objetivo de possibilitar correções posteriores nos dados obtidos.

Na segunda etapa do desenvolvimento, foram selecionados os materiais e dispositivos que compõem a célula, incluindo a realização de testes com resinas epóxi de baixa viscosidade, a escolha dos extensômetros elétricos de resistência e a definição do sensor de temperatura.

Segundo o autor, as coroas diamantadas convencionais exercem, durante a perfuração, uma pressão de aproximadamente 2,65 MPa sobre a face de corte devido ao peso das hastes e ao sistema hidráulico, e como o diâmetro interno do padrão HW (sobrefuração) é de $76,20 \pm 0,1$ mm e o diâmetro externo do padrão EW (furo piloto) é de $37,71 \pm 0,1$ mm, a coroa passa muito próxima dos extensômetros colados na parede do furo. Essa condição levanta três possíveis efeitos indesejados: a indução de deformações nos extensômetros pela passagem da ferramenta, a indução de deformações devido ao aumento de temperatura na região e a possível formação de microfissuras na parede do cilindro vazado. Para avaliar essas questões, o autor produziu uma coroa diamantada especial no diâmetro HW, com face cortante em perfil escalonado, diferente das coroas usuais de perfil curvo, plano ou multibiselado, e foram realizados testes comparativos utilizando ambos os tipos de coroas.

Os testes comparativos *in situ* entre a célula de referência e a nova célula foram realizados na galeria de ensaios da hidrelétrica Serra da Mesa, no estado do Goiás. Os resultados permitiram avaliar o desempenho de ambas, evidenciando que a nova célula apresenta sensibilidade aproximadamente seis vezes maior às deformações aliviadas.

As considerações sobre o desenvolvimento da célula triaxial mostraram que o modelo final alcançou o objetivo de aumentar a sensibilidade em relação à célula de referência e ampliar o número de medições em direções não redundantes; a câmara biaxial apresentou desempenho satisfatório e já está adaptada ao diâmetro HW; comprovou-se a viabilidade de reduzir o

diâmetro da sobrefuração de SW para HW utilizando equipamentos convencionais, reduzindo custos sem afetar as deformações estabilizadas; o Módulo de Aquisição de Dados (MAD) simplificou as operações de campo e reduziu erros; e o *software* CaTMiso permitiu rápida visualização dos tensores isotrópicos. Como perspectivas de melhoria, o autor destaca a necessidade de aperfeiçoar o sistema de compensação térmica das deformações medidas e de implementar o CaTMiso para permitir o cálculo de tensores planos em cada roseta, ampliando as possibilidades de interpretação dos dados.

Brandani *et al.*, (2016) descrevem a execução e a metodologia empregadas na campanha de sondagens e ensaios de sobrefuração realizada para a determinação das tensões *in situ* na Mina Cuiabá, onde se lavra um depósito de ouro desde meados da década de 1980, com galerias atualmente desenvolvidas a profundidades superiores a 1200 m. Para esses ensaios, foram utilizadas células do tipo STT, desenvolvidas originalmente pelo LNEC e posteriormente aprimoradas por Furnas, cuja versão apresenta rigidez significativamente menor, conferindo maior flexibilidade de deformação aos extensômetros; dessa forma, a rigidez do conjunto exerce interferência mínima nos resultados, uma vez que os extensômetros são colados sobre um filme plástico, ficando o anel de resina responsável pela única influência local no comportamento do sistema. Do ponto de vista operacional, a utilização da célula de STT apresenta duas limitações principais: a necessidade de furos verticais ou descendentes que permitam o acúmulo da resina no fundo do furo durante a colagem, e a restrição da profundidade máxima do ensaio a cerca de 30 m da boca do furo, devido ao comprimento das ferramentas disponibilizadas para execução das medições.

A preparação para o ensaio teve início antes da conclusão da perfuração do furo EW, incluindo a proteção e impermeabilização do módulo de aquisição de dados (MAD), responsável pelo registro das leituras (Figura 2.23). O MAD permite aquisição por 45 minutos, com intervalos de 15 segundos, podendo ativar-se até 48 horas após a instalação e possuindo bússola digital para orientação. Após a introdução da célula, uma de suas rosetas deve ser alinhada ao norte magnético, utilizando ranhuras no tubo de inserção. Os autores destacam que a etapa mais crítica é a limpeza e remoção de água do furo, garantindo a adequada colagem da célula. A resina é lançada e a célula é cuidadosamente descida devido à sua fragilidade. A aquisição dos dados inicia-se após a cura da resina e o alívio de tensões provocado pela sobrefuração é registrado pelos extensômetros. Em campo, verifica-se a qualidade do testemunho e validam-

se os ensaios, sendo posteriormente coletadas amostras para ensaios laboratoriais de determinação dos parâmetros elásticos da rocha.

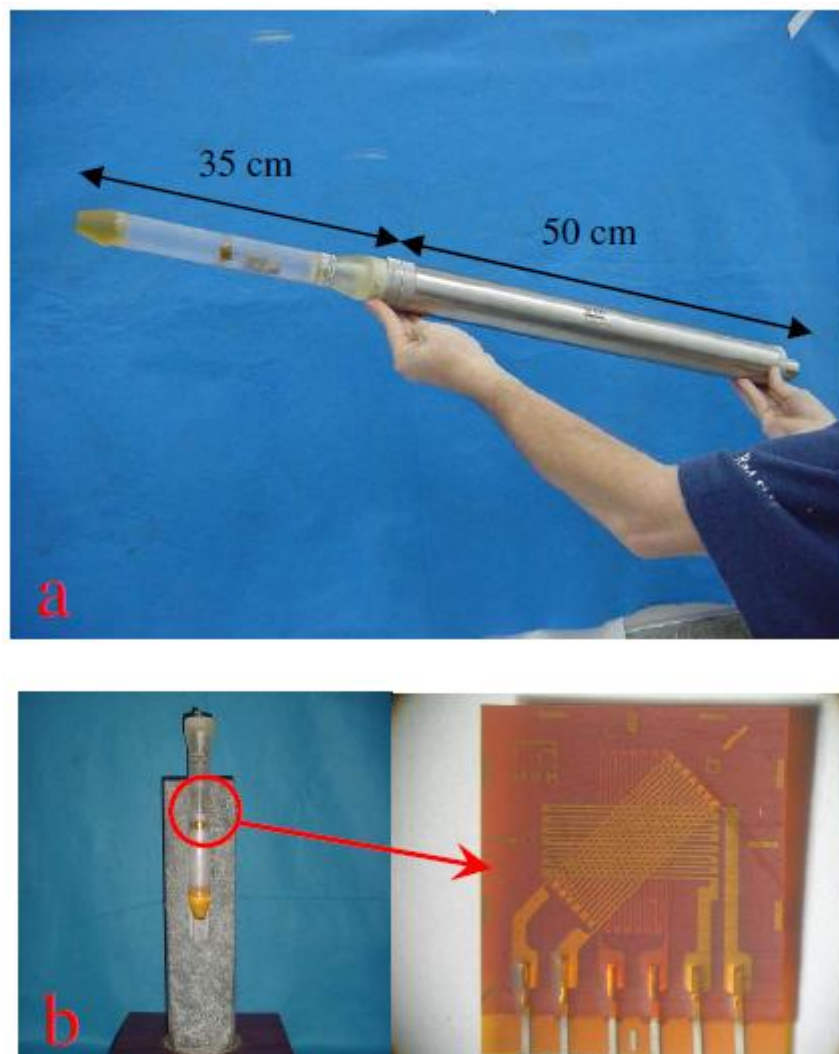


Figura 2.23 - Módulo de aquisição de dados acoplado à célula triaxial (Brandani *et al.* 2016).

As células triaxiais com extensômetros instaladas em furos piloto são altamente sensíveis à isotropia, homogeneidade e granulometria da rocha, o que frequentemente resulta em alguma dispersão nos dados obtidos. Além disso, a escala representa uma limitação potencial, já que pequenas variações na composição do material rochoso podem influenciar as medições. Outra restrição comum a esses instrumentos é a necessidade de testemunhos relativamente longos e íntegros (40–60 cm) durante o processo de sobrecorte, exigindo trechos do furo sem fraturas. Tensões elevadas também podem limitar a aplicação do método, uma vez que podem induzir o fenômeno conhecido como *core-discing* (Ljunggren, 2003).

Os medidores de deformação que registram os deslocamentos da parede durante o sobrecorte possuem princípio é semelhante ao das células de inclusão macia, em que o instrumento é instalado em um furo piloto antes da execução da sobrefuração. No entanto, nesses dispositivos, são medidas uma ou várias variações no diâmetro do furo piloto durante o processo de sobrefuração. Nesses instrumentos, as variações dos deslocamentos radiais são registradas durante a sobrefuração por meio das células e, posteriormente, convertidas em magnitudes de tensão, considerando as propriedades da rocha, como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, obtidas a partir de amostras de testemunho (Lin *et al.*, 2018). Dentre os instrumentos utilizados podemos citar USBM *gage* e o Sibra *in situ stress tool* (IST).

Instrumentos medidores de deformação que registram os deslocamentos da parede durante a sobrefuração apresentam diversas características relevantes. Entre as vantagens, destacam-se a capacidade de fornecer medições de tensões com alta precisão e a possibilidade de aplicação em diferentes condições geológicas, sem limitações impostas por mecanismos de falhas. Além disso, as células de deformação são recuperáveis e podem ser reutilizadas em múltiplos ensaios, o que contribui para a redução de custos associados (Lin *et al.*, 2018).

Por outro lado, existem algumas desvantagens importantes: é necessária a obtenção de um testemunho intacto com pelo menos 300 mm de comprimento, há risco de danos ao instrumento caso o testemunho se quebre, é exigida a perfuração de três furos não paralelos para possibilitar o cálculo do campo de tensões *in situ* e os resultados dependem das propriedades dos minerais em contato com os pistões do medidor (Ljunggren, 2003).

De acordo com Amadei & Stephansson (1997), o USBM *Borehole Deformation Gage* (USBM *Gage*), proposto por Merrill (1967), é um instrumento projetado para medição de tensões *in situ* em furos EW com diâmetro de 38 mm (1,5 polegadas). Fabricado em aço inoxidável, o medidor conta com proteções contra corrosão, água e poeira. Durante o processo de sobrefuração, geralmente utilizando uma broca de 50 mm, a deformação da rocha é registrada ao longo de três diâmetros espaçados de 60° em um plano normal ao furo.

Para cada medição diametral, dois pistões pressionam duas lâminas de berílio montadas em cantiléver, cada uma equipada com dois extensômetros de resistência. Dois transdutores opostos formam um único componente do medidor, e os cantilêveres aplicam uma força de contato de 10–30 lb (45–135 N) por pistão, garantindo contato adequado com a rocha. Molas de fixação, localizadas 150 mm atrás dos pistões, mantêm o medidor em posição durante a

sobrefuração, e normalmente três indicadores de deformação são usados para registrar as três deformações diametrais. Testes em blocos de diferentes materiais indicaram que a precisão do USBM é de $1,3 \times 10^{-3}$ mm, correspondendo a uma precisão de tensões de 0,14–1,4 MPa, dependendo do módulo de elasticidade da rocha, suficiente para estimar as tensões *in situ*. Inicialmente, o instrumento apresentava falhas, mas aprimoramentos reduziram os efeitos de fluência e a sensibilidade à temperatura. No uso do método, a sobrefuração deve ultrapassar os pistões em pelo menos 150 mm, resultando em um comprimento total mínimo de 300 mm. O método pode ser aplicado em furos com presença de água e não requer furos secos.

As principais vantagens do USBM *Gage* incluem a possibilidade de recuperação e reutilização do medidor, instalação sem necessidade de cimento ou cola, histórico comprovado de sucesso em campo, monitoramento contínuo durante a sobrefuração, impacto mínimo nas tensões da rocha, processo de instalação simples, realização de grande número de medições por dia, resistência a variações de temperatura e possibilidade de calibração regular.

Entre as limitações do método estão a necessidade de calibração antes e depois da instalação e sensibilidade a descontinuidades, heterogeneidades e granulometria da rocha. O módulo de Young da rocha pode ser determinado por ensaio biaxial do sobrefuração recuperado, conforme recomendação da ASTM (Amadei & Stephansson, 1997).

Dunn *et al.* (2022) utilizaram estimativas de tensões *in situ* obtidas pelo método de sobrefuração com o instrumento Sigrá IST, complementadas por dados de outros métodos, para analisar o regime de tensões *in situ* em uma grande mina de diamantes a céu aberto em Botswana, prevista para transição para mineração subterrânea até a década de 2030. O método de sobrefuração foi aplicado em um furo piloto de 26 mm de diâmetro, com medições realizadas ao longo de seis diâmetros deslocados 13 mm axialmente e 30° radialmente, à medida que o furo era removido do campo de tensões circundante por meio de uma perfuração coaxial de tamanho HQ. A ferramenta foi projetada para operação em profundidade como parte de uma operação em linha de cabos e incorpora magnetômetros e acelerômetros que permitem medir a orientação com precisão de 0,25° em três eixos. As tensões foram calculadas assumindo-se uma resposta puramente elástica.

Como apenas as variações diametrais são registradas, sem a coleta de deformações axiais, é necessário combinar os resultados de múltiplos furos não paralelos para obter o tensor de tensões completo. De forma similar ao fraturamento hidráulico, a ferramenta Sigrá mede

exclusivamente os componentes de tensão horizontal máxima (σ_H) e mínima (σ_h) no plano perpendicular ao furo, enquanto o componente de tensão vertical (σ_V) é considerado equivalente à sobrecarga.

Gray e Keloth (2025) realizaram uma campanha de estimativas de tensões *in situ* na Austrália ao longo de vários anos, de 2020 a 2023, utilizando a técnica de sobrefuração com os instrumentos Sibra IST. Inicialmente, as medições foram conduzidas com a ferramenta bidimensional Sibra IST2D, que mede a deformação de um furo piloto de 26 mm de diâmetro enquanto é sobrefurado por coroa HQ-3 (60,9 mm) em sistema *wireline*. Esse sistema fornece a medição das tensões ortogonais ao furo, embora dependa de uma estimativa da tensão axial, que em furos verticais é assumida como o peso da sobrecarga. Para superar essas limitações, em 2020 a Sibra introduziu a primeira variante tridimensional, o IST3D (Figura 2.24), projetado para uso com sistemas de *coring* HQ, HQ-3 ou HQ-U (subterrâneo). Essa ferramenta é fixada com cola e atualmente utiliza 21 extensômetros para medir a deformação do cone durante o sobrefuração, permitindo a medição dos estados de tensão tridimensionais no local do sobrefuração.



Figura 2.24 - Ferramenta IST3D no testemunho após o overcoring (Gray e Keloth, 2025).

As medições de tensões por sobrefuração diferem entre as ferramentas IST2D e IST3D. Na IST2D, as tensões são inferidas a partir da variação de diâmetro do furo piloto e de uma estimativa da tensão axial (em furos verticais, a sobrecarga), juntamente com as propriedades da rocha, permitindo calcular as tensões transversais. Já a IST3D fornece o estado completo de tensões no ponto de medição, dispensando estimativas da sobrecarga e permitindo calcular diretamente as deformações necessárias no maciço rochoso. Como esperado, a IST3D fornece muito mais informações, possibilitando a medição do tensor de tensões completo e revelando alterações significativas na tensão vertical.

A célula de Bonnechere (1971) mede continuamente os deslocamentos diametrais e longitudinais durante a sobrefuração e se ajusta a furos piloto de 76 mm de diâmetro. Apesar de pouco utilizada, permite determinar o estado completo de tensões em um único furo apenas

a partir das deformações e é totalmente recuperável. Quatro deslocamentos diametraais são medidos por oito hastes em balanço com extensômetros, pressionadas contra a rocha por nitrogênio, enquanto os três deslocamentos longitudinais são captados por seis DCDTs (transformadores diferenciais de corrente direta), cada um fixado a uma placa flexível com um cone de aço endurecido pressionado contra as paredes do furo (Amadei & Stephansson, 1997).

A célula de Kanagawa (Sugawara e Obara, 1993) é instalada em furos piloto de 48 mm e permite determinar o estado completo de tensões em um único furo por meio de quatro extensômetros diagonais e quatro diametraais. A sobrefuração apresenta diâmetro entre 180 e 218 mm. Os extensômetros são fixados à parede do furo com pasta de cimento, exigindo calibrações laboratoriais especiais para converter as deformações em tensões. Embora haja poucas informações fora do Japão, a célula demonstrou bom desempenho em maciços com espaçamento de juntas superior a 400 mm (Amadei & Stephansson, 1997).

2.5.4.2. SOBREFURAÇÃO DE CÉLULAS NO FUNDO DO FURO:

Nessa categoria, não ocorre a abertura de um furo piloto para a instalação do dispositivo de medição. O instrumento é posicionado diretamente no fundo do furo, que pode apresentar geometria plana, cônica ou esférica. Após a instalação, realiza-se o processo de sobrefuração, seguindo o mesmo diâmetro do furo inicial, o provocando deformações que são registradas pelos transdutores do instrumento e posteriormente correlacionadas com o estado de tensões *in situ*. Entre os instrumentos que se enquadram nesse grupo destacam-se CSIR *Doorstoppers* e as células de deformação esféricas ou cônicas.

Em 1964, Leeman desenvolveu uma célula com extensômetros que podia ser cimentada no fundo de furos de 60 mm e sobrefurada. A célula é frequentemente denominada CSIR (*Council for Scientific and Industry Research*) *Doorstopper* e tem sido utilizada para medições em furos com até 60 m de profundidade (Ljunggren, 2003).

A célula *Doorstopper* possui 35 mm de diâmetro e é utilizada em furos BW (60 mm) ou NW (76 mm). Na sua base, uma roseta de deformação a 45°, com três ou quatro extensômetros, é cimentada sobre uma pequena lâmina circular, cujos condutores se conectam a quatro ou cinco pinos em um plugue isolado. A lâmina e o conector são encapsulados em um tampão de borracha que protege contra água e poeira. O conector acopla-se a uma ferramenta de instalação

ligada ao equipamento de leitura, e a célula é pressionada por ar comprimido e colada a uma superfície lisa no fundo do furo. As deformações são registradas antes e depois da sobrefuração. O método exige que o fundo do furo seja lixado até ficar plano, liso e preferencialmente seco. Apenas cerca de 50 mm de sobrefuração são necessários para o teste, e a compensação térmica é obtida por um segundo *Doorstopper* colado a um núcleo BX de 12 mm na ferramenta de instalação. O procedimento padrão não permite monitoramento contínuo, pois as leituras são feitas apenas no início e no final da sobrefuração (Amadei & Stephansson, 1997). A Figura 2.25 ilustra as etapas que compõem o procedimento de medição de tensões utilizando o *Doorstopper*.

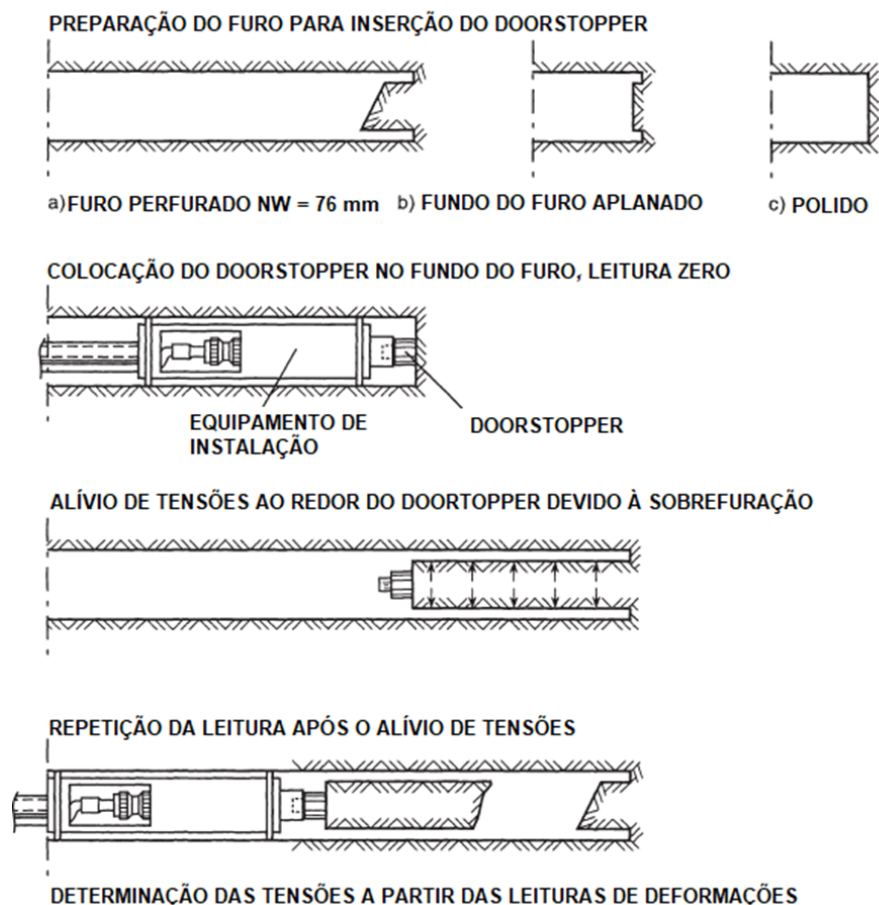


Figura 2.25 - Passos envolvendo a instalação do Doorstopper (modificado - Documentação INTERFELS citado por Amadei & Stephansson, 1997)

O instrumento CSIR *Doorstopper* apresenta diversas vantagens, sendo a principal a necessidade de apenas curtas extensões de sobrefuração (cerca de 5 cm), além da possibilidade de instalação em furos de menor diâmetro. Como não exige furo piloto, tem maior probabilidade de sucesso em rochas relativamente fracas ou fraturadas, bem como em rochas submetidas a tensões elevadas, nas quais o *core discing* é comum. Comparado às células triaxiais, um ensaio com *Doorstopper* requer menos tempo, permitindo a realização de 2 a 3 testes por dia. Outras vantagens, válidas apenas para o modelo *Doorstopper* modificado, incluem monitoramento contínuo e aplicação em furos preenchidos com água. Entretanto, o instrumento apresenta desvantagens importantes, como a necessidade de que a extremidade do furo seja extremamente lisa e plana, a possibilidade de falhas de colagem em furos molhados (embora adesivos mais recentes reduzam esse problema), a exigência de três furos para obter o estado completo de tensões, a variação do tempo de cura do adesivo entre 1 e 20 horas conforme o tipo e as condições do furo, e a impossibilidade de realizar monitoramento contínuo das deformações durante a sobrefuração no modelo padrão (Amadei & Stephansson, 1997; Ljunggren, 2003)

No Laboratório de Pesquisa Subterrâneo (*Underground Research Laboratory*, URL), no Canadá, a Empresa de Energia Atômica do Canadá (*Atomic Energy of Canada Limited*, AECL) desenvolveu um método de sobreperfuração 2D baseado na combinação do *Doorstopper* e de um sistema de registro em furos profundos. O dispositivo utiliza um Módulo de Aquisição Inteligente (*Intelligent Acquisition Module*, IAM), um registrador de dados remoto alimentado por bateria, que coleta e armazena os dados de deformação durante os testes de estimativa de tensões. O método foi testado, por exemplo, no URL, sendo capaz de realizar medições em profundidades de até 1000 m, e foi desenvolvido para fornecer um procedimento robusto em campos de tensão relativamente altos, adequado para furos de 96 mm (HQ-3). O princípio do método consiste em colar o extensômetro do *Doorstopper* no fundo plano do furo; durante a sobreperfuração, as variações nas deformações são registradas pelo IAM, que é montado diretamente no *Doorstopper* dentro do furo. Após a sobrefuração, o núcleo de rocha, juntamente com o equipamento de medição, é recuperado utilizando um sistema de cabo (*wireline*), e os dados obtidos são transferidos para um computador (Janson & Stigsson, 2002).

Para as células de deformação esféricas ou cônicas, o princípio de funcionamento é o mesmo: o instrumento de medição é instalado no fundo do furo, sem necessidade de furo piloto, seguido pelo processo de sobrefuração. A diferença é que, em vez de uma superfície plana no fundo do furo, esta deve ser esférica ou cônica.

Sugawara & Obara (1998) apresentam o equipamento e o procedimento operacional do método de sobrefuração de furo com extremidade cônica compacta (*Compact Conical-Ended Borehole Overcoring*, CCBO), desenvolvido para a medição de tensões *in situ* em rochas, incluindo formações falhadas e altamente fraturadas. Nesse método, o tensor de tensões é determinado a partir das deformações na superfície cônica de um único furo, sendo também possível calcular o erro associado às tensões. O cálculo das tensões rochosas a partir das deformações pode ser aplicado a rochas isotrópicas e transversamente isotrópicas. O alívio de tensões necessário é realizado de forma eficiente por meio da sobrefuração compacta, com o mesmo diâmetro do furo de instalação. Além disso, é viável o monitoramento contínuo das deformações durante a sobrefuração, e a célula de deformação geralmente é composta por 16 ou 24 elementos de medição.

A Figura 2.26 mostra uma visão esquemática da medição de tensões CCBO, onde: 1) perfuração de um furo com diâmetro de 76 mm; 2) criação da cavidade cônica do furo; 3) limpeza da cavidade do furo; 4) colagem da célula de deformação no local e; 5) sobrefuração compacta.

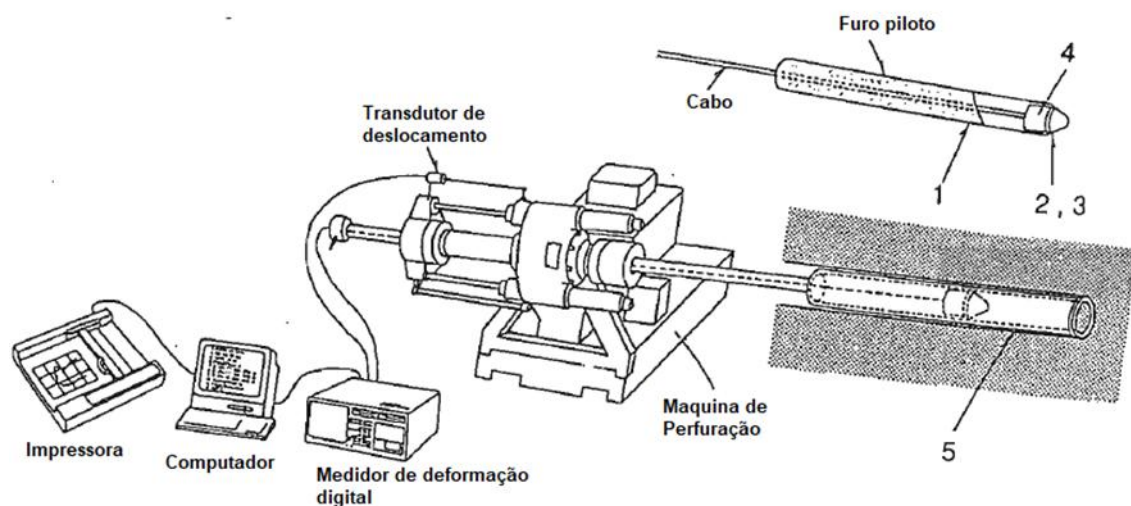


Figura 2.26 - Visão esquemática do CCBO (traduzido - Sugawara & Obara, 1998).

Ogasawara *et al.* (2012) modificaram a técnica de sobrefuração CCBO, originalmente projetada para perfuração NX (76 mm de diâmetro), para aplicação em tamanho BX (60 mm de diâmetro) a cerca de 3 km de profundidade na mina Moab Khotsong, na África do Sul. Diante da

dificuldade de realizar perfuração NX com a *Metre Eater*, uma pequena máquina pneumática amplamente utilizada nas minas de ouro sul-africanas, os autores desenvolveram ferramentas menores e semelhantes para sobrefuração em BX, mantendo a razão geométrica da posição dos 16 extensômetros em relação à célula de deformação, o que possibilitou o uso dos mesmos coeficientes de deformação publicados por Sugawara e Obara (1999). As tentativas iniciais, utilizando ferramentas de sondagem convencionais (coroa BX padrão, alargador e haste), não tiveram sucesso, mas tentativas posteriores, com a introdução de estabilizadores e coroas BX de parede fina, foram bem-sucedidas. Embora máquinas de perfuração pequenas sejam amplamente utilizadas nas minas sul-africanas para furos de pequeno diâmetro, elas raramente são aplicadas em medições de tensões; ainda assim, com esse equipamento mais simples, foi possível realizar a medição de tensões pelo método CCBO adaptado para BX. Os autores conseguiram completar todas as etapas necessárias (modelagem cônica da extremidade do furo, colagem da célula de deformação de 16 elementos e sobrefuração) em apenas 2,5 horas, e a necessidade de apenas 10 cm de sobrefuração aumentou significativamente as chances de sucesso em maciços altamente fraturados. O método modificado mostrou-se adequado para furos inclinados para cima, com profundidades de 10 a 15 m a partir dos túneis, e apresenta potencial para uso amplo nas fases iniciais de perfuração de exploração geológica.

2.5.4.3. ABERTURA DE FENDAS EM FUROS (*BOREHOLE SLOTTING*):

O método de abertura de fendas em furos baseia-se no princípio do alívio local de tensões, no qual entalhes são executados na parede do furo e as deformações aliviadas ao redor desses entalhes são medidas. O procedimento envolve inicialmente a perfuração de um furo com dimensões apropriadas e, posteriormente, a realização de cortes radiais em forma de meia-lua paralelos ao eixo do furo, utilizando um dispositivo especialmente projetado. As deformações registradas são então convertidas em tensões sob a condição de deformação plana, com base na teoria da elasticidade linear. Para determinar as tensões bidimensionais no plano perpendicular ao furo, é necessário realizar pelo menos três cortes longitudinais, geralmente espaçados a 120° entre si (Lin, Zou & Sun, 2019). A Figura 2.27 mostra o esquema do método.

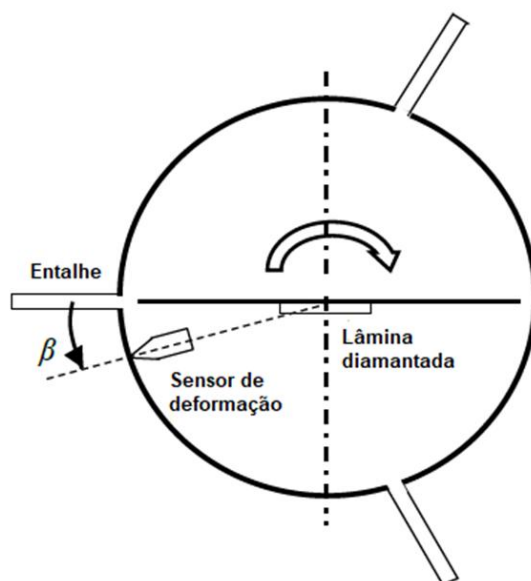


Figura 2.27 - Vista em corte do arranjo do método de abertura de fendas em furos (traduzido - Lin, Zou & Sun, 2019)

O método de fendilhamento de furo apresenta como principais vantagens a ausência de necessidade de sobrefuração, a rapidez (permitindo 10 a 15 medições por dia), a recuperação total do instrumento e a possibilidade de monitoramento contínuo das deformações. No entanto, apresenta limitações, como a necessidade de furos secos, aplicação restrita a pequenas profundidades e exigência de conhecimento da tensão paralela ao eixo do furo. O equipamento é projetado para furos com diâmetro entre 95 e 103 mm, e, em geral, as medições obtidas com ele apresentam boa concordância com outros métodos (Ljunggren, 2003).

Vinueza (1998) apresentou e avaliou a técnica BHFJ (*Borehole Flat Jack*), desenvolvida pela empresa alemã GIF (*Geotechnical Engineering Bureau Prof. Fecker & Partners*), por meio de análises com soluções exatas e numéricas que simulam a resposta de um maciço rochoso submetido ao ensaio BHFJ. Além disso, foram discutidos os resultados de testes pioneiros realizados no revestimento de um túnel ferroviário. A técnica BHFJ baseia-se no princípio geomecânico da compensação de deformações e utiliza o fendilhamento da parede do furo (*slotting*) como método auxiliar de alívio de tensões. Baseada na técnica FJ (*Flat Jack*), a BHFJ foi projetada para aplicação dentro de furos de sondagem, superando a limitação da FJ, que se restringe à determinação de tensões em superfícies livres, como paredes de túneis ou faces de galerias de mineração.

Na técnica BHFJ um alívio de tensão artificial é induzido na parede do furo por meio do fendilhamento com a sonda BHCS-P (*Borehole Chain-Saw Probe*), equipada com uma motosserra retrátil. As deformações geradas são medidas e compensadas por uma segunda sonda, a BHFJ-P (*Borehole Flat Jack Probe*), que utiliza macacos planos retráteis e LVDTs para medir e controlar a compensação. Inicialmente, perfura-se um furo de 146 mm até a profundidade de interesse e utiliza-se um sistema de perfuração por cabo (*wireline*) para obtenção de testemunhos não perturbados. Após atingir a profundidade de ensaio, a coluna de perfuração é recuada e a sonda BHFJ-P é posicionada e fixada na parede do furo, com marcadores e LVDTs instalados para medir as distâncias diametrais iniciais. Em seguida, a BHFJ-P é removida e a BHCS-P realiza dois cortes radiais na parede do furo, provocando deformações devido ao alívio de tensões *in situ*. Posteriormente, a BHFJ-P é reinstalada e os macacos planos são inseridos nos cortes e pressurizados para compensar as deformações, registrando-se as alterações diametrais. A pressão hidráulica necessária para a compensação total é considerada proporcional à tensão *in situ* normal ao par de macacos planos. O procedimento é repetido em diferentes profundidades e orientações, permitindo a determinação do estado biaxial de tensões ao longo do furo.

Na literatura, existem estudos que utilizam o método de sobrefuração para comparar diferentes instrumentos de medição de deformações e deslocamentos, bem como para avaliar o desempenho do próprio método de sobrefuração em relação a outras técnicas de estimativa de tensões *in situ*.

Martin & Christiansson (1991) conduziram um programa de sobrefuração em três furos quase ortogonais no mesmo volume de granito altamente tensionado no Laboratório de Pesquisa Subterrâneo (URL), com o objetivo de verificar se o medidor de deformação USBM fornecia resultados semelhantes aos do dispositivo CSIR modificado. Eles concluíram que o tensor de tensões médio obtido com o USBM estava dentro dos limites de confiança de 90% dos resultados obtidos pelo CSIR.

Becker & Davenport (2001) avaliaram medições de tensões *in situ* realizadas em 1987 na Inglaterra e na Escócia por meio da técnica de sobrefuração (*Doorstopper* e célula de deformação triaxial), no âmbito do projeto da Universidade de Karlsruhe, incluindo também estudos complementares com o método de Recuperação de Deformação Anelástica (ASR). Embora dados de tensões rasas sejam de difícil interpretação, os autores concluíram que os

métodos empregados, mesmo não sendo recentes, permitem obter informações confiáveis sobre tensões contemporâneas, possibilitando a determinação das orientações das tensões principais a partir de furos rasos e testemunhos de rocha quando os locais são adequadamente selecionados.

Wiles *et al.*, (2004) apresentaram um procedimento para o projeto de reforço de rochas altamente tensionadas utilizando modelagem numérica tridimensional, empregando como dados de entrada resultados de estimativas de tensões *in situ*. Essas estimativas foram obtidas por meio dos métodos de sobrefuração com o instrumento CSIRO HI e da técnica de Emissão Acústica. Ao comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, os autores observaram excelente concordância tanto nas magnitudes das tensões principais quanto nas suas orientações.

Dunn *et al.* (2022) utilizaram diferentes métodos para avaliar o regime de tensões *in situ* em uma mina de diamantes em Botswana, incluindo o método de sobrefuração com o instrumento Sigra IST, a análise da taxa de deformação (DRA) e a observação de *breakouts*. Os autores destacaram que ainda existem incertezas quanto ao campo de tensões; portanto, análises de sensibilidade são empregadas durante a modelagem numérica. O trabalho permanecia em andamento, e os resultados apresentados no estudo são considerados como a primeira etapa para compreender o estado de tensões na Mina Jwaneng.

Li *et al.* (2024) avaliaram e compararam os resultados obtidos pelos métodos de fraturamento hidráulico (HF) e sobrefuração (OC), empregando o método de furo piloto com extensômetro de inclusão tubular, nas minas de ferro Shuichang e de ouro Sanshandao, na China. Os autores verificaram que os dados independentes de OC e HF em ambas as minas revelam o mesmo regime de tensões dominante, e que as orientações de σ_H obtidas pelos dois métodos são relativamente semelhantes. Dessa forma, concluem que o desempenho das duas técnicas é consistente e que a confiabilidade dos dados gerados pode ser considerada satisfatória.

Hakala *et al.*, Hudson & Christiansson (2003) desenvolveram um sistema de controle de qualidade para medições de tensões por sobrefuração com o objetivo de aprimorar a qualidade da interpretação dos resultados de medições de tensões por sobrefuração. O projeto inclui um *software* que simula as deformações e tensões transitórias durante a sobrefuração, permitindo comparar os valores medidos com os calculados e verificar a consistência com o estado de tensão *in situ*, podendo ser aplicado a diferentes sondas mediante ajustes nos tensores de tensão.

O *software* considera a rocha como contínua, homogênea, isotrópica e linearmente elástica. Entre suas funcionalidades estão: (a) a verificação das deformações por meio da comparação entre valores medidos e calculados; (b) a identificação de extensômetros defeituosos e a estimativa de erros individuais ou deformações inexplicáveis; (c) a avaliação do potencial de dano à testemunha, comparando as tensões principais elásticas na parede do furo piloto com a resistência da rocha; e (d) a estimativa do estado de tensão *in situ* a partir das leituras iniciais utilizando uma solução inversa.

2.5.5. BREAKOUTS

Leeman (1964b) foi o primeiro pesquisador a estabelecer uma correlação entre as observações de fraturamento nas paredes laterais de furos de sondagem e o estado de tensões *in situ* em maciços rochosos. Embora o fenômeno ainda não fosse denominado *breakout* à época, sua ocorrência já havia sido identificada e descrita. O autor demonstrou que o lascamento (*spalling*) nas paredes de furos é resultado de tensões compressivas excessivas e que o grau de fraturamento ao longo do furo pode fornecer informações quantitativas sobre a variação das tensões na rocha. Além disso, Leeman (1964b) sugeriu que os segmentos rompidos são perpendiculares à tensão principal máxima no plano perpendicular ao eixo do furo.

Apesar de o fenômeno de *borehole breakout* ter começado a ser considerado como técnica confiável para estimativa das tensões *in situ* apenas da década de 1970 e início da década de 1980, durante a compilação de um dos bancos de dados de tensões mais completos do mundo, verificou-se que, 28% de todos os estudos de caracterização de tensões já utilizavam o método de *borehole breakout* à época. (Zoback, 1992).

Em muitas situações, a rocha ao redor de escavações circulares, como perfurações, túneis ou poços, pode não ser capaz de suportar a concentração de tensões compressivas associadas ao processo de escavação, resultando na ruptura desta em duas zonas de alargamento diametralmente opostas denominadas *breakouts*. Há evidências experimentais de que esse fenômeno ocorre ao longo da direção do menor componente de tensão *in situ* e podem ser um indicador da orientação dessas tensões. (Amadei & Stenphansson, 1997).

Em geral, *breakouts* são usados para determinar a orientação das tensões *in situ*, mas não sua magnitude. Entretanto, foi observado que a forma e a profundidade dos *breakouts* em furos

verticais dependem da magnitude das tensões horizontais *in situ*, maior e menor. Essa dependência levou vários autores a sugerirem que a geometria dos *breakouts* em furos de sondagem poderia ser usada para estimar a magnitude das tensões *in situ*. Contudo, essa abordagem deve ser utilizada com cautela, pois o fenômeno pode ser ampliado devido a várias causas, como redução da resistência do maciço rochoso causada por variações de temperatura ou pela composição química dos fluidos de perfuração, ou pelo intemperismo das paredes do furo, especialmente em maciços fracos ou pouco cimentados. *Breakouts* também podem ser afetados pela intensidade da perfuração (maior ou menor avanço) e pelo método de perfuração selecionado (Kutter, 1991, citado por Amadei & Stenphansson, 1997). A Figura 2.28 ilustra o fenômeno no revestimento de um poço vertical submetido às tensões horizontais *in situ* maior e menor, S_H e S_h , respectivamente.

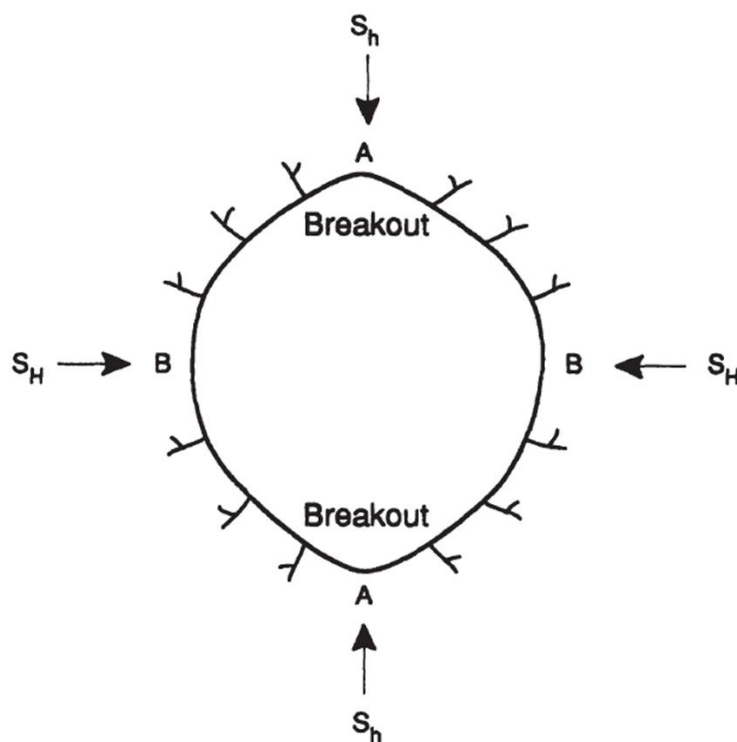


Figura 2.28 - Fenômeno de *breakout* em um poço vertical (Amadei & Stenphansson, 1997).

Diversos modelos têm sido propostos para explicar a formação dos *breakouts*. Em geral, tais modelos consideram que as tensões principais *in situ* estão orientadas horizontal e verticalmente. A abordagem convencional assume que os *breakouts* se desenvolvem por tensões de cisalhamento, e que sua localização pode ser prevista a partir da solução de Kirsch

para o estado de tensões ao redor de um furo circular em um meio elástico, linear, isotrópico, contínuo e homogêneo, submetido a um campo de tensões tridimensional atuante no infinito (Armelin, 2010).

Conforme mostrado na Figura 2.29, o *breakout* é caracterizado pela profundidade radial e pela extensão angular (ângulo de abertura) (Leriché *et al.*, 2017).

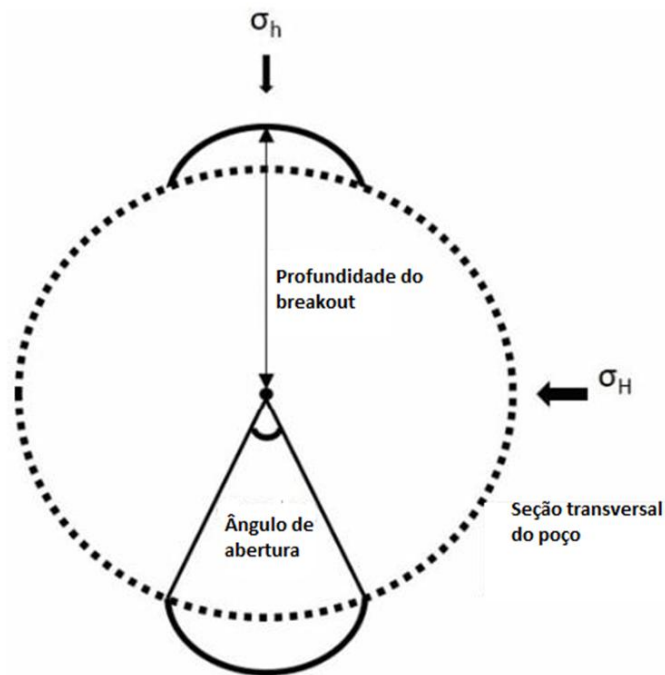


Figura 2.29 - Características do *borehole breakout* com as tensões representadas para um furo orientado verticalmente (traduzido – Leriché *et al.*, 2017).

Haimson (2007) ressalta que a evolução do *breakout* é influenciada por fatores como porosidade, mineralogia, tamanho dos grãos e composição da matriz intergranular. Em sua investigação, o autor analisou o mecanismo de *breakout* em diferentes tipos de rochas, incluindo granito, arenitos e arenitos ricos em quartzo, evidenciando a ocorrência de distintos mecanismos de ruptura. A Figura 2.30 apresenta breakouts típicos em forma de V, observados em imagens de luz polarizada de seções transversais de furos de sondagem em granitos.

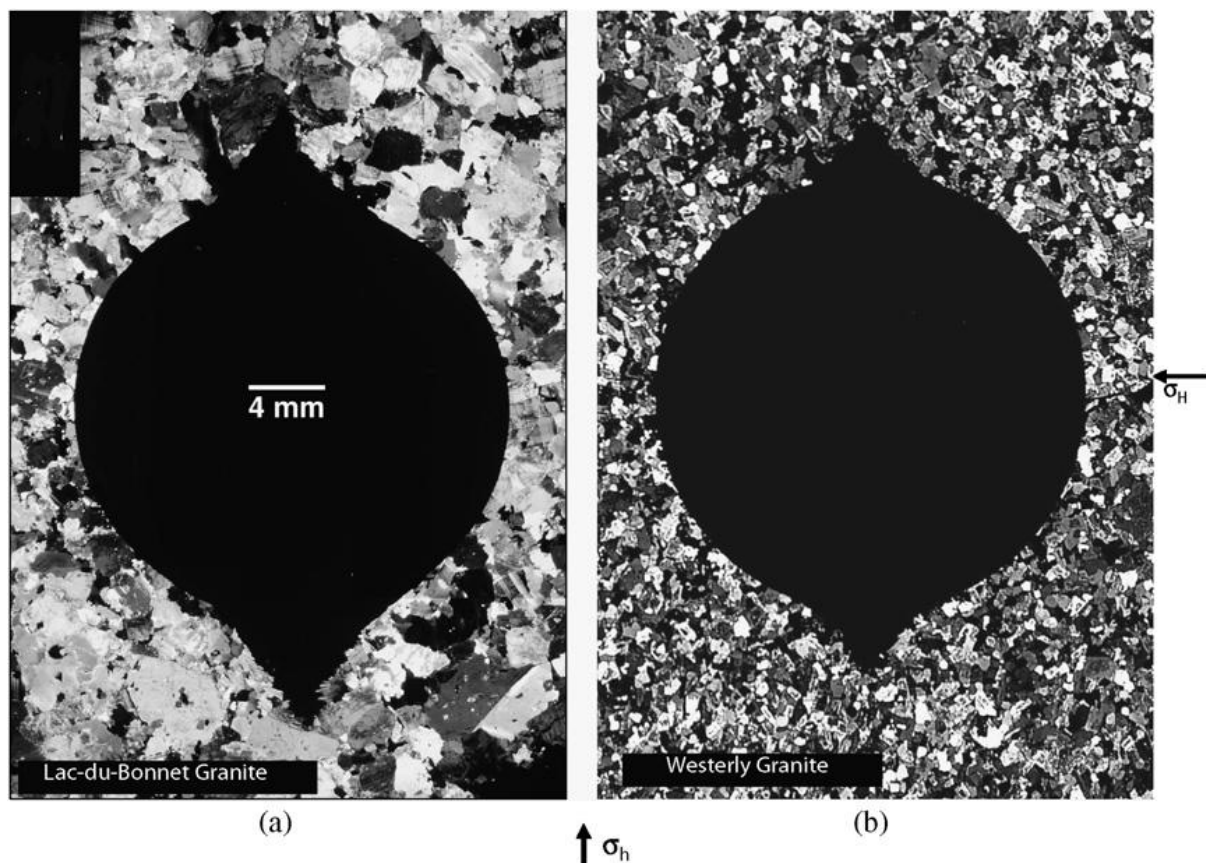


Figura 2.30 - Breakouts típicos em forma de “orelhas de cachorro” (em V), observados em imagens de luz polarizada de seções transversais de furos de sondagem em dois granitos: (a) Lac du Bonnet ($\sigma_h/\sigma_H/\sigma_v = 30/190/30$ MPa) e (b) Westerly ($\sigma_h/\sigma_H/\sigma_v = 50/210/60$ MPa) (Haimson, 2007).

O azimute do *breakout* é determinado pela orientação do campo de tensões, enquanto sua geometria é controlada pela magnitude dessas tensões e pelas propriedades mecânicas da rocha, pressupondo-se um meio isotrópico e homogêneo (LeRiche *et al.*, 2017).

Ljunggren *et al.* (2003) destacam as vantagens da avaliação de *breakouts* para a estimativa de tensões *in situ*, ressaltando que se trata de um método de aplicação rápida, que exige apenas a medição das variações diametrais na parede do furo e que pode fornecer informações confiáveis em grandes profundidades, onde outros métodos tendem a ser menos eficientes. Como limitações, os autores apontam que a técnica só pode ser empregada quando o fenômeno de *breakout* está presente e que a anisotropia do maciço rochoso pode afetar a localização dos *breakouts*, comprometendo a utilidade dos resultados obtidos.

Fowler & Weir (2008) avaliaram o fenômeno em furos de sondagem para a expansão do projeto de uma mina a céu aberto no depósito Olympic Dam, no sul da Austrália. A investigação baseou-se em furos executados com sonda diamantada, atingindo profundidades de aproximadamente 800 m, cuja descrição foi realizada por meio de ferramentas de mapeamento acústico (*Acoustic Televiewer*), capazes de fornecer informações de alta precisão sobre feições estruturais e falhas induzidas pelas tensões nas paredes dos furos. Os autores destacam que a medição de *breakouts* apresenta valor adicional relativamente pequeno, limitado principalmente à capacidade de interpretação dos dados, quando comparada a métodos tradicionais, como sobrefuração e emissão acústica. No total, foram analisados 500 furos de sondagem distribuídos por todo o depósito, com profundidades variando de 57 a 1220 m; contudo, apenas 24 apresentaram qualidade adequada de dados para avaliação assertiva do fenômeno. Os resultados obtidos por meio da análise de *breakout* foram comparados a outras estimativas de tensão *in situ*, incluindo 14 medições com CSIRO HI-Cell e cinco medições por emissão acústica. O estudo concluiu que a orientação das tensões derivada da análise de *breakout* apresenta boa concordância com os demais métodos, demonstrando que essa abordagem pode ser utilizada para identificar a orientação do campo de tensões *in situ*, desde que o modo de ruptura seja corretamente caracterizado. Além disso, os autores ressaltam que a avaliação de *breakouts* constitui um método complementar valioso para integrar informações obtidas por outras técnicas e que a crescente disponibilidade de furos com perfilagem acústica em espaçamentos reduzidos oferece uma oportunidade significativa para aprimorar a compreensão do regime de tensões com maior nível de detalhe e menor custo operacional.

Tropia e Figueiredo (2015) avaliaram o fenômeno de *breakouts* na Mina Cuiabá, em Minas Gerais, Brasil, comparando os resultados obtidos com outros métodos de estimativa de tensões *in situ*. Os dados de *breakouts*, porém, não foram satisfatórios, uma vez que a orientação das tensões estimadas pelo método apresentou sentido oposto àquela obtida pelo método de sobrefuração. Os autores destacam que os mecanismos de ruptura do maciço são fortemente controlados pelas propriedades mecânicas dos planos de foliação e por sua orientação angular em relação ao eixo do furo. Ainda assim, ressaltam que a técnica se mostrou viável e menos onerosa que os ensaios *in situ*.

LeRiche *et al.*, (2017) apresentam um estudo de análise de *borehole breakouts* utilizando o instrumento *Acoustic Televiewer* (ATV) em um depósito mineral de níquel, cobre e elementos do grupo da platina (Ni-Cu-PGE), localizado na província de Ontário, no Canadá. Os dados

foram adquiridos ao longo de um furo piloto de 2 km de extensão, sendo o trecho analisado compreendido entre 850 e 2.000 metros de profundidade. A caracterização dos perfis foi realizada por meio do ângulo médio de abertura e da profundidade do *breakout*, normalizada em relação ao tempo médio do processo. Os resultados mostraram elevada variabilidade, com ângulo médio de abertura de aproximadamente 33° e profundidade média equivalente a 1,15 vezes o raio do furo. Ao avaliar diferentes litologias, os autores observaram que aquelas com maior variabilidade no azimute e no ângulo de abertura são as que apresentam foliação preferencialmente alinhada, fazendo com que a orientação do *breakout* tenda a rotacionar em direção ao mergulho do acamamento, independentemente da orientação da tensão principal maior. Como conclusão, os autores destacam que a avaliação de *breakouts* constitui uma alternativa sólida aos dados provenientes de bancos de dados regionais ou de pressupostos baseados na história tectônica. Em projetos de mineração, essa abordagem aumenta a resolução das estimativas de tensões *in situ*, contribuindo para uma análise mais detalhada dos fatores-chave que influenciam a vida útil da mina, como a ocorrência de *overbreaks* em escavações.

MacGregor e Eng (2003) investigaram diversos fenômenos relacionados ao regime de tensões por meio da análise de *borehole breakouts* na Bacia de Sydney, na Austrália, destacando o impacto direto dessas tensões sobre as operações de mineração subterrânea. A aplicação de imagens acústicas de alta resolução permitiu reunir um conjunto de dados extenso e consistente. Esses dados forneceram subsídios importantes para compreender a natureza do regime de tensões horizontais na região, os possíveis controles estruturais sobre o estado de tensões *in situ* e os efeitos dos vazios gerados pela lavra, especialmente em escala de mina, na redistribuição do campo de tensões. Os autores concluíram que a análise de *breakouts* é um método robusto para caracterizar a direção das tensões, porém reforçam a necessidade de cautela ao interpretar tensões de longo alcance (*far-field*) em ambientes estruturalmente complexos, a fim de diferenciar adequadamente os efeitos locais daqueles regionais. No caso estudado, os resultados confirmaram uma reorientação generalizada das tensões associada à presença de painéis de mineração “longwall”, evidenciando a influência significativa da geometria e da evolução dos vazios na redistribuição do campo de tensões.

2.5.6. DISCINGS

O estudo do mecanismo de *core-discing* e sua aplicação na estimativa do estado de tensões *in situ* teve início em 1963, com os trabalhos de Jaeger e Cook, que identificaram, por meio de

experimentos laboratoriais com testemunhos cilíndricos, uma relação inversa entre a tensão principal aplicada e a espessura dos discos formados. Desde então, estudos têm avançado de forma significativa, ampliando a compreensão do mecanismo de fraturamento, explorando o uso das características geométricas dos discos e consolidando o fenômeno como uma ferramenta promissora para a predição indireta de tensões *in situ* (Lu *et al.*, 2006; Tu'ua *et al.*, 2016).

O processo de perfuração para obtenção de testemunhos gera concentrações de tensão diretamente na interface entre a broca/rocha. À medida que o núcleo é formado, o sulco anular provoca a redistribuição das tensões *in situ*, induzindo elevados níveis de tensão no interior do testemunho. Essa condição pode ocasionar danos ao material, como deformações irreversíveis e microtrincas. Em situações nas quais as tensões *in situ* são elevadas e a rocha apresenta comportamento frágil, pode ocorrer o fenômeno conhecido como *core-discing* ou empastilhamento, no qual o núcleo é fraturado em finos discos. A ocorrência de empastilhamento em testemunhos é reconhecida como um indicador de zonas submetidas a elevados níveis de tensão *in situ*. Evidências mostram que tensões excessivas podem provocar rupturas tanto na parede do furo, resultando em *breakouts*, quanto na base do testemunho de sondagem, ocasionando a fragmentação deste em discos. A presença do fenômeno de *core-discing* indica que as tensões atuantes na rocha excedem sua resistência, fornecendo informações relevantes obtidas ainda na etapa de perfuração, as quais podem ser valiosas para subsidiar decisões futuras (Fairhurst, 2003; Ljunggren *et al.*, 2003).

Lim (2013) aponta cinco fatores conhecidos que causam o fenômeno de *core-discing*, são eles: as tensões *in situ* no maciço rochoso, as propriedades da rocha, a geometria do furo, a pressão de perfuração e a poropressão e a velocidade de perfuração.

Tu'ua *et al.* (2016) conduziram um estudo em áreas de mina a céu aberto e suas adjacências, em uma mina de ouro e cobre na Indonésia, cuja operação está em transição para lavra subterrânea, com o objetivo de analisar aspectos geomecânicos relevantes, identificar potenciais riscos, avaliar a presença de tensões horizontais elevadas e estimar a magnitude das tensões *in situ*. A área apresenta rotina intensa de sondagens, totalizando mais de 5.082 furos e cerca de 1.233.283 metros de testemunhos, o que resulta em um banco de dados extenso; dentre esses furos, 31 registraram ocorrência de *core-discing*, tornando-se foco da investigação. Para cada ocorrência, foram mensuradas a espessura dos discos, a distância às principais estruturas

geológicas e a profundidade em relação à superfície da cava. As análises confirmaram a existência de um regime de tensões horizontais elevadas, evidenciado tanto pelos dados de empastilhamento de testemunhos quanto pelas medições diretas de tensões *in situ*, indicando que futuras infraestruturas devem considerar a presença desse estado de tensões. Ademais, verificou-se que todas as rochas nas quais o fenômeno ocorreu apresentam comportamento frágil, em conformidade com a teoria consolidada de que o *discing* se manifesta predominantemente em materiais frágeis.

Tropia e Figueiredo (2015) destacam que o interesse no estudo do *core-discing* decorre de sua capacidade de fornecer informações sobre o estado de tensões em grandes profundidades, especialmente em locais onde não há acesso direto ou onde a aplicação de métodos tradicionais de determinação de tensões seria tecnicamente complexa ou economicamente inviável. Ao analisarem testemunhos de sondagem da Mina Cuiabá, no Brasil, os autores concluíram que o *discing* pode ser empregado como ferramenta de zoneamento geomecânico das regiões de acúmulo de tensão, oferecendo subsídios ao planejamento de lavra ao indicar áreas do corpo de minério que exigem maior controle no sequenciamento das escavações, nas detonações e no dimensionamento dos sistemas de suporte e reforço.

Panitz *et al.* (2025) avaliaram as tensões *in situ* a partir do fenômeno de empastilhamento observado em testemunhos de sondagem obtidos em uma área localizada na Província Mineral de Carajás, no Brasil, caracterizada por depósitos de cobre e ouro (Cu-Au). Do total de 94.720 m de testemunhos analisados, apenas 24,04 m apresentaram o fenômeno, com espessura média dos discos variando entre 1 cm e 3 cm, em profundidades de aproximadamente 100 a 400 m. Os autores destacam que, embora a baixa ocorrência do fenômeno não permita extrapolar os valores estimados de tensão para todo o maciço, a presença dos *discings* indica a possibilidade de tensões elevadas e potencialmente anômalas no local. Assim, o registro dessas rupturas reforça a necessidade de estimativa *in situ* mais confiáveis, além de permitir a antecipação de possíveis problemas associados a tensões excessivas em futuras escavações nos mesmos litotipos e profundidades onde o fenômeno foi identificado.

Bustos & Villaescusa (2024) realizaram um estudo estatístico utilizando bancos de dados geotécnicos compostos por dados de empastilhamento de testemunhos e de RQD (Figura 2.31) provenientes de quatro minas, cada uma explorada por métodos distintos: lavra em bancadas, lavra a céu aberto, operação subterrânea *post-pillar* e *block caving*. A análise foi conduzida em

uma plataforma denominada *Integrated Geotechnical Data* (IGD), desenvolvida com o *software* Power BI, que auxilia na compreensão de ambientes geotécnicos específicos. A abordagem permitiu validar os resultados obtidos por meio de diversas técnicas de medição de tensões. Os autores observaram que a orientação estimada a partir do banco de dados de furos de sondagem apresentou excelente correlação com outras metodologias de determinação de tensões *in situ*.



Figura 2.31 - Exemplo de caixa de testemunhos com ocorrência de *discings* em mina de *Bench Stopping* (Bustos & Villaescusa, 2024).

2.5.7. MÉTODO DE ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DIAMETRAL DE TESTEMUNHO (DIAMETRICAL CORE DEFORMATION ANALYSIS, DCDA)

Método originalmente apresentado por Funato & Chen (2005) baseado na deformação de testemunhos de sondagem. Testado e confirmada sua confiabilidade em laboratório por Funato *et al.*, (2012) e em experimentos de campo por Ito *et al.* (2020).

Funato & Ito (2017) investigaram a possibilidade de empregar a expansão diametral diferencial de testemunhos de sondagem para determinar as tensões *in situ*. Os autores partem do princípio de que, ao ser extraído por perfuração, o fragmento de rocha fica livre das tensões *in situ*, ocasionando a expansão de seu diâmetro. Com base nesse comportamento, foi proposto o método denominado Análise da Deformação Diametral do Testemunho (*Diametrical Core Deformation Analysis*, DCDA). O modelo indica que um testemunho extraído em um campo de tensões anisotrópico tende a se expandir assumindo uma forma levemente elíptica em sua seção transversal. Dessa forma, a diferença entre os componentes máximo e mínimo da tensão

em um plano perpendicular ao furo, bem como suas orientações, pode ser estimada a partir da variação entre os diâmetros máximo e mínimo do testemunho e das direções correspondentes.

Considere um maciço rochoso submetido a tensões máxima e mínima, σ_{\max} e σ_{\min} ($\sigma_{\max} > \sigma_{\min}$), no qual um círculo de diâmetro d_0 é imaginado na superfície (Fig. 2.32a); quando ocorre o alívio dessas tensões, essa circunferência se deforma, assumindo uma forma elíptica caracterizada por d_{\max} e d_{\min} (Fig. 2.32b). De maneira semelhante, durante a sondagem, a Fig. 2.32c representa a seção transversal do furo antes do corte; porém, após o alívio das tensões *in situ*, o testemunho passa a se expandir livremente, sofrendo deformação contínua ao longo da perfuração. Como resultado, o testemunho adquire uma forma uniforme em seção transversal, apresentando d_{\max} e d_{\min} , conforme ilustrado na Fig. 2.32d. O testemunho se expande mais e menos nas direções das tensões máxima e mínima, σ_{\max} e σ_{\min} , respectivamente, embora a variação circunferencial do diâmetro seja muito pequena.

O modelo analítico proposto por Funato & Ito (2017) baseia-se na teoria da elasticidade linear para rochas isotrópicas, homogêneas e contínuas, estabelecendo uma relação entre os diâmetros máximo e mínimo do testemunho e o campo de tensões principais locais σ_h e σ_H , levando em conta as propriedades físicas da rocha, como o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Dessa forma, mesmo com o conhecimento das propriedades da rocha, apenas a tensão diferencial (ΔS) e a orientação das tensões principais podem ser determinadas.

No entanto, a aplicação do método apresenta algumas limitações. O alívio de tensões associado à perfuração pode induzir microfissuras no testemunho, que, por sua vez, podem provocar deformações elásticas não lineares e/ou dependentes do tempo. Como o DCDA não considera esse tipo de deformação inelástica, o método não deve ser utilizado quando a deformação do testemunho for significativamente influenciada pelas microfissuras (Funato & Ito, 2017).

A deformação do testemunho é consistente com a teoria do DCDA em rochas puramente elásticas e homogêneas. No entanto, os testemunhos de rocha são formados por diferentes minerais, que influenciam significativamente o comportamento de deformação e fratura. Dessa forma, a influência dos componentes minerais na deformação diametral e na fratura durante a perfuração requer investigação adicional. A presença desses minerais limita a aplicação do DCDA para a medição de tensões, já que tensões residuais podem surgir devido ao alívio de tensões em materiais heterogêneos (Gao, Li e Chang, 2022).

Funato & Ito (2017) destacam que o DCDA não permite estimar diretamente a magnitude dos componentes de tensão *in situ*. No entanto, eles sugerem que, ao combinar os resultados do DCDA com outros métodos de estimativa de tensões *in situ*, como o fraturamento hidráulico e a sobrefuração, é possível determinar essas magnitudes. Por exemplo, conhecendo-se a magnitude da tensão principal mínima (σ_h) por meio do fraturamento hidráulico, a magnitude da tensão principal máxima (σ_H) pode ser obtida somando-se a tensão diferencial ($\Delta S = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$), obtida pelo método DCDA.

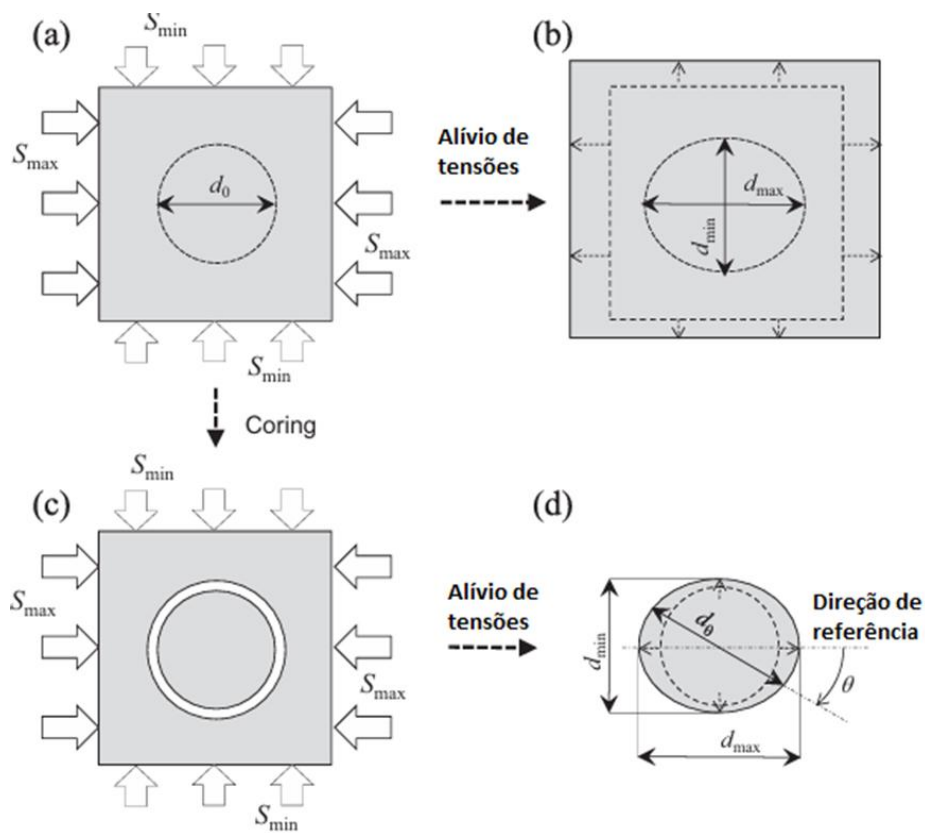


Figura 2.32 - Diagrama esquemático mostrando como a expansão do testemunho é causada pelo alívio de tensões durante a perfuração (traduzido - Funato & Ito, 2017).

Li & Mitri (2022) investigaram a determinação de tensões induzidas pela mineração utilizando deformações diametrais em testemunhos de rocha extraídos de profundidades entre 1,3 e 1,8 km em minas subterrâneas, medindo e analisando essas deformações em laboratório. Dois estudos de caso demonstraram a viabilidade do método para estimar tensões diferenciais: o primeiro indicou que testemunhos maiores, com deformações diametrais mais significativas,

proporcionam medições mais precisas, enquanto o segundo revelou uma tendência de aumento da tensão diferencial com a profundidade, possivelmente influenciada por atividades de mineração próximas. Além disso, a análise de deformação diametral mostrou-se útil para avaliar o potencial de estouro de rochas frágeis, considerando a tensão máxima de cisalhamento e a razão de cisalhamento frágil.

O método deve ser aplicado com alta precisão nas medições e um desenho experimental adequado, uma vez que alterações de apenas 1 μm no diâmetro da rocha podem impactar de 1% a 3% nos resultados das tensões. Além disso, o método considera a rocha como um material linear, elástico e isotrópico, condição que nem sempre é observada na prática. Outro aspecto importante é que a orientação do testemunho precisa ser conhecida para que seja possível determinar a direção das tensões principais (Li & Mitri, 2022).

Dargahizarandi *et al.* (2025) propuseram um método integrado que combina a análise de deformação diametral de testemunhos (DCDA) com mapeamento ultrassônico para estimar o estado de tensão 3D em rochas, incluindo azimute e ângulo de inclinação dos componentes de tensão. A metodologia foi validada em oito testemunhos de dois furos verticais em uma mina subterrânea na Austrália, apresentando resultados confiáveis em comparação com medições de sobrefuração.

Penido (2021) realizou um estudo de caso com a aplicação de ensaios para a determinação das tensões *in situ*, incluindo magnitudes e orientações, por meio dos métodos de Análise da Deformação Diametral de Testemunhos (DCDA), Fraturamento Hidráulico (FH) e Análise da Taxa de Deformação (DRA), em um maciço rochoso itabirítico do Quadrilátero Ferrífero Brasileiro, a profundidades de até 400 m. O maciço estudado apresenta elevada complexidade estrutural, com a presença de bandamento e foliação, o que dificultou a execução e a interpretação dos ensaios. Os resultados obtidos pelo método DRA diferiram significativamente daqueles provenientes dos métodos de FH e DCDA, indicando tensões horizontais superiores à tensão vertical, contribuindo para o entendimento do estado de tensões e das deformações induzidas pela atividade de mineração em taludes do Quadrilátero Ferrífero Brasileiro e de seus impactos nas estruturas circundantes.

2.5.8. MÉTODOS GEOFÍSICOS

Segundo Ljunggren (2003), diversos métodos geofísicos têm sido descritos na literatura para a estimativa de tensões *in situ*, incluindo:

- Métodos sísmicos e micro-sísmicos;
- Métodos sônicos e ultrassônicos;
- Método de radioisótopos;
- Método magnético atômico;
- Métodos eletromagnéticos;
- Métodos acústicos, como o efeito Kaiser (1950—atualmente).

Segundo os autores, as técnicas citadas têm aplicação limitada, embora o método baseado no efeito Kaiser se destaque como uma alternativa promissora para a determinação de tensões *in situ* em rochas.

Lin *et al.* (2019) relatam que o registro acústico em poço e o levantamento sísmico de superfície são métodos utilizados na indústria do petróleo para estimar as tensões *in situ*, baseados na propagação de ondas em meios elásticos (Fjar *et al.*, 2008). O registro acústico fornece o tempo de trânsito intervalar (Δt), que mede a capacidade da formação de transmitir ondas elásticas, enquanto o levantamento sísmico é empregado no mapeamento de grandes estruturas subterrâneas por meio da geração e captação de ondas elásticas na superfície.

Os autores sintetizam os métodos geofísicos para a estimativa das tensões *in situ*, destacando que esses métodos correlacionam parâmetros mecânicos das formações rochosas com o estado de tensões e são amplamente empregados na indústria petrolífera. Tais abordagens consideram a tensão vertical como uma tensão principal, a partir da qual são determinadas as magnitudes e orientações das tensões horizontais máxima e mínima. Entre as principais vantagens, destaca-se o aproveitamento de dados já disponíveis de perfilagem de poço. Entretanto, a precisão desses métodos é influenciada por diversos fatores, a análise é complexa e a determinação prática da magnitude das tensões apresenta limitações significativas.

A sismicidade induzida pela mineração corresponde à ocorrência de eventos sísmicos gerados por movimentos ou falhas na rocha devido às alterações no estado de tensões próximas às escavações, alterações provocadas pela própria atividade de lavra. As escavações podem assumir diferentes geometrias, que determinam o tipo de falha resultante. Em minas a céu aberto, são comuns rupturas de talude, em que o material falhado se desloca sob seu próprio

peso. Nas operações subterrâneas, a lavra ocorre em depósitos tabulares, filões ou veios (corpos minerais extensos em um plano e muito delgados na direção perpendicular), enquanto depósitos do tipo lode apresentam geometria mais equidimensional (Cook, 1976).

De modo geral, as falhas de rocha induzidas pela mineração classificam-se em quedas de rochas, *rockbursts*, *bumps* e *outbursts*. Quedas de rochas correspondem a deslocamentos não violentos de blocos instáveis sob a ação da gravidade. *Rockbursts* são falhas súbitas e violentas associadas a altas tensões, causando danos às escavações e ocorrendo sobretudo em minas profundas de rochas rígidas e frágeis. *Outbursts*, comuns em minas de carvão ou sal, envolvem a ejeção rápida de material devido à liberação abrupta de gás aprisionado. Tanto *rockbursts* quanto *outbursts* podem mobilizar volumes que variam de pequenas frações até milhares de metros cúbicos. Já o termo *bump* descreve uma falha violenta ou movimento brusco da rocha que não necessariamente produz danos significativos na escavação (Cook, 1976).

Na mineração, é reconhecido há muito tempo que a rocha “fala” ou “estala” em resposta às mudanças de tensão induzidas pela mineração, utilizando esses sinais qualitativamente para avaliar a segurança das áreas de trabalho. Quando a rocha é submetida a tensões próximas de sua resistência, pequenas instabilidades mecânicas surgem em seu interior, emitindo radiação microssísmica (Obert & Duvall, 1957; Hardy, 1971; citados por Cook, 1976). A taxa de atividade microssísmica varia amplamente, refletindo mudanças contínuas nas tensões devido à deformação e falha da rocha (Cook, 1976).

O monitoramento sísmico em mineração é uma ferramenta singular que opera de forma contínua e avalia um volume tridimensional capaz de registrar movimentos do solo em amplas faixas de velocidade e magnitude — desde frações de $\mu\text{m/s}$ até dezenas de mm/s — permitindo identificar deformações inelásticas súbitas decorrentes de mudanças de tensão no maciço rochoso causadas pela lavra. Apesar de seu grande potencial, trata-se apenas de um dos vários instrumentos disponíveis aos profissionais de mecânica das rochas (Rebuli, 2024).

Ao planejar ou implantar um sistema de monitoramento sísmico, a primeira questão essencial é definir claramente o objetivo do sistema. Segundo Mendecki *et al.* (1999), esse tipo de monitoramento permite quantificar a exposição à sismicidade e pode atender a finalidades como identificar potenciais *rockbursts*, apoiar ações de prevenção e controle, emitir alertas e realizar retroanálises. Essa definição inicial orienta decisões cruciais, incluindo a seleção dos sensores,

o número e a densidade da malha sísmica e os tipos de alertas a serem implementados (Rebuli, 2024).

Martin *et al.* (1990), com o objetivo de caracterizar o estado de tensões *in situ* ao redor do poço de acesso do *Underground Research Laboratory* (URL), no Canadá, realizaram a estimativa das tensões por meio de diversos métodos, buscando responder a questionamentos recorrentes sobre essas técnicas. Como parte desse esforço, em dezembro de 1988, foi instalado, a partir do nível de 300 m, um sistema de monitoramento microssísmico para acompanhar a escavação do poço. Com o avanço das técnicas de análise de eventos microssísmicos (Talebi & Young, 1989), esse sistema forneceu informações valiosas sobre a orientação das tensões. Os resultados confirmaram outras medições da direção da tensão principal máxima e mostraram que, durante e logo após a escavação, a maioria dos eventos microssísmicos se concentrou em uma zona equivalente a aproximadamente um diâmetro do poço ao redor deste, formando agrupamentos em ambos os lados na direção da tensão horizontal mínima.

Liu *et al.* (2024) afirmam que a técnica de monitoramento microssísmico desempenha um papel central na avaliação das instabilidades de carvão/rocha e na gestão da segurança em minas de carvão, sendo amplamente utilizada em diversas operações chinesas. Segundo os autores, esse método é essencial porque permite compreender o processo de fraturamento do carvão e da rocha, o qual é decisivo para a previsão e o controle de desastres associados à mineração profunda — como *rockbursts*, entrada de água, explosões de carvão e gás e quedas de teto — que representam sérias ameaças à segurança dos trabalhadores, dos equipamentos e das estruturas subterrâneas.

A técnica constitui um dos métodos mais eficientes para analisar, acompanhar e emitir alertas sobre desastres associados à mineração profunda. Apesar de seu uso crescente, ainda apresenta limitações importantes, incluindo a baixa precisão na localização das fontes microssísmicas e dificuldades na avaliação precisa das instabilidades do carvão e da rocha.

Liu *et al.* (2024) apresentaram uma revisão sobre os avanços e aplicações do monitoramento microssísmico em minas de carvão, destacando suas perspectivas futuras. Concluíram que essa técnica é capaz de detectar fraturas em diferentes escalas, superando as limitações dos métodos tradicionais de monitoramento de tensões e deformações. Além disso, alguns parâmetros das microssismicidades, como parâmetros de fonte e estatísticas, são eficazes para avaliar o regime de tensões e o dano nas rochas ao redor, podendo ser combinados com outros métodos, como

varredura a laser e radiação eletromagnética, para mitigar e controlar desastres. Embora a técnica tenha alcançado avanços significativos, os autores destacam que desafios como a precisão na localização das fontes microssísmicas, o processamento eficiente dos dados, a avaliação abrangente das instabilidades e o desenvolvimento de novos equipamentos ainda precisam ser resolvidos para melhorar o monitoramento e o controle de desastres em minas profundas.

Sun & Peng (1989) analisam, sob os pontos de vista teórico e experimental, a aplicabilidade do método de atenuação de ondas ultrassônicas para a determinação de tensões *in situ*. No âmbito dos métodos ultrassônicos, destacam-se duas abordagens principais para essa finalidade: a baseada na velocidade de propagação das ondas e a baseada na atenuação. Estudos anteriores (Pros *et al.*, 1962; Toksöz *et al.*, 1979; Winkler & Nur, 1982) demonstraram que, para um mesmo tipo de rocha e sob condições de tensão semelhantes, as variações relativas na atenuação são mais pronunciadas do que aquelas observadas na velocidade das ondas, indicando que a atenuação ultrassônica constitui um parâmetro mais adequado para a estimativa de tensões *in situ*.

Os autores investigam, em laboratório, a viabilidade e o potencial do método ultrassônico não destrutivo baseado na atenuação de ondas para a medição de tensões *in situ*. As análises teóricas indicam que, para um mesmo tipo de rocha, a relação entre a tensão aplicada e a razão do coeficiente de atenuação pode ser bem representada por polinômios de segundo grau, permitindo a estimativa da magnitude e da direção das tensões principais a partir de calibrações em corpos de prova. Experimentalmente, o método é avaliado por meio de medições do coeficiente de atenuação em corpos de prova e em furos perfurados em blocos de arenito e calcário submetidos à compressão uniaxial, utilizando exclusivamente ondas compressivas.

Tian e Wang (2006) apresentam um método ultrassônico para a determinação de tensões *in situ* em rochas, baseado na teoria da acustoelasticidade, que estabelece a relação teórica entre a velocidade das ondas ultrassônicas e o estado de tensões *in situ* da rocha. O método consiste na medição das variações de velocidade das ondas ao longo da superfície de um furo de sondagem antes e após a sobrefuração, possibilitando a retroanálise das tensões *in situ*. Por meio de exemplos numéricos e simulações, os autores demonstram que a técnica é capaz de estimar de forma eficaz tanto a magnitude quanto a direção das tensões atuantes nas rochas.

Para avaliar o uso da tomografia sísmica na identificação de pressões induzidas em pilares subterrâneos, Scott (2004) utiliza como estudo de caso a Mina Edgar, no Colorado. O trabalho integra tomografia sísmica, análises numéricas por diferenças finitas, medições laboratoriais das velocidades de ondas compressivas (ultrassônicas) em testemunhos de rocha e informações geológicas, analisando a aplicação de métodos geofísicos para a detecção de tensões em minas subterrâneas, com foco na mitigação de riscos associados a rochas altamente tensionadas em câmaras de lavra. Adicionalmente, são investigadas emissões eletromagnéticas na Mina Galena, em Idaho, como possíveis indicadores de instabilidade iminente. Os resultados indicaram que a tomografia sísmica é eficaz na estimativa de tensões relativas em pilares subterrâneos, enquanto as emissões eletromagnéticas não se mostram precursores confiáveis de falhas catastróficas do maciço rochoso.

Lavrov (2003) realiza uma revisão das características experimentais do efeito Kaiser, incluindo aquelas observadas sob condições de tensão triaxial. O autor discute os mecanismos e os modelos teóricos que explicam o fenômeno e apresenta técnicas de estimativa de tensões baseadas no efeito Kaiser, aplicáveis tanto a testemunhos de rocha quanto às rochas circundantes a um furo de sondagem, com análise de suas vantagens e limitações.

Devido à complexidade e ao tempo exigido pelos métodos tradicionais de estimativa de tensões em rochas, desenvolveu-se um método baseado na “memória de tensões”, que reside na capacidade da rocha de acumular, reter e, sob certas condições, reproduzir informações sobre tensões previamente experimentadas. Entre as manifestações mais conhecidas e de interesse prático dessa memória estão o efeito Kaiser e o encruamento por deformação. O efeito Kaiser, descoberto por Joseph Kaiser na década de 1950 em experimentos com metais, madeira e arenito, ocorre em materiais submetidos a carregamento e descarregamento cíclico. No caso mais simples de compressão uniaxial cíclica, a emissão acústica (EA) permanece próxima ao nível de fundo enquanto a tensão não ultrapassa o maior valor previamente atingido, aumentando abruptamente quando esse limite é alcançado (Lavrov, 2003).

De acordo com Lehtonen *et al.* (2012), o princípio básico do efeito Kaiser é que um material emite emissão acústica (EA) durante o carregamento, mas, quando recarregado, a emissão só se inicia quando a tensão aplicada supera a tensão previamente aplicada. O ponto na curva tensão-deformação em que a emissão se inicia ou se intensifica é denominado ponto do efeito Kaiser (Pollock, 1989). No contexto da estimativa de tensões, os autores destacam que, ao

carregar um testemunho de rocha em laboratório, a emissão acústica começará quando a tensão aplicada exceder a máxima tensão previamente experimentada pela rocha *in situ*, podendo essa tensão ou não representar o estado atual. Além disso, ressaltam que a tensão é um tensor de segunda ordem com seis componentes independentes, sendo necessário testar seis testemunhos em diferentes orientações para se obter o tensor de tensões completo.

A Figura 2.33 apresenta uma amostra homogênea de granito instrumentada com extensômetros para a realização de ensaios do Efeito Kaiser, destacando-se as guias de onda de alumínio posicionadas entre os transdutores e o corpo de prova.

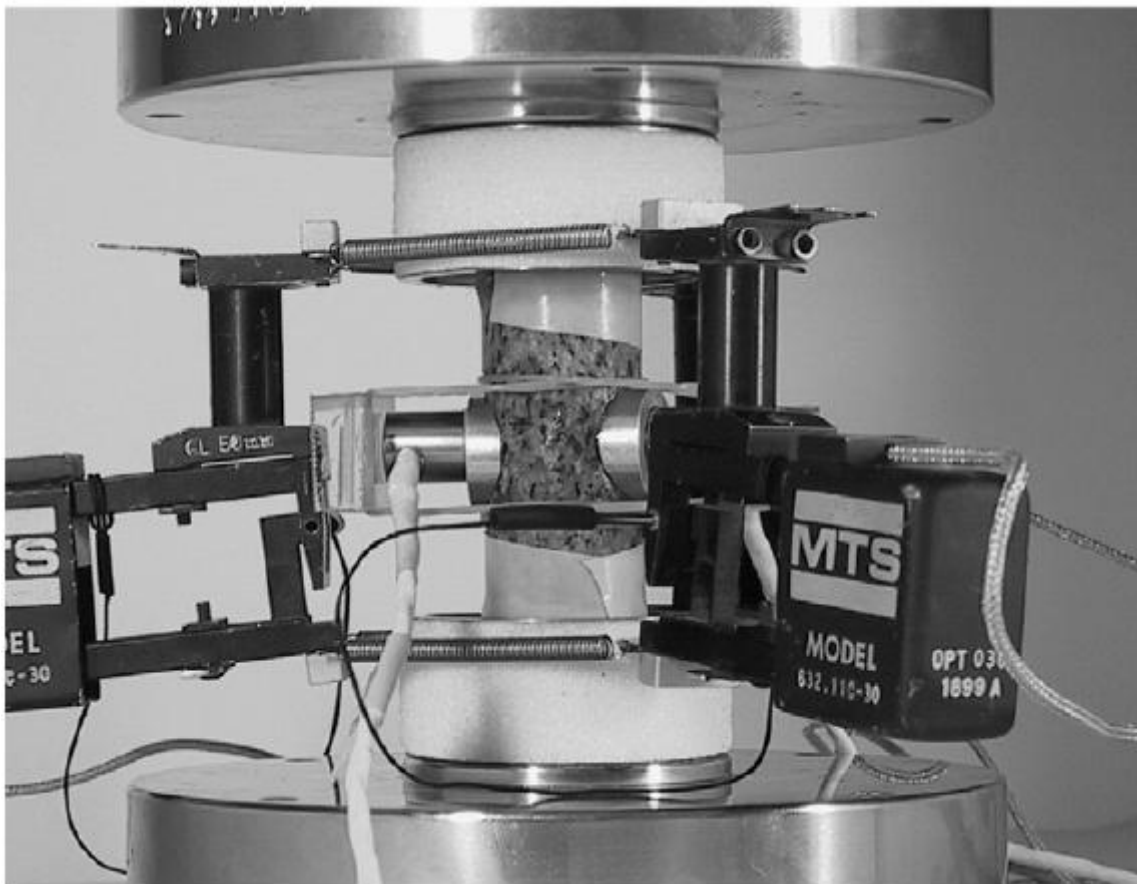


Figura 2.33 - Amostra de granito instrumentada com extensômetros para ensaios do Efeito Kaiser (Lehtonen *et al.*, 2012).

No entanto, os autores destacam que a aplicação do efeito Kaiser apresenta várias complicações: o tensor de tensões é formado por seis componentes independentes, a rocha *in situ* pode ter sido submetida a diferentes regimes naturais de tensão; o testemunho foi exposto a condições distintas durante a extração e pode não ser fácil determinar exatamente quando a EA começa

ou se intensifica. Além disso, testar rochas deformadas triaxialmente sob compressão uniaxial em laboratório e garantir a coaxialidade entre o eixo de carregamento original e a orientação dos subtestemunhos são desafios importantes.

Kent *et al.* (2002) compararam medições de tensões *in situ* por sobrefuração com resultados de testes laboratoriais de Emissão Acústica (EA) em subtestemunhos orientados em diferentes minas de carvão e ouro na Europa e África do Sul. Os resultados indicaram que o Efeito Kaiser pode ser determinado de forma relativamente clara ao longo da deformação frágil, embora a interpretação exija cuidado na fase de acomodação e durante o crescimento instável de trincas antes da ruptura. No estudo, o método de emissão acústica mostrou-se um método complementar útil para comparação com métodos existentes de determinação de tensões, no entanto, o sucesso do método pode depender tanto do tipo de rocha quanto da magnitude provável da tensão *in situ* em comparação com a resistência da rocha. Os autores ressaltam que em locais onde apresentou boa correlação com a sobrefuração, o método EA pode ser usado como uma alternativa mais econômica para estimar tensões em novas seções de minas.

Tuncay & Obara (2012) compararam os valores de tensão obtidos pelas técnicas de Emissão Acústica (AE) e Perfuração Concêntrica de Furo com Extremidade Cônica Compacta (*Compact Conical-Ended Borehole Overcoring*, CCBO) em uma mina subterrânea de calcário no Japão, explorada pelo método *room and pillar*, e investigaram o efeito da anisotropia da rocha e da pressão confinante sobre o nível do efeito Kaiser. Testes de CCBO foram realizados em furos horizontais em pilares e na parede suspensa da mina a cerca de 150 m de profundidade e testes de AE foram realizados em núcleos extraídos destes. Os resultados mostraram que as tensões obtidas pela técnica de AE durante o recarregamento uniaxial dos núcleos foram duas a três vezes maiores do que as tensões *in situ* determinadas pela técnica CCBO. Na segunda etapa, a anisotropia de um bloco de granito foi avaliada por medições de ondas P, com núcleos extraídos em duas direções diferentes, pré-carregados triaxialmente e depois recarregados uniaxialmente para determinar os níveis do efeito Kaiser, concluindo-se que tanto a anisotropia quanto a pressão confinante influenciam significativamente esses níveis. Diante disso, os autores ressaltam que parece irrealista determinar tensões *in situ* aplicando a técnica de emissão acústica com um simples recarregamento uniaxial das amostras de rocha orientadas.

2.5.9. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Aplicados a testemunhos de sondagem, os métodos de recuperação de deformação baseiam-se no princípio de que, ao serem removidos do estado de tensões *in situ*, os testemunhos sofrem alívio das tensões e passam a se expandir diferencialmente — mais intensamente na direção da tensão principal máxima e menos na direção da tensão principal mínima. Esse processo de alívio provoca uma relaxação do material, composta por dois componentes: um elástico e um anelástico (Ljunggren *et al.*, 2003).

Os métodos de recuperação de deformação se mostram adequados a estimativa de tensões *in situ* em poços profundos ou muito profundos onde outras técnicas não funcionam e onde pequenas amostras de testemunhos estão disponíveis (Amadei & Stenphansson, 1997). No entanto, os resultados obtidos podem ser afetados pela precisão dos dados e pelas suposições adotadas durante a análise (Sazid *et al.*, 2023).

Dois métodos fundamentam-se na observação do comportamento dos testemunhos: o método de recuperação de deformação anelástica (*Anelastic Strain Recovery*, ASR) e a análise diferencial da curva de deformação (*Differential Strain Curve Analysis*, DSCA).

2.5.9.1. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO ANELÁSTICA:

O método foi inicialmente proposto por Voight (1968), posteriormente analisado e aprimorado por Teufel (1983) em uma abordagem bidimensional, e mais tarde ampliado para medições tridimensionais de tensões *in situ* por Matsuki (1991) (Wang *et al.*, 2012).

O relaxamento provocado no testemunho de sondagem provoca expansão deste. Medições de campo mostram que a abertura e a propagação de microfissuras provocadas por esse relaxamento, geralmente acompanham a recuperação de deformação anelástica e ao medir a recuperação dessas deformações, consegue-se determinar a orientação das tensões principais. (Ljunggren *et al.*, 2003).

A determinação da magnitude das tensões principais é mais complexa pois exige o uso de um modelo constitutivo viscoelástico para descrever a relaxação de deformações da rocha. (Ljunggren *et al.*, 2003; Amadei & Stenphansson, 1997).

Segundo Teufel (1993), alguns fatores podem limitar significativamente a aplicação do método, entre eles: variações de temperatura que geram deformações térmicas; desidratação das amostras; difusão da pressão de fluido nos poros; deformações de recuperação não homogêneas; anisotropia da rocha; interação entre a lama de perfuração e o material rochoso; presença de deformações residuais; o tempo decorrido para a recuperação do testemunho; e a precisão da orientação do testemunho. De acordo com Wang *et al.* (2012), para garantir precisão nas medições e a eficácia do método, é necessário iniciar as medições o mais cedo possível para capturar mais informações, utilizando instrumentos de alta precisão e boa estabilidade.

Ao ser removido do barrilete, o testemunho é cuidadosamente inspecionado para a seleção de amostras livres de heterogeneidades e fraturas naturais. Em seguida, as amostras são cortadas e seladas para evitar variações de umidade. A medição dos deslocamentos associados à recuperação anelástica pode ser realizada utilizando extensômetros com mola, transdutores de deslocamento ou rosetas de deformação. Quando o testemunho é orientado, apenas três medições independentes são necessárias; caso contrário, o método requer a instalação de pelo menos seis extensômetros (Amadei & Stenphansson, 1997). A Figura 2.34 ilustra o equipamento utilizado.

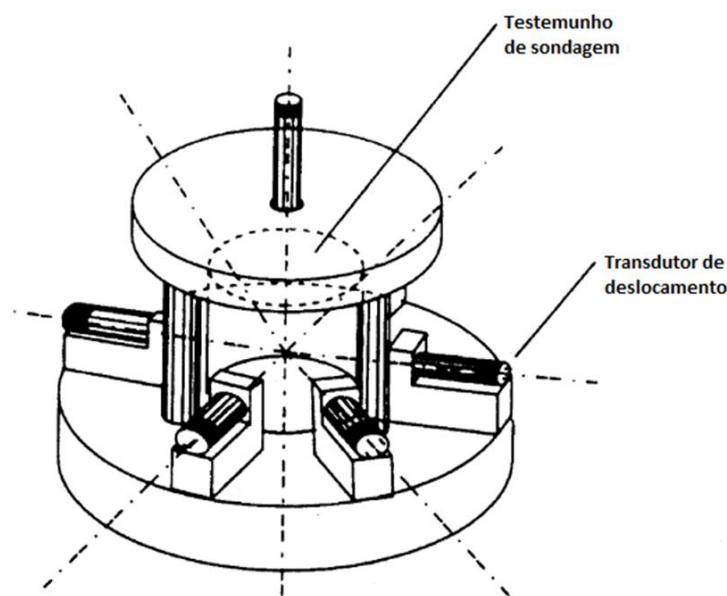


Figura 2.34 - Instrumento para medições ASR em um testemunho de sondagem (três pares de transdutores indutivos de deslocamento radial e um transdutor axial são utilizados para medir a resposta anelástica de uma amostra de testemunho) - (traduzido - Ljunggren *et al.*, 2003).

Wang *et al.* (2012) descrevem detalhadamente o princípio e os procedimentos de cálculo do método ASR, apresentando também resultados típicos obtidos em um furo científico da Zona de Falha do Terremoto de Wenchuan. Esse estudo representa a primeira aplicação do método para a determinação de tensões tridimensionais profundas na China continental. A Figura 2.35 ilustra a configuração dos extensômetros instalados na superfície do testemunho após sua remoção do poço e posterior limpeza. Os autores demonstraram que o método ASR é eficaz na estimativa das magnitudes e orientações das tensões principais, especialmente em poços de grande profundidade e em condições geológicas complexas, onde outras técnicas, como fraturamento hidráulico ou sobrefuração, são difíceis ou impossíveis de realizar.

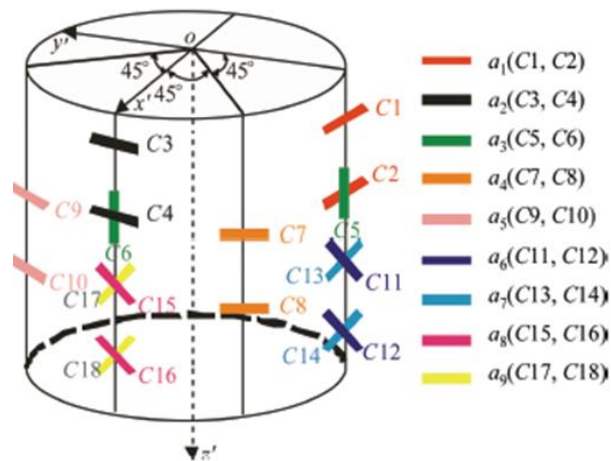


Figura 2.35 - Disposição dos extensômetros na superfície do testemunho de rocha (Wang *et al.*, 2012).

Zhang, Ji e Xu (2022) realizaram um estudo em grandes profundidades (acima de 2000 m) na Mina de Ouro Sanshandao, com o objetivo de investigar problemas de engenharia associados a poços, galerias, grandes deformações do maciço e eventos de *rockburst*. Para isso, determinaram o campo de tensões em regiões submetidas a altos níveis de compressão, em rochas de elevada dureza e alto conteúdo energético, empregando o método ASR. A pesquisa analisou amostras coletadas em profundidades entre 1180 m e 1960 m e, como resultado, os autores estimaram a magnitude das tensões *in situ* em grandes profundidades, fornecendo dados relevantes para a avaliação da estabilidade das escavações e para o dimensionamento de poços, galerias e seus sistemas de suporte. Ao comparar os resultados obtidos pelo método ASR com

aqueles provenientes do fraturamento hidráulico, verificou-se que ambos são consistentes, reforçando a confiabilidade do método. Os autores destacam ainda que os erros dos dados podem ser reduzidos e a precisão aprimorada mediante o controle adequado da influência do tempo no processo de recuperação anelástica.

O método ASR apresenta operação simples, não interfere no andamento da obra e mostra-se mais adequado para a medição de tensões *in situ* em formações rochosas profundas e de boa integridade. Nessas condições, observa-se um aumento das tensões *in situ*, acompanhado de maior recuperação da deformação anelástica e de uma redução nos erros associados à sua medição (Zhang, Ji e Xu, 2022).

Sun *et al.* (2020) avaliaram a eficácia do método ASR e sua aplicação em minas subterrâneas. O estudo foi realizado em um poço com profundidade de 2.043,91 m e diâmetro de 98 mm, comparando os resultados obtidos pelo ASR com os do método de fraturamento hidráulico. A confiabilidade do ASR foi avaliada por meio de testes de repetibilidade. Os autores destacaram diversas vantagens do método: os extensômetros aderem melhor à superfície das amostras, evitando superfícies com fraturas pré-existentes; a temperatura das amostras é mantida constante durante a medição; múltiplas amostras podem ser avaliadas simultaneamente, permitindo análises comparativas; os testes são realizados rapidamente após a retirada do núcleo, mantendo os núcleos próximos ao estado original e garantindo informações confiáveis sobre as tensões; a confiabilidade do método é confirmada pela comparação com resultados obtidos pelo fraturamento hidráulico; a repetibilidade mostrou baixo coeficiente médio de diferença entre as medições, comprovando a eficácia do método; e, por fim, o método não é limitado pela profundidade do poço ou pelas condições do ambiente subterrâneo. O método deve ser evitado em rochas com alto teor de minerais argilosos, como xistos, pois a perda de água dos minerais pode causar deformações de retração, que ocorrem na direção oposta às deformações de expansão gerada pelo alívio de tensões.

2.5.9.2. ANÁLISE DIFERENCIAL DA CURVA DE DEFORMAÇÃO:

O método baseia-se em submeter um testemunho de sondagem a um carregamento hidrostático, registrando por meio de extensômetros as deformações associadas ao fechamento das microfissuras geradas durante a remoção do material do seu estado original *in situ*. Para a interpretação dos resultados, admitem-se duas suposições fundamentais, as direções das

deformações resultantes do fechamento das microfissuras coincidem com as direções das tensões *principais in situ* e as razões entre as magnitudes das três tensões principais devem estar relacionadas às razões entre as três deformações principais observadas durante o fechamento das fissuras (Ljunggren *et al.*, 2003).

Segundo Amadei & Stephansson (1997), o método segue as seguintes etapas: (i) preparação de um corpo de prova cúbico obtido a partir da região central do testemunho orientado; (ii) limpeza e secagem do corpo de prova por 24 horas, seguida da instalação dos extensômetros; (iii) aplicação de um carregamento hidrostático constante, podendo alcançar até 200 MPa, evitando os efeitos de fluência e variações de temperatura; (iv) registro contínuo dos sinais dos extensômetros e da pressão aplicada; e (v) análise dos dados obtidos.

Uma curva pressão–deformação obtida sob carregamento hidrostático pode fornecer subsídios importantes para estimar o estado de tensões *in situ*. A DSCA baseia-se em três pressupostos principais: o testemunho de rocha se expande devido ao alívio de tensões durante a perfuração, o que resulta no desenvolvimento de microfissuras orientadas perpendicularmente à direção da tensão principal; o volume dessas microfissuras geradas no processo de perfuração é proporcional à magnitude da tensão principal; e as microfissuras formadas previamente à perfuração podem ser desconsideradas (Sanada *et al.*, 2013). Em consonância com esse último ponto, Oikawa *et al.* (1993) destacam que as microfissuras produzidas pelo alívio de tensões são as que dominam o comportamento deformacional da amostra, enquanto a influência de outros tipos de descontinuidades, como fissuras naturais preexistentes ou fissuras induzidas por efeitos térmicos, são pequenas e podem ser negligenciada, uma vez que rochas geralmente contêm esse tipo de descontinuidade.

Entretanto, no estudo de Kang *et al.* (2000), ao estimar as tensões *in situ* em uma mina de calcário no Japão utilizando o método DSCA, observou-se que a orientação das tensões diferia daquela obtida pelo método sobrefuração. Os autores concluíram que a orientação determinada pelo DSCA reflete principalmente a direção de fissuras pré-existentes no calcário, correspondendo, assim, às direções de paleotensões e não tensões *in situ* em profundidades rasas. O método pode ser aplicado para estimar tensões em grandes profundidades, desde que seja possível recuperar o testemunho. Entretanto, apresenta limitações inerentes ao próprio processo, pois envolve medições em microescala, volumes muito pequenos e se caracteriza como um método bidimensional (Ljunggren *et al.*, 2003).

2.5.10. MÉTODOS DE RETROANÁLISE - ALÍVIO EM GRANDES VOLUMES DE ROCHA (*RELIEF OF LARGE ROCK VOLUMES*)

Durante a escavação de aberturas subterrâneas, ocorrerão deformações e deslocamentos da massa rochosa. Esses deslocamentos podem ser medidos por meio de seções transversais instrumentadas nas aberturas. Os deslocamentos medidos estão relacionados às tensões *in situ* por métodos numéricos (retroanálises) (Ljunggren *et al.*, 2003).

Sakurai e Shimizu (1986) propuseram um método de retroanálise, baseado em elementos de contorno tridimensionais, para determinar a tensão inicial e as constantes elásticas do terreno a partir dos deslocamentos medidos em aberturas subterrâneas, demonstrando sua aplicabilidade por meio de um estudo de caso. Os autores destacam que os métodos de fraturamento hidráulico e de sobrefuração têm validade limitada à vizinhança dos pontos de ensaio e não podem ser usados diretamente no projeto de aberturas subterrâneas. Assim, o valor médio da tensão inicial em todo o terreno em relação ao tamanho da abertura circundante é fundamental, podendo ser estimado de forma mais confiável por meio de retroanálise das medições de deslocamento, convergência e extensômetros multipontos em sondagens, que oferecem instrumentação simples e dados confiáveis.

A principal desvantagem dos métodos de alívio em superfície e em sondagem quando comparados a análises de grandes volumes de rocha é que eles envolvem pequenos volumes de rocha. Assim, as tensões medidas podem ser sensíveis a mudanças na composição mineral da rocha e ao tamanho dos grãos da rocha (Amadei & Stenphansson, 1997).

O método pode ser utilizado para identificar a localização e a extensão de grandes volumes de rocha; entretanto, os resultados dependem da precisão dos dados e das suposições adotadas durante a análise (Sazid *et al.*, 2023).

Embora demande alto custo computacional e dependa significativamente da qualidade dos dados de entrada, o método de retroanálise ainda oferece uma estrutura robusta para lidar com condições geológicas reais e complexas (Wang *et al.*, 2025)

Ao comparar os métodos de retroanálise e sobrefuração, observa-se que a sobrefuração alivia completamente as tensões ao redor da célula de deformação, fazendo com que as deformações

medidas resultem diretamente das tensões *in situ*. Além disso, trata-se de um método caro e cujos resultados podem variar significativamente entre diferentes locais. Já a retroanálise utiliza a escavação de uma abertura próxima para aliviar apenas parcialmente essas tensões, de modo que as deformações medidas se relacionam indiretamente às tensões *in situ*, que são posteriormente determinadas por meio do processo de retroanálise. Ademais, é um método mais econômico quando realizado durante a própria escavação e permite estimar o estado de tensões em um volume relativamente grande de rocha (Lin *et al.*, 2019).

A retroanálise de uma escavação próxima com instrumentos de medição de deformação permite obter as deformações imediatamente após a escavação, sendo medições relativamente fáceis tanto na superfície da abertura quanto no interior do maciço. Para determinar os seis componentes do campo de tensões 3D, é necessário um par de escavações não perpendiculares. O método assume comportamento linearmente elástico, utilizando soluções analíticas para aberturas circulares ou técnicas numéricas como Elementos de Contorno (BEM) ou o Método dos Elementos Finitos (FEM) para geometrias irregulares. Entre suas vantagens, destacam-se: possibilidade de medir tensões 2D com potencial para estimar o campo 3D completo, avaliação de tensões médias em um grande volume de rocha, maior versatilidade por exigir apenas perfuração e medição de deformação e menor custo em comparação ao *overcoring* (Lin *et al.* 2019).

Cordova *et al.* (2022) realizaram uma retroanálise da diluição real em uma mina subterrânea de ouro em rocha dura, aplicando o método ELOS e avaliaram o desenvolvimento das galerias no contato com a parede suspensa por meio de modelagem numérica por elementos finitos (FEM), utilizando dados de 19 realces obtidos pelo *Cavity Monitoring System* (CMS). Diante da ausência de estudos prévios de tensões *in situ* na região, os autores adotaram um estado de tensões baseado em um ambiente geológico estável, considerando σ_1 horizontal e perpendicular e σ_2 horizontal e paralela ao corpo mineralizado, e σ_3 vertical, com a tensão vertical estimada pela equação de Brown & Hoek (1978). Os modelos elásticos 3D calibrados permitiram confirmar que o estado de tensões *in situ* considerado produziu modelos numéricos com boa correlação entre a diluição modelada (DD) e a diluição real, medida pelo fator ELOS.

Para caracterizar o campo de tensões local em um projeto hidrelétrico no norte de Portugal, Figueiredo *et al.* (2014) utilizaram uma campanha de estimativas de tensões *in situ* utilizando 19 testes hidráulicos, 12 testes de sobrefuração e 12 testes de macaco plano (*flat jack*), cujos

resultados foram integrados em um modelo de tensões que considera efeitos topográficos e tectônicos. Com base nesses dados, foram desenvolvidos modelos numéricos no *software* FLAC3D, permitindo aos autores determinar o campo de tensões em grande escala, analisar a distribuição das tensões principais no maciço e avaliar a influência de heterogeneidades locais.

Wang *et al.* (2025) propuseram um método para determinar o campo de tensões *in situ* em escala de mina durante a transição da lavra a céu aberto para subterrânea na mina de diamantes Jwaneng, em Botswana, um ambiente geológico complexo, no qual as estimativas de tensões *in situ* apresentam grande dispersão. O método baseia-se em retroanálise numérica integrando dados geológicos, medições de tensões *in situ* (por sobrefuração e análise de taxas de deformação, DRA) e o histórico de lavra. O estudo demonstrou que essa abordagem de retroanálise é eficaz para estimar o campo de tensões em escala de mina sob condições geológicas complexas, fornecendo um modelo de tensões confiável e essencial para o projeto da futura mina subterrânea.

Modelos numéricos obtidos por retroanálise podem não reproduzir fielmente o comportamento real do maciço rochoso; por isso, recomenda-se complementar sua utilização com observações diretas de rupturas e com instrumentação para monitoramento de deformações, possibilitando a comparação entre medições de campo e previsões numéricas. Para interpretar adequadamente o estado de tensões *in situ*, Wang *et al.* (2025) sugerem o seguinte procedimento:

- Etapa I: estimar o campo de tensões inicial com base no World Stress Map (WSM);
- Etapa II: ajustar esse campo conforme as condições geológicas regionais;
- Etapa III: selecionar o método apropriado de medição de tensões e obter os dados de campo;
- Etapa IV: realizar a retroanálise numérica considerando as principais estruturas geológicas e a infraestrutura da mina;
- Etapa V: interpretar e validar os resultados.

Novas iterações a partir da Etapa IV podem ser conduzidas sempre que surgirem novos dados geológicos ou de tensões. Além disso, os autores apresentam um fluxograma que sintetiza a abordagem integrada, combinando modelagem numérica, informações geológicas e geotécnicas, histórico de lavra e medições de tensões *in situ*, para realizar a retroanálise e obter um campo de tensões representativo em escala de mina. O fluxograma é disposto na Figura 2.36.

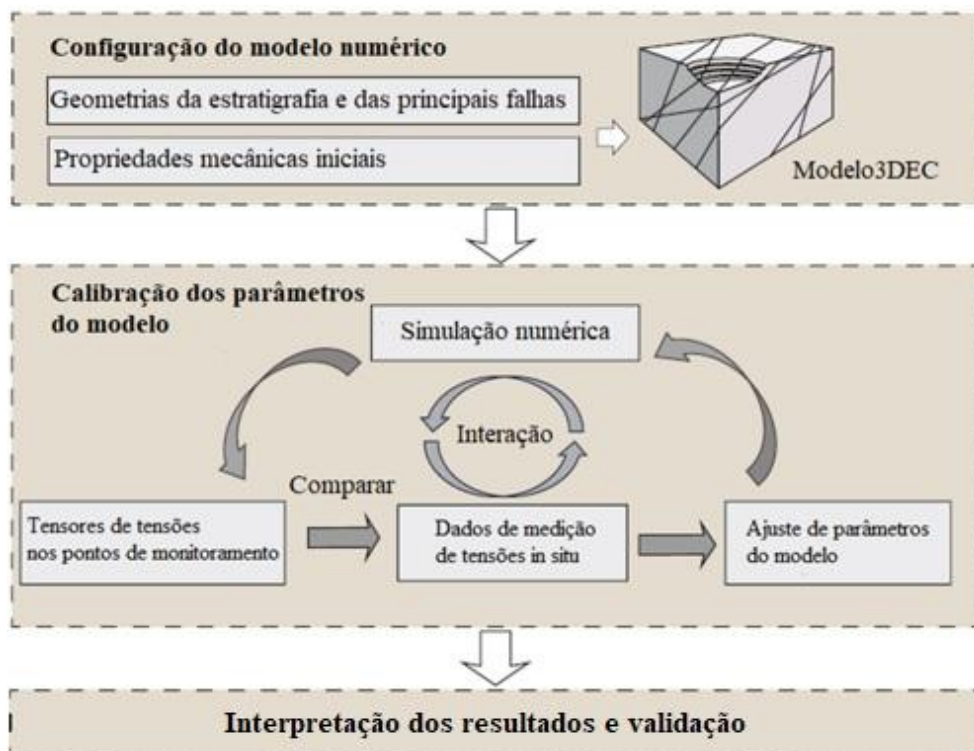


Figura 2.36 - Fluxograma da retroanálise para determinação do campo de tensões *in situ*.
(traduzido - Wang *et al.*, 2025).

2.5.11. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS

Os processos tectônicos que têm atuado na crosta terrestre ao longo do tempo provocaram dobras, falhas e fraturamentos periféricos nessas estruturas, gerando redistribuições localizadas do estado de tensões. Por exemplo, alterações nas magnitudes e orientações das tensões principais são comuns próximas a zonas de deformação frágil. Regiões antigas da crosta, como o Escudo Fennoscandiano, com cerca de 2 bilhões de anos, foram submetidas a múltiplas orogêneses, o que resultou em padrões complexos de distribuição de tensões devido à presença de diferentes estruturas geológicas. Assim, espera-se a ocorrência de distintas concentrações de tensão e variados tipos de redistribuição das tensões. É, portanto, importante, ao estimar o estado de tensão *in situ*, estar atento à forma como a tensão local pode variar nas proximidades dos diferentes tipos de estruturas geológicas (Christiansson, 2006).

Ljunggren (2003) ressalta que a maioria das estruturas geológicas se formou há muito tempo, e os mecanismos que controlavam o campo de tensões naquele período podem ter se alterado consideravelmente ao longo dos anos, sendo que as forças que impulsionam a tectônica de placas possivelmente apresentavam padrões distintos dos atuais, a erosão pode ter influenciado as formações geológicas, e diversas eras glaciais ocorreram em algumas regiões do planeta, por isso, o uso de informações sobre tensões a partir dessas estruturas deve ser usado com cautela.

Métodos baseados na análise de dados geológicos são adequados para as fases iniciais de projetos e podem ser aplicados tanto em estudos 2D quanto 3D. Sua principal vantagem é o baixo custo de execução, entretanto, apresentam como desvantagens a baixa confiabilidade e a falta de precisão com estimativas bastante grosseiras (Ljunggren, 2003).

2.5.11.1. ANÁLISE DE DADOS DE DESLIZAMENTOS DE FALHAS:

Amadei & Stenphansson (1997) abordam que a medição de *slickensides* (estrias de deslizamento) em grandes volumes de rocha podem ser utilizadas para estimar a direção e magnitude do campo de tensões *in situ* baseando-se em três permissas: (i) todas as *slickensides* nas falhas da população estão relacionadas a um tensor de tensões específico, porém desconhecido; (ii) o movimento em cada plano de falha é paralelo à tensão de cisalhamento atuante nesse plano; e (iii) os movimentos das falhas são independentes. Esses pressupostos são importantes, pois limitam em certa medida a aplicabilidade do método. O método tem como vantagem não necessitar do conhecimento prévio das propriedades de deformabilidade da rocha.

Falhas representam a origem de diversos desastres associados tanto ao maciço rochoso quanto aos fluidos na mineração subterrânea. A pré-avaliação de sua estabilidade antes do início da lavra é fundamental para estimar, de forma antecipada, o risco de potenciais desastres geológicos relacionados as falhas (Zhou *et al.*, 2022).

A análise de deslizamento de falhas é um método empregado para determinar a orientação das três tensões principais ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, considerando compressão como positiva) e a razão entre elas. Para isso, utiliza como dados de entrada a orientação de cada plano de falha, o ângulo de inclinação da lineação de *slickenside* em cada plano e o sentido do movimento ao longo da falha (Park *et al.*, 2006).

Zhou *et al.* (2022) apresentaram uma técnica para a avaliação da estabilidade de falhas na fase pré-mineração, considerando os efeitos da orientação das falhas, das tensões *in situ* e da pressão de fluido de poro. O método foi aplicado à mina de carvão Shilin, na China, onde os autores analisaram a estabilidade de quinze falhas localizadas nas profundidades de 369 e 514 m, as quais exercem forte influência sobre a extração das camadas carboníferas. Os resultados mostraram que, em diferentes profundidades de mineração, as variações nos regimes de tensões alteram significativamente a estabilidade das falhas, de modo que uma mesma falha pode apresentar distintos níveis de estabilidade conforme o regime de tensões *in situ*.

Eventos de deslizamento em falhas localizadas em maciços rochosos ao redor de escavações subterrâneas (deslocamentos irreversíveis e *rockbursts* do tipo deslizamento) podem ocorrer com facilidade após a ação de distúrbios externos. Para compreender tanto o mecanismo quanto as condições-limite que desencadeiam esses eventos, Deng *et al.* (2018) realizaram uma série de experimentos de deslizamento utilizando blocos de arenito vermelho, submetidos a diferentes forças horizontais de tração e a perturbações dinâmicas verticais. Os resultados mostraram que o estado inicial de tensões exerce forte influência sobre os deslocamentos horizontais residuais observados e sobre as condições-limite necessárias para que os eventos de deslizamento ocorram.

2.5.12. MECANISMOS FOCAIS DE TERREMOTOS

Desde que haja ocorrência de terremotos e uma rede de aquisição sísmica disponível, os dados registrados podem ser utilizados para estudar o estado de tensões *in situ* de um maciço rochoso. Segundo Amadei & Stephansson (1997), a análise do primeiro movimento das ondas sísmicas permite determinar o tipo de falhamento, bem como as magnitudes e as orientações das três tensões principais *in situ*. Trata-se do único método capaz de fornecer dados em profundidades médias ou maiores da crosta, entre aproximadamente 5 e 20 km, abrangendo volumes de rocha muito extensos.

Na maioria dos casos, os terremotos não apresentam ruptura superficial. Por isso, a sismicidade e os *aftershocks* de eventos fortes constituem as principais ferramentas para investigar o estado de tensões em grandes profundidades (Pasquale *et al.*, 2009). Quando aplicados em análises bidimensionais, esses métodos apresentam simultaneamente a vantagem e a limitação de fornecer informações restritas às maiores profundidades (Ljunggren, 2003).

Com base no estudo de Pasquale *et al.* (2009), o campo de tensões atuante na região de Irpinia, no sul da Itália, foi estimado por meio da análise da sismicidade local, especialmente utilizando terremotos de baixa magnitude. Para isso, os autores aplicaram o método de inversão de tensões proposto por Michael (1987a), capaz de inferir o tensor de tensões a partir de mecanismos focais selecionados. Os resultados obtidos mostram boa concordância com estimativas derivadas de terremotos moderados a fortes e de dados de *breakout*, evidenciando que eventos de baixa magnitude podem, de fato, fornecer informações confiáveis sobre o campo de tensões, sobretudo em áreas onde não há evidências superficiais de falhamento.

De acordo com Yan *et al.* (2024), o aumento da profundidade e da intensidade das atividades de extração em minas de carvão tem levado à ocorrência cada vez mais frequente de terremotos induzidos pela mineração, tornando o entendimento dos mecanismos responsáveis por esses eventos um desafio central para garantir uma produção mais eficiente e segura. Nesse contexto, a inversão de mecanismos focais tem sido utilizada para inferir o campo de tensões induzido pela mineração. Essa técnica, fundamentada em uma análise aprofundada do tensor de momento, permite determinar as orientações dos eixos principais de tensão no plano horizontal, incluindo as direções de tensão compressiva máxima, intermediária e mínima (direção de tensão máxima tensional). Entre essas direções, a tensão compressiva máxima é especialmente relevante, pois exerce papel crucial na definição de medidas de segurança e no planejamento das operações de mineração em minas de carvão.

Os métodos convencionais utilizados para determinar as orientações das tensões principais, embora comuns em minas de carvão, são caros e demorados. Em contraponto, a inversão de eventos microsísmicos para obter mecanismos focais e estimar o campo de tensões surge como uma alternativa mais econômica e ágil, oferecendo suporte teórico e prático consistente para aprimorar a segurança operacional em minas de carvão.

2.6. CONTROLE DE QUALIDADE EM ESTIMATIVAS DE TENSÕES EM ROCHAS

Christiansson e Hudson (2003), por meio dos *ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation — Part 4: Quality Control of Rock Stress Estimation*, publicado no *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, apresentaram diretrizes sobre as principais questões relacionadas à implementação de um sistema adequado de controle de qualidade para a estimativa de tensões em rochas. Segundo os autores, o cliente exige que as informações sobre

o estado de tensões na rocha sejam plenamente rastreáveis e apresentem um nível de precisão compatível com suas especificações, o que somente pode ser alcançado quando um sistema de controle de qualidade apropriado é estabelecido e operado de forma eficaz ao longo de toda a execução do trabalho, desde a concepção inicial até a apresentação final dos resultados.

De acordo com os autores, todo programa que envolva a obtenção de dados de campo em meios geológicos está sujeito a diferentes tipos de incertezas, incluindo heterogeneidade e anisotropia do maciço, variações dos parâmetros com a profundidade, efeitos de escala, além de fatores relacionados ao método adotado, aos equipamentos utilizados e à experiência na execução dos procedimentos. Os esforços direcionados à redução dessas incertezas dependem de aspectos como a natureza do parâmetro a ser medido, a etapa do projeto, o orçamento disponível e as condições do local. Ainda assim, é fundamental garantir que exista um plano de ação bem definido e que o trabalho realizado seja devidamente registrado, assegurando a rastreabilidade completa e permitindo a análise crítica dos resultados para comprovar sua confiabilidade.

Seguindo esse contexto, Christiansson & Hudson (2003) estabelecem cinco tópicos para serem levados em consideração ao estimar tensões em rochas. Os tópicos estão dispostos na Tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Critérios de qualidade a serem considerados ao estimar tensões em rochas
(traduzido - Christiansson & Hudson, 2003)

Tópico 01: Desenvolvimento do programa de estimativa de tensões	
Declaração do objetivo da medição	Qual é a finalidade das medições?
	Qual é a precisão esperada?
	Quais procedimentos confirmatórios devem ser adotados?
Declaração do contexto da medição de tensões:	Os problemas associados às medições <i>in situ</i> de tensões em rochas foram identificados?
	Foi elaborada uma lista desses problemas?
	As referências bibliográficas mais relevantes foram identificadas e estudadas?
	O projeto foi discutido com alguém que possua experiência prática em medições de tensões e com o método específico a ser utilizado?
Especificação do método de medição de tensões:	Qual método de medição de tensões será utilizado?
	Quais são os processos físicos envolvidos?

	<p>Que influência as condições do local podem exercer sobre os resultados do método a ser utilizado?</p> <p>Quais problemas já foram identificados anteriormente?</p>
Confirmação da adequação do método:	<p>Considerando as informações apresentadas até o momento, o método de medição de tensões é capaz de medir o estado de tensões requerido no maciço rochoso?</p>
Disponibilidade de um procedimento de Garantia da Qualidade (QA):	<p>Existe um procedimento de QA disponível para o método de medição de tensões?</p> <p>Em caso afirmativo, o procedimento de QA foi verificado — tanto nos aspectos teóricos quanto na experiência prática — para assegurar que seja adequado, considerando o objetivo e os problemas conhecidos das medições de tensões?</p> <p>O procedimento de QA existente é adequado?</p> <p>Caso não exista um procedimento de QA apropriado, é possível desenvolver um procedimento adequado?</p>
Protocolo de medição de tensões:	<p>Está sendo desenvolvido um protocolo para a aplicação do método de medição de tensões que incorpore os aspectos de Auditoria Técnica (TA) e Garantia da Qualidade (QA)?</p>
Tópico 02: procedimento de garantia da qualidade	
Adaptação ao sistema de qualidade da organização:	<p>Qual o nível de detalhamento requerido?</p> <p>Há compatibilidade ou integração com o sistema geral de Garantia da Qualidade da organização?</p>
Fabricação ou montagem dos equipamentos:	<p>As peças utilizadas são adequadas para a aplicação pretendida?</p> <p>As magnitudes de tensão, a pressão da água e a qualidade da água são devidamente consideradas?</p> <p>As peças empregadas apresentam qualidade suficiente para o propósito a que se destinam?</p> <p>Haverá disponibilidade de peças de reposição?</p> <p>As atividades críticas que podem influenciar a qualidade dos resultados dos ensaios são compreendidas, e existem procedimentos e controles de qualidade adequados estabelecidos?</p>
Rotinas de armazenamento e manutenção dos equipamentos de medição de tensões	<p>Existem procedimentos de manutenção definidos para os componentes críticos dos equipamentos?</p> <p>Os equipamentos são armazenados de forma segura quando não estão em uso?</p>
Controle de qualidade dos sistemas de aquisição de dados	<p>Existem rotinas de calibração estabelecidas?</p> <p>A vida útil dos componentes é conhecida e considerada?</p> <p>O <i>software</i> utilizado foi validado?</p>
Estabelecimento e manutenção dos procedimentos de QA:	<p>Existe um sistema para acompanhar e verificar a aplicação das rotinas e procedimentos adotados?</p>

	Estão estabelecidos e mantidos procedimentos para identificar necessidades de treinamento, bem como para prover a capacitação do pessoal responsável pela execução e avaliação das medições de tensões?
Tópico 03: medições em uma determinada localização/profundidade:	
Decisão sobre a localização/profundidade do ensaio:	<p>As informações geológicas mais recentes estão sendo utilizadas para avaliar a adequação da localização/profundidade do ensaio?</p> <p>A localização/profundidade proposta é representativa do local e do projeto planejado?</p> <p>Para o método de <i>overcoring</i>: existem especificações prévias quanto à qualidade da rocha exigida na formação onde o ensaio será realizado?</p> <p>Para fraturamento hidráulico: a influência de eventuais anisotropias nos resultados dos ensaios é compreendida e é possível selecionar os trechos menos anisotrópicos?</p> <p>Para HTPF: existem fraturas fechadas adequadas disponíveis para a realização dos ensaios?</p>
Ensaio funcionais das ferramentas de instalação, entre outros	Os procedimentos estabelecidos estão sendo seguidos e listas de verificação (checklists) estão sendo utilizadas?
Procedimentos para a instalação dos equipamentos na localização/profundidade adequada	<p>Para <i>overcoring</i>: quais procedimentos estão em vigor para a perfuração do furo piloto e para a aceitação do nível de ensaio?</p> <p>Para fraturamento hidráulico: quais procedimentos existem para garantir que os obturadores (<i>packers</i>) sejam posicionados no nível de ensaio selecionado, e esses procedimentos estão sendo devidamente seguidos e documentados?</p>
Tópico 04: procedimentos de medição:	
Instalações e medições em fundo de furo	<p>Quais procedimentos estão em vigor para garantir que as operações em fundo de furo sejam totalmente rastreáveis?</p> <p>Quais procedimentos existem para verificar as condições geológicas reais no nível de ensaio (por exemplo, inspeção da amostra sobrefurada, verificação dos resultados do obturador de impressão)?</p>
Aquisição de dados	<p>Quais procedimentos existem para verificação ou calibração dos sensores utilizados?</p> <p>Quais procedimentos estão estabelecidos para a verificação do <i>hardware</i> e do <i>software</i>?</p> <p>Quais procedimentos existem para armazenamento e <i>backup</i> dos dados?</p>
Registro, confiabilidade e redução dos dados	<p>Quais procedimentos garantem que os dados sejam registrados de forma precisa e segura?</p> <p>Todos os riscos associados às medições de tensões (ver Áreas Temáticas de Auditoria 1 e 2) foram considerados?</p>

	<p>Quais procedimentos asseguram a confiabilidade dos dados brutos obtidos? Como os dados serão reduzidos? Quais procedimentos existem para evitar erros durante a redução dos dados? Existe um protocolo com exemplo de caso disponível para esta Área Temática 7?</p>
Interpretação dos dados	<p>Como os dados serão interpretados e como as tendências serão identificadas?</p>
Procedimentos para avaliação em campo e relatórios preliminares	<p>Quais procedimentos estão em vigor para uma compreensão progressivamente atualizada dos resultados durante o processo de medição? Quais procedimentos existem para a tomada de decisão quanto à continuidade ou interrupção dos trabalhos de campo (ver Área Temática 2)?</p>
Validação dos dados	<p>Os resultados são compatíveis com dados e tendências relevantes previamente existentes no local? As condições do local estão dentro das hipóteses assumidas pelo método utilizado? As propriedades elásticas determinadas para a rocha são realistas?</p>
Apresentação dos resultados das medições de tensões	<p>Como as medições de tensões serão apresentadas de forma clara? Discussão do processo de avaliação das incertezas. De que forma as incertezas serão apresentadas?</p>
Tópico 05: conclusões da auditoria técnica	
Adequação das medições de tensões	<p>As medições de tensões foram conduzidas de forma adequada, considerando o objetivo estabelecido (Área Temática de Auditoria 1) e o conhecimento científico, prático e das condições do local existentes? A documentação do controle de qualidade durante as etapas de medição, redução de dados e interpretação dos resultados é confiável (Áreas Temáticas de Auditoria 5 a 9)?</p>
Declaração geral da Auditoria Técnica (TA)	<p>Quais são as conclusões gerais da auditoria técnica, considerando as conclusões individuais dos itens dispostos nesta tabela? Quais recomendações devem ser feitas em relação ao trabalho realizado?</p>

CAPITULO 3. MÉTODOLOGIA DE PESQUISA E ANÁLISE

Este capítulo apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento do estudo, descrevendo os critérios utilizados para a organização e sistematização dos temas abordados, bem como os objetivos que guiaram a condução do estudo.

O estudo teve como foco a análise do estado da arte das técnicas empregadas na estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos aplicadas a lavras de mineração. Para isso, realizou-se um levantamento crítico da literatura científica, no qual foram discutidas as definições das principais técnicas, seu desenvolvimento ao longo do tempo e suas aplicações atuais no contexto de atividades de mineração.

A partir desse levantamento, buscou-se identificar as abordagens mais consolidadas e os avanços recentes, bem como as limitações associadas a cada método. Adicionalmente, foram analisadas as lacunas existentes e as tendências de pesquisa, de modo a evidenciar os desafios ainda presentes e justificar a relevância do tema frente às demandas atuais da indústria de exploração mineral.

O desenvolvimento do estudo teve início com a compreensão dos conceitos fundamentais de tensões aplicados à mecânica dos materiais sólidos e à mecânica das rochas, estabelecendo a base teórica necessária para a análise do comportamento mecânico dos maciços rochosos.

Em seguida, aprofundou-se o estudo do conceito de tensões em maciços rochosos, buscando compreender os processos responsáveis pela geração do estado de tensões e os principais fatores que influenciam sua distribuição. Foram também discutidas a relevância desse conceito e a importância de sua compreensão para atividades de engenharia nesse meio.

Adicionalmente, procedeu-se com a classificação das tensões atuantes em maciços rochosos baseando-se na abordagem proposta por diversos autores e à análise de como o estado de tensões varia no espaço.

No tópico seguinte, o conceito de tensões em maciços rochosos é discutido com ênfase na atividade de exploração mineral, analisando-se a influência do estado de tensões *in situ* na disposição geométrica das estruturas associadas à atividade minerária, bem como na previsão de sua estabilidade, visando à garantia da segurança e à otimização das operações.

Na sequência, são apresentados os métodos utilizados para a estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos, os quais foram analisados quanto à sua origem, procedimentos de aplicação, limitações, campos de utilização, bem como vantagens e desvantagens. Adicionalmente, é descrito o controle de qualidade recomendado na literatura visando aumentar a confiabilidade e da eficiência dessas estimativas.

Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma dispendo a organização da pesquisa bibliográfica realizada:

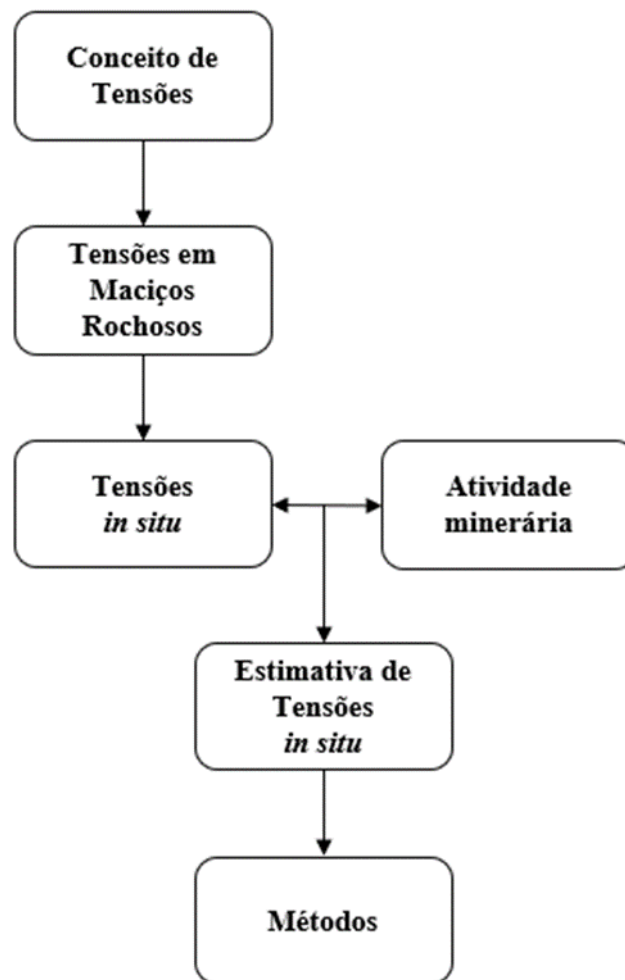


Figura 3.1 – Fluxograma metodológico.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada e na contextualização atual desses métodos, procedeu-se a uma avaliação crítica individual de cada técnica analisada. Como resultado dessa

análise, foram elaborados fluxogramas com o objetivo de servir como guias iniciais para a seleção do método mais adequado às diferentes condições e situações *in situ*.

Também foi desenvolvido um quadro-resumo contendo as principais vantagens e desvantagens associadas a cada método. Dessa forma, o estudo configura-se como um guia inicial, fundamentado nas informações disponíveis na literatura científica, para a avaliação e a escolha do método mais eficiente para a estimativa do estado de tensões em maciços rochosos. Ressalta-se, ainda, a relevância do tema para as atividades minerárias, uma vez que o conhecimento do estado de tensões *in situ* em minas contribui para uma condução mais segura, objetiva e otimizada das operações, reduzindo incertezas associadas ao comportamento do maciço rochoso.

CAPITULO 4. AVALIAÇÃO E CATEGORIZAÇÃO DOS MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a avaliação crítica dos métodos discutidos neste estudo, resumindo as características e aplicabilidades de cada um, baseando na base bibliográfica pesquisada. Também será apresentada a subdivisão dos métodos por categoria esquematizando as ideias em tabelas e fluxogramas resumos que poderão servir como auxílio na tomada de decisões futuras.

A distribuição de tensões em maciços rochosos é uma característica complexa e essencial no contexto de mecânica das rochas, principalmente quando ligada ao processo de mineração, seja em mina subterrânea ou a céu aberto, onde o produto e o local de intervenção é a rocha. A maneira como o maciço se comporta diante das alterações impostas pelo processo de lavra depende diretamente do estado de tensões o qual o maciço está submetido e das alterações provocadas pelas atividades.

Na mineração subterrânea, os processos de escavações destinadas à extração quanto as estruturas auxiliares, como galerias de acesso, vias de ventilação e áreas de suporte, alteram o equilíbrio inicial do maciço. Essas alterações podem gerar redistribuições significativas de tensões, com potencial para provocar deformações, instabilidades ou rupturas localizadas. Por esse motivo, o dimensionamento e o posicionamento dessas estruturas devem considerar cuidadosamente a resposta mecânica da rocha, buscando aumentar a segurança operacional, reduzir impactos ambientais e garantir a continuidade da produção.

Em mineração a céu aberto, embora as operações se iniciem na superfície, o aumento progressivo da profundidade da cava traz desafios semelhantes. Variações geológicas e geometrias complexas das minas fazem com que o estado de tensões *in situ* desempenhe papel decisivo na estabilidade da mina. O avanço da lavra exige análises contínuas, ajustes na geometria da cava, monitoramento adequado para controlar a resposta do maciço às escavações.

Assim, independentemente do método de lavra empregado, compreender como as tensões se distribuem e se modificam no maciço rochoso é essencial para o desenvolvimento de projetos seguros e eficientes.

Estimar tensões *in situ* em maciços rochosos é um procedimento complexo que exige atenção e cuidados, sobretudo porque os métodos disponíveis não realizam medições diretas dessa grandeza. Para obter estimativas de tensões, correlações e simplificações são adotadas. Cabe ao executor e planejador do processo avaliar se tais simplificações e correlações são coerentes com os objetivos do estudo. Ademais, a determinação de tensões *in situ* por meio desses métodos envolve custos significativos, podendo influenciar substancialmente o orçamento global de um projeto. Contudo, quando bem aplicados, os resultados obtidos tendem a proporcionar ganhos relevantes, justificando o investimento. Dessa forma, a escolha do método mais apropriado para cada situação deve ser realizada de maneira criteriosa e integrada ao planejamento geral do projeto.

4.1. MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSOES EM SUPERFICIES

Os métodos de alívio de tensões em superfícies, avaliando o mais aplicado, o macaco plano (*Flat Jack*), como o próprio nome indica, é aplicado diretamente em superfícies expostas do maciço rochoso. Por essa razão, sua utilização depende necessariamente do acesso direto onde o ensaio será realizado. Em situações em que a estimativa de tensões precisa ser obtida em grandes profundidades, especialmente antes de qualquer intervenção no maciço, a aplicação do método torna-se inviável.

Apesar dessa limitação, em contextos em que a estrutura subterrânea já está configurada (túneis, galerias, pilares ou paredes, taludes) o método se mostra uma alternativa eficiente para avaliar as tensões remanescentes após as escavações. A simplicidade dos equipamentos

utilizados e a relação direta entre os valores medidos e o estado de tensões tornam o método uma opção prática e de implantação relativamente rápida em condições favoráveis.

Outro ponto relevante é que o ensaio não requer a determinação das constantes elásticas da rocha por meio de testes laboratoriais e a própria execução do ensaio no local permite estimar a deformabilidade do maciço, o que reduz tempo e custos associados a campanhas experimentais adicionais.

O método possibilita determinar apenas a componente de tensão atuante na direção correspondente ao plano do corte realizado. Assim, para se obter o tensor completo de tensões, é necessário executar múltiplos ensaios com orientações distintas.

A normalização do método pela *ASTM International* - ASTM D4729-19 confere maior credibilidade, padronização e reconhecimento técnico. Essa padronização garante que os procedimentos adotados sejam consistentes, reduzindo variações significativas decorrentes de diferenças operacionais entre equipes ou empresas e fortalecendo a confiabilidade dos resultados.

Entretanto, a obtenção da acurácia das estimativas depende diretamente da correta execução em campo, exigindo uma série de cuidados durante a operação e interpretação dos resultados. As medições comparativas realizadas antes e depois da instalação do macaco plano devem ser feitas com alta precisão, deve-se assegurar que a força aplicada pelo equipamento seja totalmente transmitida às superfícies da abertura e utilizar instrumentos devidamente calibrados, capazes de fornecer leituras precisas. Além disso, a abertura realizada deve gerar deformações suficientes que consigam gerar alívio de tensões e é importante avaliar previamente as condições do maciço onde será executado o ensaio, considerando fraturamento, umidade, poeira e irregularidades superficiais.

Considerando esses fatores, o método do macaco plano pode desempenhar um papel relevante na verificação do estado de tensões em estruturas já existentes, servindo como base para validar modelos, ajustar projetos ou otimizar sistemas de suporte. Quando corretamente aplicado e em condições adequadas, constitui um recurso útil para compreender o comportamento do maciço *in situ* após intervenções de mineração ou obras subterrâneas.

4.2. MÉTODOS HIDRÁULICOS

Os métodos hidráulicos, compostos pelo Fraturamento Hidráulico (HF) e os Testes Hidráulicos em Fraturas Pré-existentes (HTPF), formam um dos procedimentos mais amplamente utilizados e consolidados para a estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos. Ambos são normatizados pela ASTM *International*, o que garante padronização e confiabilidade aos resultados obtidos. A execução é realizada em furos de sondagem e, apesar de exigir equipamentos mais robustos, o princípio de funcionamento é relativamente simples.

Uma das principais vantagens desses métodos é a possibilidade de aplicação em grandes profundidades, com registros na literatura de utilização em níveis próximos a 9 km, o que os torna particularmente adequados para a fase de exploração mineral, quando não há acesso direto às estruturas subterrâneas.

Outro ponto favorável é a adaptabilidade, em trechos de rocha intacta aplica-se o HF, enquanto em segmentos naturalmente fraturados é possível utilizar o HTPF. No entanto, no caso do HF, é essencial selecionar um intervalo livre de fraturas naturais suficientemente grande, de modo a evitar interferência entre as fraturas induzidas pelo ensaio e as existentes no maciço. É ideal que, em um mesmo furo, com trechos de rocha intacta e fraturada, seja aplicado ambos os métodos, em profundidades diferentes, para prover uma análise comparativa.

A aplicação segura do método requer verificação prévia da capacidade dos equipamentos frente às condições do local. Em grandes profundidades, fatores como pressão da água subterrânea, capacidade dos obturadores, integridade do furo e desafios operacionais podem limitar a aplicabilidade ou comprometer a qualidade dos resultados. No HTPF, em particular, é fundamental identificar e selecionar uma fratura adequada, com geometria compatível com o objetivo do ensaio, garantindo que sua reabertura seja tecnicamente viável e geradora de dados consistentes.

Comparativamente, o HTPF apresenta menos restrições geológicas que o fraturamento hidráulico convencional, pois não depende da determinação da resistência à tração da rocha, nem é sensível à pressão de poros da mesma forma que o HF. Além disso, permite medições confiáveis mesmo na presença de planos de fraqueza, desde seja possível caracterizar esses planos.

Ambos os métodos dependem diretamente da criação ou reativação de fraturas no maciço. Por isso, a correta identificação da orientação dessas fraturas é um passo crítico, já que as tensões principais são inferidas a partir da geometria e comportamento dessas descontinuidades durante o ensaio. O tratamento dos dados envolve a interpretação de gráficos pressão \times tempo, dos quais se extraem pontos de inflexão correlacionadas com os componentes do estado de tensões. Eventuais oscilações ou registros ambíguos exigem interpretação criteriosa, reforçando a necessidade de operadores experientes e procedimentos rigorosos.

Por fim, é importante reconhecer que o método incorpora hipóteses simplificadoras que podem não representar integralmente a realidade geológica. No fraturamento hidráulico, por exemplo, assume-se frequentemente que a tensão vertical corresponde a uma das tensões principais, premissa que nem sempre é válida. Assim, embora amplamente aceitos, os métodos hidráulicos requerem julgamento técnico na aplicação e interpretação.

4.3. FRATURAMENTO COM REVESTIMENTO FLEXÍVEL

O método é semelhante aos métodos hidráulicos; contudo, distingue-se pela forma como as fraturas são induzidas. Nesse caso, a indução ocorre por meio da pressurização de uma membrana expansível.

O fato de não utilizar fluidos para gerar as fraturas é considerado uma vantagem em relação aos métodos hidráulicos, pois nenhum fluido penetra no maciço rochoso durante o ensaio. Dessa forma, evita-se a interação com defeitos, microfraturas e juntas presentes no maciço.

Como desvantagem do método, alguns autores apontam que as fraturas geradas não se propagam significativamente além da parede do furo, permanecendo restritas à região diretamente pressurizada.

Assim como nos métodos hidráulicos, os dados obtidos dos ciclos de pressurização e despressurização devem ser bem definidos para permitir a avaliação e correlação com as tensões *in situ*.

4.4. MÉTODOS DE ALÍVIO EM FUROS DE SONDAGEM

Os métodos realizados em furos de sondagem, principalmente os de sobrefuração são, provavelmente, aqueles que reúnem o maior volume de pesquisas, aplicações práticas e resultados documentados na literatura. Isso se deve, em grande parte, à variedade de instrumentos desenvolvidos desde seu surgimento, para mensurar deformações e deslocamentos, bem como às adaptações e aprimoramentos contínuos desses equipamentos, que elevaram a confiabilidade e ampliaram o campo de aplicação dos métodos. Por ser amplamente estudado e aplicado, possui posição de destaque semelhante aos métodos hidráulicos na estimativa de tensões *in situ*.

Padronizado e recomendado pela ASTM *International*, o método permite estimar o estado tridimensional de tensões em um ponto específico do maciço rochoso. Essa característica, embora seja uma vantagem técnica, também levanta um questionamento relevante: até que ponto uma medição pontual representa adequadamente o comportamento global do maciço? Essa limitação é inerente ao procedimento, uma vez que a estimativa é localizada. Assim, embora uma única execução possa fornecer o tensor completo de tensões, a caracterização adequada de um maciço requer a realização do ensaio em múltiplos pontos e, preferencialmente, em diferentes profundidades e contextos estruturais.

Alguns dos dispositivos de medição de deslocamentos ou deformações são recuperáveis e permitem realizar diversas medições utilizando o mesmo dispositivo, tornando o processo mais econômico e prático. Isso possibilita realizar um número maior de ensaios, melhorando a distribuição dos pontos de medição e diminuindo a limitação do método por fornecer resultados apenas em locais específicos.

Assim como ocorre nos demais métodos, é essencial avaliar cuidadosamente o local onde os ensaios serão realizados. A precisão dos instrumentos de medição pode ser comprometida por fatores como microfraturas, poeira, mineralogia local, granulometria da rocha, além de efeitos de anisotropia e heterogeneidade do maciço. Esses aspectos influenciam diretamente a qualidade das leituras e, portanto, devem ser considerados antes da execução do ensaio.

Um aspecto recorrente identificado durante a pesquisa bibliográfica refere-se à influência da temperatura sobre o desempenho dos dispositivos de medição. Condições térmicas da rocha podem alterar significativamente as leituras obtidas, resultando em interpretações incorretas das

deformações registradas. Por essa razão, ao aplicar o método, é fundamental considerar esse efeito e realizar as devidas compensações ou correções.

É essencial que, antes de escolher o método e executar o ensaio, haja plena compreensão dos procedimentos envolvidos, das simplificações adotadas em cada um e dos critérios aplicados. Embora a estimativa do estado de tensões por esse método pareça direta, a falta de atenção a esses aspectos pode produzir valores inconsistentes. Além disso, se as determinações não refletirem o comportamento esperado da rocha em campo, é possível realizar um tratamento adequado dos dados, incorporando correções ou ajustes que aproximem as estimativas da condição real. Da mesma forma, adaptações nos instrumentos de medição podem ser implementadas para superar limitações encontradas em campo e melhorar a qualidade das leituras, assim como Armelin (2010) fez a partir do modelo utilizado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa.

Como os dados obtidos em campo correspondem a deformações ou deslocamentos, a conversão dessas medições para valores de tensão depende diretamente da adoção de um modelo constitutivo que represente de forma adequada o comportamento da rocha. O módulo de elasticidade utilizado nessa transformação deve ser obtido com rigor, pois sua determinação inadequada pode conduzir a resultados errôneos. Em condições naturais, o módulo de elasticidade não é constante, ele varia conforme o nível de tensão atuante, o que implica mudanças significativas com a profundidade. Além disso, outras propriedades fundamentais da rocha, como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, devem ser determinadas com precisão, uma vez que influenciam diretamente na transformação dos dados obtidos em campo com o estado de tensões determinado.

Por se tratar de um método aplicado em furos de sondagem, tanto a perfuração inicial até o ponto de ensaio quanto a etapa de sobrefuração precisam ser realizadas com cuidado. Qualquer procedimento inadequado pode induzir fraturas artificiais no entorno do furo, comprometendo os resultados obtidos.

A presença de água subterrânea foi, por muito tempo, um fator que dificultou diretamente a obtenção de resultados confiáveis. Hoje, porém, já existem dispositivos capazes de minimizar esse problema, como a célula KX-81. Mesmo assim, a água não influencia apenas as medições em campo, mas também altera o comportamento mecânico da própria rocha. Por isso, sua presença deve ser sempre considerada e nunca negligenciada.

Em alguns dispositivos de medição de deformações ou deslocamentos, como o CSIR, o CSIRO HI e a sonda Borre, os extensômetros são fixados diretamente no furo piloto para registrar as deformações. Nesses casos, a espessura e o tempo de cura da cola utilizada na fixação merecem atenção especial, pois podem interferir nas leituras. Além disso, a superfície onde os extensômetros serão instalados deve estar devidamente preparada estando limpa, sem poeira e livre de umidade. Vale destacar que dispositivos como o CSIRO HI e o *Doorstopper* possuem proteção adicional para os extensômetros, reduzindo a influência direta de poeira e umidade.

Outro aspecto importante diz respeito à forma como o instrumento registra as deformações, se realiza leituras contínuas durante a sobrefuração ou apenas medições pontuais, antes e depois do processo. Quando há leitura contínua, o operador consegue acompanhar em tempo real o comportamento da rocha e verificar se os dados coletados são coerentes ou se apresentam desvios. Esse acompanhamento facilita a identificação imediata de inconsistências e permite interromper e/ou ajustar o procedimento.

O comprimento da sobrefuração realizado após a instalação dos dispositivos de medição também é outro parâmetro relevante na escolha do método. Em rochas fracas, muito estratificadas ou sujeitas a altos níveis de tensão, o comprimento da sobrefuração é um fator que merece atenção pois existe o risco de desestabilizar o entorno do furo ou induzir fraturas artificiais e o alívio de tensões pode não ocorrer de forma completa. Por isso, ao definir o método utilizado, uma pesquisa na bibliografia pode indicar os comprimentos mínimos para cada ensaio e condição.

Cada instrumento de medição apresenta características específicas que precisam ser avaliadas antes da escolha, como o número e a disposição dos extensômetros e outros dispositivos utilizados para medir deslocamentos, além do comprimento mínimo de sobrefuração necessário para o funcionamento adequado. Em geral, as células de sobrefuração instaladas no fundo do furo tendem a apresentar maior taxa de sucesso em rochas relativamente fracas, fraturadas ou submetidas a tensões elevadas, que aquelas instaladas em furos piloto, pois não dependem de um furo piloto e são menos sensíveis a instabilidades ao redor da parede do furo.

Os métodos baseados na abertura de fendas na parede do furo diferem das técnicas por sobrefuração com furo piloto ou fundo de furo, pois não conseguem determinar o estado completo de tensões em um único ensaio. Para obter o tensor de tensões, é necessário realizar pelo menos três cortes longitudinais em orientações diferentes. Apesar dessa limitação, esses

métodos possuem vantagens importantes como não exigir sobrefuração, serem mais rápidos de executar e permitir várias repetições ao longo do dia, o que pode ser útil em campanhas que necessitam de maior produtividade.

4.5. BREAKOUTS

Outro método aplicado em furos de sondagem baseia-se apenas na observação do comportamento mecânico da rocha após a perfuração, sem necessidade de provocar novas intervenções. A ocorrência de *breakouts* pode fornecer indicações do estado de tensões *in situ*, pois resulta diretamente da resposta da rocha às tensões atuantes e ao alívio destas.

O método só pode ser utilizado como indicativo do estado de tensões na rocha caso ocorra. Na ausência do fenômeno, não é possível extrair qualquer informação conclusiva, tornando o método limitado a situações em que o colapso da parede do furo efetivamente se manifesta.

Um aspecto que confere relevância e consistência ao método é seu uso contínuo desde a década de 1970, quando as ocorrências de *breakouts* começaram a ser sistematicamente registradas e incorporadas a bases de dados globais, permitindo comparar e interpretar estados de tensões em diversas regiões geológicas.

Embora o método dos *breakouts* tenha amadurecido quanto à identificação da orientação das tensões *in situ*, ainda existem poucas evidências robustas que permitam determinar com precisão suas magnitudes a partir desse fenômeno. Diversos autores já propuseram modelos que correlacionam a geometria dos *breakouts* com o estado de tensões, porém essa abordagem apresenta limitações importantes. A forma como o colapso da parede do furo se manifesta é influenciada por uma série de fatores, como características físicas e químicas da rocha, porosidade, mineralogia, tamanho dos grãos, composição da matriz intergranular e até mesmo pelo próprio processo de perfuração.

Diante disso, o uso de *breakouts* para estimar magnitudes de tensões requer cautela. Ainda que essas interpretações possam ser úteis para análises preliminares ou comparativas, elas não devem ser tratadas como valores definitivos. Em outras palavras, podem complementar o entendimento do estado de tensões, mas não substituir os métodos mais indicados disponíveis para esse fim.

O “*breakout*” é um método rápido e aplicável em grandes profundidades, o que o torna atrativo em fases iniciais de investigação geotécnica e pode ser aderido a outras etapas de projeto onde sondagens são necessárias. Contudo, por se tratar de um fenômeno sujeito a diferentes interpretações e influenciado por múltiplos fatores geológicos, sua aplicabilidade prática acaba sendo limitada quando deseja ter dados mais realistas do estado de tensões *in situ*.

Ainda assim, observar “*breakouts*” em furos de sondagem realizados para outros propósitos, como caracterização geológica, determinação de propriedades do maciço ou avaliação do potencial mineral, pode ser útil. Mesmo que não forneça valores confiáveis de magnitude das tensões *in situ*, o método pode contribuir de forma consistente para a identificação da orientação do campo de tensões, servindo como informação complementar dentro de um conjunto análises e pode direcionar a localização de estimativas por outros métodos.

4.6. DISCINGS

Outro método que utiliza campanhas de sondagem para obter informações sobre o estado de tensões *in situ* é a análise de *core discing*. Diferentemente do *breakout*, cuja observação ocorre na parede do furo, o *discing* é identificado diretamente nos testemunhos recuperados durante a perfuração. A interpretação baseia-se no padrão de fraturamento em forma de discos formado em rochas submetidas a elevados níveis de tensão, permitindo inferir características do campo de tensões sem necessidade de intervenções adicionais no maciço.

A orientação e a magnitude das tensões *in situ* podem até ser inferidas para fins de entendimento preliminar do maciço, a partir da forma e da espessura dos discos, mas o empastilhamento de testemunhos não deve ser tratado como um método de estimativa direta desses parâmetros. Sua utilidade é maior nas etapas iniciais de um projeto, funcionando como uma ferramenta indicativa que auxilia na definição de hipóteses e no direcionamento de métodos mais eficientes.

É essencial que o profissional responsável pela avaliação conheça o fenômeno, de modo a distinguir corretamente o *core discing* verdadeiro de fraturas mecânicas geradas pelo próprio processo de perfuração.

Para que seja possível identificar corretamente a profundidade e a localização dos trechos de altas tensões onde ocorreu o *core discing*, é fundamental que a perfuração seja executada com

rigorosa referência à superfície, mantendo o controle preciso da profundidade. Além disso, os testemunhos devem ser acondicionados de forma adequada e ordenada, garantindo a rastreabilidade e permitindo consultas posteriores confiáveis.

Conforme mostrado em estudos que aplicaram o *core discing* na avaliação do estado de tensões em minas subterrâneas, a observação desse fenômeno pode ser utilizada como uma ferramenta de zoneamento geomecânico das áreas de maior concentração de tensões. Essa identificação prévia auxilia o planejamento de lavra ao indicar setores do corpo de minério que demandam maior atenção no sequenciamento das escavações, no controle das detonações e no dimensionamento dos sistemas de suporte e reforço.

4.7. MÉTODO DE ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO DIAMETRAL DE TESTEMUNHO

Outro método que utiliza campanhas de sondagem como fonte de informação e é baseado na análise do comportamento dos testemunhos após sua extração. A premissa fundamental é que, ao retirar o núcleo de sondagem do seu estado *in situ*, ocorre um alívio das tensões que pode induzir microfissuras no material. Esse processo pode gerar deformações elásticas não lineares e até mesmo dependentes do tempo, influenciando a interpretação dos resultados.

É importante considerar que os testemunhos são constituídos por diferentes minerais, cada um com propriedades mecânicas específicas. A mineralogia exerce influência significativa tanto na deformação diametral quanto no padrão de fraturamento observado durante e após a perfuração. Essa variabilidade faz com que seja necessária uma investigação adicional que permita distinguir essas deformações.

Esse método não permite estimar diretamente a magnitude das tensões *in situ*. Entretanto, quando seus resultados são combinados com outras técnicas de estimativa de tensões, é possível determinar essas magnitudes com maior confiabilidade.

Outro ponto crítico é a necessidade de manter o testemunho orientado desde a extração. Sem essa referência, torna-se inviável estabelecer a direção das tensões principais, limitando consideravelmente a utilidade do método.

4.8. MÉTODOS GEOFÍSICOS

Esses métodos apresentam aplicações bastante limitadas, e ainda há estudos em desenvolvimento para avaliar sua real aplicabilidade. Por esse motivo, mesmo quando disponíveis, seu uso deve ser considerado principalmente como ferramenta auxiliar ou complementar a outras técnicas de determinação de tensões *in situ*. Utilizá-los como métodos principais pode comprometer a confiabilidade dos resultados, uma vez que a precisão é fortemente influenciada por diversos fatores e a análise é inerentemente complexa. Além disso, a determinação prática da magnitude das tensões apresenta limitações significativas.

A exemplo do método acústico baseado no efeito Kaiser, que não estima diretamente o estado de tensões *in situ*, mas sim a maior tensão já experimentada pelo espécime ao longo de sua história. Essa tensão pode ou não representar o estado atual do maciço. A literatura indica que, para estimar o estado completo de tensões, seria necessário ensaiar ao menos seis testemunhos orientados em diferentes direções. Contudo, como mencionado anteriormente, o valor obtido no carregamento do corpo de prova nem sempre corresponde ao valor real das tensões atuantes no campo.

Dessa forma, o método acústico baseado no efeito Kaiser pode ser útil como técnica complementar, fornecendo uma referência adicional para comparação com métodos consagrados de determinação de tensões. No entanto, sua aplicação isolada não deve ser considerada suficiente para caracterizar o estado de tensões *in situ* com precisão.

4.9. MÉTODO DE RECUPERAÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Também aplicados a testemunhos de sondagem, esses métodos podem ser adequados para estimar tensões *in situ* em poços profundos ou muito profundos, especialmente em situações em que outras técnicas não são viáveis e apenas pequenas amostras estão disponíveis. Contudo, os resultados podem ser significativamente influenciados pela precisão dos dados obtidos e pelas suposições adotadas durante a análise.

Nesse método, ao medir a recuperação das deformações de testemunhos após o alívio das tensões, é possível determinar a orientação das tensões principais. No entanto, a estimativa das

magnitudes dessas tensões é consideravelmente mais complexa, pois requer a adoção de um modelo constitutivo que represente de forma realista o comportamento da rocha.

Os autores indicam que a medição das deformações deve ser executada o mais rápido possível, com elevada precisão e estabilidade, a fim de evitar a influência de fenômenos como variações de temperatura, desidratação das amostras; difusão da pressão de fluido nos poros etc. Processos que influenciam as deformações dos testemunhos. Um cuidado a ser tomado a fim de evitar a perda de umidade é prover a selagem da amostra.

Os instrumentos utilizados para medir as deformações nas amostras devem ser precisos e devidamente calibrados. Quando os testemunhos são orientados, o número de medições necessárias pode ser reduzido, já que a orientação facilita a interpretação das direções principais de tensão.

Além disso, como as amostras são inspecionadas antes de serem ensaiadas, é possível avaliar previamente seu estado, descartando testemunhos fraturados ou inadequados. Outro aspecto vantajoso é a possibilidade de ensaiar diversas amostras simultaneamente, permitindo análises comparativas.

No entanto, o método deve ser evitado em rochas com alto teor de minerais argilosos, pois a perda de água desses minerais pode gerar deformações de retração. Esse comportamento ocorre no sentido oposto às deformações de expansão associadas ao alívio de tensões, podendo distorcer a interpretação final.

4.10. MÉTODOS DE RETROANÁLISE - ALÍVIO EM GRANDES VOLUMES DE ROCHA

O método de retroanálise baseado no alívio em grandes volumes de rocha consiste em instrumentar o maciço rochoso, registrar deformações e deslocamentos ao longo do tempo e, posteriormente, correlacionar esses dados com o estado de tensões *in situ*. Assim como outros métodos que convertem deformações e deslocamentos em tensões, a aplicação adequada depende da escolha de um modelo constitutivo capaz de representar fielmente o comportamento mecânico da rocha.

Por envolver modelagem numérica, o método requer o uso de técnicas computacionais como o Método dos Elementos de Contorno (BEM) ou o Método dos Elementos Finitos (FEM). Para garantir resultados confiáveis, as propriedades dos materiais, as condições de contorno, a geometria do modelo e as suposições adotadas devem ser bem definidas e compatíveis com a realidade geológica. Embora apresente elevado custo computacional e dependa significativamente da qualidade dos dados de entrada, a retroanálise ainda se destaca como uma abordagem robusta e capaz de lidar com configurações geológicas complexas.

Em comparação aos outros métodos, a retroanálise permite avaliar e estimar o estado de tensões em um volume muito maior de rocha. Isso possibilita uma visão mais abrangente do comportamento do maciço.

4.11. OBSERVAÇÕES GEOLÓGICAS

Um ponto importante ao estimar o estado de tensão *in situ* baseando em observações geológicas é considerar que a tensão pode mudar diante de diferentes estruturas geológicas. Falhas, fraturas, dobras e contatos entre rochas podem alterar o modo como a tensão se distribui no maciço. Por isso, é essencial levar essas variações locais em conta para evitar interpretações incorretas sobre o comportamento das tensões na área estudada.

Métodos baseados em dados geológicos são úteis nas etapas iniciais de um projeto e podem ser aplicados tanto em análises 2D quanto 3D. Eles têm como vantagem o baixo custo e a rapidez. Porém, sua grande limitação é a baixa confiabilidade. Essas estimativas podem ser bem gerais e pouco precisas e devem servir como orientação inicial ou informação complementar a outros métodos.

Algumas formações geológicas podem servir como indicativo de orientação das tensões *in situ*, no entanto, tal estrutura deve ser avaliada criteriosamente e levar em consideração outros aspectos que podem ter contribuído para aquela formação.

Os mecanismos focais de terremotos também podem ser utilizados para investigar o estado de tensões *in situ*. Para isso, é essencial que esses mecanismos sejam corretamente identificados, avaliados e interpretados. A qualidade da análise depende diretamente de uma rede sísmica adequada, capaz de registrar eventos com precisão e fornecer dados confiáveis.

Esse método é um dos poucos capazes de fornecer informações sobre o estado de tensões em grandes profundidades, cerca de 5 a 20 km, abrangendo volumes extensos de rocha, muito além do alcance dos métodos estimativa.

4.12. SÍNTESE DOS MÉTODOS AVALIADOS

Alguns autores, como Ljunggren (2003), Lin *et al.* (2019) e Sazid *et al.* (2023), apresentam em seus trabalhos tabelas que destacam as principais vantagens e desvantagens dos métodos de estimativa de tensões *in situ* em rochas. Com base nessa abordagem e na revisão bibliográfica realizada, elaborou-se a Tabela 4.1, que resume os métodos estudados neste estudo, evidenciando suas principais características.

Tabela 4.1 - Sumarização dos métodos estudados.

Método	Local	Limitações	Vantagens	Desvantagens
Alívio de tensões em superfícies (macaco plano – Flat Jack)	<i>In situ</i> (superfície)	Considera a rocha com comportamento elástico.	Não requer conhecimento prévio das constantes elásticas da rocha.	Umidade e poeira afetam o desempenho dos instrumentos.
		Em maciços não homogêneos e altamente fraturados a teoria pode não ser verdadeira.	Avaliam as tensões <i>in situ</i> nas fases de projeto e em estruturas já existentes.	Superfície ensaiada vulnerável a intemperismo e escavação.
Métodos Hidráulicos	<i>In situ</i> (furos de sondagem)	Mede apenas as tensões normais no plano perpendicular ao furo.	Avalia o tensor completo de tensões, sem depender da orientação do furo ou do material.	Histerese nos ciclos de carga e descarga pode impedir a medição da tensão real.
		Devem-se testar furos verticais /subverticais.	Não depende de parâmetros elásticos da rocha	Pelo menos 6 medições em diferentes direções são necessárias.
		Considera-se meio isotrópico, homogêneo e linearmente elástico.	Necessita de equipamentos simples	Pressão aplicada pelo equipamento pode não ser totalmente efetiva.
		Interpretação dos dados (pressão ×	Amplamente utilizado em grandes profundidades	Tensões próximas ao poço, compressibilidade e escoamento viscoso do fluido podem afetar a precisão.
			Aproveita furos de sondagem existentes,	HF com necessidade de seções livres de fraturas além do trecho ensaiado.
				HTPF requer fratura grande e planar para uniformidade da aplicação da tensão normal.

		tempo) pode ser difícil.	tornando-o mais econômico e prático. Adequado para minas a céu aberto com geometria complexa. Adequado para projetos iniciais sem acesso subterrâneo. Mede a menor tensão diretamente com precisão.	
Fratramento com revestimento flexível	<i>In situ</i> (furos de sondagem)	Pressão de ruptura indefinida dificulta interpretação dos resultados. Fraturas geradas não se propagam além da parede do furo.	Nenhum fluido penetra no maciço rochoso. A pressão de ruptura reflete melhor o estado de tensões do maciço que no HF.	Curvas do ensaio podem ser difíceis de analisar por pontos de inflexão indefinidos. Dependência da geração das fraturas, da interpretação correta de suas causas e da determinação precisa de sua orientação.
Método de alívio de tensões em furos de sondagem (sobrefuração)	<i>In situ</i> (furos de sondagem)	Considera comportamento elástico linear. Módulo de elasticidade depende da tensão.	Técnicas mais usadas para estimar tensões <i>in situ</i> . Na mineração subterrânea, a infraestrutura da mina permite acesso direto aos pontos de ensaio.	Interpretação do comportamento anisotrópico da rocha é desafiadora e pode gerar erros nas tensões estimadas. Temperaturas elevadas podem afetar a medição dos extensômetros. Perfuração o pode gerar microfissuras, aumentando anisotropia e distorcendo estimativas de tensões. A presença de água subterrânea afeta os dados. Pode levar à subestimação das tensões em rochas moles.

<p>Célula CSIR, Célula CSIRO HI, Célula KX-81, Sonda Borre</p>	<p><i>In situ</i> (furos de sondagem)</p>	<p>Célula CSIR necessita lixar o fundo do furo de forma plana para posicionar corretamente a célula garantindo o centramento da ferramenta.</p> <p>CSIRO HI apresenta desempenho limitado fora do intervalo de 10°C a 40°C.</p> <p>CSIRO HI exige sobrefurações longas e intactas, difíceis em rochas fracas, estratificadas ou muito tensionadas.</p> <p>CSIRO HI possui dificuldade de uso em ambientes frios e úmidos.</p> <p>Sonda Borre, deve-se aguardar a estabilização da temperatura da rocha antes da sobrefuração.</p> <p>Sonda Borre, os medidores de deformação precisam estar perfeitamente alinhados.</p>	<p>Célula CSIR medem os seis componentes de tensão em um único furo.</p> <p>CSIRO HI determina o tensor completo de tensões em um único furo.</p> <p>CSIRO HI permite o monitoramento contínuo durante a sobrefuração.</p> <p>Célula KX-81 apresenta excelente desempenho à prova d'água</p> <p>Sonda Borre permite medições tridimensionais em furos profundos preenchidos com água (≥ 500 m).</p> <p>Sonda Borre é recuperável.</p> <p>Sonda Borre, as deformações da sobrefuração refletem o relaxamento total do núcleo, pois a rigidez dos medidores é desprezível frente à da rocha.</p> <p>Sonda Borre possui dispositivos para avaliar o efeito da temperatura.</p> <p>Sonda Borre possui bateria com armazenamento de dados superior a 10 horas.</p>	<p>Célula CSIR não é recuperável.</p> <p>A configuração padrão da célula CSIR não possibilita monitoramento contínuo das deformações.</p> <p>Tempo de cura da cola dos extensômetros da célula CSIR e CSIRO HI é longo e variável.</p> <p>Sonda Borre necessita de limpeza da área de instalação da célula.</p> <p>Sonda Borre necessita endurecimento completo do adesivo de cola antes da sobrefuração.</p>
<p>USBM gage, Sigra in situ stress tool (IST) e a célula Bonneche re</p>	<p><i>In situ</i> (furos de sondagem)</p>	<p>Sigra IST requer múltiplos furos não paralelos para determinar o tensor completo de tensões.</p> <p>Sigra IST2D assume tensões axiais pela sobrecarga em furos verticais e calcula apenas tensões horizontais.</p>	<p>Capacidade de fornecer medições de tensões com alta precisão.</p> <p>Aplicável em diversas condições geológicas, sem restrições por mecanismos de falhas.</p> <p>Células de deformação são recuperáveis e reutilizáveis em vários ensaios.</p>	<p>Resultados dependem das propriedades dos minerais em contato com os pistões do medidor.</p> <p>USBM Gage exige calibração antes e depois da instalação e é sensível a descontinuidades, heterogeneidades e granulometria da rocha.</p>

		<p>USBM <i>Gage</i> é em aço inoxidável e protegido contra corrosão, água e poeira.</p> <p>USBM <i>Gage</i> é resistente a variações de temperatura, permite calibração regular, instalação simples sem cimento ou cola, monitoramento contínuo em furos com água, e possibilita grande número de medições diárias.</p> <p>A célula <i>Bonnechere</i> é totalmente recuperável, mede continuamente deslocamentos diametrais e longitudinais durante a sobrefuração e determina o estado completo de tensões em um único furo.</p>
CSIR Doorstopper	<i>In situ</i> (furos de sondagem)	<p>Deformações são registradas antes e depois da sobrefuração, não permite monitoramento contínuo.</p> <p>Possibilita compensação térmica.</p> <p>Necessidade de apenas curtas extensões de sobrefuração.</p> <p>Possibilidade de instalação em furos de menor diâmetro.</p> <p>Maior probabilidade de sucesso em rochas relativamente fracas ou fraturadas, bem como em rochas submetidas a tensões elevadas.</p> <p>Permite a realização de 2 a 3 testes por dia</p>
		<p>CSIR <i>Doorstopper</i> requer que a extremidade do furo seja muito lisa e plana.</p> <p>CSIR <i>Doorstopper</i> pode haver falhas de colagem em furos molhados, embora adesivos modernos reduzam o problema.</p> <p>CSIR <i>Doorstopper</i> necessita de três furos para obter o estado completo de tensões.</p> <p>CSIR <i>Doorstopper</i> tem tempo de cura do adesivo varia de 1 a 20 horas.</p> <p>CSIR <i>Doorstopper</i> não permite monitoramento contínuo das deformações durante a sobrefuração no modelo padrão</p>
Compact Conical-Ended Borehole	<i>In situ</i> (furos de sondagem)	<p>Desenvolvido para medir tensões <i>in situ</i> em rochas, inclusive falhadas e fraturadas.</p>

Overcoring, CCBO			Determina o tensor de tensões a partir das deformações em um único furo.	
			Permite calcular erros associados.	
			É aplicável a rochas isotrópicas e transversamente isotrópicas.	
			Possibilita monitoramento contínuo das deformações.	
Abertura de fendas nas paredes dos furos	<i>In situ</i> (furos de sondagem)		<p>Não requer sobrefuração.</p> <p>Ensaio rápido, permitindo 10 a 15 medições por dia.</p> <p>Instrumento totalmente recuperável.</p> <p>Permite monitoramento contínuo das deformações.</p>	<p>Necessita de furos secos.</p> <p>Aplicação restrita a pequenas profundidades.</p> <p>Exige conhecimento da tensão paralela ao eixo do furo.</p>
Método de análise de deformação diametral de testemunho	Laboratório (testemunhos de sondagem)	<p>Variação circunferencial do diâmetro é muito pequena.</p> <p>Apenas a tensão diferencial (ΔS) e a orientação das tensões principais podem ser determinadas.</p> <p>O método não deve ser usado se a deformação do testemunho for significativamente influenciada por microfissuras.</p> <p>A influência dos componentes minerais na deformação diametral e na fratura durante a perfuração requer investigação adicional.</p> <p>A direção das tensões principais depende da orientação do testemunho.</p>	Pode ser utilizado como método auxiliar, em conjunto com outros métodos.	<p>Não permite medir diretamente a magnitude das tensões.</p> <p>Assume que a rocha é linear, elástica e isotrópica, o que nem sempre ocorre.”</p>

Métodos geofísicos	Laboratório (testemunhos de sondagem)	<p>Aplicação limitada dos métodos sísmicos.</p> <p>A precisão influenciada por diversos fatores e a análise complexa.</p> <p>Estimativas pelo efeito Kaiser exigem seis testemunhos em diferentes orientações para obter o tensor de tensões completo.</p>	<p>Monitoramento sísmico em mineração é uma ferramenta singular que opera de forma contínua.</p> <p>Monitoramento sísmico avalia um volume tridimensional, identifica potenciais <i>rockbursts</i>, emite alertas e permite retroanálises.</p> <p>Monitoramento sísmico é capaz de detectar fraturas em diferentes escalas, superando limitações de métodos tradicionais de monitoramento de tensões e deformações.</p> <p>Parâmetros da microssismicidade ajudam a avaliar o regime de tensões e o dano nas rochas.</p>	<p>No efeito Kaiser a rocha <i>in situ</i> pode ter sido submetida a diferentes regimes naturais de tensão.</p> <p>O testemunho foi exposto a condições distintas durante a extração.</p> <p>Pode haver dificuldade de reproduzir corretamente os testes laboratoriais.</p>
Método de recuperação de deformação	Laboratório (testemunhos de sondagem)	<p>Requer um modelo viscoelástico para representar a relaxação das deformações da rocha.</p> <p>Não é indicado para rochas ricas em minerais argilosos.</p>	<p>Quando o testemunho é orientado, são necessárias apenas três medições independentes.</p> <p>É eficiente para estimar orientações das tensões principais, especialmente em grandes profundidades e em cenários geológicos complexos.</p> <p>Os extensômetros aderem melhor à superfície das amostras, evitando áreas fraturadas.</p> <p>A temperatura das amostras é mantida constante durante as medições.</p> <p>Múltiplas amostras podem ser analisadas simultaneamente, permitindo comparações.</p> <p>Os testes são realizados rapidamente após a retirada do núcleo, preservando seu estado original e garantindo maior confiabilidade.</p> <p>O método não depende da profundidade do furo</p>	<p>A aplicação do método é afetada por diversos fatores, como variações de temperatura, desidratação das amostras, difusão de pressão nos poros, recuperação de deformações não homogêneas, anisotropia da rocha, interação com a lama de perfuração, deformações residuais, tempo de recuperação do testemunho e precisão de sua orientação.</p> <p>Se o testemunho não for orientado, o método exige instalar pelo menos seis extensômetros.</p>

			nem das condições ambientais subterrâneas.	
Alívio em grandes volumes de rochas	<i>In situ</i> e Laboratório	Os resultados dependem da precisão dos dados e das suposições adotadas durante a análise.	Supera outros métodos que analisam apenas pequenos volumes de rocha. Possui estrutura robusta para lidar com condições geológicas reais e complexas. Torna-se mais econômico quando aplicado durante a própria escavação. Estima o estado de tensões em um volume grande de rocha. Mede deformações logo após a escavação, com procedimentos simples no maciço. Possibilita medir tensões 2D, com potencial para estimar todo o campo de tensões 3D.	Exige alto custo computacional e depende fortemente da qualidade dos dados de entrada.
Observações geológicas	Base de dados	Os mecanismos que controlavam o campo de tensões no passado podem ter mudado ao longo do tempo	Adequados para fases iniciais de projetos. Podem ser usados em estudos 2D e 3D. Não exigem conhecimento prévio das propriedades deformacionais da rocha. Únicos a fornecer dados em profundidades médias ou grandes da crosta. Alternativa econômica e rápida.	Estimativa muito grosseira e de baixa confiabilidade.

O fluxograma disposto na Figura 4.1 apresenta os métodos para estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos considerando o meio de análise.

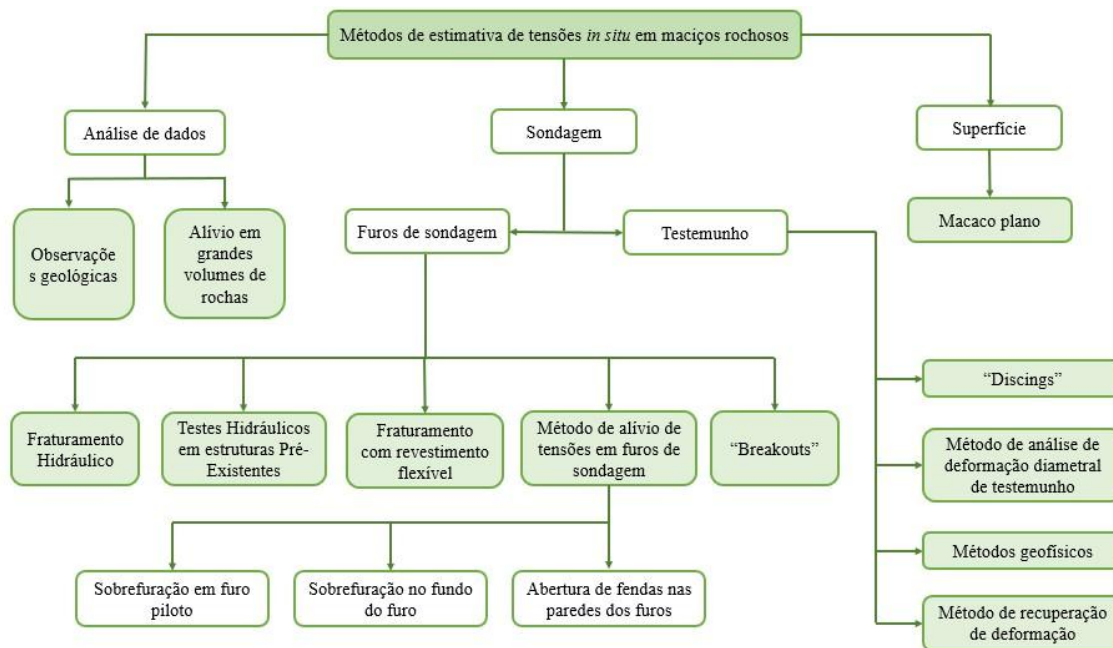


Figura 4.1 - Fluxograma dos métodos para estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos a partir do meio de análise (furos de sondagem, análise de dados e superfícies).

Para iniciar uma campanha de estimativa do estado de tensões em maciços rochosos, é fundamental, antes mesmo da definição dos métodos a serem empregados, verificar a disponibilidade de informações pré-existent sobre o regime de tensões no local. Essa verificação inclui a consulta às bases de dados globais, como o *World Stress Map*, a análise de evidências estruturais de possíveis tensões elevadas (rupturas, deslocamentos ou deslocamentos já observados) e a consideração de informações fornecidas por levantamentos e análises geológicas *in situ*.

Diante disso, no contexto de exploração mineral, realizam-se campanhas de sondagens destinadas à verificação do ambiente geológico local. Sabe-se que a execução de sondagens constitui um dos métodos mais amplamente empregados para a investigação do subsolo e, especificamente na estimativa de tensões *in situ*, representa uma importante fonte de dados. Tanto o comportamento do testemunho durante sua extração do maciço quanto as características observadas na parede do furo podem fornecer informações relevantes sobre o estado de tensões atuante. Dessa forma, a análise detalhada desses elementos contribui significativamente para a compreensão das condições *in situ* do maciço rochoso.

O fenômeno *discing* pode ser identificado ainda em campo, logo após a retirada do testemunho do barrilete e durante seu acondicionamento nas caixas. Quando essa ocorrência é observada, torna-se necessário redobrar a atenção quanto aos procedimentos operacionais adotados, uma vez que diferentes causas podem estar associadas ao aparecimento do fenômeno. É fundamental considerar, por exemplo, se a fragmentação observada resulta de condições inadequadas de operação, levando a quebras mecânicas, se reflete a presença de descontinuidades ou falhas naturais do próprio maciço rochoso, ou, ainda, se indica que a sondagem atingiu uma zona de elevadas tensões *in situ*.

Caso se cogite a presença de um elevado estado de tensões *in situ*, é possível dar continuidade ao avanço da sondagem, desde que se redobre a atenção aos aspectos operacionais mencionados anteriormente, bem como às vantagens e limitações do método de *discing* empregado, conforme apresentado na Tabela 4.1. Alternativamente, pode-se considerar a aplicação de outro método de estimativa de tensões *in situ*, com capacidade de confirmar ou refutar a hipótese levantada. Nesse contexto, a adoção de técnicas que permitam a determinação da magnitude dessas tensões pode revelar-se mais adequada para a caracterização precisa do comportamento do maciço rochoso.

A identificação do fenômeno de *discing* já fornece uma informação relevante para o projeto: o maciço encontra-se submetido a níveis elevados de tensões *in situ*. Nessas condições, intervenções no local podem estar associadas à possibilidade de ocorrência de *rockbursts*, exigindo, portanto, análises mais detalhadas e medidas preventivas específicas durante o planejamento e a execução das atividades.

A partir dessa constatação, pode-se também optar pela paralisação temporária das sondagens, de modo a permitir a inspeção da parede do furo e a verificação da presença de possíveis *breakouts*.

Caso se opte pela utilização de um método que avalie o comportamento do testemunho de sondagem em laboratório, como o método de análise de deformação diametral, o método de recuperação de deformação ou ainda métodos geofísicos aplicados ao testemunho, é imprescindível que o material seja devidamente acondicionado e encaminhado ao ensaio de forma rápida. Essa precaução visa preservar suas condições e propriedades originais do testemunho, evitando alterações que possam comprometer a representatividade dos resultados. Além disso, destaca-se a importância de registrar corretamente a orientação do testemunho no

momento de sua extração, uma vez que essa informação é essencial para a interpretação da orientação das tensões no maciço rochoso.

Em situações nas quais não é adequado considerar a tensão vertical como uma das componentes principais do estado de tensões, a utilização de métodos capazes de estimar diretamente o regime tensional tridimensional como o método de sobrefuração, pode ser a alternativa mais indicada. Contudo, torna-se indispensável realizar uma análise prévia dos testemunhos obtidos ao longo da sondagem até o ponto de ensaio, especialmente no que se refere à presença de fraturas, composição mineralógica e granulometria. Caso o maciço apresente um grau significativo de fraturamento, métodos específicos, como os Testes Hidráulicos em Fraturas Pré-Existentes, podem oferecer maior confiabilidade na determinação das tensões *in situ*, uma vez que são mais adequados às características desse tipo de meio descontínuo.

Uma vez obtidos os dados por meio dos métodos de estimativa de tensões, desde que representativos de um contexto geológico mais amplo, os projetistas podem utilizá-los como base para o desenvolvimento de modelagens numéricas. Essas modelagens permitem dar início ao projeto, auxiliando na seleção dos métodos de lavra e na definição mais eficiente e segura da disposição das estruturas.

Com o avanço das atividades e a geometria da mineração já estabelecida, ensaios como o macaco plano, realizados diretamente em superfícies expostas, podem ser empregados para verificar o estado de tensões pós-intervenção. Essa etapa é essencial para confirmar as condições previstas pelas modelagens, ajustar parâmetros de projeto e promover a otimização contínua das operações.

4.13. METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES

Inicialmente, na fase anterior à construção, recomenda-se a consideração e avaliação de métodos preliminares, mais simples e intuitivos, baseados em evidências geológicas e na análise de eventos estruturais, com o objetivo de identificar zonas potencialmente submetidas a elevados níveis de tensões, bem como a orientação dessas tensões. A partir dos dados obtidos por esses métodos iniciais, os resultados podem ser progressivamente aprimorados e refinados.

Considerando que qualquer intervenção em maciços rochosos envolve a execução de sondagens de reconhecimento, métodos que utilizam informações provenientes dessas operações podem ser incorporados ao processo de análise, tanto nos furos de sondagem quanto nos testemunhos recuperados. Entre esses métodos destacam-se a análise de *breakouts*, *discings*, métodos hidráulicos, métodos acústicos e métodos de recuperação de deformações, os quais permitem complementar, verificar e aprimorar os resultados obtidos nas análises preliminares, baseadas em métodos geofísicos.

Com base na determinação do estado de tensões por esses métodos, torna-se possível definir de forma mais adequada a orientação das estruturas subterrâneas, orientando as paredes das escavações perpendicularmente à menor tensão principal e estabelecendo o sentido de avanço das escavações preferencialmente na direção da maior tensão principal.

Após a implantação da obra, sugere-se a execução de galerias de teste, escavadas especificamente para a realização de ensaios com a menor perturbação possível das superfícies expostas, adotando-se métodos de escavação com baixo dano. Nessas galerias, recomenda-se a realização de ensaios de alívio de tensões em superfícies, como o ensaio de macaco plano, com o objetivo de confirmar os resultados previamente obtidos e promover eventuais ajustes. Adicionalmente, esses ensaios permitem verificar a validade da premissa adotada de que as tensões principais são predominantemente verticais e horizontais, condição que depende da topografia local, bem como identificar possíveis variações no campo de tensões.

A Figura 4.2 ilustra o exposto anteriormente por meio de um fluxograma que propõe uma abordagem para a avaliação do estado de tensões *in situ*.

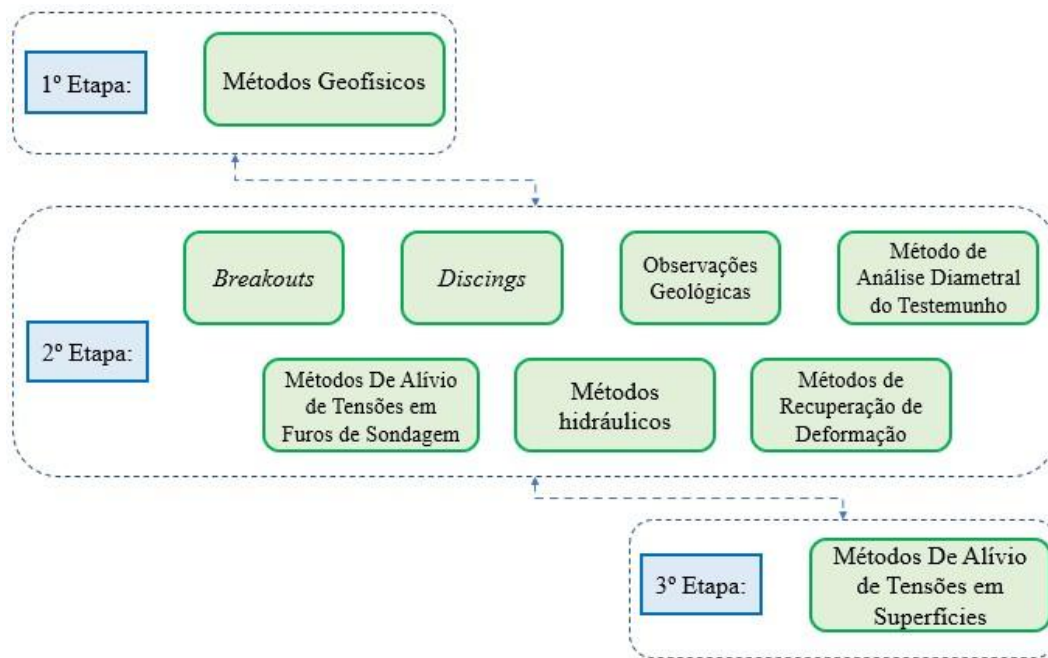


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia proposta para avaliação do estado de tensões.

A seguir, a Figura 4.3 apresenta a subdivisão dos métodos de estimativa de tensões *in situ* em maciços rochosos, considerando a condição do maciço ensaiado, classificado como fraturado ou não fraturado.

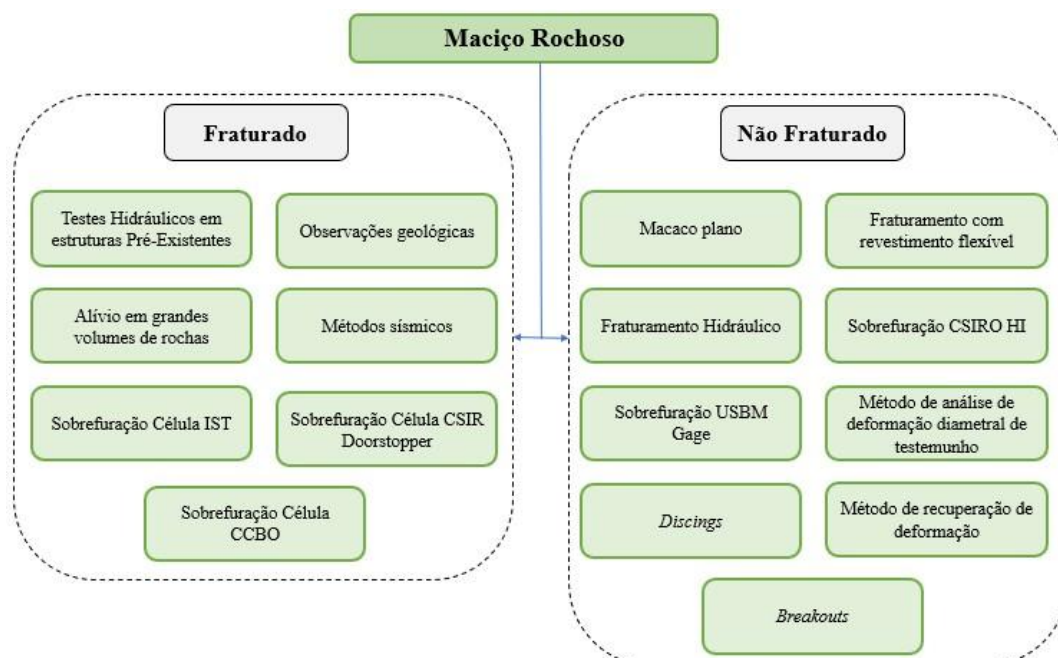


Figura 4.3 – Métodos de estimativa de tensões *in situ* considerando a condição do maciço rochoso.

CAPITULO 5. CONCLUSÕES

A avaliação das tensões *in situ* em maciços rochosos representa um desafio significativo devido à complexidade inerente desse meio, marcado por elevada heterogeneidade e influenciado por diversos fatores geológicos. Apesar disso, conhecer e caracterizar adequadamente o estado de tensões é fundamental para qualquer intervenção, em conjunto com as demais propriedades do maciço. Embora este estudo tenha sido conduzido no contexto da mineração, os princípios discutidos aplicam-se a outras operações em maciços rochosos.

No setor mineral, a redução de reservas superficiais tem conduzido ao aprofundamento das cavas, e muitos empreendimentos já se encontram em processo de transição da lavra a céu aberto para a subterrânea. Esse cenário introduz novos desafios técnicos e operacionais, exigindo abordagens de projeto mais robustas e adequadas às condições mais complexas.

A análise dos métodos apresentados evidencia que alguns já são consolidados na prática e amplamente empregados na indústria, enquanto outros ainda se encontram em desenvolvimento, embora apresentem perspectivas promissoras. Cabe ao projetista e ao planejador selecionar o método mais adequado às suas necessidades, considerando limitações técnicas, condições de execução e viabilidade econômica.

Antes da escolha metodológica, é essencial compreender os fundamentos teóricos por trás das práticas, reconhecendo as simplificações e hipóteses adotadas. A maioria dos métodos pressupõe um meio homogêneo, linear e isotrópico, o que nem sempre corresponde às características geológicas reais. Intervenções no maciço rochoso sem o devido entendimento do estado de tensões podem resultar não apenas em prejuízos econômicos, mas também em riscos significativos à segurança operacional e à vida humana. Sob a perspectiva técnica e produtiva, estimar adequadamente o estado de tensões pode contribuir para projetos mais eficientes, possibilitando maior aproveitamento do maciço e melhor retorno econômico. Assim, justifica-se a busca contínua por compreender e caracterizar o estado de tensões.

Este estudo teve como propósito avaliar métodos de estimativa das tensões *in situ*, oferecendo aos projetistas uma base inicial para tomada de decisão e destacando a relevância do tema. Procurou-se sintetizar conceitos, origens, evoluções e aplicações atuais, apontando estudos recentes e tendências. Observou-se que um único método dificilmente será suficiente para

caracterizar completamente o estado de tensões, sendo mais eficaz a integração de diferentes abordagens. Ensaio *in situ* podem ser complementados por testes laboratoriais e posteriormente integrados a modelos computacionais, resultando em caracterizações mais completas e representativas.

Também se constatou que diferentes etapas do projeto demandam diferentes métodos, e que os resultados de uma técnica podem orientar a aplicação de outras de forma complementar. A continuidade na estimativa e registro de tensões pode, ainda, contribuir para a formação de bancos de dados locais ou globais, úteis para futuras intervenções e estudos comparativos.

Por fim, considerando a complexidade do tema, reforça-se a importância de parcerias entre mineradoras, instituições de pesquisa e universidades, como estratégia para aprimorar métodos existentes e desenvolver novas alternativas para a determinação confiável das tensões *in situ* em maciços rochosos.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se a busca por fornecedores regionais, a aplicação dos métodos na prática, juntamente com o retorno de seus resultados e a realização de modelagem numérica tanto dos dados obtidos nos ensaios quanto dos ensaios em si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ADACH-PAWELUS, K.; PAWELUS, D. (2021). Influence of driving direction on the stability of a group of headings located in a field of high horizontal stresses in the Polish underground copper mines. *Energies*, MDPI, Basel, Suíça, v. 14, n. 18, 5955.
- AMADEI, B., STEPHANSSON, O., (1997). *Rock Stress and its Measurements*. Chapman & Hall. London, UK 287 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2019). ASTM D4729-19: Standard test method for *in situ* stress and modulus of deformation using the flat jack method. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4729-19>.
- ARMELIN, J. L. (2010). *Medição de tensões in situ em maciços rochosos e estruturas de concreto* (Tese de doutorado, Universidade de Brasília). Universidade de Brasília.
- BECKER, A., & DAVENPORT, C. A. (2001). Contemporary *in situ* stress determinations at three sites in Scotland and northern England. *Journal of Structural Geology*, 23(2-3), 407-419.
- BRADY, B. H. G., & BROWN, E. T. (2004). *Rock Mechanics for Underground Mining* (3rd ed.). Springer.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília: ANM, 2025. 26 p. il. Ano-base 2023. Versão 1 – abril 2025. Disponível em: <https://www.anm.gov.br>. Acesso em: 09/01/2026.
- BROWN, E. T., & HOEK, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.
- BRUDY, M., ZOBACK, M.D., FUCHS, K., RUMMEL, F. AND BAUMGARTNER, J. (1997) Estimation of the Complete Stress Tensor to 8 km Depth in the KTB Scientific Drill Holes Implications for Crustal Strength. *Journal of Geophysical Research* , 102, 18453-18475
- BUSTOS, N., & VILLAESCUSA, E. (2024). Integration of geotechnical databases for rock mass characterisation in underground mines. In 9th International Conference and Exhibition on Mass Mining (p. 231). Kiruna, Sweden, September 17–19. WA School of Mines, Curtin University / Mining 3.
- CAI, M. F., HE, M. C., & LIU, D. Y. (2002). *Rock mechanics and engineering*. Science and Technology Press: Beijing, China.
- CAI, M. F., QIAO, L., LI, C., YU, B., & WANG, S. (2000). Results of *in situ* stress measurements and their application to mining design at five Chinese metal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(3), 509-515.
- CAI, M., & PENG, H. (2011). Advance of in-situ stress measurement in China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(4), 373-384.

- CAI, M., PENG, H., & JI, H. (2008). New development of hydraulic fracturing technique for in-situ stress measurement at great depth of mines. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 15(6), 665-670.
- CAI, M.-F.; LIU, W.-D.; LI, Y. (2010). In-situ stress measurement at deep position of Linglong gold mine and distribution law of in-situ stress field in mine area. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Science Press, Beijing, China, v. 29, n. 2, p. 227–233.
- CHARRUA-GRAÇA, J. (1984). A nova célula STT e a sua interpretação. *Geotecnia*, (41), 19-26.
- CHARSLEY, A. D., MARTIN, C. D., & MCCREATH, D. R. (2003). Sleeve-fracturing limitations for measuring *in situ* stress in an anisotropic stress environment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 127-136.
- CHISTIANSOON, R. (2006). The latest development for in-situ rock stress measuring techniques. In *Proceedings of the International Symposium on in-situ Rock Stress. Trondheim# Norway - 2006* (pp. 3-10).
- CHRISTIANSOON, R., & HUDSON, J. A. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 4: quality control of rock stress estimation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1021-1025.
- COOK, N. G. W. (1976). Seismicity associated with mining. *Engineering Geology*, 10(2-4), 99-122.
- CORDOVA, D. P., ZINGANO, A. C., & GONÇALVES, Í. G. (2022). Unplanned dilution back analysis in an underground mine using numerical models. *REM-International Engineering Journal*, 75, 379-388.
- CORNET, F. H. (1988). Two examples of stress measurements by the HTPF method. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-88). ARMA.
- CORNET, F. H., WILEVEAU, Y., BERT, B., & DARCY, J. (1997). Complete stress determination with the HTPF tool in a mountainous region. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3-4), 57-e1.
- DARGAHIZARANDI, A., MASOUMI, H., HASHEMI, A., SAHA, B., & ROSHAN, H. (2025). Determination of 3D Stress State Using a Novel Integrated Diametrical Core Deformation and Ultrasonic Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(4), 4377-4401.
- DE LUCIA, V.; ERMINI, A.; GUIDO, S.; MARCHETTI, D.; GULLÌ, D.; SALVINI, R. (2025). Distinct element numerical modelling and *in situ* CSIRO HI cell data for rock slope stability assessment. *Geosciences*, MDPI, Basel, Suíça, v. 15, n. 4, p. 155.
- DENG, S., LI, J., JIANG, H., & WANG, M. (2018). Experimental and theoretical study of the fault slip events of rock masses around underground tunnels induced by external disturbances. *Engineering Geology*, 233, 191-199.

- DUNN, M. J., HARRIS, R. O., BOITSHEPO, B., & CHIWAYE, H. T. (2022). Assessing the stress field for the Jwaneng underground project. In *Caving 2022, Proceedings of the Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, Adelaide, Australia, 30 August–1 September 2022. Australian Centre for Geomechanics: Perth, Australia.
- FAIRHURST, C. (2003). Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 957-973.
- FIGUEIREDO, B., CORNET, F. H., LAMAS, L., & MURALHA, J. (2014). Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 72, 37-48.
- FOWLER, M. J. & WEIR, F. M. (2008). The Use of Borehole Breakout for Geotechnical Investigation of an Open Pit Mine. In Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin & R. Jeffrey (Eds.), *SHIRMS 2008: Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium* (pp. 541–550). Australian Centre for Geomechanics.
- FUNATO, A., & CHEN, Q. (2005). Initial stress evaluation by boring core deformation method. In *Proceedings of the 34th Symposium on Rock Mechanics, JSCE* (pp. 261-266).
- FUNATO, A., & ITO, T. (2017). A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 91, 112-118.
- FUNATO, A., ITO, T., & SHONO, T. (2012). Laboratory verification of the Diametrical Core Deformation Analysis (DCDA) developed for in-situ stress measurements. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2012). ARMA.
- GAO, G., LI, Z., & CHANG, C. (2022). Numerical simulation of diametrical core deformation and fracture induced by core drilling. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1), 59.
- GAO, G., WANG, C., & GAO, K. (2024). Stress tensor determination by modified hydraulic tests on pre-existing fractures: method and stress constraints. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(5), 1637-1648.
- GOODMAN, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- GRAY, IAN; KELOTH, RATHEESH (2025). Stresses within the area of longwall in massive strata. University of Wollongong. Conference contribution.
- HAIMSON, B. (2007). Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 157–173.
- HAIMSON, B. C., & CORNET, F. H. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 40(7-8), 1011-1020.
- HAKALA, M., HUDSON, J. A., & CHRISTIANSSON, R. (2003). Quality control of overcoring stress measurement data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1141-1159.

- HAN, J., ZHANG, H. W., LI, S., & SONG, W. H. (2012). The characteristic of *in situ* stress in outburst area of China. *Safety science*, 50(4), 878-884.
- HAST, N. (1959). The measurement of rock pressure in mines (No. 560). Norstedt.
- HEIDBACH, OLIVER; RAJABI, MOJTABA; DI GIACOMO, DOMENICO; HARRIS, JAMES; LAMMERS, STEFFI; MORAWIETZ, SOPHIA; PIERDOMINICI, SIMONA; REITER, KARSTEN; VON SPECHT, SEBASTIAN; STORCHAK, DMITRY; ZIEGLER, MORITZ O. (2025): World Stress Map 2025. GFZ Data Services.
- HERGET, G. (1973). First experiences with the CSIR triaxial strain cell for stress determinations. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 10, No. 6, pp. 509-522).
- HUDSON, J. A., & HARRISON, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles* (2nd ed.). Pergamon Press.
- HUSTRULID, W. A., & BULLOCK, R. L. (EDS.). (2001). *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- HYETT, A. J., DYKE, C. G., & HUDSON, J. A. (1986). A critical examination of basic concepts associated with the existence and measurement of *in situ* stress. In *ISRM International Symposium* (pp. ISRM-IS). ISRM.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING. (2003). *ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 2: Overcoring methods*. ISRM.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. (2003). *ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, Oxford, Reino Unido, v. 40, n. 7–8, p. 1011–1020.
- ITO, T., KUMAZAWA, A., TEZUKA, K., YOKOYAMA, T., OGAWA, K., & FUNATO, A. (2020). Experimental verification of the dual bit coring method developed for stress measurement applicable in deep and high temperature environment. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2020). ARMA.
- JANSON, T., & STIGSSON, M. (2002). Test with different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö HRL.
- KANG, S. S., NAKAMURA, N., OBARA, Y., & SUGAWARA, K. (2000). Rock stress interpretations from Mt. Torigata (Japan) based on calcite strain gauge and differential strain curve analysis. *Engineering geology*, 58(1), 35-52.
- KENT, L., BIGBY, D., COGGAN, J., & CHILTON, J. (2002). Comparison of acoustic emission and stress measurement results to evaluate the application of the Kaiser effect for stress determination in underground mines. *Stress (MPa)*, 40(20), 20.

- KUTTER, H.K. (1991) Influence of drilling method on borehole breakouts and core diskings, in Proc. 7th Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM), Aachen, Balkema, Rotterdam, Vol. 3, pp. 1659-64.
- LAKIROUHANI, A., DETOURNAY, E., & BUNGER, A. P. (2016). A reassessment of *in situ* stress determination by hydraulic fracturing. *Geophysical Journal International*, 205(3), 1859-1873.
- LAVROV, A. (2003). The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(2), 151-171.
- LEEMAN, E. R. (1964a). The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole by the doorstopper and triaxial rock stress measuring instruments. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 65(5), 254–284.
- LEEMAN, E. R. (1964b). The measurement of stress in rock. Part 1: The principles of rock stress measurements. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 64(10), 281–309.
- LEHTONEN, A., COSGROVE, J. W., HUDSON, J. A., & JOHANSSON, E. (2012). An examination of *in situ* rock stress estimation using the Kaiser effect. *Engineering Geology*, 124, 24-37.
- LERICHE, A., KALENCHUK, K. S., & DIEDERICHS, M. S. (2017). Estimation of *in situ* stress from borehole breakout for improved understanding of excavation overbreak in brittle-anisotropic rock. In *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining* (pp. 209-222). Australian Centre for Geomechanics.
- LI, P., CAI, M., MIAO, S., LI, Y., SUN, L., WANG, J., & GORJIAN, M. (2024). Comparison and evaluation of overcoring and hydraulic fracturing stress measurements. *Scientific Reports*, 14(1), 8771.
- LI, P., GUO, Q., CAI, M., & MIAO, S. (2023). Present-day state of tectonic stress and tectonization in coastal gold mine area near Laizhou Gulf, North China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 33(3), 865–888. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(23\)66152-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66152-7)
- LI, P., LIU, Y., CAI, M., MIAO, S., LI, Y., HU, Y., & GORJIAN, M. (2025). The Overcoring Technique for Precise Measurement of *In Situ* Rock Stress at Great Depths: Challenges and Solutions. *Engineering*, 46, 9-15.
- LI, P., WU, Y., & CAI, M. (2021). Implications of in-situ stress measurement in mining engineering. In *ISRM EUROCK* (pp. ISRM-EUROCK). ISRM.
- LI, Y., & MITRI, H. S. (2022). Determination of mining-induced stresses using diametral rock core deformations. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1), 80.
- LIM, S. S. (2013). In-situ stress magnitude and core diskings. University of Alberta (Canada).
- LIN, C., ZOU, D. S., & SUN, H. (2019). Exploration of measurement methods of 3D in-situ stresses in rock masses. *International Journal of Georesources and Environment-IJGE (formerly Int'l J of Geohazards and Environment)*, 5, 1-13.

- LIN, H., OH, J., MASOUMI, H., CANBULAT, I., ZHANG, C., & DOU, L. (2018). A review of *in situ* stress measurement techniques. In Proceedings of the 2018 coal operators' conference, February 7 (Vol. 9, pp. 95-102).
- LINDFORS, U., & PERMAN, F. (2007). Oskarshamn Site Investigation: Overcoring Rock Stress Measurements in Borehole KLX12A. SKB.
- LIU, F., WANG, Y., KOU, M., & LIANG, C. (2024). Applications of microseismic monitoring technique in coal mines: A state-of-the-art review. *Applied Sciences*, 14(4), 1509.
- LJUNGGREN, C., & STEPHANSSON, O. (1986). Sleeve fracturing-a borehole technique for in-situ determination of rock deformability and rock stresses. In ISRM International Symposium (pp. ISRM-IS). ISRM.
- LJUNGGREN, C., CHANG, Y., JANSON, T., & CHRISTIANSSON, R. (2003). An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 975-989.
- LU, M., LI, C. C., KJORHOLT, H., & DAHLE, H. (2006). In-Situ Rock Stress: International Symposium on In-Situ Rock Stress, Trondheim, Norway, 19-21 June 2006. CRC Press.
- MACGREGOR, S., & ENG, B. (2003). Definition of stress regimes at borehole, mine and regional scale in the Sydney Basin through breakout analysis in. In Proceedings of the 35th Sydney Basin Symposium "Advances in the study of the Sydney Basin September 29-30, 2003, University of Wollongong, Australia (pp. 223-227).
- MAGALHÃES, F. S. (1999). Tensões regionais e locais: casos no território brasileiro e padrão geral. Tesis Doctoral, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos.
- MAJEED, Y., ABBAS, N., & EMAD, M. Z. (2023). Stability evaluation of room-and-pillar rock salt mines by using a flat jack technique – A case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 123(6), 287-298.
- MARTIN, C. D., & CHRISTIANSSON, R. C. (1991). Overcoring in highly stressed granite: comparison of USBM and modified CSIR devices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 24(4), 207-235.
- MARTIN, C. D., READ, R. S., & LANG, P. A. (1990). Seven years of *in situ* stress measurements at the URL An overview. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (pp. ARMA-90). ARMA.
- MERRILL, R. (1967). A borehole deformation gage for *in situ* measurement of rock stress. US Bureau of Mines Report of Investigations 6898.
- OGASAWARA, H., KATO, H., HOFMANN, G., & DE BRUIN, P. (2012). Trial of the BX conical-ended borehole overcoring stress measurement technique. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(8), 749-754.
- OIKAWA, Y., MATSUNAGA, I., & YAMAGUCHI, T. (1993). Differential strain curve analysis to estimate the stress state of the Hijiori hot dry rock field, Japan. *International*

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts;(United Kingdom), 30(7).

- PANITZ, J. S. P., FIGUEIREDO, R. P., TAMMERIK, G. R., & POSSAS, C. R. (2025). Modelo de tensões *in situ* a partir de avaliações de ocorrência de *discing* – análise de caso. In 18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- PASQUALE, G., DE MATTEIS, R., ROMEO, A., & MARESCA, R. (2009). Earthquake focal mechanisms and stress inversion in the Irpinia Region (southern Italy). *Journal of seismology*, 13(1), 107-124.
- PENIDO, H. A., FIGUEIREDO, R. P., ASSIS, A. P., TORRES, V. F. N., & GUIMARÃES, A. (2020). Método de fraturamento hidráulico: aspectos operacionais e dificuldades encontradas na aplicação em rochas itabiríticas. In XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 15–18 de setembro, Campinas, SP.
- PENIDO, Henrique de Andrade. Aplicação de diferentes metodologias de determinação de tensão *in situ* em maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero Brasileiro. 2021. 231 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- PINTO, J., L. (1989). Estado de Tensão em Maciços Rochosos – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Relatório 14/90 - NFR– Lisboa: 1-31.
- REBULLI, D. B. (2024). Micro-Seismic Monitoring in Mines Benefits and Limitations. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (p. D041S045R001). ARMA.
- ROCHA, M., SILVERIO, A., PEDRO, J. O., & DELGADO, J. S. (1974). A new development of the LNEC stress tensor gauge (No. 455 Memoria).
- RUTQVIST, J., TSANG, C. F., & STEPHANSSON, O. (2000). Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1-2), 107-120.
- SAKURAI, S., & SHIMIZU, N. (1986). Initial stress back analyzed from displacements due to underground excavations. In ISRM International Symposium (pp. ISRM-IS). ISRM.
- SANADA, H., HIKIMA, R., TANNO, T., MATSUI, H., & SATO, T. (2013). Application of differential strain curve analysis to the Toki Granite for *in situ* stress determination at the Mizunami underground research laboratory, Japan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59, 50-56.
- SANO, O., ITO, H., HIRATA, A., & MIZUTA, Y. (2005). Review of methods of measuring stress and its variations. *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 80, 87-103.
- SARWADE, D. V., MISHRA, K. K., KAPOOR, V. K., & KUMAR, N. (2009). Stress measurement in rock mass. In Indian Geotechnical Conference Contributory Papers (pp. 233-237).

- SAZID, M., HUSSEIN, K., & ABUDURMAN, K. (2023). Rock stress measurement methods in rock mechanics—a brief overview. *World Journal of Engineering and Technology*, 11(2), 252-272.
- SCOTT, D. F. (2004). Geophysical methods to detect stress in underground mines (Vol. 9661). US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Spokane Research Laboratory.
- SJÖBERG, J., & KLASSON, H. (2003). Stress measurements in deep boreholes using the Borre (SSPB) probe. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1205-1223.
- SJOBERG, J., BERTILSSON, R., & CHRISTIANSSON, R. (2008). Overcoring in Deep Surface Boreholes-Recent Experiences and Lessons for the Future. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-08). ARMA.
- STEPHANSSON, O. (1983). Rock stress measurement by sleeve fracturing. In *ISRM Congress* (pp. ISRM-5CONGRESS). ISRM.
- SUGAWARA, K., & OBARA, Y. (1998). Measuring *in situ* rock stress by means of the compact conical-ended borehole over-coring (CCBO) technique. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kumamoto University*, 43(2), 19–35.
- SUN, D., CHEN, Q., LI, A. W., & YANG, Y. (2020). Anelastic strain recovery *in situ* stress measurement method and its application prospect in underground mines. In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 570, No. 4, p. 042021). IOP Publishing.
- SUN, D., ZHANG, C., ZHANG, S., XU, J., TAO, Z., WU, M., ... & HE, M. (2025). Hydraulic Fracturing In-Situ Stress Measurements and Large Deformation Evaluation of 1000 m-Deep Soft Rock Roadway in Jinchuan No. 2 Mine, Northwestern China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(3), 2781-2801.
- SUN, Y. L., & PENG, S. S. (1989). Development of in-situ stress measurement technique using ultrasonic wave attenuation method-A progress report. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-89). ARMA.
- TEUFEL, L. W. (1993). Determination of *in situ* stress from partial anelastic strain recovery measurements of oriented cores from deep boreholes. In *US symposium on rock mechanics*. 34.
- TIAN, J., & WANG, E. (2006). Ultrasonic method for measuring in-situ stress based on acoustoelasticity theory. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(2), 3719-3724.
- TROPIA, I. R., & FIGUEIREDO, R. P. (2015). *In situ* stress analysis of the Cuiabá Mine – Sabará – Minas Gerais, Brazil. *Geotecnia*, (133), 63–72. <https://doi.org/10.24849/j.geot.2015.133.05>

- TU'UA, J. W., ARIF, I., WIDODO, N. P., & WIDIJANTO, E. (2016). Core disk analysis to characterize potential high horizontal stress in open pit mine. In Proceedings of the 9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS9), Bali, Indonesia, October 18–20, 2016.
- TUNCAY, E., & OBARA, Y. (2012). Comparison of stresses obtained from acoustic emission and compact conical-ended borehole overcoring techniques and an evaluation of the Kaiser effect level. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2), 367-377.
- VINUEZA, G. (1998). Determination of Stresses in Rock Masses by the Borehole Flat Jack technique – Numeric Modeling and Pioneer Field Tests. Doktor der Naturwissenschaften Dissertation, Geowissenschaftliche Fakultät, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Deutschland, 162 p.
- WANG, J., LIU, Y., GUO, Z. B., PANG, J. W., & LIU, B. (2013). Measurement and the distribution law of *in situ* stresses of tingnan coal mine. *Applied Mechanics and Materials*, 275, 282-285.
- WANG, L. J., SUN, D. S., LIN, W., CUI, J. W., PENG, H., GAO, L., ... & QIAO, Z. J. (2012). Anelastic Strain Recovery Method to Determine In-situ Stresses and an Application Example. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(3), 333-342.
- WANG, M., CAI, M., MALONEY, S., & DUNN, M. (2025). Determination of mine-wide *in situ* stress using numerical back analysis: a case study of Jwaneng mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 194, 106235.
- WILES, T. D., VILLAESCUSA, E., & WINDSOR, C. R. (2004). Rock reinforcement design for overstressed rock using threedimensional numerical modelling. In 5th International Symposium on Ground Support, Perth, Australia (pp. 483-489).
- YAN, X., XU, R., ZHAN, K., WEN, X., WANG, C., LI, Z., & ZHANG, Q. (2024). Inversion of mining-induced stress field based on focal mechanism solutions: a case study of the 63upper06 working face in Dongtan Coal Mine. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1405154.
- YANG, X., PANG, J., LOU, H., & FAN, L. (2015). Characteristics of *in situ* stress field at Qingshui coal mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(3), 497-501.
- ZANG, A. & STEPHANSSON, O. (2010). *Stress Field of the Earth's Crust*. Dordrecht: Springer.
- ZHANG, Y., JI, H., & XU, H. (2022). Study on the law of rock anelastic recovery and the characteristics of *in situ* stress field of 2000 m deep stratum in metal mines of coastal area. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 2152814.
- ZHOU, Q., LIU, D., & LIN, X. (2022). Pre-evaluation of fault stability for underground mining based on geomechanical fault-slip analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 400-413.
- ZOBACK, M. L. (1992). First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11703-11728.

ZOBACK, M. L.; ZOBACK, M. D.; ADAMS, J.; ASSUMPÇÃO, M.; BELL, S.; BERGMAN, E. A.; BLÜMLING, P.; BRERETON, N. R.; DENHAM, D.; DING, J.; FUCHS, K.; GAY, N.; GREGERSEN, S.; GUPTA, H. K.; GVISHIANI, A.; JACOB, K.; KLEIN, R.; KNOLL, P.; MAGEE, M.; MERCIER, J.-L.; MÜLLER, B.; PAQUIN, C.; RAJENDRAN, K.; STEPHENSON, R.; SUTER, M.; UDIAS, A.; XU, Z. H. (1989). Global patterns of tectonic stress. *Nature*, London, v. 341, n. 6240, p. 291–298.