

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS**

ALEXANDRE ASSUNÇÃO GONTIJO



Orientador: Prof. Dr. Romero Cesar Gomes

**OURO PRETO
2017**

G641p

Gontijo, Alexandre Assuncao.

Proposta e desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de convergência em ambientes subterrâneos [manuscrito] / Alexandre Assuncao Gontijo. - 2017.

104f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Romero Cesar Gomes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Minas e recursos minerais . 2. Mecânica de rochas. 3. Geodinâmica. I. Gomes, Romero Cesar. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

PROPOSTA E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE CONVERGÊNCIA PARA AMBIENTES SUBTERRÂNEOS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração em *Geotecnia Aplicada à Mineração*.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 02 de junho de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Romero César Gomes (Orientador – UFOP)



Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (UFOP)



Prof. Dr. Paulo André Charbel (IFG)

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar saúde, força, coragem, perseverança, e me guiar pelos caminhos da verdade e respeito. Agradeço também pelas oportunidades apresentadas a mim e, principalmente, por me honrar com sua presença.

Aos meus pais José Otávio e Rosa, e meu irmão Ricardo, pelo apoio e interesse em todas as etapas de minha vida, além de torcerem sempre, para tudo dar certo!

À Paulinda pela amável presença em minha vida, sua companhia, torcida, apoio, orientação, além de ser um porto seguro em todos os momentos de minha vida. Agradeço também por ter me presenteado com dois filhos maravilhosos, José e Clara. Amo Todos vocês!

A meus familiares e amigos pela torcida e pela sempre preocupação com meu bem-estar.

Ao Professor Romero César Gomes, pela forma agradável de conduzir sua orientação, pela amizade, confiança e por acreditar em mim, com toda empolgação durante o transcorrer deste trabalho.

Aos amigos da AERON e MecRoc pela imensa ajuda e amizade; a parceria de vocês foi preciosa.

Agradeço a AngloGold Ashanti, a Votorantim Metais, a Anglo American e a Vale pela disponibilidade dos dados e dos trabalhos realizados.

RESUMO

Este trabalho visa apresentar um método para a medição de convergência, utilizando sensores óticos em ambientes subterrâneos tais como as cavidades naturais, galerias de mineração e túneis. A metodologia apresentada visa inovar procedimentos de controle de convergência já existentes, proporcionando maior segurança na coleta dos dados e reduzindo a exposição humana em ambientes de elevado risco geotécnico. O sistema é baseado na utilização de um sensor ótico de deslocamento, conectado a um sistema de aquisição de dados, de forma a permitir o monitoramento da convergência em tempo real. A metodologia e os dispositivos adotados estão inseridos no chamado Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha (SMDR). Além da exposição e discussão da metodologia proposta, são apresentados os resultados obtidos em três aplicações práticas do SMDR – uma cavidade natural e duas aplicações em minas subterrâneas, comparativamente aos métodos convencionais. Os resultados obtidos demonstram que a tecnologia proposta foi capaz de caracterizar, de forma muito mais detalhada e abrangente, os deslocamentos ocorridos num ambiente subterrâneo.

Palavras-chave: Mineração, Cavidades, Instrumentação, Monitoramento, Convergência

ABSTRACT

This research aims to present a method for the measurement of convergence, using optical sensors in underground environments such as natural cavities, mining galleries and tunnels. The methodology presented aims to innovate existing convergence control procedures, providing greater security in data collection and reducing human exposure in high geotechnical risk environments. The system is based on the use of an optical displacement sensor, connected to a data acquisition system, in order to allow real-time convergence monitoring. The methodology and adopted devices are part of the so-called System of Rock Dynamics Monitoring (SRDM). In addition to the discussion, the results obtained in three practical applications of SDMR - a natural cavity and two applications in underground mines, compared to conventional methods, are presented. The results show that the proposed technology was able to characterize, in a much more detailed and comprehensive way, the displacements occurred in an underground environment.

Key words: Mining, Cavities, Instrumentation, Monitoring, Convergence

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função da dinâmica dos sedimentos.	56
Tabela 4.2 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho do vão.	57
Tabela 4.3 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função do formato dos cortes.	59
Tabela 4.4 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função dos mecanismos de ruptura.	60
Tabela 5.1 - Taxas de Aquisição de dados do SMDR e da medição direta.	72
Tabela 5.2 - Erros Relativos dos dados do SMDR e da medição direta.	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Operação mineira restrita nos avanços que existem cavidades naturais no sequenciamento de lavras - Dias, C. (2012).	3
Figura 2.1 - Esquema da instrumentação in situ tipo overcoring - Tropa (2013).....	8
Figura 2.2 - Variação da direção das tensões in situ em uma mina subterrânea em operação - Hills e Walton (2010).	9
Figura 2.3 - Extensômetro MPBX instalado e seus pontos de ancoragem - Hyett et al (1992).....	10
Figura 2.4 - Extensômetro instalado em Hang Wall de um realce na Mina Cuiabá – AngloGold Ashanti - Cota (2011).	11
Figura 2.5 - Distribuição dos sensores para monitoramento com metodologia de convergência invertida -Hyett (1992).	11
Figura 2.6 - Princípio geral de funcionamento do TDR - Dowding (1985).	12
Figura 2.7 - Medidor de descontinuidades, Crackmeter - Geokon (2016).	13
Figura 2.8 - Stress meter instalado - Geokon (2016).....	14
Figura 2.9 (A) - Destaque da nuvem de pontos; (B) Modelos computacionais; (C) Trecho escaneado – possibilidade de quantificar as descontinuidades - Cacciari & Futai (2014).	15
Figura 2.10 - Controle de escavação: qualidade da detonação - Fekete & Diederichs (2010).....	15
Figura 2.11 - Exemplo de padrões operacionais de medições de convergência em escavação subterrânea.....	16
Figura 2.12 - Representação do arco compressivo no concreto projetado - Hadjigeorgiou & Potvin (2011) apud Brito, (2015).....	17
Figura 2.13 - Mecanismos de estabilização por intertravamento (A) Adesão da interface limitando deslocamentos (B) Resistência de cisalhamento entre concreto e rocha para concreto com baixa resistência de aderência. (C) Penetração de concreto nas trincas, aumentando a restrição de movimento. (D) Suporte de quebras por tensão quando aplicada na fase inicial do processo, inibe o movimento progressivo. (E) resistência ao cisalhamento puro do concreto (F) Pequenas espessuras de concreto promovem perda de adesão e conseqüente esforço por tração e tração na flexão - Stacey & Orlepp (2007). 18	
Figura 2.14 - Mecanismo tipo Basket - Stacey & Orlepp (2007).	19
Figura 2.15 - Ruptura por tração/tração na flexão resultante de resistência insuficiente de aderência entre concreto e escavação - Kutcha (2002).....	19
Figura 2.16 - Modo de ruptura esquemático - Morton et al. (2008); apud Brito (2015).20	
Figura 2.17 - Célula de carga instalada no maciço rochoso anteriormente ao lançamento do concreto projetado - Geokon (2016).	20
Figura 2.18 - Ilustração da distribuição das células de carga no concreto posterior ao lançamento - Geokon (2016).	21

Figura 2.19 - Diferentes cabos simples/comum e cabos com bulbos simples/duplos - Hutchinson & Diederichs (1996).	21
Figura 2.20 - Diferença de resistência entre cabos simples/comum e cabos com bulbos simples e bulbos duplos em 650 mm de ancoragem - Hutchinson & Diederichs (1996).	22
Figura 2.21 - Projeto de cabos para uma área de realce em uma mina subterrânea - Cota (2011).	23
Figura 2.22 - Cabo instrumentado internamente na perfuração e seu funcionamento mecânico pontual - YieldPoint (2016).	23
Figura 2.23 - Tirante com as ranhuras laterais para instalação da fibra ótica - Hyett & Mitri (2012).	24
Figura 2.24 - Exemplo de análise de estabilidade por equilíbrio limite utilizando o programa Unwedge, ilustrando potencial de cunha e os reforços necessários para a estabilização - Hyett & Mitri (2012).	25
Figura 2.25 - Ensaio de laboratório com aplicação de esforço cisalhante no tirante - Hyett & Mitri (2012).	26
Figura 2.26 - Esforços cisalhantes mobilizados em um tirante instrumentado - Hyett (2012).	26
Figura 2.27 - Esforços em tirantes instrumentados após abertura da escavação - Hyett (2012).	27
Figura 2.28 - Ilustração dos sismogramas dos três eixos de um geofone.	29
Figura 2.29 - Geofone de sacrifício e a distribuição dos sensores internos.	29
Figura 2.30 - Ensaio de arrancamento em tirantes instalados com grout químico e exemplos de resultados de testes em campo - Votorantim Metais (2016).	31
Figura 2.31 - Fluxograma do processo de teste de arrancamento – ISRM (1981).	32
Figura 2.32 - A) visualização do contato litológico entre xisto e filito carbonoso; B) cisalhamento entre a xistosidade. Imagens de furos realizados na mina Cuiabá, Sabará-MG - Cota (2010).	33
Figura 2.33 - Monitoramento microsísmico em minerações subterrâneas - Mendecki et al. (2010).	35
Figura 3.1 - Comportamento das tensões verticais e horizontais antes e após a abertura de uma escavação e deslocamentos radiais associados - modificado de Silva (2015).	37
Figura 3.2 - Distribuição das zonas do maciço rochoso: sem danos, fraturada e plastificada - Lopez (2012).	37
Figura 3.3 - Curva de Reação do Maciço e Curva Característica do Suporte - modificado de Silva (2015).	38
Figura 3.4 - Comportamento da deformação/deslocamento em torno, no maciço rochoso, da construção de um túnel - Carranza-Torres (2004).	39
Figura 3.5 - Realces de mina próximos a escavações permanentes.	40
Figura 3.6 - Central de processamento / datalogger e locais de instalação dos sensores – MecRoc (2016).	42

Figura 3.7 - Medidores de Convergência a laser – MecRoc (2016).	43
Figura 3.8 - Sensor de Vibração (geofone) Triaxial – MecRoc (2016).	43
Figura 3.9 - Sensor de Temperatura e Umidade do SMDR – MecRoc (2016).	44
Figura 3.10 - Telas e dados do software do SMDR – MecRoc (2016).	45
Figura 3.11 - Suporte para fixação do sensor laser de convergência.	46
Figura 3.12 - Encaixe do sensor de convergência ao suporte de fixação.	46
Figura 3.13 - Montagem do refletor do sensor laser no suporte de fixação.	47
Figura 3.14 - Seleção inicial do sensor de convergência.	48
Figura 3.15 - Configuração inicial do sensor de convergência.	49
Figura 3.16 - Interface Gráfica – software SMDR.	50
Figura 3.17 - Cabos de comunicação entre central de processamento e computador.	50
Figura 3.18 - Ajustes de convergência dos sensores.	51
Figura 3.19 - Interface apresentando dados de convergência.	51
Figura 3.20 - Dados de convergência e momentos exatos que ocorreram vibrações coletadas pelo SMDR.	52
Figura 4.1 - Planta baixa da cavidade em estudo - Auler (2011).	55
Figura 4.2 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função da dinâmica dos sedimentos - Gontijo el al., (2016a).	57
Figura 4.3 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho dos vãos - Gontijo el al., (2016a).	58
Figura 4.4 - Exemplo dos tipos de cortes existentes na cavidade.	58
Figura 4.5 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho dos vãos - Gontijo el al., (2016a).	59
Figura 4.6 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função dos mecanismos de ruptura - Gontijo el al., (2016a).	60
Figura 4.7 - Zoneamento dos sinais de instabilidade da cavidade - Gontijo el al., (2016a).	61
Figura 4.8 - Zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade - Gontijo el al., (2016a).	61
Figura 4.9 - Bloco de canga isolado por descontinuidades e instrumentado com barra telescópica - Gontijo el al., (2016a).	64
Figura 4.10 - Esquema detalhado do dispositivo em barra telescópica.	65
Figura 4.11 - Sensores de vibração - geofone (esquerda) e de deslocamento (direita) fixados nas paredes da cavidade com gesso - Gontijo el al., (2016a).	65
Figura 4.12 - Fonte de alimentação e central de armazenamento de dados instalados na proximidade da entrada da cavidade - Gontijo el al., (2016a).	66
Figura 4.13 - Ruído do sensor de deslocamento com variação cíclica de baixa amplitude.	66

Figura 4.14 - Exemplo do evento de vibração registrado em 22/12/14 às 18:52:20h. ...	67
Figura 5.1 - Localização da instalação do sistema SMDR na Mina Cuiabá - Gontijo et al., (2014).....	69
Figura 5.2 - Pilar entre Realce e galeria onde foi instalado o SMDR - Gontijo et al., (2014).	70
Figura 5.3 - Galeria de instalação do SMDR juntamente com 03 seções de convergência convencionais utilizadas pela Mina Cuiabá - Gontijo et al., (2014).....	70
Figura 5.4 - Operação de Medidas de Convergência.....	71
Figura 5.5 - Resultados das medições de campo.	71
Figura 5.6 - SMDR instalado na lateral da escavação; sensor ótico fixado com resina de poliéster.....	73
Figura 5.7 - Dados filtrados dos deslocamentos medidos na seção.....	73
Figura 5.8 - Dados de temperatura (a) e de umidade (b) da seção monitorada.	74
Figura 5.9 - Classes geomecânicas dos maciços rochosos da galeria estudada.....	76
Figura 5.10 - Fatores de segurança dos pilares existentes na galeria.	78
Figura 5.11 - Plano de otimização do arranjo dos pilares da galeria.	79
Figura 5.12 - Pontos de monitoramento de convergência.	79
Figura 5.13 - Instalação do refletor do sensor de convergência no teto da galeria.....	80
Figura 5.14 - Fase de aquisição dos dados em campo.	80
Figura 5.15 - Resultados do monitoramento de convergência da galeria.	81

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Contextualização e justificativa do estudo	1
1.2 Objetivos e metodologia adotada	4
1.3 Estruturação do trabalho	5
CAPÍTULO 2	6
INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS.....	6
2.1 Introdução	6
2.2 Medições de tensões in situ por Overcoring	7
2.3 Extensômetros	9
2.4 TDR – Time Domain Reflectometer	12
2.5 Medidor de trincas (Crackmeter)	13
2.6 Stress meter	13
2.7 Scanner a laser 3D.....	14
2.8 Monitoramento de convergência.....	15
2.9 Célula de carga – Concreto projetado	16
2.10 Sistemas de reforço instrumentado	21
2.10.1 Cabo SMART (Stretch Measurement Assess Reinforcement Tension) ..	21
2.10.2 Tirante Instrumentado	23
2.11 Análises de danos causados por vibrações induzidas por detonação	27
2.11.1 Ensaios de arrancamento (Pull Tests).....	30
2.11.2 Microcâmera	33
2.11.3 Microssísmica	34
CAPÍTULO 3	36
PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA PARA AMBIENTES SUBTERRÂNEOS.....	36
3.1 Contextualização	36
3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DINÂMICA DE ROCHAS	41
3.2.1 Sensores do Sistema Proposto	41
3.2.2 Sistema de Monitoramento proposto.....	45
3.2.3 Sequência de Montagem do Sensor de Convergência	46
3.2.4 Instalação do Sensor de Convergência no Ambiente Subterrâneo.....	47

3.2.5	Configuração dos parâmetros do sensor ótico.....	47
3.2.6	Interface Gráfica.....	49
3.3	Ajustes e análises dos dados de convergência	50
CAPÍTULO 4	53
ESTUDO DE CASO I – PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE UMA CAVIDADE NATURAL.....		53
4.1	Localização da cavidade	53
4.2	Características geológicas e espeleológicas locais.....	54
4.3	Caracterização e zoneamento geotécnico da cavidade.....	55
4.4	Instrumentação geotécnica instalada.....	63
4.5	RESULTADOS DO MONITORAMENTO DA CAVIDADE.....	66
CAPÍTULO 5	69
ESTUDOS DE CASO II – PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM MINAS SUBTERRÂNEAS.....		69
5.1	Monitoramento de convergência em galeria	69
5.2	Monitoramento em área de lavra com recuperação de pilares	74
CAPÍTULO 6	82
CONCLUSÕES E SUGESTÕES COMPLEMENTARES		82
6.1	Introdução	82
6.2	Conclusões	82
3.2.7	Importância de um Plano de Instrumentação Geomecânica	82
3.2.8	Sistemas de Convergência.....	83
3.2.9	Desenvolvimento Tecnológico.....	83
6.3	Estudos complementares	84
3.2.10	Implantar o SMDR em monitoramentos remotos / tempo real.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		85

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A história da escavação subterrânea é considerada como a busca da humanidade por soluções para os desafios da melhoria de qualidade de vida. Os engenheiros romanos projetaram túneis que entregavam água às cidades áridas do Império, criando assim as condições para a sua prosperidade. As cidades subterrâneas da Capadócia são um excelente exemplo da longevidade da construção em pedra. As estruturas de culto subterrâneo do antigo Egito asseguram que a engenharia de escavação subterrânea existia desde épocas remotas. Segundo Moreira (2009), as catacumbas de Roma, Nápoles e Paris ou os labirintos e as passagens misteriosas dos castelos medievais são outros exemplos de que a humanidade sempre se esforçou para utilizar o espaço subterrâneo com objetivos de praticidade, dada a sua sensibilização para a segurança e longevidade deste tipo de construção.

Conhecer e entender geotecnicamente os ambientes subterrâneos tem sido um grande desafio mundial. Para esse trabalho, subdividiu-se esses ambientes em escavações subterrâneas (túneis e minerações) e em cavidades naturais, visto que cada um destes ambientes requer estudos e análises distintas.

No caso dos túneis, a necessidade de construí-los torna-se fundamental a fim de otimizar os espaços urbanos e rodoviários enquanto que, nas minerações, o foco é reduzir passivos ambientais e buscar minerais que se tornam mais escassos na superfície, propiciando um desenvolvimento de atividades subterrâneas com profundidades consideráveis. Nessas escavações, garantir a estabilidade requer uma investigação geomecânica detalhada sobre o maciço rochoso (contínuo/descontínuo), desde qualidade, resistência mecânica das rochas, direção das tensões, performance do desmonte, tipo de suportes, mecanismos de ruptura, definição de estruturas geotécnicas e o monitoramento geomecânico das aberturas e vãos (Gama, 2004).

O grande número de obras subterrâneas, principalmente urbanas, em execução no mundo podem gerar acidentes, e, para evitá-los ou minimizar seus impactos, é necessário seguir uma série de critérios, como os que estão expostos no Código de Prática para o Gerenciamento de Riscos em Obras de Túneis, iniciativa do *The International Tunnelling Insurance Group* (ITIG - Grupo internacional de seguros de tuneis, ligado a *International Tunnelling Association* (ITA), das mais relevantes para se alcançar maior segurança neste tipo de obra de engenharia.

Nas minerações, as normativas seguidas são recomendações de órgãos fiscalizadores internos de cada país que atuam, de forma sistemática e sequencial, desde a pesquisa mineral até a liberação efetiva operacional dos empreendimentos.

Em relação às cavidades naturais subterrâneas, há pouca informação disponível na literatura sobre análises de estabilidade; e um dos principais métodos de acompanhar e controlar quaisquer danos ocasionados pelas operações mineiras nas proximidades, além de um mapeamento geológico-geotécnico e uma caracterização morfológica e geométrica da cavidade, é a utilização de sismógrafos de engenharia, realizando o controle de vibrações induzidas pelo desmonte de rocha.

Desde 15 de junho de 1990, minerações com operações nas proximidades de cavernas naturais devem seguir a Portaria do IBAMA Nº 887, ou seja, são proibidos desmatamentos, queimadas, uso de solo e subsolo ou ações de qualquer natureza que coloquem em risco as cavidades naturais subterrâneas e sua área de influência, a qual compreende os recursos ambientais, superficiais e subterrâneos, dos quais dependam sua integridade física ou seu equilíbrio ecológico.

A Resolução CONAMA Nº 347/2004, estabelece que, na ausência de estudos específicos que delimitem a área de influência no entorno das cavidades, pelo princípio de precaução, fica definido que o raio mínimo de proteção em torno da cavidade será de 250 metros, embora essa medida tenha sido estabelecida aparentemente com base em meras suposições de limites. Tal condicionante, entretanto, impõe severas restrições aos planos de sequenciamento da lavra, o que pode gerar comprometimento e perdas significativas em termos do aproveitamento econômico de uma jazida (Figura 1.1).

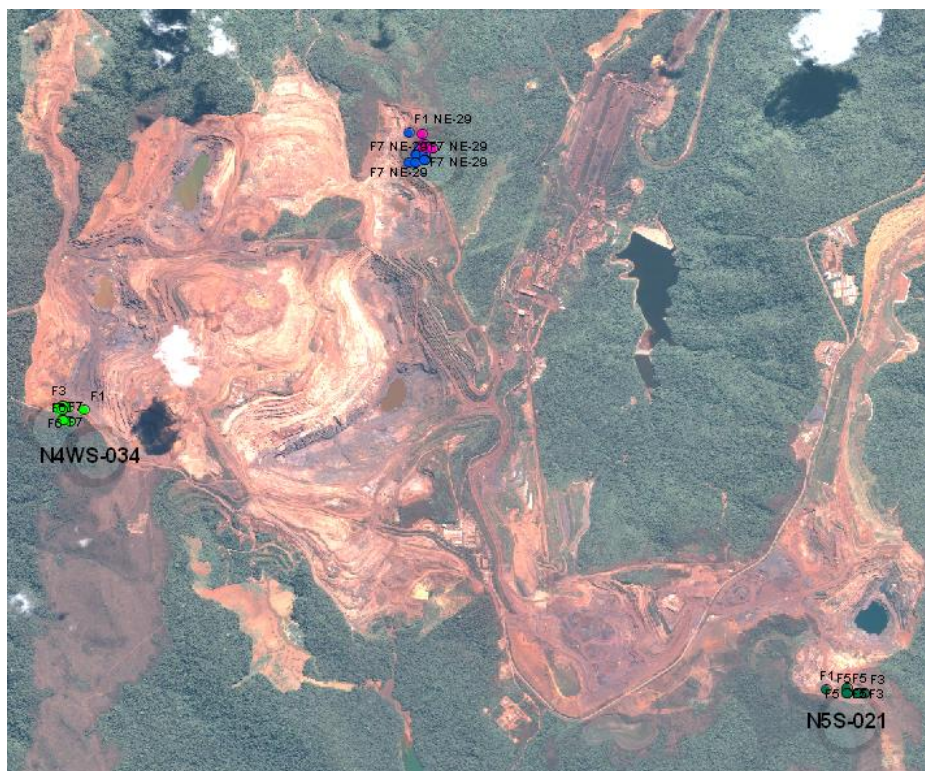


Figura 1.1 - Operação mineira restrita nos avanços que existem cavidades naturais no sequenciamento de lavras - Dias, C. (2012).

Para a garantia do controle desses ambientes subterrâneos, monitoramentos são executados de forma discreta ou contínua. Monitoramentos discretos, ou seja, coleta manual de dados tem perdido cada vez mais seu espaço nesses empreendimentos de engenharia para monitoramentos contínuos *on-line*. Apesar de ser um investimento inicial superior à instrumentação manual, a eficácia e integração das informações são indiscutivelmente mais consistentes e abrangentes.

Neste trabalho, são descritos, inicialmente, os principais sistemas de monitoramento geomecânicos de ambientes subterrâneos utilizados, atualmente, para se obter um monitoramento mais efetivo das frentes de escavação e subsidiar tomadas de decisão de curto prazo. Adicionalmente, buscando ampliar e facilitar o monitoramento em ambientes subterrâneos, propõe-se nessa dissertação o uso de uma nova tecnologia, baseada na aquisição contínua de sinais de sensores desenvolvidos para este fim. Este estudo apresentará um método para monitoramento de ambientes subterrâneos, o desenvolvimento de um sistema para tal e alguns resultados de testes em campo utilizando o sistema proposto.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA ADOTADA

Como objetivo principal, esse trabalho visa apresentar uma nova tecnologia desenvolvida para monitoramento de convergência em ambientes subterrâneos. Será detalhado o equipamento desenvolvido, baseado em sensores óticos conectados a um sistema de aquisição de dados do tipo contínuo, com armazenamento local das informações e possibilidade de envio remoto.

Serão apresentados resultados obtidos em testes realizados com o sistema desenvolvido, o chamado SMDR (Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha), em escavações subterrâneas, utilizando processos tradicionais para validação/comparação dos resultados e em cavernas naturais, assim como discutir as vantagens de um monitoramento contínuo perante as técnicas convencionais.

O estudo foi desenvolvido a partir do entendimento das dificuldades operacionais de um monitoramento de convergência em ambientes subterrâneos. A ideia principal é evitar a exposição de pessoal a realização deste monitoramento que, em muitos casos, tende a ocorrer em locais onde o risco de uma movimentação ou colapso é significativa.

Para a validação do sistema desenvolvido, ensaios em campo foram executados, subsidiados por uma compilação abrangente dos dados constantes de relatórios técnicos elaborados pela empresa *MecRoc Engenharia Ltda* às empresas parceiras destes estudos, por meio de processo de monitoramento geotécnico contínuo de convergência.

Para o desenvolvimento da tecnologia e a execução prática do monitoramento em ambientes subterrâneos, foram realizados previamente levantamentos bibliográficos das principais metodologias relativas a processos e abordagens geotécnicas e geomecânicas aplicadas a ambientes subterrâneos. Complementarmente, os estudos incluíram as principais prescrições normativas existentes, particularmente as recomendações internacionais da ISRM. Nos trabalhos, especificamente, a metodologia empregada foi:

- (i) revisão bibliográfica: literatura sobre instrumentação geomecânica de ambientes subterrâneos e normativas e recomendações internacionais.
- (ii) desenvolvimento do sistema: desenvolvimento de *hardwares* que atendessem as condições extremas dos ambientes subterrâneos e *softwares* com facilidade de manuseio e sem necessidade de tempo para entendimento imediato.

(iii) validação da metodologia: correlacionar o sistema proposto com monitoramentos já consagrados no ambiente subterrâneo.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, iniciado por esta introdução que contextualiza e justifica o presente projeto de pesquisa e que apresenta a distribuição dos capítulos da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma síntese bibliográfica do tema ‘Instrumentação e Monitoramento de Escavações Subterrâneas’, com foco no detalhamento dos principais sistemas de monitoramento utilizados em escavações subterrâneas.

O Capítulo 3 apresenta uma proposta de um sistema de monitoramento de convergência para ambientes subterrâneos, objetivo principal do trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação do sistema de monitoramento proposto para o caso de uma cavidade natural, inserida em um ambiente de formações ferríferas, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

O Capítulo 5 apresenta dois outros estudos de casos, relativos à aplicação do monitoramento de convergência em minas subterrâneas. O primeiro caso refere-se ao monitoramento de uma galeria com dimensões de 5,5 x 5,5 m, sobrejacente à área da lavra e situada a uma profundidade de seiscentos e setenta metros. O segundo caso avalia o monitoramento de uma galeria subterrânea durante o período de recuperação de pilares horizontais de um corpo mineralizado da mina.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as principais conclusões desse trabalho de pesquisa, mediante a síntese quantitativa dos resultados obtidos e vantagens do processo de monitoramento proposto, bem como proposições de pesquisas complementares.

INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

2.1 INTRODUÇÃO

A instrumentação geomecânica em escavações subterrâneas desempenha um importante papel na investigação e controle de riscos geotécnicos. Uma instrumentação pode ser entendida como um modo de calibrar modelos, e/ou quantificar variações/direções de tensão, deslocamentos, vibrações, esforços e pressões, entre outras grandezas. Estruturas geotécnicas de feições micro a macro são, então, monitoradas com o intuito de obter tal risco controlado e embasar estudos de pré-viabilidade, planejamento de lavra e cumprimento de normativas.

Segundo Dunnycliff (1988), uma premissa básica para qualquer tipo de instrumentação é se ter um plano básico de monitoramento. Tal plano, que será detalhado particularmente nos estudos de caso que serão apresentados, deverá conter no mínimo:

1. Comportamento de estruturas geotécnicas a serem monitoradas (rupturas, deslocamentos, tensão, vibrações, etc.).
2. Questões geotécnicas a serem respondidas e/ou calibradas.
3. Definição de limites de referência para magnitudes aceitáveis de variações e mudanças.
4. Instrumentos a serem utilizados.
5. Local de instalação dos instrumentos.
6. Fatores que poderão influenciar nos resultados.

Devido a não existência de uma Norma ABNT sobre monitoramento de escavações subterrâneas, buscou-se aplicar nesse trabalho as prescrições da norma ASTM D 4403 - *Standard Practice for Extensometers Used in Rock* (ASTM, 2004); e dentre os sistemas de monitoramento e instrumentação disponíveis no mercado para escavações subterrâneas, detalham-se os principais neste capítulo.

2.2 MEDIÇÕES DE TENSÕES *IN SITU* POR *OVERCORING*

A medição de tensões *in situ* em escavações subterrâneas vem se tornando uma atividade necessária e com extrema importância para tomada de decisões. Em escavações profundas, o conhecimento da direção das tensões é sinônimo de possibilidade de redução de custos e aumento de segurança, proporcionando um aumento de produtividade. Através do conhecimento das direções das tensões, é possível planejar a direção das escavações em um sentido ótimo, reduzindo a quantidade de sistemas de reforços/suportes a serem utilizados, o tempo de abatimento de choco, além de minimizar qualquer evento dinâmico que possa vir a ocorrer em outra direção de escavação.

Além das vantagens operacionais, é importante descrever que tal informação fornece uma importante condição limite para se trabalhar no planejamento de lavra, incluindo a seleção do método de lavra e a avaliação do desempenho de escavações subterrâneas de curto e longo prazo. Diversos autores discutiram as estratégias para se estimar a tensão existente em um meio e forneceram avaliações abrangentes de métodos de medição de tensões *in situ*. Como o foco deste trabalho são os ambientes subterrâneos, será apresentado o método mais usual neste meio, que é o *overcoring*.

Segundo Tropia (2013), *Overcoring* é um método que envolve o isolamento de uma amostra de rocha do campo de tensões que o rodeia, e o monitoramento da resposta a esse esforço. As tensões medidas não estão relacionadas com pressões aplicadas, e sim inferidas a partir de esforços gerados por processos de descarga de pressões.

O método envolve primeiramente uma perfuração de um poço de diâmetro de 6" (Figura 2.1), seguida por uma perfuração, central, piloto de menor diâmetro na qual está inserido e preso um dispositivo de medição de esforços (rosetas com *strain gages*). A perfuração de maior diâmetro é sequenciada, aliviando tensões e esforços no cilindro de rocha interno. Alterações nos esforços são registradas com o dispositivo enquanto os trabalhos prosseguem até o plano de medição. As tensões *in-situ* são calculadas a partir dos esforços medidos com o conhecimento das propriedades mecânicas da rocha (módulo de elasticidade, resistência simples).

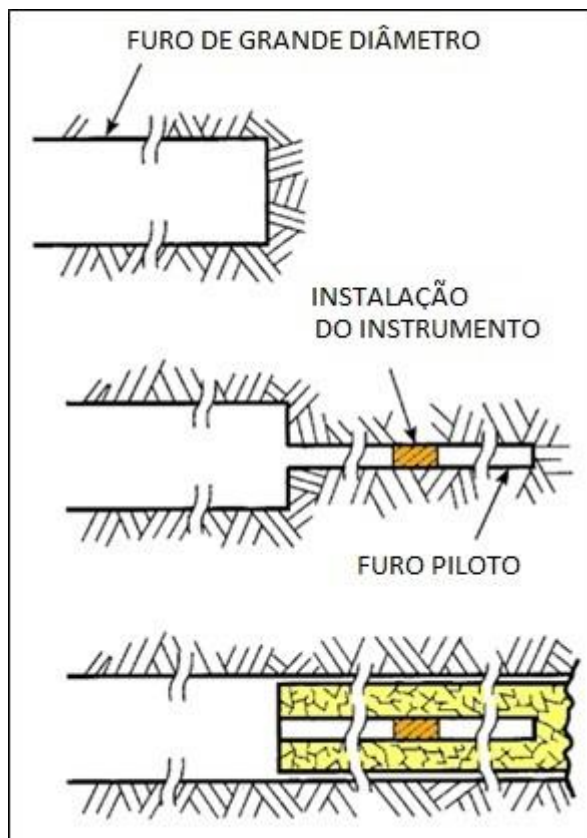


Figura 2.1 - Esquema da instrumentação in situ tipo overcoring - Tropa (2013).

Assim, o processo de *overcoring* requer a suposição do comportamento contínuo, homogêneo, isotrópico e linear-elástico da rocha. Segundo Tropa (2013), descreve que os erros ocorrem porque essas condições são raramente encontradas em maciços rochosos, pois mesmo quando aparentemente as condições ideais se aplicam, alguma variação dos resultados sempre ocorre.

As curvas de anisotropia são o produto de tal estudo, que permitem entender sobre qual é a direção ótima de escavação, ou seja, as que não são afetadas pelos esforços, sem causar danos em tetos ou em laterais/paredes.

Considerando que uma mineração subterrânea é uma operação dinâmica, dúvidas sobre possíveis variações de tensão, no decorrer de um desenvolvimento e lavra de uma operação mineira subterrânea, incentivou estudiosos à desenvolver um sistema de monitoramento contínuo de tensão *in situ* para tal análise, onde o entendimento do comportamento das tensões é o principal foco. Segundo Hills e Walton (2010), tal monitoramento possibilita três importantes informações:

- (i) entender o comportamento dos esforços induzidos por realces abertos (*stoping*);
- (ii) entender o impacto da mudança de tensão *in situ* devido à qualidade do maciço rochoso;
- (iii) entender a resposta do maciço rochoso ao se manifestar esforços induzidos em áreas onde se tem instalado o sistema de suporte/reforço.

Na mina Tasmania, em 2009, foram instaladas células de *overcoring* (do tipo *Hollow Inclusion – CCBO*) e, de acordo com Hills e Walton (2010), foi confirmado que as tensões principais induzidas geradas em regiões de *footwall* em operação. O estereograma (Figura 2.2) apresenta os dados coletados pelas células CCBO, em um ponto, entre o período de instalação dos sensores (antes de iniciar a lavra da mina Tasmânia) até o final da lavra, onde é possível visualizar a variação das tensões *in situ*. Detalhes sobre o estudo, como magnitude das tensões *in situ*, profundidade e local dos ensaios, litologias, método de lavra e dimensões dos realces, são melhores explicados no trabalho de Hills e Walton (2010).

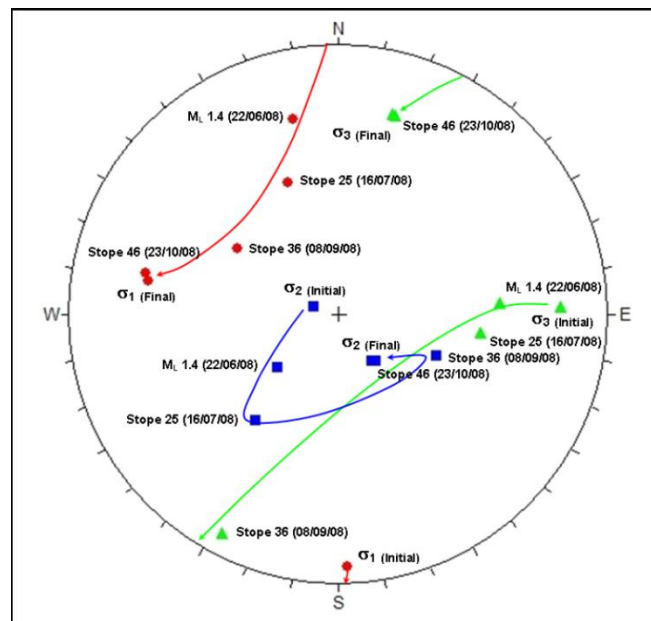


Figura 2.2 - Variação da direção das tensões *in situ* em uma mina subterrânea em operação - Hills e Walton (2010).

2.3 EXTENSÔMETROS

Diversos equipamentos são utilizados para verificar a variação dos deslocamentos internos no maciço rochoso em escavações subterrâneas, sendo que os mais tradicionais

são os extensômetros (MPBX – *Multiple Position Borehole Extensometer*). O princípio de funcionamento desses equipamentos pode variar de acordo com cada fabricante, porém, para um simples entendimento, consiste em ancorar dentro de uma perfuração no maciço uma haste que seja capaz de mensurar os deslocamentos por meio de potenciômetros e/ou LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*).

Segundo Cota (2011), os extensômetros axiais são instrumentos utilizados para a realização do monitoramento dos deslocamentos existentes em um ou mais pontos localizados no interior do maciço rochoso ou solo, e que para uso em escavações subterrâneas, os mesmos devem ser fixados com *grout*. Para Dunnicliff (1988), os extensômetros fixados em furos são definidos como instrumentos instalados para o monitoramento da mudança da distância entre dois ou mais pontos ao longo do eixo do furo, sem utilização de sonda móvel.

Utilizados para monitorar os diversos níveis de deslocamento em várias profundidades no maciço rochoso, variados extensômetros estão disponíveis, com hastes de materiais diferentes, de tipos e/ou número de ancoragens distintas, além de possibilitar leituras mecânicas e automáticas (remotas). A Figura 2.3 ilustra um MPBX instalado em uma perfuração, com as descontinuidades e os pontos de ancoragem do equipamento.

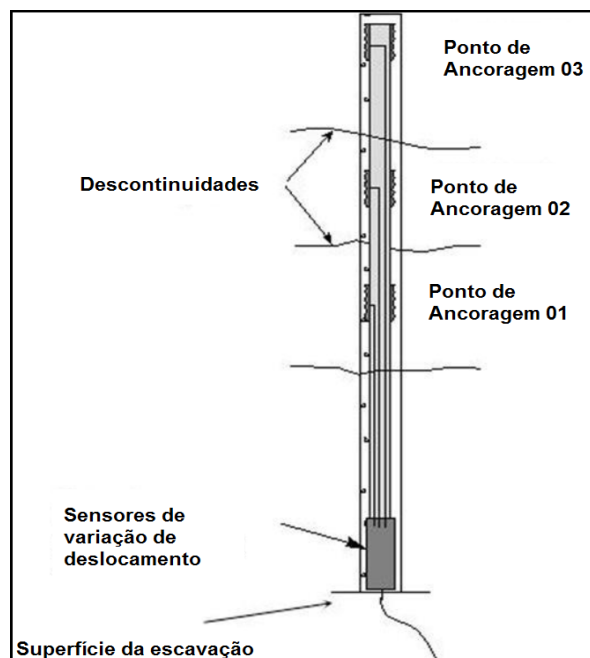


Figura 2.3 - Extensômetro MPBX instalado e seus pontos de ancoragem - Hyett et al (1992).

As maiores demandas de extensometria em escavações subterrâneas são em interseções, onde o *span* tem maior dimensão, além da possibilidade de uma maior cunha, onde é necessário se ter o controle deste risco potencial. Em áreas de lavra, no *hanging wall* dos realces (Figura 2.4), é de extrema importância conhecer e entender o comportamento desta estrutura sobrejacente, pelo risco constante às pessoas e equipamentos.

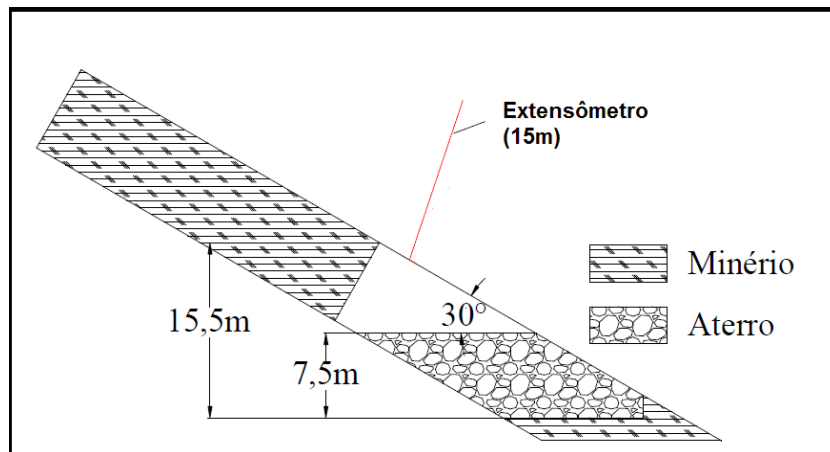


Figura 2.4 - Extensômetro instalado em Hang Wall de um realce na Mina Cuiabá – AngloGold Ashanti - Cota (2011).

Em *shafts*, *raises* ou quaisquer escavações circulares, metodologias de monitoramento são desenvolvidas de acordo com a Figura 2.5, chamada de convergência invertida (Hyett, 1992).

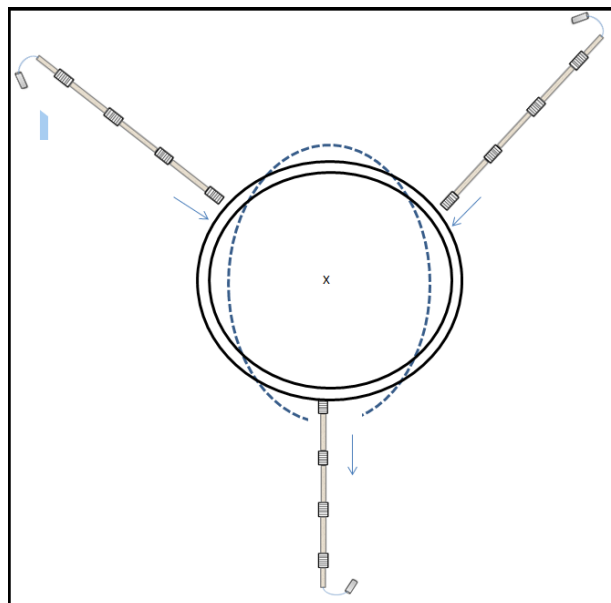


Figura 2.5 - Distribuição dos sensores para monitoramento com metodologia de convergência invertida - Hyett (1992).

2.4 TDR – TIME DOMAIN REFLECTOMETER

De funcionamento simples e grande eficácia o TDR é um complemento de um extensômetro, pois, segundo Dowding (1985) é possível com o TDR conhecer o ponto exato do local do plano de fratura, ou descontinuidade. Em mineração subterrânea o TDR é de extrema necessidade quando se conversa sobre monitorar um *crown pillar* ou qualquer outro pilar de um empreendimento mineiro. Além disto, o monitoramento de superfície, para se entender ou controlar a subsidência ocasionada por uma mina subterrânea é outro local onde o TDR pode ser aplicado.

O princípio básico do TDR (Figura 2.6) é similar ao radar, ou seja, envia-se um pulso eletromagnético pelo cabo coaxial (corrente elétrica se propaga no condutor, que é o metal, e a onda eletromagnética, vai no isolante, material dielétrico que separa o condutor interno e a malha do cabo) que deverá estar fixo na perfuração com *grout*, e se este encontra alguma anomalia no cabo (compressão ou corte) é refletido imediatamente, total ou parcialmente.

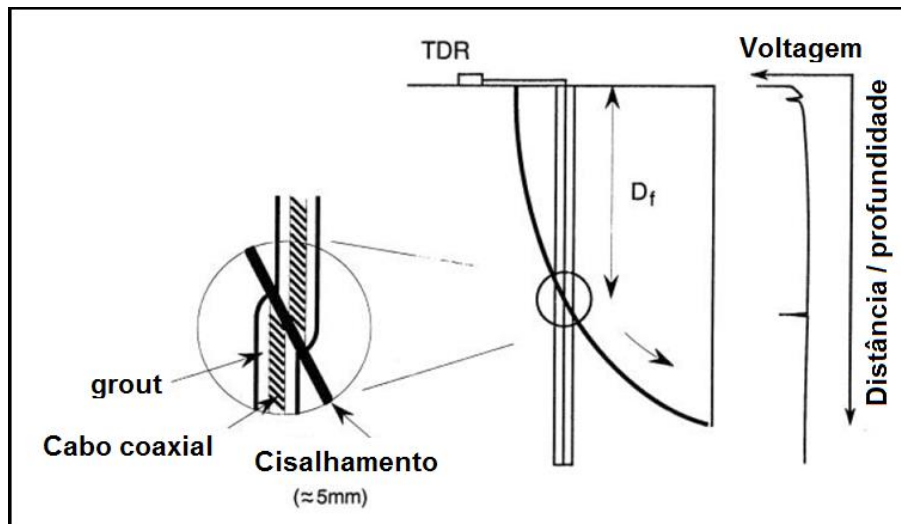


Figura 2.6 - Princípio geral de funcionamento do TDR - Dowding (1985).

As reflexões desta onda geram picos em pontos onde existe a anomalia no cabo que podem ser visualizados através de um gráfico disponibilizado pelo equipamento. A amplitude e a polaridade do pulso podem ser correlacionadas com a magnitude do movimento.

2.5 MEDIDOR DE TRINCAS (*CRACKMETER*)

Os instrumentos utilizados para medir descontinuidade (juntas, fraturas, falhas, trincas e outros) são fixados entre dois pontos (Figura 2.7), buscando-se medir diretamente o deslocamento (abertura/fechamento) destes. Para a instalação pode-se utilizar uma furadeira elétrica com brocas de 1/2" na perfuração, onde a instalação poderá ser feita com resina epóxi, *grout* ou sistema mecânico de coquilhas.



Figura 2.7 - Medidor de descontinuidades, Crackmeter - Geokon (2016).

O funcionamento mecânico desse instrumento é à base de potenciômetros linear ou de corda vibrante e o dispositivo trabalha medindo variações uniaxiais.

2.6 STRESS METER

Medir a variação de tensão internamente no maciço rochoso é de extrema importância para que se possa entender como determinados pilares e/ou escavações/cavidades estão se comportando a medida que tensões induzidas são direcionadas durante as atividades minerárias.

O princípio de funcionamento é feito por um conjunto de cordas vibrantes, sendo que os dados de frequência medidos são convertidos em variação de tensão na qual o instrumento está submetido em relação ao seu momento de instalação (Figura 2.8). Parâmetros Geomecânicos (módulo de deformabilidade/Young) auxiliarão a interpretar resultados do monitoramento. Segundo Brandani (2011), para a instalação deste instrumento, deve ser observada a direção de interesse de leitura, bem como a atitude das principais descontinuidades presentes no maciço.

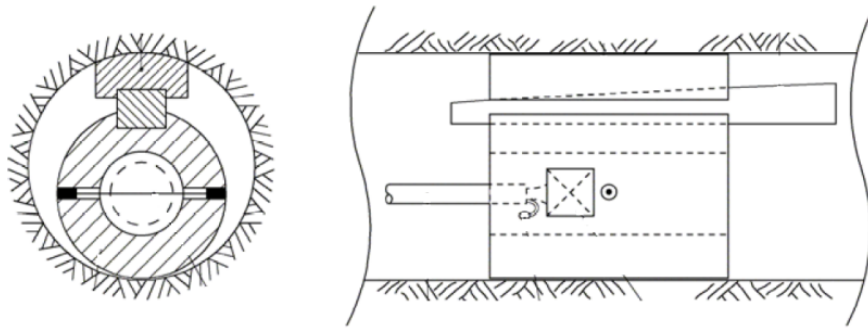


Figura 2.8 - Stress meter instalado - Geokon (2016).

2.7 SCANNER A LASER 3D

Dentre as várias funcionalidades de imagens de um *scanner* a laser 3D em uma mineração subterrânea, consideraremos neste estudo a vantagem de um mapeamento de descontinuidades geológicas e um controle operacional de escavações.

O *Scanner* a Laser 3D é um instrumento que opera na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Estes instrumentos são robustos, resistentes à poeira e umidade, e não dependem de iluminação para operação. A tecnologia para geração das imagens consiste na transmissão de uma faixa de ondas eletromagnéticas (luz) enquanto o equipamento gira 360 graus em torno do próprio eixo. Estas ondas são refletidas por barreiras físicas, e o sinal captado de cada uma delas é gravado como um ponto no espaço, gerando como produto, uma nuvem de pontos.

Considerando que é trabalhoso realizar o levantamento e a caracterização geométrica das descontinuidades manualmente (utilizando bússola geológica e trena), e sendo o mapeamento de estruturas geológicas extremamente importante para analisar o comportamento mecânico do maciço rochoso em escavações mineiras de operação dinâmica, o uso de imagens 3D de *scanner* se torna uma ferramenta necessária. Segundo Cacciari & Futai (2014), mesmo com a alta qualidade dos instrumentos fabricados, descontinuidades cujos planos não estão expostos nas paredes ou teto das escavações, dificilmente são identificadas nas imagens.

Quando apenas uma pequena parcela destes planos está exposta, ou existe um preenchimento espesso, pode ser possível visualizá-los na nuvem de pontos, entretanto, a medida de orientação, é muito prejudicada. A Figura 2.9 apresenta a nuvem de pontos,

juntamente com uma modelagem computacional e a visualização da imagem – maciço rochoso.

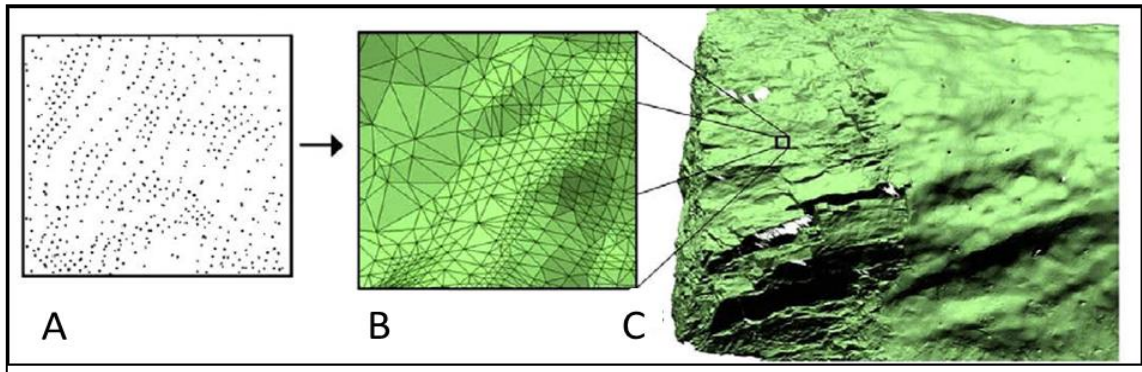


Figura 2.9 (A) - Destaque da nuvem de pontos; (B) Modelos computacionais; (C) Trecho escaneado – possibilidade de quantificar as descontinuidades - Cacciari & Futai (2014).

Como controle operacional, segundo Fekete & Diederichs, (2010), a aplicação desta tecnologia como controle operacional, calculando a espessura do concreto projetado, a malha de atirantamento à seção de escavação, tem trazido produtividade e qualidade operacional. A Figura 2.10 ilustra um produto de escaneamento para controle operacional de escavação, identificando o *overbreak* (sobre escavação) e o *underbreak*.

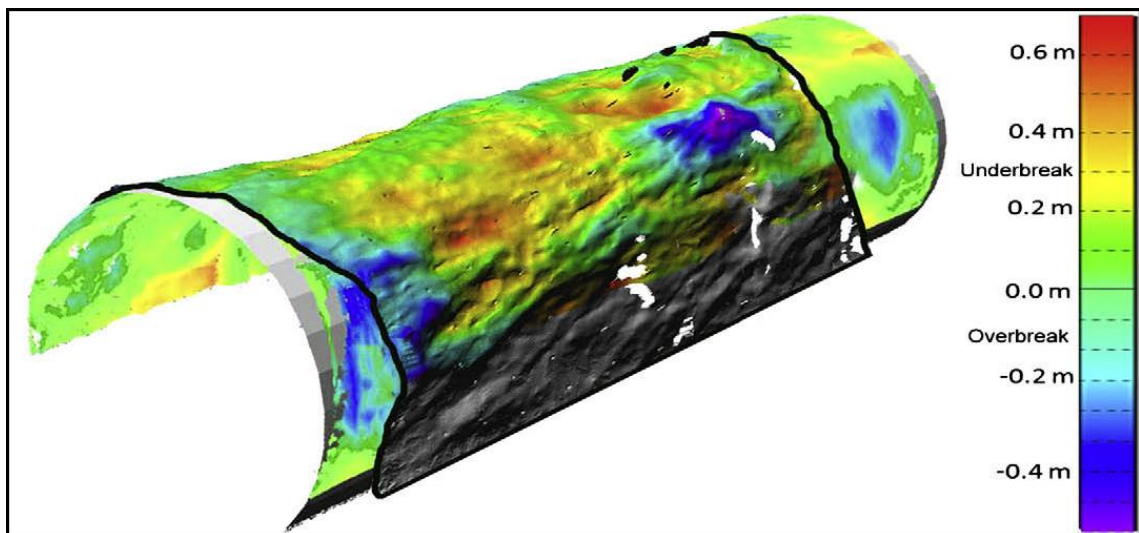


Figura 2.10 - Controle de escavação: qualidade da detonação - Fekete & Diederichs (2010).

2.8 MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA

Segundo Barbosa (2008), um dos principais métodos de se medir o deslocamento na superfície de uma escavação é utilizando técnicas de convergência, que consiste em um sistema de monitoramento pontual e discreto do qual podemos realizar leituras

sistemáticas ao longo da seção de uma escavação para monitorar a deformação desta (abertura ou fechamento) correlacionando com o tempo. As medidas são realizadas com equipamentos analógicos (através da utilização de fios invar) ou digitais (através de uma fita de aço).

Devido ao seu baixo custo, e alta praticidade, essa instrumentação tem sido o monitoramento geomecânico mais utilizado nas minerações e túneis brasileiros para se controlar variações de deslocamento entre dois ou mais pontos. A figura 2.11 ilustra uma metodologia de um monitoramento de convergência em triangulação de galerias subterrâneas, usando o sistema convencional analógico de fio invar.

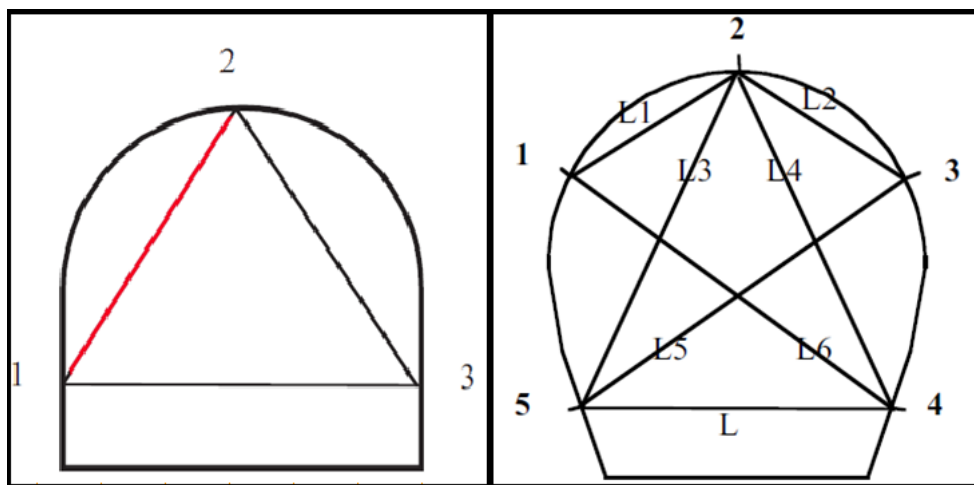


Figura 2.11 - Exemplo de padrões operacionais de medições de convergência em escavação subterrânea.

É importante ressaltar que este sistema de monitoramento tem grandes desvantagens, pois a exposição de pessoal aumenta o risco perante um acidente, além de se ter uma menor precisão, devido à coleta ser manual e com intervalos periódicos, onde não é possível entender o comportamento da escavação entre as coletas.

2.9 CÉLULA DE CARGA – CONCRETO PROJETADO

A aplicação de concreto projetado data de 1907, quando Karl Akeley iniciou o processo de projeção via seca, foi chamado de gunita (Rispin & Brooks, 2001). A aplicação do material, até então direcionada para obras civis ganhou relevância também na mineração com o passar dos anos. Novas tecnologias de concreto, equipamento, logística e técnicas operacionais tem aumentado da aplicação deste tipo de suporte em todo o mundo.

Concreto projetado, telas, *straps* e/ou combinação possuem como princípio básico fazer com que o maciço rochoso mantenha sua integridade, reduzindo deslocamentos e por

consequência, prevenindo a perda de massa no entorno da escavação (Kuchta, 2002). Segundo Bernardo (2004) o concreto projetado previne a degradação do sistema de ancoragens e conecta o vão entre ancoragens, suportando material desconfiando que esteja no contorno da escavação.

O mecanismo de transferência de esforços entre maciço rochoso e concreto projetado está intimamente correlacionado à maneira na qual o mesmo é disposto nos túneis. Para aproveitar a resistência a compressão uniaxial do concreto o mesmo deve ser disposto de tal forma a se trabalhar como um arco compressivo. Para tal, faz-se necessário que o suporte seja aplicado piso a piso. A Figura 2.12 apresenta o arco compressivo no concreto projetado após lançado.

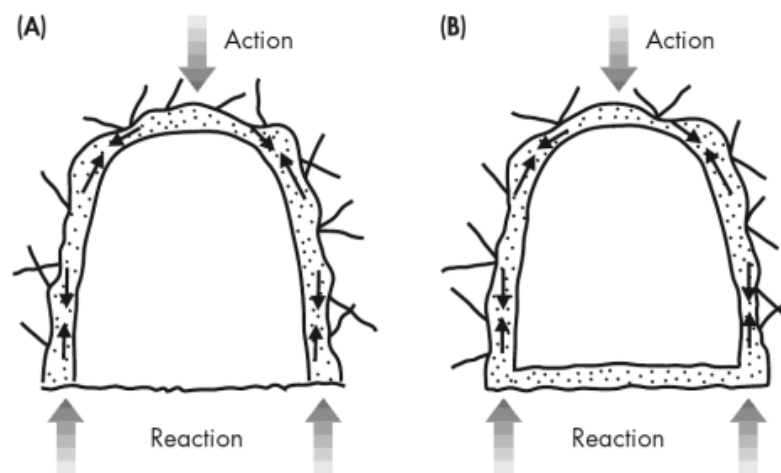


Figura 2.12 - Representação do arco compressivo no concreto projetado - Hadjigeorgiou & Potvin (2011) *apud* Brito, (2015).

Segundo Hadjigeorgiou & Potvin (2011 *apud* Brito, 2015), o comportamento do concreto projetado, diante dos esforços estará relacionado com:

- (i) Adesão entre concreto projetado e maciço rochoso / Resistência ao cisalhamento entre concreto e maciço rochoso;
- (ii) Resistência a tração na flexão;
- (iii) Transferência de carga para sistema de reforço, desde que este seja aplicado a posterior do projetado.

Stacey & Orlepp (2007) identificaram diversos mecanismos e submecanismos de atuação do concreto projetado da qual, podem atuar isoladamente ou em combinação. Quando se

direcionam para maciços anisotrópicos ao modelo de ruptura acima proposto, destacam-se os seguintes princípios de estabilização:

- a) Intertravamento dos blocos (restritor cinemático): a interação entre o concreto projetado e o maciço através da adesão, previne deslocamentos que acarretaria na perda de blocos pela escavação (Figura 2.13).

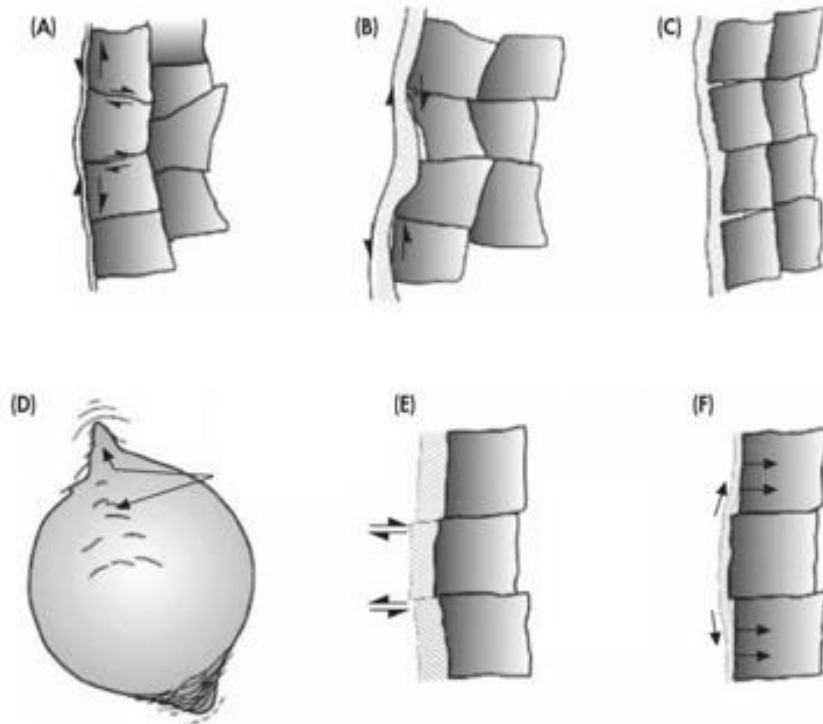


Figura 2.13 - Mecanismos de estabilização por intertravamento (A) Adesão da interface limitando deslocamentos (B) Resistência de cisalhamento entre concreto e rocha para concreto com baixa resistência de aderência. (C) Penetração de concreto nas trincas, aumentando a restrição de movimento. (D) Suporte de quebras por tensão quando aplicada na fase inicial do processo, inibe o movimento progressivo. (E) resistência ao cisalhamento puro do concreto (F) Pequenas espessuras de concreto promovem perda de adesão e conseqüente esforço por tração e tração na flexão - Stacey & Orlepp (2007).

- b) Mecanismo tipo *Basket* (Figura 2.14): quando o maciço rochoso se encontra com alto nível de plastificação, a atuação do concreto baseia no princípio de armazenar a massa rompida. Neste processo, a tenacidade do concreto se torna um elemento de grande relevância para a estabilidade do mesmo.

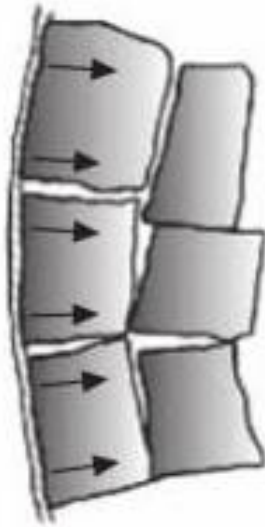


Figura 2.14 - Mecanismo tipo Basket - Stacey & Orlepp (2007).

- c) Reforço aos Planos de Fraqueza (Figura 2.15): Kutcha (2002) descreve que testes realizados na Suécia ilustram resultados da qual concreto projetado de boa qualidade iniciam seu processo de ruptura pela resistência de adesão. Diante deste fato, a movimentação subsequente do maciço, seja por gravidade e/ou progressão do *buckling*, irá promover um movimento descendente na camada de concreto, aumentando assim, seus esforços de tração e/ou tração na flexão.



Figura 2.15 - Ruptura por tração/tração na flexão resultante de resistência insuficiente de aderência entre concreto e escavação - Kutcha (2002).

Considerando que a camada de concreto está corretamente dimensionada para suportar os esforços solicitantes, após evolução do processo de plastificação do maciço este cenário pode evoluir para situação pelo mecanismo da qual será exigido do suporte sua propriedade de tenacidade, induzindo em alguns casos a resistência ao cisalhamento do concreto, conforme ilustra a Figura 2.16.

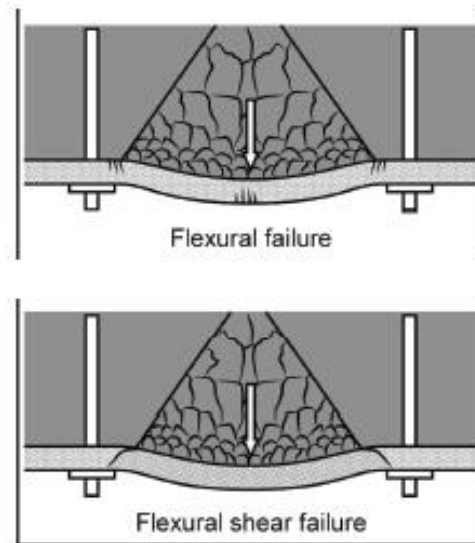


Figura 2.16 - Modo de ruptura esquemático - Morton *et al.* (2008); *apud* Brito (2015).

A evolução do concreto projetado representa para Kutcha (2002) o cenário mais crítico de blocos discretos entre o sistema de reforço. O mesmo propôs uma metodologia de cálculo considerando mecanismos de ruptura do tipo: adesiva, cisalhamento direto, tração na flexão e cisalhamento por puncionamento.

De acordo com todo o contexto descrito acima, conclui-se que é de extrema importância a necessidade de se ter um controle do concreto projetado, ou seja, uma instrumentação deste para se conhecer os mecanismos de ruptura e as formas de trabalho deste sistema de suporte. Assim, células de carga são instaladas anteriormente à aplicação em dois sentidos (Figura 2.17), buscando-se entender a direção dos principais esforços que estão sendo mobilizados, numa distribuição adequada (Figura 2.18).



Figura 2.17 - Célula de carga instalada no maciço rochoso anteriormente ao lançamento do concreto projetado - Geokon (2016).

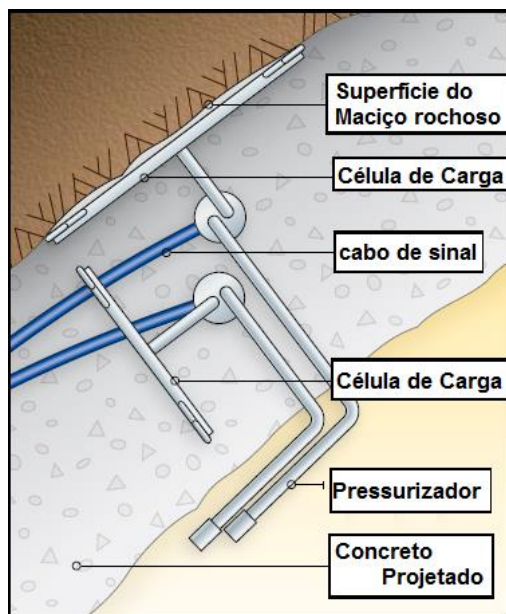


Figura 2.18 - Ilustração da distribuição das células de carga no concreto posterior ao lançamento - Geokon (2016).

2.10 SISTEMAS DE REFORÇO INSTRUMENTADO

2.10.1 Cabo SMART (Stretch Measurement Assess Reinforcement Tension)

O uso de cordoalhas de aço em escavações subterrâneas, em regiões de grande vão, ou em áreas de extração de minério como sistema de reforço tem ganhado seu espaço no decorrer da evolução da engenharia subterrânea. Cabos modificados, sendo com bulbo, ou *nut cage* ou até mesmo *bird cage* foram introduzidos no mercado em meados da década de 80, em minerações da Austrália, buscando uma melhor transferência de carga e menor comprimento de ancoragem. A Figura 2.19 apresenta os cabos disponíveis no mercado.

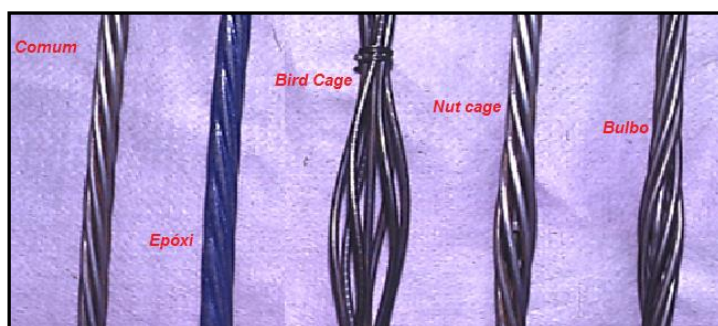


Figura 2.19 - Diferentes cabos simples/comum e cabos com bulbos simples/duplos - Hutchinson & Diederichs (1996).

A Figura 2.20 apresenta os resultados de um ensaio de campo, que mostra a vantagem de uma boa transferência de carga (*bond strength*) entre um cabo comum e um cabo modificado.

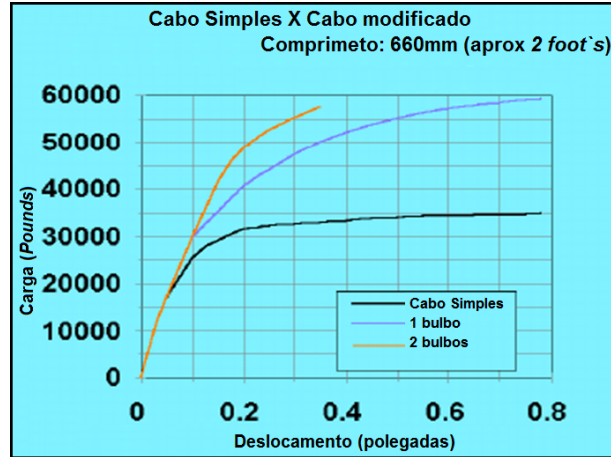


Figura 2.20 - Diferença de resistência entre cabos simples/comum e cabos com bulbos simples e bulbos duplos em 650 mm de ancoragem - Hutchinson & Diederichs (1996).

Tod e Lausch (2003) definem o cabo SMART como um extensômetro semelhante ao MPBX, mas localizado no interior do cabo de aço de sete fios (5/8”), substituindo o fio localizado no centro do cabo por um tubo de aço inoxidável onde os fios referentes a cada um dos seis pontos de medição estão inseridos. Segundo Cota (2011), este equipamento foi desenvolvido para otimizar os suportes constituídos pelos cabos de aço de sete fios, onde é importante enfatizar que este equipamento realiza a medição do deslocamento do cabo de aço e não do maciço rochoso.

Em escavações subterrâneas a principal finalidade deste instrumento é calibrar o sistema de cabos dimensionados, ou seja, verificar locais e esforços axiais linearmente no cabo, e facilitar a tomada de decisão sobre a quantidade e comprimento dos cabos de acordo com cada projeto/particularidade. Na Figura 2.21, é possível entender um sistema de reforço, com cabos, proposto em uma área de realce de mina subterrânea, onde se recomenda o uso de alguns cabos instrumentados para calibrar tal dimensionamento.

A Figura 2.22 ilustra o sistema de cabo instrumentado internamente na perfuração e seu funcionamento em uma visão pontual.

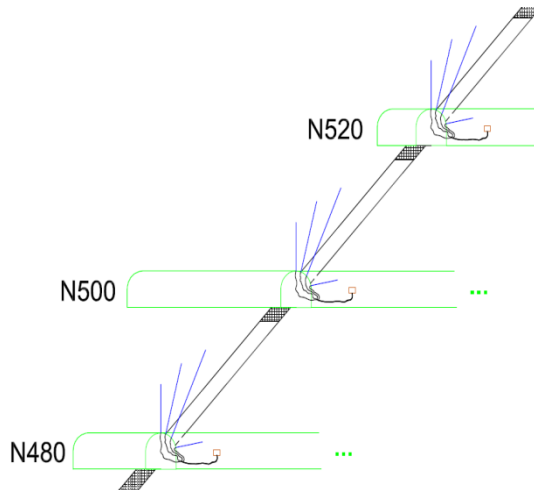


Figura 2.21 - Projeto de cabos para uma área de realce em uma mina subterrânea - Cota (2011).

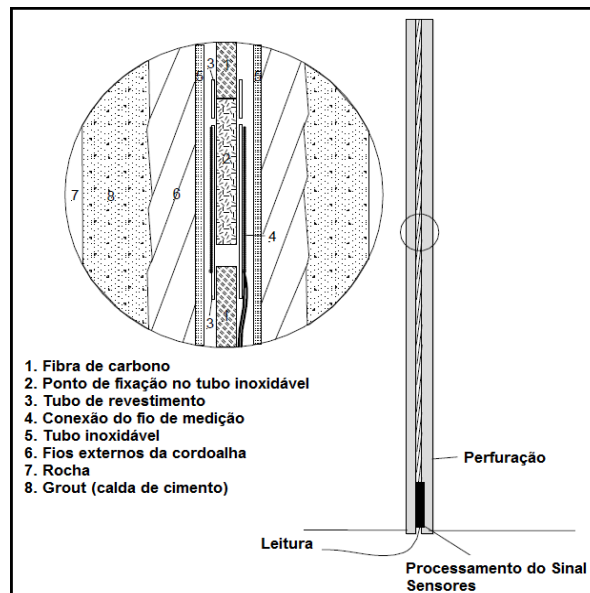


Figura 2.22 - Cabo instrumentado internamente na perfuração e seu funcionamento mecânico pontual - YieldPoint (2016).

2.10.2 Tirante Instrumentado

A constante necessidade de um controle mais eficiente sobre a estabilidade do maciço rochoso com o objetivo de uma maior segurança, maximizar a produtividade e reduzir os custos, levaram a investigar o desenvolvimento de um tipo de argamassa química para ser uma alternativa ao uso da calda de cimento no processo de reforço de uma escavação subterrânea. A calda de cimento tem sido tradicionalmente usada em mineração subterrânea para a fixação dos elementos de reforço há mais de 50 anos, mas a necessidade de obter uma maior velocidade de cura despertou o interesse dos

pesquisadores, que no início dos anos 70, desenvolveram um elemento de ligação à base de resina de poliéster. Segundo Gontijo *et al* (2016b), este elemento oferece vantagens, tais como, possibilidade de trabalhar com distintos tempos de cura, sendo, desde segundos a minutos, e a obtenção de uma elevada resistência mecânica, graças às propriedades de aderência e de coesão.

Segundo Gontijo *et al* (2016b), o uso de cartuchos de resina de poliéster como elementos de ligação, para tirantes protendidos, surge como uma solução efetiva, atendendo os aspectos técnicos, econômicos, e que tem como uma grande vantagem, sua eficácia e cura rápida bem definida, permitindo um ciclo operacional de trabalho mais produtivo e mais seguro. No Brasil, em minerações subterrâneas com maciço rochoso competente, o principal sistema de reforço utilizado em nichos, acessos, rampas, interseções e *shafts*, é o atirantamento com cartuchos de resina de poliéster, por ter uma garantia de funcionamento permanente e rápido.

Os sistemas de reforço, que tem a função de melhorar a qualidade do maciço rochoso e alterar as propriedades mecânicas do meio no qual está inserido, em escavações subterrâneas de maciço rochoso, são dimensionados para trabalhar com mecanismos de ruptura de qualquer gênero. Hyett & Mitri. (2012) apresenta o potencial de usar técnicas DOS (*Distributed Optical Sensing*) em instrumentação geotécnica em sistemas de reforços fixados quimicamente (atirantamento com resinas). O princípio consiste em se fixar fibra ótica ao entorno de todo o tirante, ao longo de uma ranhura (Figura 2.23).



Figura 2.23 - Tirante com as ranhuras laterais para instalação da fibra ótica - Hyett & Mitri (2012).

Essa ferramenta irá possibilitar identificar os esforços precisamente, desde a direção (tração/compressão ou cisalhamento) e os locais exatos destes. No Brasil, atualmente, o

dimensionamento completo de sistemas de reforço, tanto em desenvolvimento mineiro como em túneis urbanos, trabalha com os sistemas consagrados de classificação de maciços rochosos de Barton *et al* (1974) e Bieniawski (1974).

Em casos especiais, onde o mecanismo de ruptura for caracterizado como queda de blocos, ou mecanismo gravitacional, além das caracterizações descritas, análises de estabilidade por métodos analíticos utilizando técnicas de equilíbrio limite, são de extrema necessidade. A Figura 2.24 apresenta um exemplo de necessidade de análises de equilíbrio limite em uma escavação mineira.

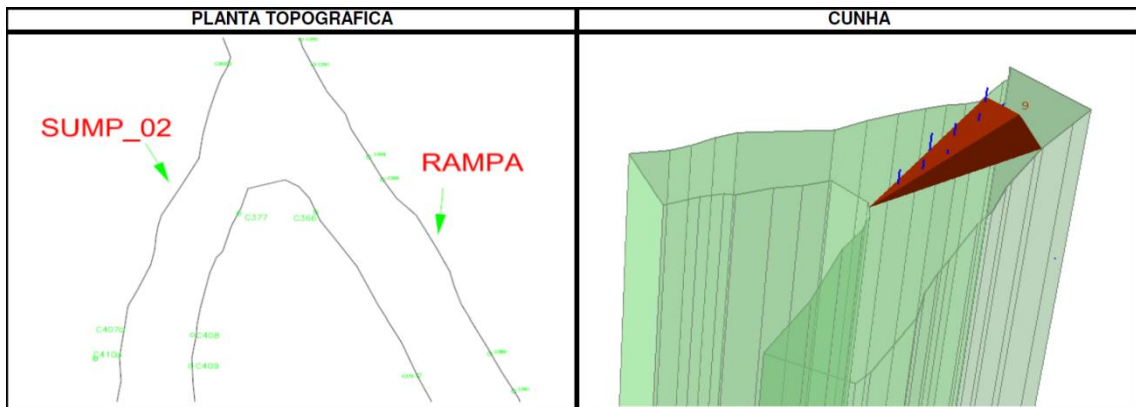


Figura 2.24 - Exemplo de análise de estabilidade por equilíbrio limite utilizando o programa Unwedge, ilustrando potencial de cunha e os reforços necessários para a estabilização - Hyett & Mitri (2012).

Buscando quantificar a demanda de carga solicitada nos sistemas de reforço, tirantes instrumentados são instalados para calibrar e auditar tal dimensionamento. Os tirantes (D-Rebar), desenvolvidos pela YieldPoint (Canadá), trabalham com fibra ótica, onde é possível medir os esforços, desde a direção (tração/compressão ou cisalhamento) à localização exata destes.

A Figura 2.25 apresenta o princípio de aplicação de esforços cisalhantes em um tirante por meio de um ensaio de laboratório e a Figura 2.26 mostra os resultados típicos de um destes ensaios de cisalhamento. Por outro lado, a Figura 2.27 apresenta uma análise matemática da distribuição de esforços mobilizados ao longo de tirantes instrumentados após a abertura da escavação.

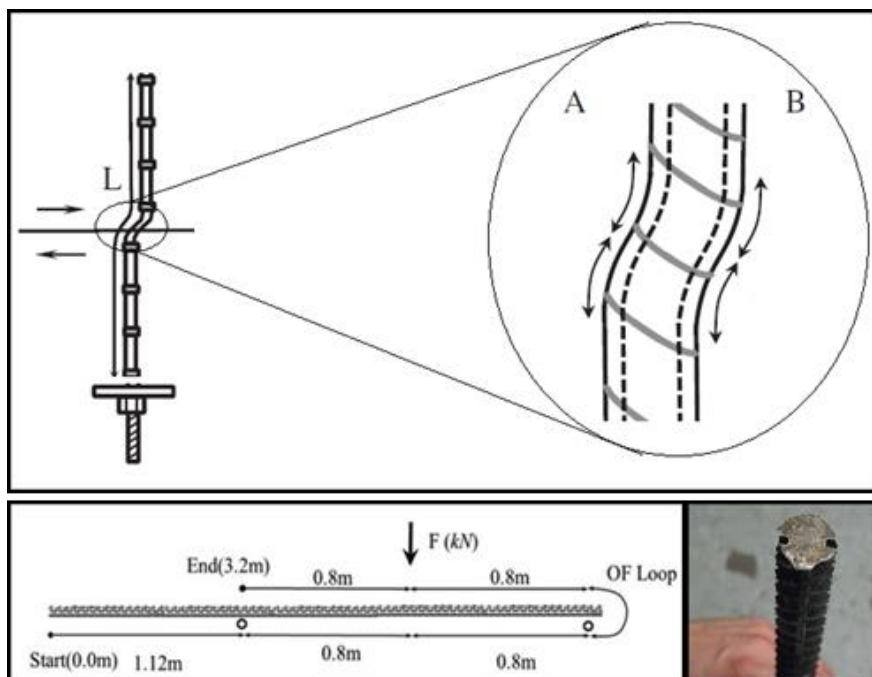


Figura 2.25 - Ensaio de laboratório com aplicação de esforço cisalhante no tirante - Hyet & Mitri (2012).

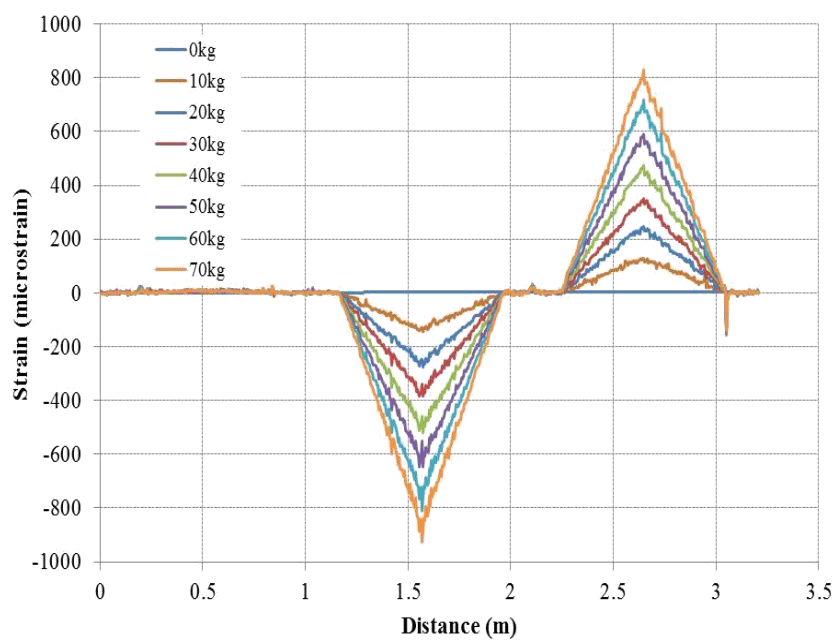


Figura 2.26 - Esforços cisalhantes mobilizados em um tirante instrumentado - Hyett (2012).

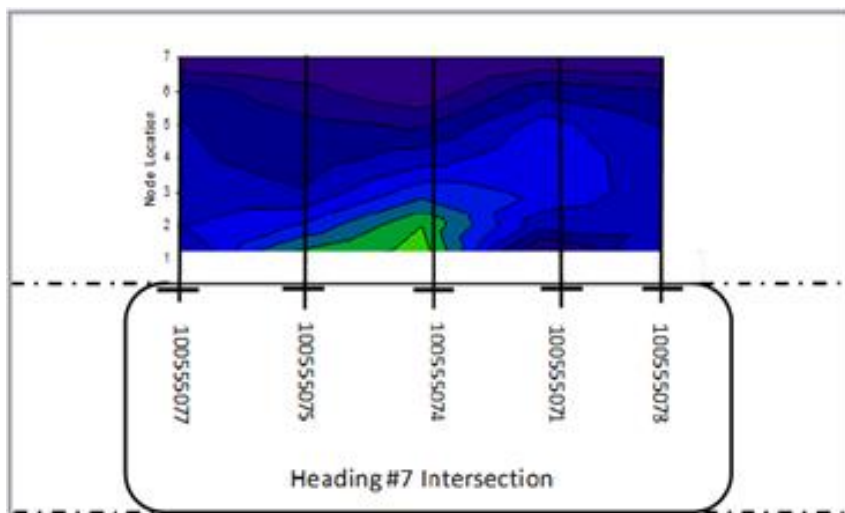


Figura 2.27 - Esforços em tirantes instrumentados após abertura da escavação - Hyett (2012).

2.11 ANÁLISES DE DANOS CAUSADOS POR VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR DETONAÇÃO

Muitas vezes, ao se buscar uma fragmentação satisfatória na detonação de galerias de minas subterrâneas, pode-se induzir no maciço sobrejacente um carregamento excessivo de tensões devido à ação das ondas de choque. Isto pode gerar novas fraturas e/ou movimentação e abertura de fraturas preexistentes.

A sobrequebra (*overbreak* ou quebra ou significativa redução da qualidade geomecânica da rocha além do perímetro projetado da escavação) deve ser minimizada, evitando-se, entre outros, os seguintes efeitos indesejáveis: aumento de tempo de remoção de ‘chocos’ e atraso no carregamento do material detonado; gasto com instalação de suportes; piora nas condições de segurança e ventilação; aumento da diluição do minério.

Segundo Bernardo (2004), a detonação de explosivos em maciços rochosos caracteriza-se essencialmente pela geração de ondas de tensão compressivas, em resultado da refração da onda de choque, procedente da detonação do explosivo, nas paredes do furo onde é aplicado. Se a forma geométrica da carga explosiva for cilíndrica, como é mais frequente, devido à forma dos furos, o lugar geométrico das frentes de onda é constituído por uma onda cônica, que se propaga no terreno circundante, até se refletir na superfície livre, ocasionando roturas na rocha das proximidades.

Para além da zona fraturada que rodeia a carga, os efeitos da detonação fazem-se sentir sob a forma de vibrações, associadas à propagação ondulatória, as quais se atenuam com

a distância. Estas vibrações devem ser mantidas dentro de limites específicos de forma a não causar danos na infraestrutura próxima ou induzir o aparecimento de feições que possam comprometer a sua funcionalidade.

O monitoramento de vibrações é parte fundamental de toda avaliação de dano estrutural, de maciço rochoso e conforto humano, permitindo comparar registros obtidos com critérios de danos, em referências disponíveis na literatura, com a finalidade de controlar os níveis de vibração pré-estabelecidos.

A obtenção dos dados experimentais é feita através de sismógrafos de engenharia, dotados de geofones¹, apropriadamente localizados no terreno, em relação à geometria do desmorte, podendo ser unidades móveis, ou unidades de sacrifício. Para cada detonação, os diversos geofones que recebem os impulsos sísmicos, em diferentes instantes, registam os eventos se forem superiores aos limites de detecção do equipamento (sensibilidade do geofone) e ao valor mínimo de ativação (*trigger*) do sismógrafo, definido para dar início ao registo.

Os movimentos induzidos pelas detonações no terreno podem ser descritos através de três componentes ortogonais, habitualmente designadas por L (longitudinal, isto é, na direção da reta horizontal que passa pelos pontos de detonação e de registo), T (transversal, perpendicular à anterior) e V (vertical, perpendicular às anteriores). Na Figura 2.28, apresenta-se o sismograma relativo a um registo junto à fundação de um edifício próximo a uma detonação (nove cargas explosivas com dispositivos de retardo).

¹ Os geofones transformam a energia mecânica da vibração que os atinge, em sinal elétrico, com intensidade proporcional a intensidade do movimento oscilatório do solo. Os sismógrafos atuais procedem ao registo de vibrações a partir de geofones - triortogonais, capazes de discriminar as componentes radial (L), transversal (T) e vertical (V).

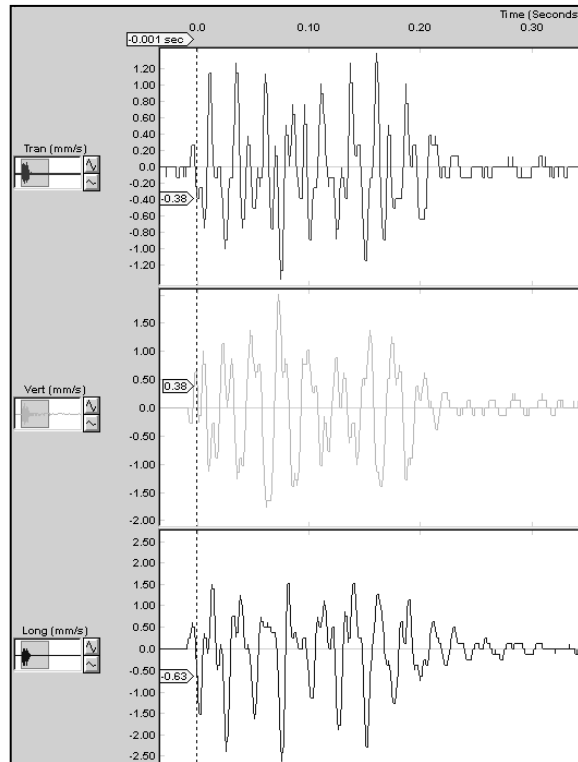


Figura 2.28 - Ilustração dos sismogramas dos três eixos de um geofone.

As unidades móveis, que são fixadas na superfície da escavação com gesso, trabalham em uma zona plastificada, o que poderá ocorrer reflexão de ondas; enquanto que as unidades de sacrifício são instaladas na área *in situ* da escavação, reduzindo ao máximo a reflexão das ondas.

As unidades de sacrifício, por estarem consolidadas ao maciço rochoso em áreas elásticas, podem auxiliar em retroanálises ou até mesmo em análises de danos internamente no maciço rochoso. A Figura 2.29 ilustra a unidade de sacrifício e a distribuição dos sensores neste. As calibrações, configurações, instalações dos sensores e todos dados referentes à análises de vibrações seguem a norma brasileira NBR 9653/2005.

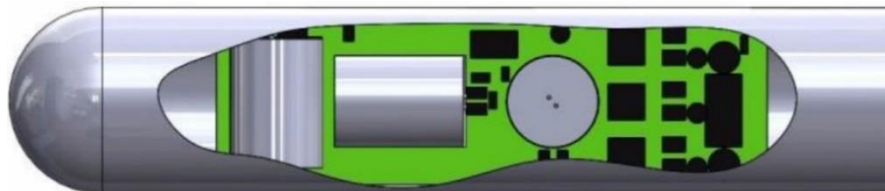


Figura 2.29 - Geofone de sacrifício e a distribuição dos sensores internos.

2.11.1 Ensaio de arrancamento (*Pull Tests*)

Os sistemas de suporte e de reforço em rochas são ferramentas essenciais para se garantir a eficiência e a estabilidade das obras, sendo recomendados testes que comprovem sua capacidade de resistência sujeitos a estados de tensão pré-estabelecidos. O teste de arrancamento (*Pull Test*) quando bem executado, seguindo os procedimentos regidos pelas prescrições da norma D4435 (ASTM, 2004) e da publicação *Suggested Methods for Rockbolt Testing* (ISRM, 1981), discutidos neste trabalho, pode assegurar as especificações fornecidas pelos fabricantes e comprovar a qualidade da instalação.

Este ensaio tem por objetivo a determinação da resistência a curto prazo de ancoragens em rocha instaladas nas condições de campo. A resistência é medida pelo ensaio de arrancamento, no qual o deslocamento da cabeça da barra é medido em função do carregamento ao qual a barra está submetida, obtendo-se assim uma curva carregamento x deslocamento. Este ensaio é normalmente empregado na seleção das barras e no controle da qualidade dos materiais e dos métodos de instalação.

O teste de arrancamento deve ser feito nos diferentes tipos de rocha em que as ancoragens são instaladas, buscando avaliar aderência nos contatos Rocha/Resina e Resina/Tirante (Gontijo *et al.*, 2016b). Se a rocha tem comportamento anisotrópico, acamamento ou xistosidade, os testes devem ser conduzidos nas diferentes orientações de anisotropia incluindo aquelas em que a ancoragem foi instalada (ASTM, 2004).

A Figura 2.30 ilustra a metodologia do teste de arrancamento em campo avaliando aderência e, como exemplo, apresenta resultados de testes realizados na Votorantim Metais, utilizando tirantes helicoidais de 22 mm de diâmetro e cartuchos de resina do fabricante *Rock Support*.



HORA DE INSTALAÇÃO	TEMPO DE MISTURA*	COMPRIMENTO ANCORAGEM	TEMPO DE TORQUE	TORQUE APLICADO	CARGA APLICADA	HORA DE PULL TEST
14h 10min	30 seg	1,5 m	N/A	N/A	23 Ton	15h 26min
14h 18min	30 seg	1,0 m	N/A	N/A	23 Ton	15h 39min
14h 37min	30 seg	0,5 m	N/A	N/A	21 Ton	16h 07min

Figura 2.30 - Ensaio de arrancamento em tirantes instalados com grout químico e exemplos de resultados de testes em campo -Votorantim Metais (2016).

Para aplicação da carga nas ancoragens são necessários os seguintes equipamentos:

- Macaco hidráulico com curso mínimo de 50mm e capacidade máxima de carga capaz de romper a interface ancoragem-rocha. Uma mangueira de pressão deve ligar o macaco hidráulico a uma bomba de pressão manual;
- Equipamento de transferência de carga do macaco hidráulico para a ancoragem (apoio de parafusos e porcas que ajustam a superfície do maciço rochoso para que a carga seja aplicada de forma axial à ancoragem).

Os equipamentos utilizados devem ser previamente calibrados e devidamente transportados até o local de execução do teste a fim de não gerar erros de medição de carga aplicada e deslocamentos. De acordo com recomendações técnicas (ISRM, 1981), a execução dos testes de arrancamento devem seguir as etapas representadas no fluxograma da Figura 2.31.

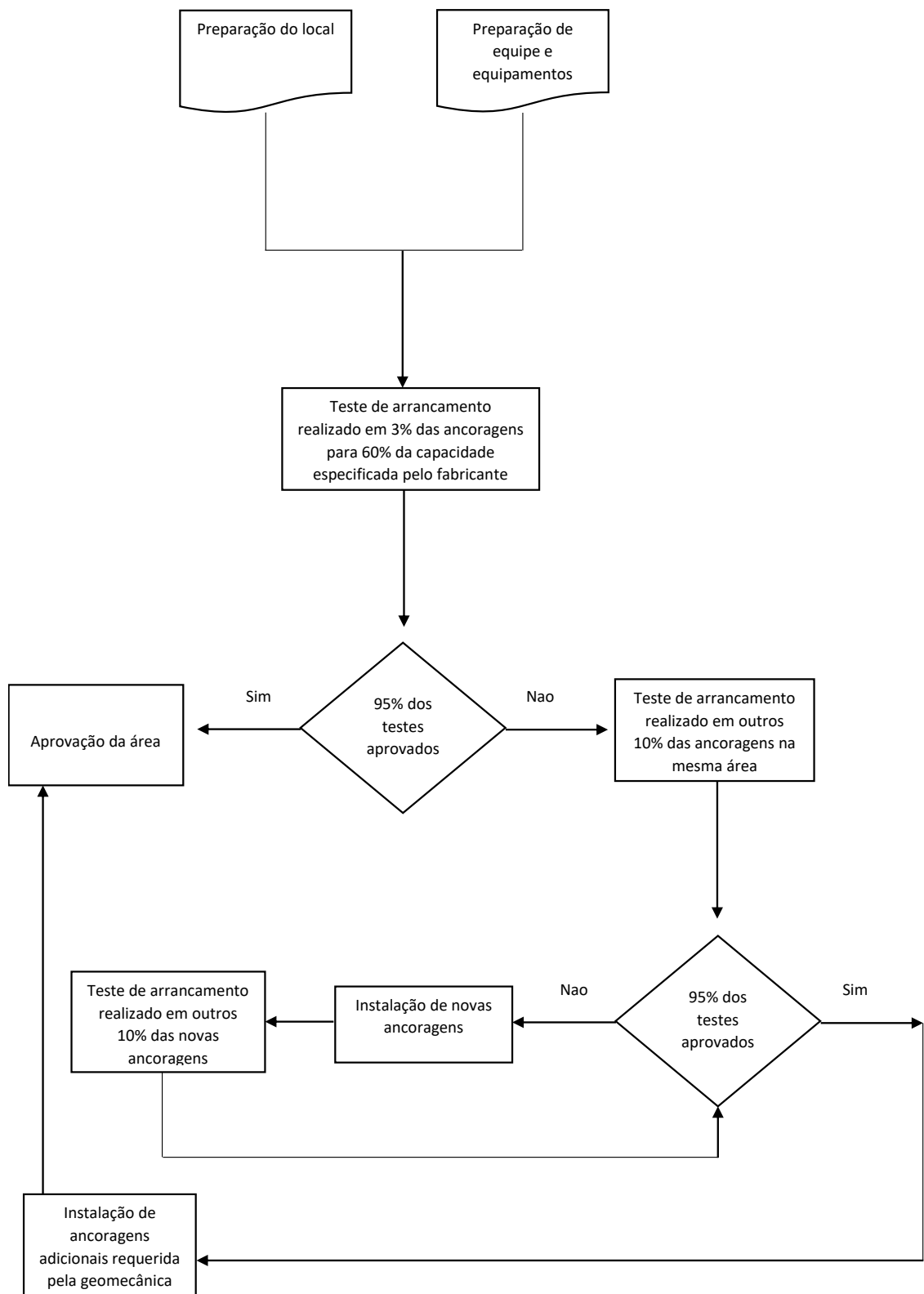


Figura 2.31 - Fluxograma do processo de teste de arrancamento – ISRM (1981).

A grande maioria das operações mineiras aplica uma carga de até 60% da capacidade da ancoragem, como especificada pelo fabricante, sem ruptura, os tirantes são aprovados. Dos testes realizados, 95% deles devem ser aprovados para liberação da área. Caso contrário, deve-se realizar outros testes de arrancamento em 10% das ancoragens instaladas no local e destes, ainda 95% deles devem ser aprovados para que os responsáveis pela geomecânica proponham uma malha adicional para o local. E, caso ainda estes 10% das ancoragens no local ainda não atinjam esta aprovação, deve-se reinstalar ancoragens e executar novamente o teste sob 10% destes novos tirantes.

2.11.2 Microcâmera

Segundo Cota (2010), a microcâmera de furo é inserida em uma perfuração e seu cabeçote pode ser girado para visualizar e fotografar e/ou televisionar as paredes ao longo da extensão da perfuração (Figura 2.32), detectando descontinuidades, contatos litológicos e diferentes outras feições litológico-estruturais. Existem várias câmeras disponíveis com diâmetros diversificados para furos de diferentes tamanhos.

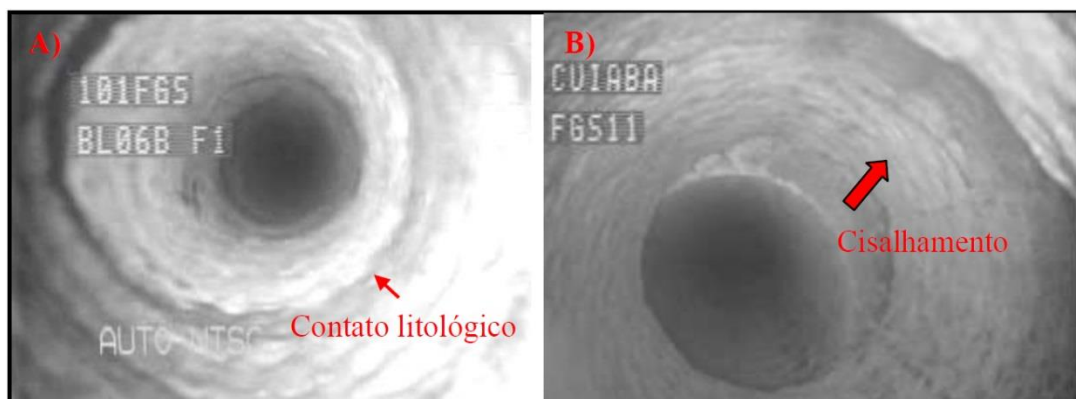


Figura 2.32 - A) visualização do contato litológico entre xisto e filito carbonoso; B) cisalhamento entre a xistosidade. Imagens de furos realizados na mina Cuiabá, Sabará-MG - Cota (2010).

Em um programa de monitoramento, onde serão feitas leituras regulares dos instrumentos, uma perfuração para o registro da câmera deve ser realizada e deixada aberta durante a duração do trabalho. O colar da perfuração deve ser bloqueado para evitar que poeira ou detritos sejam levados para o interior da perfuração (Hutchinson e Diederichs, 1996).

Segundo esses autores, sempre que possível, devem ser feitos registros de microcâmeras nos furos onde outros instrumentos de monitoramento são instalados. O registro da

microcâmara fornecerá informações sobre a localização de estruturas preexistentes na extensão do furo.

A localização do movimento dentro do maciço rochoso pode ser melhor entendida quando as informações da microcâmara de furo estiverem disponíveis, desde a pesquisa inicial até os furos adjacentes que são registrados regularmente.

2.11.3 Microsísmica

Em geral, a rotina de acompanhamento sísmico permite quantificar a sismicidade, além de fornecer uma ferramenta de logística para classificar os riscos sísmicos, ou seja, uma zonificação sísmica e prevenir, com possíveis alertas, zonas de instabilidade que poderia resultar em *rock burst* em minas subterrâneas (Mendecki *et al.*, 2010).

Segundo Mendecki *et al.* (2010), pode-se definir quatro objetivos específicos do monitoramento da resposta sísmica:

1. Risco: Detectar e localizar potenciais de danos no maciço induzidos por eventos sísmicos, para alertar e prevenir possibilidade de riscos operacionais;
2. Prevenção: Comparar o observado (sismo sentido) e o sismo esperado e entender o comportamento do maciço rochoso perante o evento;
3. Alertas: Detectar mudanças fortes e inesperadas de parâmetros sísmicos que poderão levar à instabilidade, afetando locais de trabalho imeditamente ou no curto prazo;
4. Retro Análise: Para uma busca de uma melhoria contínua, tanto da operação/planejamento de mina e do monitoramento micro-sísmico. A retro análise não deve ser realizada somente em momentos de danos, e sim, deve ser uma análise rotineira, para calibrar as informações iniciais do risco, ou microzonificação sísmica.

Com relação à direção de propagação, existem duas principais ondas: as ondas *p* e as ondas *s*. As primeiras, também conhecidas como compressionais, vibram na direção de propagação. As segundas, também conhecidas como cisalhantes, vibram ortogonalmente ao sentido de propagação.

As ondas *p* possuem velocidades de propagação maiores que as ondas *s* e estas velocidades são controladas pelas constantes elásticas dos meios de propagação. Outra

importante diferença é o fato de as ondas s não se propagarem nos fluidos, diferentemente das ondas p , que se propagam tanto nos sólidos quanto nos fluidos.

O princípio da sísmica de reflexão é baseado na emissão de ondas acústicas por uma fonte de energia. No caso de aquisições terrestres, estas fontes podem ser naturais ou induzidas. À medida que estas frentes de ondas se propagam pelo interior da terra, parte delas é refletida e parte refratada quando encontram uma interface no subsolo, geralmente relacionadas às mudanças litológicas.

As amplitudes e as frequências destas ondas respeitam o princípio físico da Lei de Snell, onde as amplitudes dependem diretamente da energia inicial e são proporcionais ao inverso da distância (para um meio isotrópico), já as frequências são inversamente proporcionais ao período destas ondas, quanto maior o período, menor a frequência e vice-versa.

A Figura 2.33 ilustra uma escavação subterrânea, nas proximidades de uma cava (*open pit*), onde é possível identificar os eventos coletados pelos instrumentos microssísmicos. A definição de dimensões de estruturas a serem coletadas serão de acordo com o adensamento e distribuição dos sensores no meio subterrâneo.

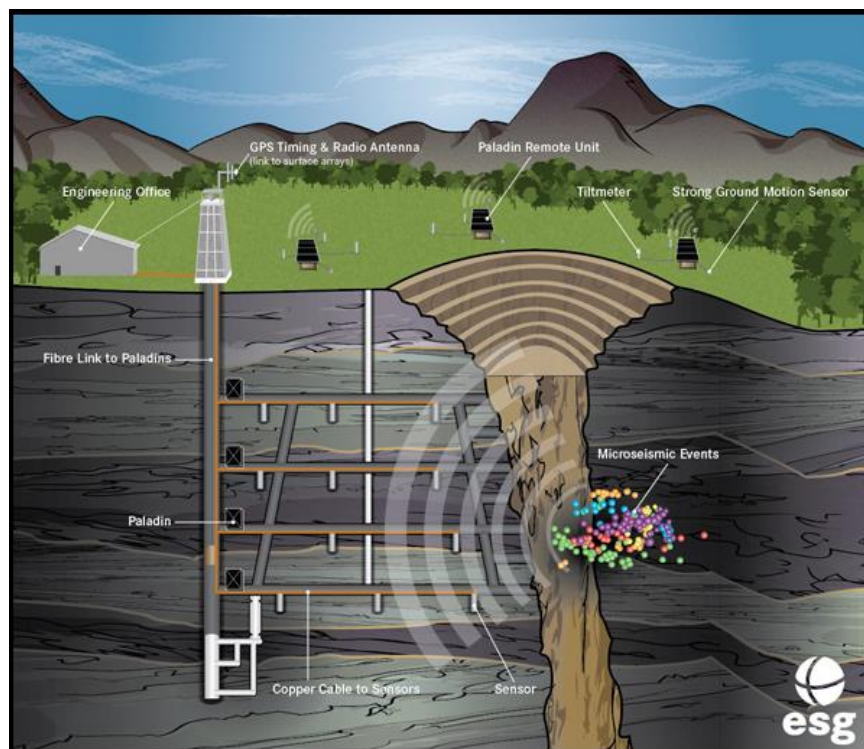


Figura 2.33 - Monitoramento microssísmico em minerações subterrâneas - Mendecki *et al.* (2010).

PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA PARA AMBIENTES SUBTERRÂNEOS

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Quando uma abertura ou escavação subterrânea é executada em um maciço rochoso, as tensões *in situ* existentes (tensões tanto verticais como horizontais) são perturbadas e novas tensões são induzidas imediatamente em torno da escavação. Uma forma que se utiliza para representar este novo campo de esforços, são linhas imaginárias em torno de um corpo elástico solicitado, ao longo do qual agem as tensões principais (Hoek e Brown, 1997).

As tensões induzidas têm uma influência direta na geometria e na forma das escavações. Em uma abertura circular, regular, a redistribuição dos esforços possibilita a ocorrência de um deslocamento radial na escavação, que pode assim levá-la ao colapso. De acordo com o campo de tensões a qual está submetida a escavação, pode-se, analiticamente, analisar quais são as tensões e os deslocamentos que agem em torno do raio da escavação².

A Figura 3.1 (*a* e *b*) detalha desde as linhas imaginárias que apresentam as trajetórias das tensões *in situ* principais, a redistribuição das mesmas, após a execução de uma abertura circular, juntamente com os deslocamentos radiais mobilizados. Com o objetivo de estabilizar a escavação, evitando uma possível ruptura do maciço rochoso, aplica-se uma pressão interna na abertura, por meio de estruturas de suporte/reforço, ou seja, aplica-se uma força no sentido contrário ao dos esforços impostos pelo maciço rochoso, buscando uma estabilização da escavação, que por sua vez, deve ser entendido, como um processo dinâmico.

² Para facilitar estas análises, considera-se um meio homogêneo, isotrópico e com comportamento elástico.

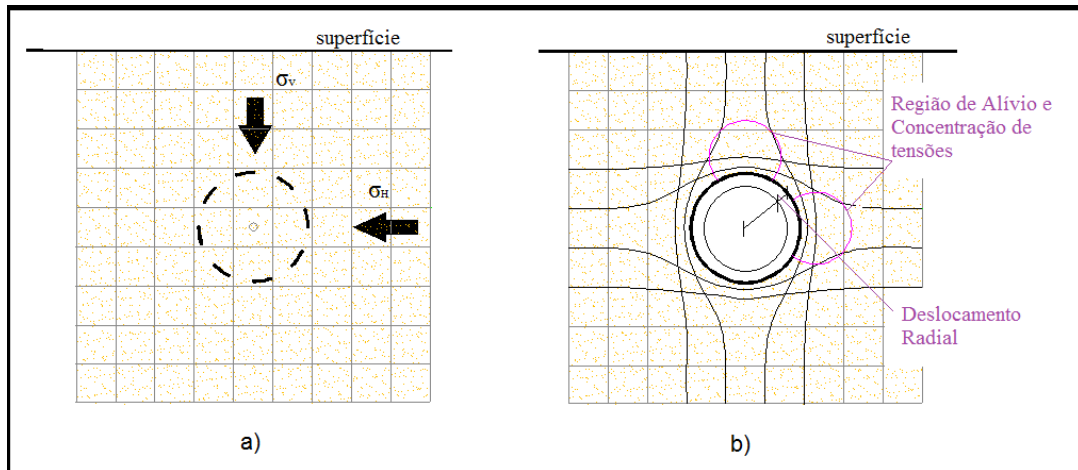


Figura 3.1 - Comportamento das tensões verticais e horizontais antes e após a abertura de uma escavação e deslocamentos radiais associados - modificado de Silva (2015).

Para melhor apresentar e entender a estabilização da escavação, o maciço rochoso pode ser subdividido em três regiões, sendo, uma zona sem danos, uma região de propagação de fissuras e uma zona fraturada (Figura 3.2).

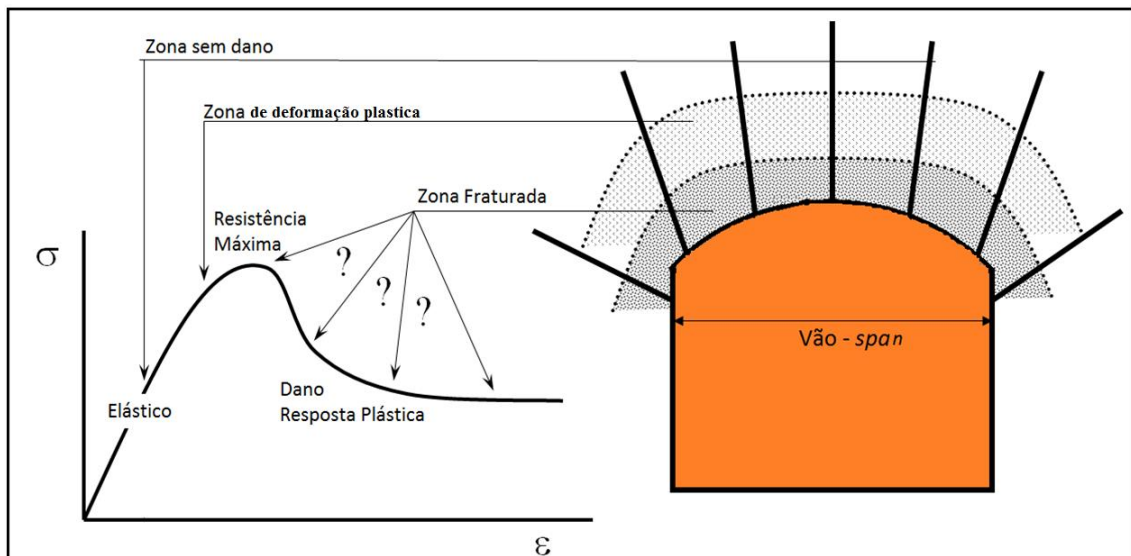


Figura 3.2 - Distribuição das zonas do maciço rochoso: sem danos, fraturada e plastificada - Lopez (2012).

Segundo Silva (2015), a determinação do carregamento transferido ao suporte requer uma análise da interação das características carga-deformação dos elementos compreendidos no sistema, sendo, a seção da escavação, o suporte instalado em cada seção e o avanço do túnel.

O comportamento da seção da escavação é definido pela Curva de Reação do Maciço - GRC (*Ground Reaction Curve*), representada na Figura 3.3 pela curva ABC, iniciando no

ponto A – onde a pressão interna é igual a tensão in situ, e terminando no ponto C, que corresponde a uma pressão interna igual a zero, e a máxima convergência possível. O ponto B define o encontro entre o comportamento elástico e o início da plastificação. Detalhes dos modelos constitutivos (elásticos ou elasto-plásticos) podem ser melhor entendido em livros textos tais como Duncan-Fama (1993) e Carranza-Torres (2004).

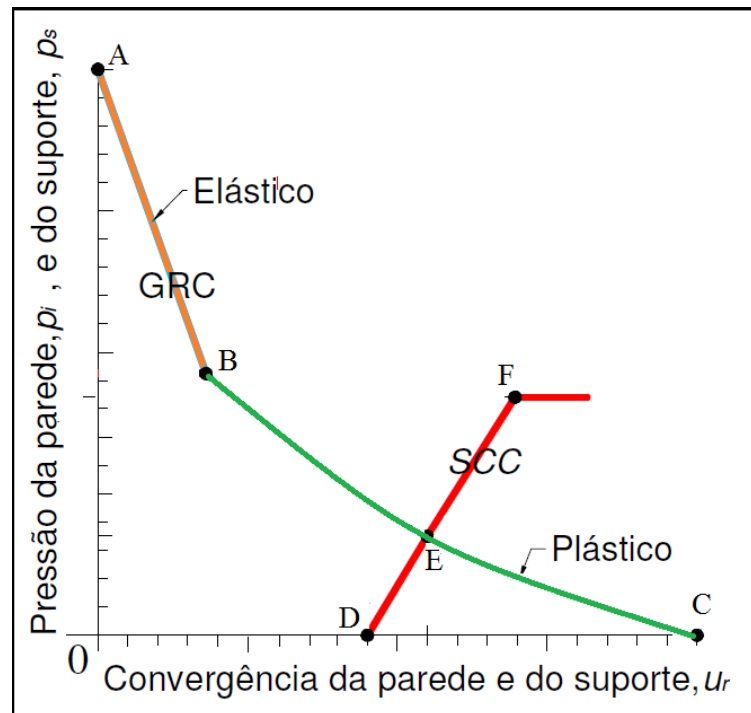


Figura 3.3 - Curva de Reação do Maciço e Curva Característica do Suporte - modificado de Silva (2015).

O suporte a ser instalado em cada seção é representado pelo elemento Curva Característica do Suporte – SCC (*Support Characteristic Curve*), que pode ser definido como sendo a relação entre a crescente pressão no suporte e o crescente deslocamento radial. Na mesma Figura 3.3, a SCC é representada pela curva DF, sendo o ponto D correspondente ao momento da instalação do suporte e o ponto F à capacidade máxima de suporte. Como informação adicional o ponto E é o momento adequado de instalar o sistema de fortificação, pois, se instalado antes, será antecipado e necessários sistemas de maior rigidez, enquanto que posteriormente ao mesmo ponto, pode ser tardio o momento de instalação.

A Figura 3.4 detalha o comportamento de uma escavação, em construção, em que a convergência inicia-se aproximadamente a uma distância duas vezes o diâmetro da escavação, antes da face e a paralisação desse deslocamento radial tende a estabilizar cerca de duas vezes o diâmetro da escavação, após a face.

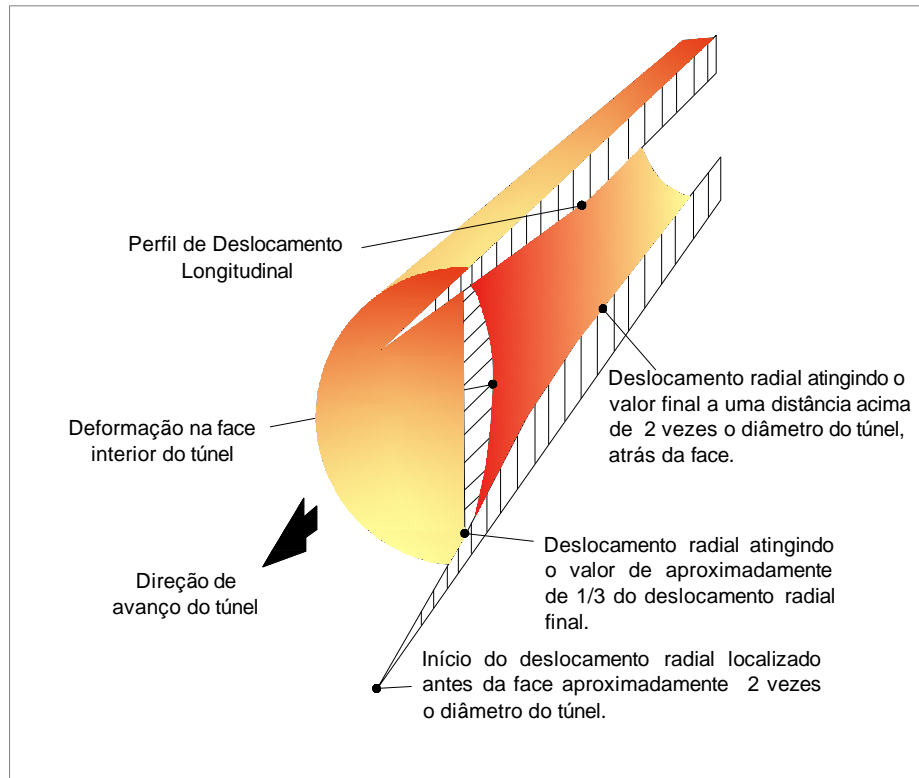


Figura 3.4 - Comportamento da deformação/deslocamento em torno, no maciço rochoso, da construção de um túnel - Carranza-Torres (2004).

Apesar de, teoricamente, se concluir que a escavação se estabiliza, ou seja, tem sua convergência final no momento que esta abertura entra em equilíbrio (deslocamento radial e a capacidade de suporte), à uma distância conhecida da frente de escavação onde não existe mais influência da face, porém, em operações mineiras algumas particularidades são de comum acontecimento, onde é considerado uma atividade dinâmica, e devem ser analisados outros detalhes e teorias.

Para melhor entender sobre a necessidade de se instrumentar com técnicas de convergência, em pontos distantes da face, deve se conhecer conceitos sobre:

- a) As vibrações induzidas por desmorte de rocha em escavações próximas podem causar danos, tais como, a propagação de abertura das descontinuidades, ou até mesmo a quebra por tração do maciço rochoso. Tais danos, podem ser medidos de acordo com metodologias já consagradas de análises de danos de campo próximo ou campo distante, além de possibilitar a elaboração de uma curva/equação de atenuação. Porém, a calibração em campo dessas informações, é de extrema importância para otimizar a precisão

da conclusão, ou seja, podem ser mensuradas utilizando o controle de convergência da abertura, ou medidores de trinca nas discontinuidades.

- b) Tensões induzidas, redistribuídas após aberturas de grandes vãos, ocasionando sobreposição de tensão em escavações próximas.

Em áreas de realce de minerações subterrâneas (Figura 3.5), quanto mais próximo esse for de uma escavação de acesso, menor custo terá de escavação (desenvolvimento), menor tempo demandará até se concluir essa abertura, mas, após a abertura deste realce, a redistribuição de tensão se dará imediatamente, onde poderá ocorrer uma sobrecarga de esforços nessas escavações.

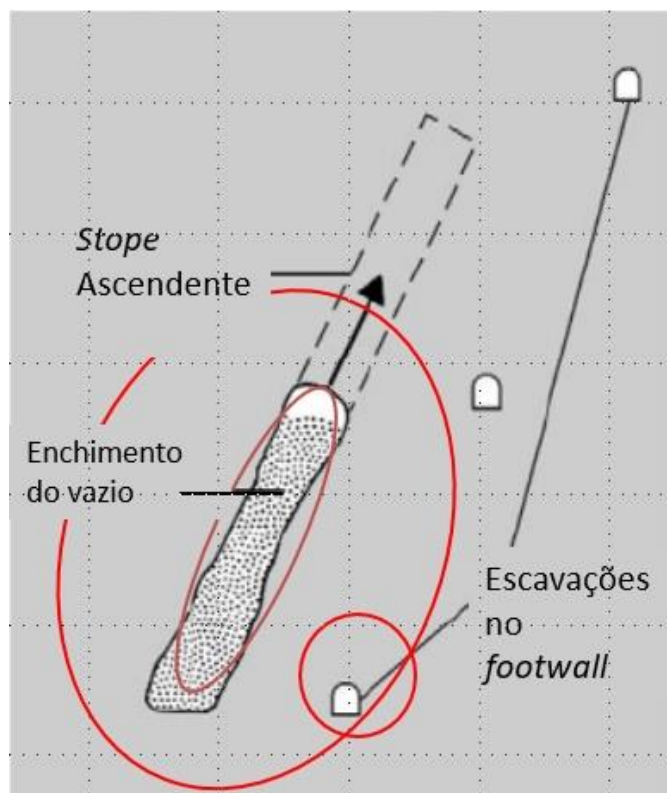


Figura 3.5 - Realces de mina próximos a escavações permanentes.

Controles de instrumentação, tais como, medidas de convergência, nestes casos devem ocorrer para garantir o conhecimento do comportamento da escavação para uma tomada de decisão em curto prazo, se necessário. Uma descrição detalhada dos fundamentos da análise de tensão pode ser entendida com mais detalhe em livros de Timoshenko e Goodier (1970).

- a) Interseções em minerações subterrâneas.

Por se considerar grandes vãos (*span*), e acesso de pessoas e equipamentos, monitoramento geomecânico de convergência deve ser executado com uma frequência pré-definida para se ter o controle da abertura e tomar decisão, se necessário, em curto prazo.

b) Escavações subterrâneas em grandes profundidades

Em profundidades consideráveis de escavações, é sabido que as tensões variam suas direções, ou seja, a tensão principal pode alterar de vertical para horizontal ou vice-versa. Controles de instrumentação são recomendáveis para acompanhar e entender o comportamento de deformação do maciço rochoso (escavação).

Em suma, é de extrema importância realizar um monitoramento de convergência em minerações subterrâneas.

3.2 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DINÂMICA DE ROCHAS

3.2.1 Sensores do Sistema Proposto

Com foco em superar as dificuldades operacionais de instrumentação de convergência, e buscando acompanhar a evolução tecnológica, atendendo as necessidades de monitoramento geomecânico, foi desenvolvido o SMDR (Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rochas), que é um equipamento que opera continuamente e oferece a possibilidade de definir a periodicidade das medições a serem coletadas sem necessitar de exposição de pessoal para a realização destas medidas.

Com alto desempenho, baseado em microprocessadores de última geração, o SMDR trabalha com medições simultâneas de vibrações, convergência e clima (temperatura e humidade) propiciando uma maior segurança operacional, exatidão na análise de processamento de dados e maior precisão e confiabilidade no monitoramento das cavidades.

Todos os dados coletados são armazenados em uma memória interna do sistema, e podem ser descarregados frequentemente através de um computador, ou quando se desejar o sistema pode ser conectado a uma central através de um sistema de rádios, enviando informações em tempo real sobre as grandezas medidas.

Um sistema eletrônico central é responsável pelo processamento e armazenamento dos sinais de todos os sensores. Essa central é própria e desenvolvida exclusivamente para o SMDR. A Figura 3.6 ilustra a central (*datalogger*), juntamente com o esquema de conexões dos sensores.



Figura 3.6 - Central de processamento / datalogger e locais de instalação dos sensores – MecRoc (2016).

Para um melhor entendimento, será explicado brevemente sobre todos os sensores do sistema, e posteriormente, detalharemos sobre o foco do trabalho, que são as medidas de convergência.

- Sensores Óticos de Distância

A variação de deslocamento entre dois pontos do ambiente (teto/lateral; teto/piso; lateral/piso) é avaliada por meio de sensores eletrônicos óticos de deslocamento (Figura 3.7). Tais sensores trabalham com uma resolução de 0,03 mm e são protegidos contra intemperes. Em cada central é possível trabalhar com três sensores, buscando ser suficiente para fazer uma triangulação no ambiente.

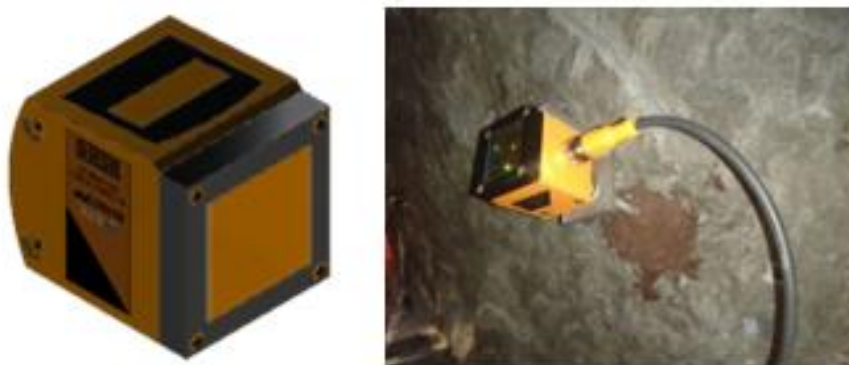


Figura 3.7 - Medidores de Convergência a laser – MecRoc (2016).

Esses sensores são capazes de mensurar uma determinada distância, entre 1 m e 75 m, com alta precisão através de um feixe de laser e alta taxa de aquisição de dados, sendo tomadas várias medidas ao longo de um dia. Esse valor de distância, avaliado ao longo de dias, permite verificar se existe qualquer pequena variação de deslocamento entre os pontos, podendo indicar deformações/deslocamentos de galerias (aberturas e fechamentos) ocasionados pela movimentação do maciço rochoso ou possibilitar o monitoramento de estruturas geotécnicas (pilares; blocos abatidos, etc).

- Sensores de Vibrações

A vibração, induzida por detonação, será monitorada utilizando geofones de 4,5Hz, para campo distante, distribuídos triaxialmente. A configuração e calibração dos geofones segue as recomendações da norma NBR 9653 (ABNT, 2005), sendo possível coletar ondas verticais, longitudinais e transversais e também as velocidades de vibração de partículas. Com o sensor de vibração (Figura 3.8) é possível determinar as frequências relativas a onda e também as vibrações resultantes do evento.



Figura 3.8 - Sensor de Vibração (geofone) Triaxial – MecRoc (2016).

- Sensores de Temperatura e Umidade

Apesar de não ser um parâmetro geomecânico, monitorar o ambiente de trabalho dos operadores, é uma informação relevante para Saúde e Segurança, enquanto em cavidades, tais informações são essenciais para estudos bioespeleológico do interior da caverna, sendo um dos parâmetros utilizado para definir o grau de relevância da mesma (Auler, 2011). Por esse motivo optou-se por incluir esses sensores (Figura 43), com software acoplado (Figura 3.9) no sistema de monitoramento proposto.



Figura 3.9 - Sensor de Temperatura e Umidade do SMDR – MecRoc (2016).

O SMDR, no presente trabalho, para a instrumentação geomecânica, dará foco ao monitoramento de variação de deslocamentos da superfície, ou seja, no sistema de convergência de ambientes subterrâneos. Para facilitar a visualização e emissão de relatórios, fez-se uso direto de software acoplado ao dispositivo para aquisição e processamento dos dados coletados, Figura 3.10.

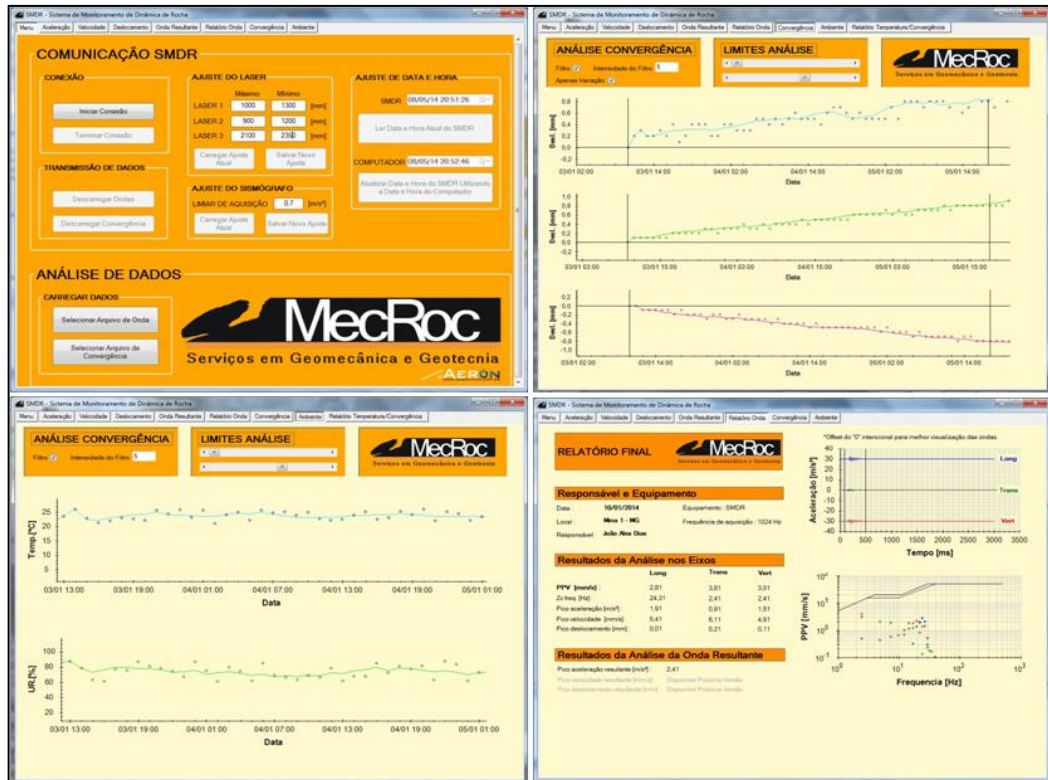


Figura 3.10 - Telas e dados do software do SMDR – MecRoc (2016).

3.2.2 Sistema de Monitoramento proposto

Para detectar a variação de deslocamento da superfície do ambiente subterrâneo ou variação de convergência em galerias/conduitos, é utilizado um sensor óptico. A medição da distância é realizada por um feixe de laser emitido, refletido, e captado de volta pelo sensor. A distância é calculada pelo tempo gasto pelo laser para realizar o trajeto.

O feixe de laser deverá estar apontado na direção de um refletor, que pode ter uma superfície prismática ou opaca, dependendo do modelo do sensor. A distância capaz de ser medida pelo sensor pode chegar até 75m, também dependendo do modelo utilizado. Para a fixação do laser e do refletor usa-se um suporte que é aparafusado ao sensor. Esses suportes deverão ser fixados na parede/teto do maciço rochoso de uma das duas formas a saber:

- a) Fixação com resinas ou calda de cimento em um furo de um pino roscado;
- b) Fixação por uma barra telescópica (sem interferências locais).

3.2.3 Sequência de Montagem do Sensor de Convergência

A montagem do sensor de convergência consiste em realizar os seguintes procedimentos:

- (i) Montar a barra roscada no suporte do sensor utilizando-se uma arruela plana, uma arruela de pressão e uma porca em cada um dos lados do suporte (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Suporte para fixação do sensor laser de convergência.

- (ii) Montar o sensor no suporte utilizando os parafusos fornecidos, conforme a Figura 3.12.

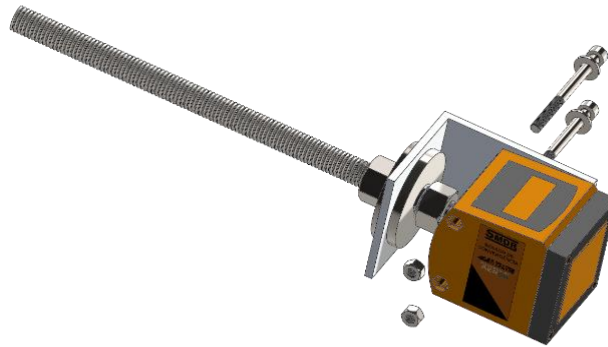


Figura 3.12 - Encaixe do sensor de convergência ao suporte de fixação.

- (iii) Após a montagem do laser, o refletor também deverá ser montado (Figura 3.13), utilizando o *kit* de parafusos do conjunto, da mesma forma que no suporte do sensor, utilizando-se uma barra roscada, uma arruela plana, uma arruela de pressão e uma porca em cada um dos lados do refletor.

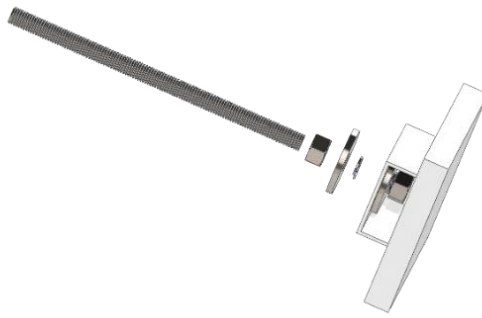


Figura 3.13 - Montagem do refletor do sensor laser no suporte de fixação.

3.2.4 Instalação do Sensor de Convergência no Ambiente Subterrâneo

O sensor de convergência deverá ser instalado na superfície do ambiente subterrâneo, em um dos lados (parede/teto/piso) e do lado oposto ao refletor de forma que o feixe de luz fique o mais próximo possível do centro do refletor.

Recomenda-se a instalação primeiramente do sensor ótico e em seguida a do refletor. A instalação do refletor deverá ser realizada após a completa secagem da fixação do sensor ótico, uma vez que ocorre movimentação do sensor no decorrer da secagem. O equipamento deve estar ligado de forma a possibilitar o ajuste do refletor para que o feixe laser reflita próximo ao centro do mesmo.

O sensor ótico possui um ajuste da faixa de medição que o mesmo irá medir. Após a instalação, os parâmetros do sensor deverão ser configurados para uma faixa de medição centrada no valor alvo conforme a explicação a seguir. A precisão da medição da distância depende do intervalo da faixa de medição configurado. O melhor ajuste depende da amplitude do deslocamento que se deseja monitorar. Consulte seu fornecedor para saber qual a faixa de operação ideal para sua aplicação.

3.2.5 Configuração dos parâmetros do sensor ótico

Para o correto funcionamento do sensor de convergência os limites de medição do mesmo deverão ser ajustados em uma faixa ao redor do limite que se deseja monitorar. Para realizar esse ajuste, devem ser adotados os seguintes procedimentos:

- (i) Instalar o sensor e o refletor no local que se deseja monitorar utilizando resina;
- (ii) Observar no visor do laser o valor indicado da distância medida e anotar esse valor;

- (iii) Em torno desse valor anotado define-se então uma faixa de medição de 100mm³. Ou seja, o limite inferior da faixa de medição do laser será um valor 50mm abaixo do valor anotado e o limite superior um valor 50mm acima do mesmo valor anotado anteriormente;
- (iv) Anote então os dois valores, ou seja, o limite inferior e o limite superior que serão ajustados no sensor;
- (v) No sensor ótico ajustar o parâmetro ASP com o valor mínimo da faixa de medição, seguindo o procedimento a seguir;
- (vi) Selecionar parâmetro; Pressionar [MODE/ENTER] até que o parâmetro desejado, **ASP**, seja exibido no display (Figura 3.14).

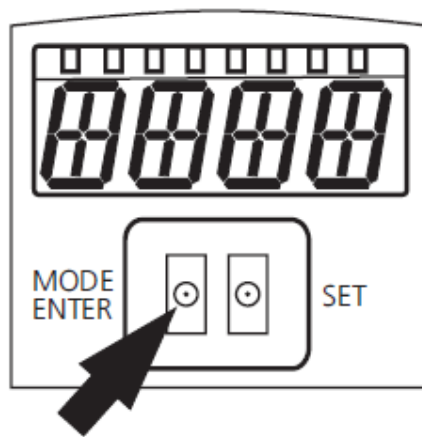


Figura 3.14 - Seleção inicial do sensor de convergência.

- (vii) Ajustar o valor do parâmetro (Figura 3.15), pressionando o botão [SET]. O valor de parâmetro atual irá piscar durante 5s e começará então a incrementar. O valor do parâmetro pode ser aumentado continuamente (mantendo o botão pressionado) ou passo a passo (pressionar o botão repetidamente). Não é possível reduzir o valor do parâmetro. Caso isso seja necessário, deve-se incrementar o valor do parâmetro até atingir o máximo da faixa de medição do laser. Em seguida, a contagem reinicia com o valor de ajuste mínimo.

³ O tamanho da faixa utilizado como exemplo é de 100mm, mas esse valor vai depender de fatores como a distância que será monitorada e o comportamento do material onde o sistema está instalado. Consulte o seu fornecedor para definir qual a melhor faixa a ser utilizada.

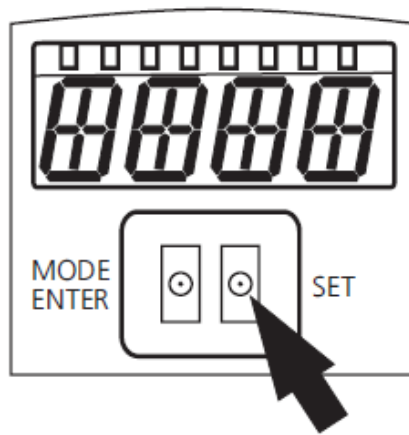


Figura 3.15 - Configuração inicial do sensor de convergência.

- (viii) Confirmar o valor do parâmetro; Pressionar brevemente [MODE/ENTER]. O novo valor de parâmetro é exibido e torna-se ativo.
- (ix) Concluir a parametrização; Aguardar 15 s ou pressionar [MODE/ENTER]. O atual valor de medição é exibido.
- (x) No sensor ótico ajustar o parâmetro AEP com o valor máximo da faixa de medição, seguindo o mesmo procedimento para o parâmetro ASP. Em caso de deslocamento abaixo da distância mínima, será exibida a mensagem de erro 'SIZE'.
- (xi) Manter os valores configurados nos parâmetros AEP e ASP anotados para posterior configuração da interface gráfica.

3.2.6 Interface Gráfica

Juntamente com o sistema, foi desenvolvido um *software* que constitui parte integrante do equipamento (Figura 3.16), para configuração, análise, interpretação dos dados e elaboração de relatórios.



Figura 3.16 - Interface Gráfica – software SMDR.

Por medida de segurança todos os dados descarregados do SMDR são criptografados e só podem ser abertos pela interface gráfica. Dessa forma, pode-se garantir que não acontecerá manipulação dos dados. Caso o usuário deseje os valores podem ser exportados em uma planilha do Excel® para utilização em outros softwares de análise de dados. A metodologia de exportação dos dados será explicada mais adiante. Com a interface gráfica e o driver do conector serial USB instalados, um computador é conectado ao SMDR utilizando-se dois cabos de comunicação (Figura 3.17).

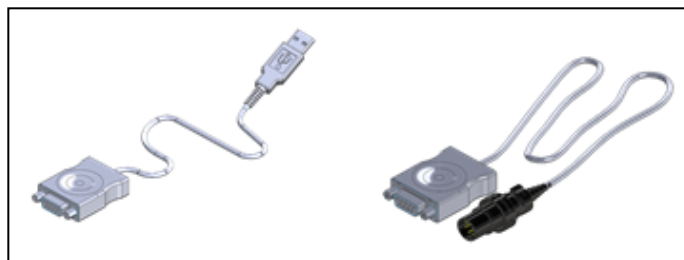


Figura 3.17 - Cabos de comunicação entre central de processamento e computador.

3.3 AJUSTES E ANÁLISES DOS DADOS DE CONVERGÊNCIA

Nos ajustes de convergência (Figura 3.18), são configurados os valores ajustados para os limites nos sensores de convergência. Quando conectado, o sistema exibe os valores atualmente ajustados. Para a alteração desses valores, os mesmos deverão ser digitados nas caixas correspondentes e o botão [Alterar Configuração] pressionado, sendo exibida uma mensagem confirmando ou não o sucesso da alteração.

Ajustes da Convergência

	Mínimo	Máximo	
Conv. 1	1020	1120	[mm]
Conv. 2	1450	1550	[mm]
Conv. 3	2650	2750	[mm]

Alterar Configuração

Intervalo de Aquisição: 30 min

Figura 3.18 - Ajustes de convergência dos sensores.

Os valores de ajuste de convergência inseridos devem ser os mesmos configurados nos sensores de convergência. O intervalo de aquisição indica o intervalo de tempo entre a leitura de um ponto de convergência e a próxima leitura. Esse valor deve ser escolhido levando em consideração as características do local estudado. Um intervalo de aquisição pequeno pode levar a um grande número de pontos coletados e uma massa muito grande de dados a serem avaliados. Valores entre alguns minutos e uma hora em geral são os mais recomendados.

Outra configuração da janela na Interface Gráfica é exibida quando selecionado a análise de um dado de convergência. Na aba de convergência, são apresentados os dados dos sensores de convergência. A janela possui três gráficos referentes aos três sensores de convergência possíveis de instalação no SMDR. Cada um dos sensores terá seus dados exibidos no gráfico, desde que esteja instalado no SMDR, Figura 3.19.

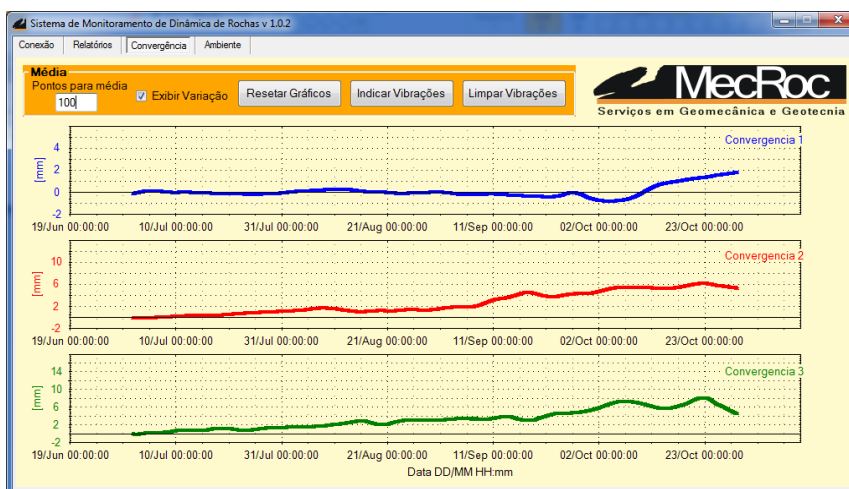


Figura 3.19 - Interface apresentando dados de convergência.

Da mesma forma que com os dados de ambiente, é possível fazer uma média com os resultados, no campo de 'pontos para média', deve-se colocar o número de pontos utilizados para o cálculo de cada média.

Um outro recurso disponível é o de [Exibir Variação]. Caso essa caixa esteja marcada, o valor exibido no gráfico estão centrados em torno de uma média de todos os valores para aquele dado. Se a caixa for desmarcada, os valores exibidos são referentes aos valores absolutos registrados pelo sistema. A exibição dos dados de convergência conta ainda com um recurso de relacionar a convergência registrada com os eventos de vibração registrados pelo sistema. No botão [indicar vibrações], é possível selecionar um conjunto de dados específicos de vibração, que serão então plotados em um mesmo gráfico (Figura 3.20).

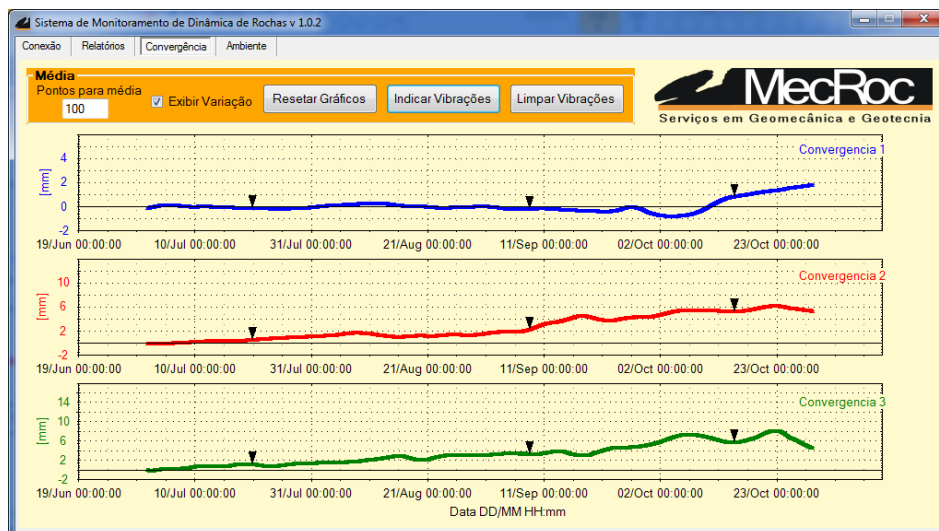


Figura 3.20 - Dados de convergência e momentos exatos que ocorreram vibrações coletadas pelo SMDR.

Com isso é possível relacionar se eventuais variações que aconteçam nas medidas de convergência, podem estar, de alguma forma, relacionadas com eventos de vibração, que podem ser decorrentes de detonações, que aconteçam na região.

ESTUDO DE CASO I – PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE UMA CAVIDADE NATURAL

4.1 LOCALIZAÇÃO DA CAVIDADE

Nos últimos anos houve um grande aumento no número de cavidades naturais cadastradas em formações ferríferas no Brasil. Esse fato vem sendo associado às mudanças recentes nas regras jurídicas voltadas ao licenciamento ambiental de empreendimentos em áreas com potencial espeleológico. Com as novas mudanças na legislação foi possível, nestas regiões, direcionar esforços para a prospecção espeleológica, estudos de relevância e estudos específicos visando a proteção do patrimônio espeleológico (Gontijo *et al.*, 2016a).

Grande parte das cavidades, juntamente com suas respectivas áreas de influência, não podem sofrer impactos irreversíveis e possuem sua preservação garantida pela legislação vigente. Isso, aliado ao fato que o processo espeleogenético é semelhante ao processo de concentração mineral em ambientes de formações ferríferas, causa o bloqueio de recursos minerais, além da inviabilização de obras de infraestrutura vitais aos empreendimentos mineiros. Atualmente, existem diversos estudos, desenvolvidos pela iniciativa privada e pública, que buscam avaliar e monitorar os impactos físicos que os empreendimentos podem causar nas cavidades e suas áreas de influência.

Segundo Gontijo *et al.* (2016a), a realização de um monitoramento geotécnico em ambientes subterrâneos não se trata apenas da seleção de instrumentos e sim de um processo de engenharia abrangente, com premissas básicas que devem ser seguidas, além de análises específicas para otimização do projeto de monitoramento. Este estudo, então, busca apresentar as considerações e detalhes da instrumentação geotécnica contínua de uma cavidade natural, inserida em um ambiente de formações ferríferas, localizada na região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Distante 189m a oeste da cavidade, encontra-se uma estrada de acesso e um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD), ambas na direção N-S. Outras estruturas

encontram-se a uma distância maior como, por exemplo: 320m à norte inicia-se área industrial; 310m ao sul inicia-se área industrial; 210m à leste encontra-se uma estrada de acesso e a 250m a sudeste encontra-se uma estrada de acesso.

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E ESPELEOLÓGICAS LOCAIS

A cavidade desenvolve-se, preferencialmente, ao longo do contato com a canga sotoposta ao itabirito. Esse contato é visível quase que na totalidade da cavidade e caracteriza-se por ser uma superfície bastante irregular e interdigitada (Auler, 2011).

O itabirito constitui uma rocha de protólito sedimentar de origem química, depositada em ambiente oxidante e posteriormente metamorfizada. É estruturada por bandamentos alternados, milimétricos a centímetros, de porções compostas por silicatos e porções compostas por minerais de óxido de ferro, principalmente hematita, magnetita e martita. Por se tratar de uma rocha metamórfica deformada, é possível identificar planos de fraturas, juntas, zonas de cisalhamento, além do acamamento. Também é possível identificar dobramentos, lineações de interseções e indicadores cinemáticos.

A canga sobreposta ao itabirito é caracterizada por apresentar um baixo selecionamento, com seixos pouco arredondados a angulosos, variação granulométrica acentuada indo de matações a cascalho, compostos por itabirito e quartzo de veio. Possui uma matriz arenosa com granulometria de areia grossa a muito fina, juntamente com argilominerais de granulometria silte e argila. Aparentemente, existe uma granodecrescência ascendente que pode evidenciar uma movimentação desse material anterior a sua oxidação e cimentação, entendido como um material coluvionar. Acima da canga existe uma camada de solo de espessura variada que permite o desenvolvimento de uma vegetação mais densa em alguns pontos.

A cavidade localiza-se na vertente W de uma drenagem na área industrial do empreendimento mineiro. Caracteriza-se por ser uma cavidade encaixada na interface entre as formações ferríferas bandadas (BIF's) e a canga (Figura 4.1). Sua morfologia pode ser definida como linear com um desenvolvimento principal na direção N-S. Apresenta uma projeção horizontal de 74m, desnível de até 2,50m, área de 396m² e um volume aproximado de 485m³. Possui apenas uma entrada de 16m de largura e 3,00 metros de altura, localizada em uma quebra no relevo de direção E-W em meia encosta.

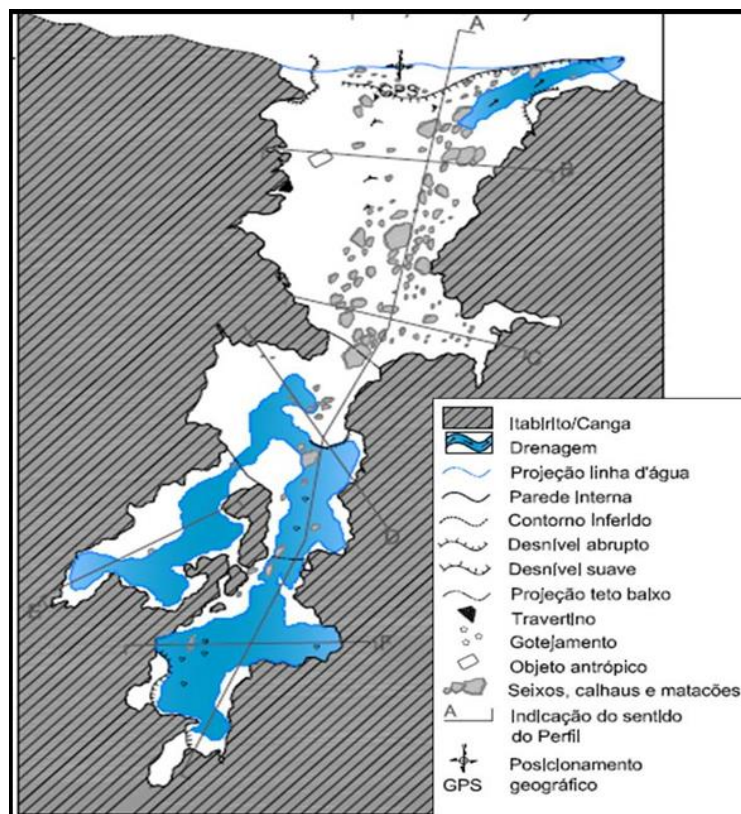


Figura 4.1 - Planta baixa da cavidade em estudo - Auler (2011).

4.3 CARACTERIZAÇÃO E ZONEAMENTO GEOTÉCNICO DA CAVIDADE

As informações levantadas em campo foram tratadas e analisadas espacialmente possibilitando a setorização dos aspectos geotécnicos semelhantes. Entende-se que os locais de maior fragilidade são os que provavelmente responderiam primeiro aos impactos sofridos nos condutos por agentes externos. Para a caracterização geotécnica da cavidade foram descritos aspectos relacionados às:

- Qualidade do maciço rochoso (grau de alteração e coerência, além das principais características das discontinuidades).
- Prováveis mecanismos de ruptura.
- Sinais de instabilidade
- Morfologia dos condutos.
- Dinâmica dos sedimentos
- Dimensões do vão.

Para cada aspecto adotou-se uma escala de pontuação e do somatório desses parâmetros foi possível definir um zoneamento de fragilidade da cavidade. A atribuição de valores

ocorreu de forma comparativa, resultando em um zoneamento apenas qualitativo, de modo a definir as áreas mais susceptíveis a possíveis impactos.

Para obtenção da qualidade do maciço rochoso foram utilizados os sistemas de classificação de maciços rochosos desenvolvidos por Bieniawski (1974) e Barton et al. (1974), porém esses sistemas foram adaptados, e não são o foco deste trabalho detalhar tal adaptação. Em média a qualidade do maciço levantado pelo método RMR foi de 54 para o itabirito e 49 para a canga. Já a qualidade levantada pelo índice Q teve um resultado de 2,099 para o itabirito e 0,667 para a canga.

Segundo Auler (2011), a fragilidade quando relacionada à movimentação dos sedimentos está ligada principalmente aos mecanismos de transporte. Na cavidade em questão a gravidade atua no transporte em função da inclinação do piso, além de fluxos de água que ajudam na movimentação durante as estações chuvosas. Com base nessas características, foram delimitadas áreas semelhantes e atribuídos índices (Tabela 4.1) para cada uma delas, em função da facilidade de movimentação dos sedimentos (Figura 4.2). Em épocas de chuva a área com fluxo de água foi penalizada em dois pontos.

Tabela 4.1 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função da dinâmica dos sedimentos.

Características	Índices
Sem sedimentos	10
Piso plano a pouco inclinado	8
Inclinação mediana	5
Inclinação acentuada	3

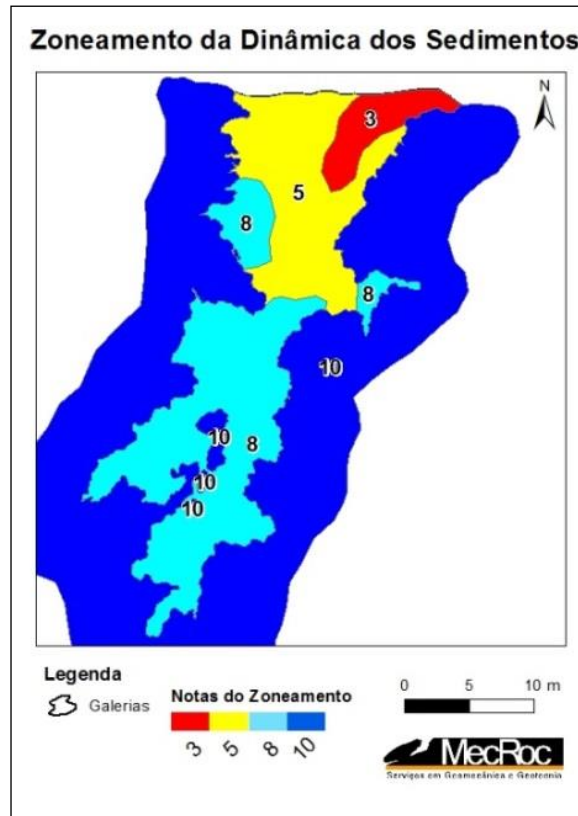


Figura 4.2 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função da dinâmica dos sedimentos - Gontijo *et al.*, (2016a).

O grau de estabilidade de uma abertura subterrânea está também relacionado à dimensão do vão em questão. Para definir um valor comparativo entre a estabilidade dos condutos da cavidade foi realizada uma análise utilizando os círculos que circunscrevem a galeria em diversos pontos. Com base nos valores das áreas desses círculos, foram atribuídos índices (Tabela 4.2) para cada intervalo, buscando-se realizar um comparativo do grau de estabilidade no local (Figura 4.3).

Tabela 4.2 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho do vão.

Área do Círculo	Índices
> 60m ²	3
60m ² - 20m ²	5
20m ² - 10m ²	8
< 10m ²	12
0	15

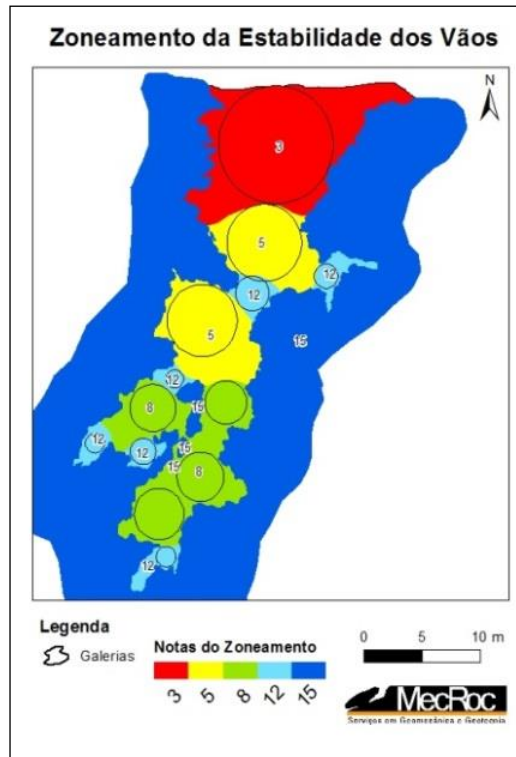


Figura 4.3 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho dos vãos - Gontijo *et al.*, (2016a).

Um parâmetro comparativo que também foi usado na definição do zoneamento da fragilidade é a morfologia das seções dos condutos. Ambientes subterrâneos em formato circular ou em abóboda são considerados mais estáveis quando comparados às formas retangulares ou quadrados, devido às tensões no entorno da abertura. Em aberturas abobadadas, a redistribuição dos esforços ocorre de maneira ótima, ou seja, sem concentração de tensões, devido a não existir “quinas” (Figura 4.4). Com base nessas características foi associada uma nota (Tabela 4.3) em função da estabilidade e setorizado na cavidade os locais com aspectos semelhantes (Figura 4.5).

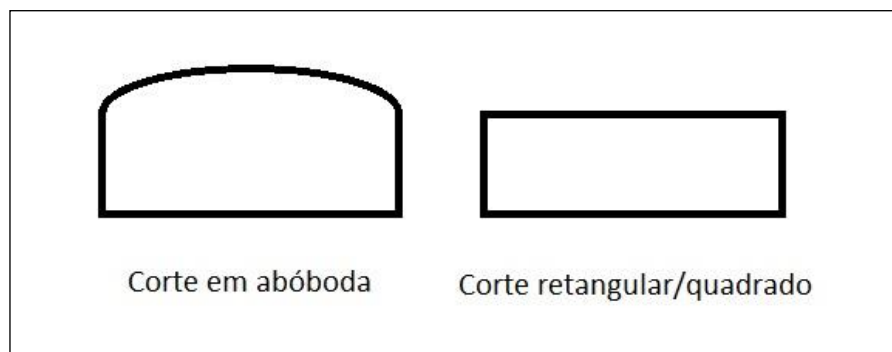


Figura 4.4 - Exemplo dos tipos de cortes existentes na cavidade.

Tabela 4.3 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função do formato dos cortes.

Formato do corte	Índices
Sem abertura	15
Abertura em abóboda	10
Abertura retangular/quadrada	5

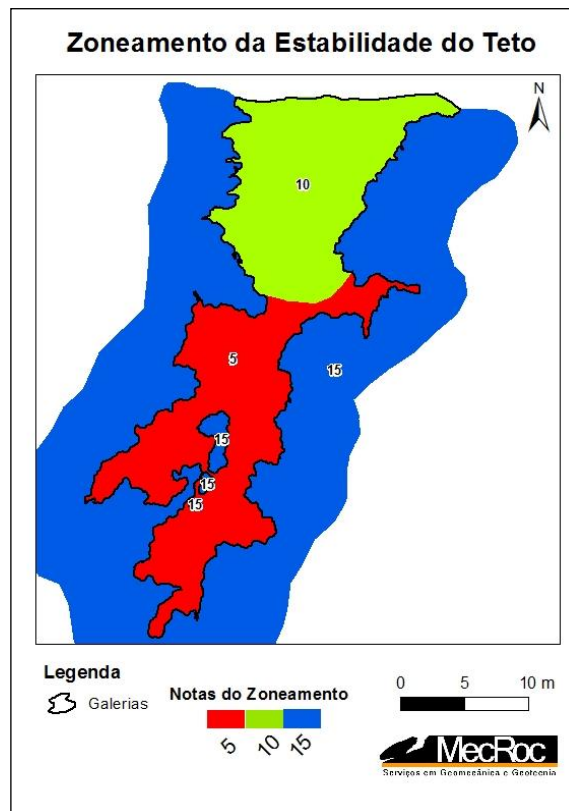


Figura 4.5 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função do tamanho dos vãos - Gontijo et al., (2016a).

Devido às estruturas presentes no itabirito das laterais da cavidade é possível a geração de cunhas que, por algum agente externo, podem vir a se movimentar. Outro mecanismo de ruptura observado na cavidade é a queda de massa do teto composto de canga. A queda de blocos do teto trata-se do mecanismo mais comum, tendo em vista também que faz parte de uma das etapas da evolução genética da cavidade. Para cada um desses parâmetros foi associado um valor (Erro! A origem da referência não foi encontrada. 4.4) e delimitado, na planta da cavidade, zonas de características semelhantes (Figura 4.6).

Tabela 4.4 - Parâmetros para o zoneamento da fragilidade geotécnica em função dos mecanismos de ruptura.

Mecanismos de Ruptura	Índice
Sem ruptura	15
Deslizamento lateral	10
Queda de blocos	5

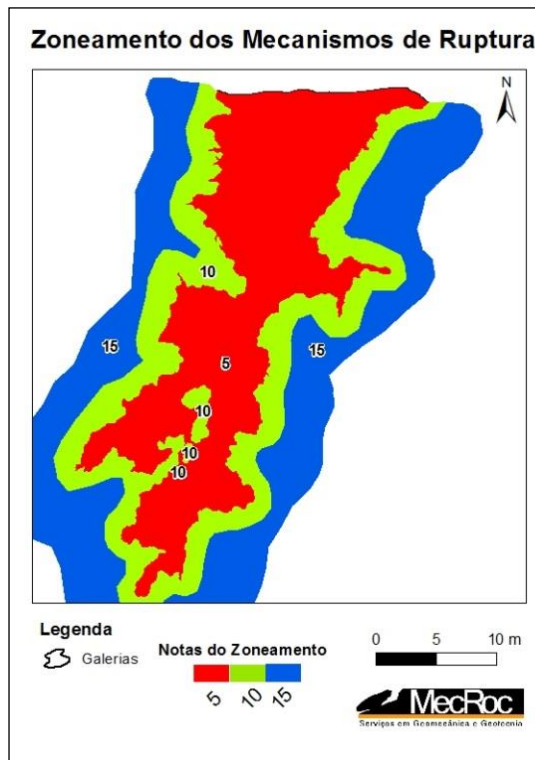


Figura 4.6 - Distribuição do zoneamento da fragilidade geotécnica em função dos mecanismos de ruptura - Gontijo et al., (2016a).

Em alguns pontos da cavidade foram identificados mecanismos de ruptura em processo de atuação. Esses mecanismos tratam-se de fraturas de tração na canga presente no teto da cavidade. A instabilidade é gerada a partir do momento em que a coesão da porção que ainda não se desprende não é suficiente para suportar o peso do bloco definido pela superfície da fratura, fazendo-o colapsar. Nesses locais a fragilidade geotécnica da cavidade foi penalizada em 15 (Figura 4.7). Estes estudos foram realizados em períodos de clima seco, sendo estas feições caracterizáveis em épocas de chuva por meio de fluxos contínuos e empoçamentos ou mesmo fluxos torrenciais (enxurradas).

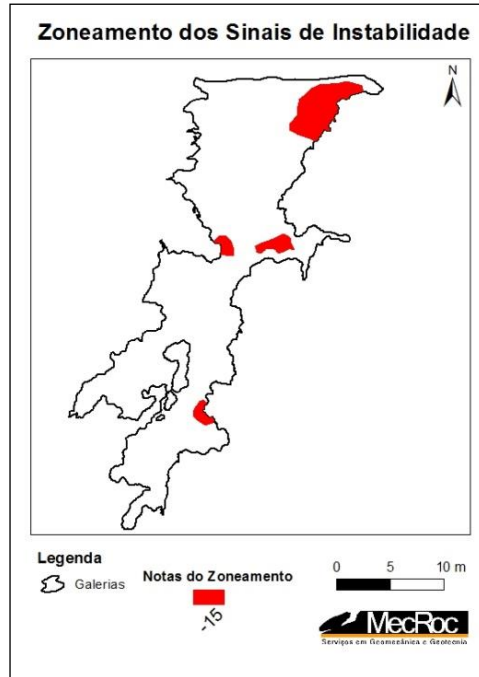


Figura 4.7 - Zoneamento dos sinais de instabilidade da cavidade - Gontijo et al., (2016a).

A partir da somatória dos atributos geotécnicos, tornou-se possível estabelecer o zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade (Figura 4.8). Este zoneamento foi reanalisado também em função de uma simulação do ambiente subterrâneo durante a estação chuvosa.

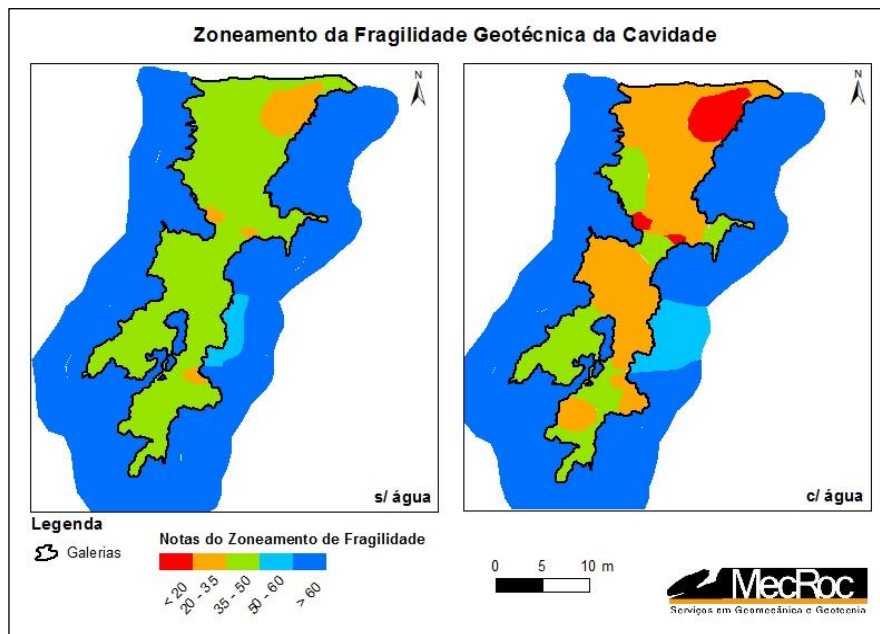


Figura 4.8 - Zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade - Gontijo et al., (2016a).

Com base no zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade, foram definidos três pontos para a instrumentação do monitoramento de deslocamento do maciço, um ponto para o monitoramento das vibrações e um ponto de monitoramento climático.

O uso de monitoramento geotécnico em ambientes subterrâneos não é apenas a seleção de instrumentos, mas um passo a passo de um processo de engenharia abrangente, começando com uma definição da necessidade e terminando com a implementação dos dados. O desafio é selecionar os parâmetros de medição mais sensíveis com relação aos objetivos do projeto, como por exemplo, os que vão mudar significativamente a direção do empreendimento. No entanto, devido às limitações físicas e restrições ambientais, nem todos os parâmetros podem ser medidos com a mesma facilidade e sucesso.

No caso de cavidades naturais subterrâneas, os principais aspectos observáveis são causados por vibrações que se refletem no deslocamento de blocos/lajes, abertura ou fechamento de vãos, movimentação de estruturas, sedimentos ou espeleotemas, dentre outros. Além disso, mudanças bruscas relacionadas a temperatura e umidade podem comprometer o equilíbrio do ecossistema cavernícola.

Considerando que monitoramento em cavidades naturais é um tema novo no assunto geotécnica, a utilização de planos (conceituais, básicos e executivos) de monitoramento é necessária para melhor definição dos parâmetros a serem avaliados e os respectivos instrumentos a serem utilizados.

Em função da necessidade de se manter a integridade física das cavidades naturais nas proximidades de um empreendimento, a importância do monitoramento geotécnico e climático contínuo se faz devido à quantidade e periodicidade de dados que são coletados. Esses dados compõem um histórico das informações, no qual identificam-se possíveis impactos causados à cavidade.

Como se trata de uma ferramenta automatizada, outras vantagens podem ser listadas:

- Reduzir a exposição de pessoas em áreas de risco ou remotas;
- Sensores eletrônicos diminuem o tempo de resposta do monitoramento;
- Exatidão na análise e processamento dos dados, minimizando erros;
- Reduzir número de pessoas em campo realizando medidas manuais;

- Maior quantidade de informações coletadas em relação aos métodos convencionais, permitindo manter um histórico mais detalhado do comportamento da cavidade de interesse.

Segundo Dunncliff (1993), o sucesso de um determinado projeto de instrumentação geotécnica demanda a observância estrita de certas premissas básicas que, no presente caso, foram as seguintes:

- Definição dos locais de instalação dos instrumentos (estudo de fragilidade geotécnica da cavidade);
- Definição dos instrumentos a serem utilizados;
- Definição dos parâmetros a serem monitorados;
- Entendimento dos fatores que poderão influenciar os resultados;
- Descrição das metodologias de instalação, coleta de dados e calibração dos equipamentos.

4.4 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA INSTALADA

Com base no zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade foram definidos três pontos para a instalação de sensores de variação de deslocamento do maciço e um ponto para o monitoramento das vibrações (com geofone triaxial).

O equipamento escolhido para realizar o monitoramento foi o Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rochas – SMDR, desenvolvido por meio de uma parceria entre a *Aeron Sistemas Eletrônicos e Aeronáutica* e *MecRoc Engenharia Ltda* para atender as necessidades de monitoramento geotécnico de cavidades naturais.

O SMDR conta com sensores capazes de executar o monitoramento de maneira contínua, além do aparelho possuir um sistema eletrônico central responsável pelo processamento e armazenamentos dos sinais de todos os sensores utilizados, conforme descrito em capítulo anterior.

Para situações especiais, como cavidades naturais, que geralmente encontram-se em locais afastados e até mesmo de acesso limitado, o uso de sistemas autônomos, que não precisam estar conectados à rede de distribuição de energia, pode ser a única alternativa viável e, neste caso, tem-se como solução a energia fotovoltaica. Este foi o caso da cavidade em questão, onde o solar foi instalado próximo à estrada que dá acesso à

cavidade, fora do raio de influência da cavidade, minimizando a possibilidade de impactos ambientais e facilitando a manutenção e a desmobilização dos equipamentos.

Foram definidos três pontos para o monitoramento contínuo de variação de deslocamento. Dois deles, por se tratarem de blocos instáveis no teto, foram instrumentados com a utilização de uma barra telescópica de fixação (Figura 4.9), para evitar quaisquer perfurações no maciço, buscando manter a integridade desta. O outro ponto, por ter sido escolhido para monitorar uma possível movimentação das paredes do vão de entrada da cavidade, foi instalado com gesso.



Figura 4.9 - Bloco de canga isolado por discontinuidades e instrumentado com barra telescópica - Gontijo et al., (2016a).

Para a fixação dos sensores e refletores em campo existem duas opções, de acordo com as dimensões dos vãos a serem monitorados. Para distâncias de até 4,60m, pode-se utilizar barras telescópicas desenvolvidas em alumínio com pontas de borracha (Figura 4.10). Para distâncias maiores que 4,60m, pode-se utilizar gesso. O fato de não haver necessidade de perfurar o maciço mantém a integridade física da cavidade, considerando que elas não podem sofrer impactos.

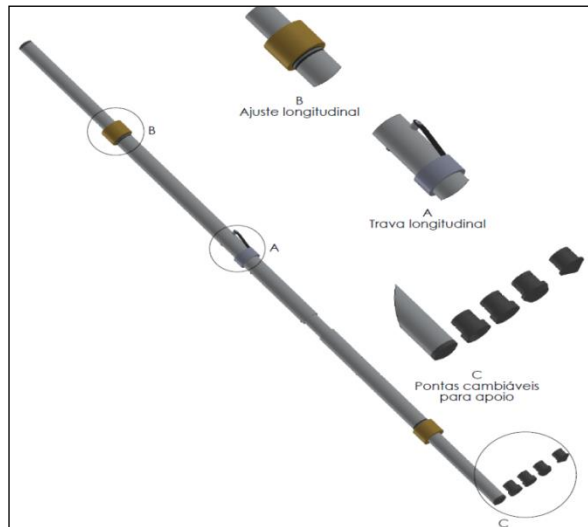


Figura 4.10 - Esquema detalhado do dispositivo em barra telescópica.

O sensor de vibração foi instalado na canga por se tratar do material que será monitorado no caso da movimentação, buscando correlacionar a intensidade das vibrações com a reação da movimentação/deslocamento do maciço (Figura 4.11).



Figura 4.11 - Sensores de vibração - geofone (esquerda) e de deslocamento (direita) fixados nas paredes da cavidade com gesso - Gontijo et al., (2016a).

A central de coleta de dados foi instalada na entrada da cavidade, evitando acesso constante de pessoas no local para coleta de dados, e conseqüentemente diminuindo as chances de acidentes e impactos à cavidade (Figura 4.12).



Figura 4.12 - Fonte de alimentação e central de armazenamento de dados instalados na proximidade da entrada da cavidade - Gontijo et al., (2016a).

4.5 RESULTADOS DO MONITORAMENTO DA CAVIDADE

A coleta das informações foi realizada a partir da conexão de um computador à central de armazenamento localizada logo na entrada da cavidade. A conexão foi realizada através de um cabo e com a utilização do software específico do SMDR, no qual foram gerados relatórios das medidas dos sensores de deslocamento e informações sobre os eventos de vibração detectados.

Pela análise geral dos dados de deslocamento coletados, pode-se concluir que não existe uma movimentação aparente nos sensores no período de monitoramento. Observam-se nos gráficos desvios máximos de deslocamentos em todos os sensores, menores que 1,0mm, em que não existe uma tendência aparente que possa indicar a ocorrência de uma movimentação. Esse sinal cíclico, de baixa amplitude que deve ser relacionado apenas a ruído dos sensores e dos sistemas (Figura 4.13).

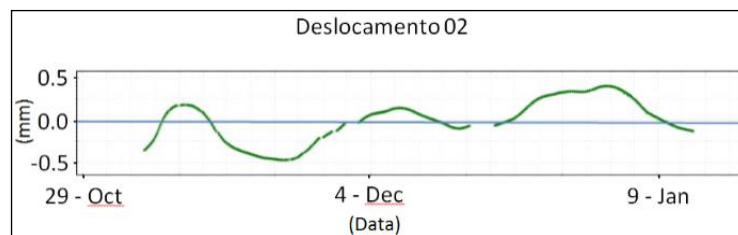


Figura 4.13 - Ruído do sensor de deslocamento com variação cíclica de baixa amplitude.

Nos dados descarregados no monitoramento foram encontrados três arquivos de vibração no sistema. Pela característica dos dados observados podemos observar que não são vibrações características de detonações, trânsito de equipamentos ou devido a interferências da TCLD. Nota-se apenas um pico, de intensidade muito baixa, podendo talvez ser correlacionado pela interação de algum animal com o sensor (Figura 4.14).

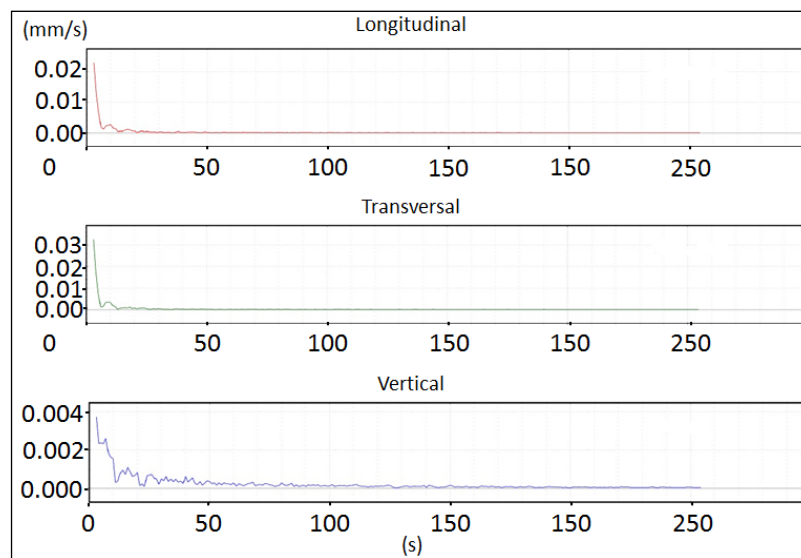


Figura 4.14 - Exemplo do evento de vibração registrado em 22/12/14 às 18:52:20h.

Como resultado final do trabalho de monitoramento foi possível concluir que todas as intervenções realizadas no empreendimento, fora dos 150m de raio da área de influência da cavidade, não foram intensas o suficiente para causar impactos físicos, quantificados pelos sensores, na cavidade.

O estudo mostra que as técnicas empregadas atualmente nos monitoramentos subterrâneos de maciços rochosos podem ser empregadas com sucesso em monitoramentos geotécnicos de cavidades naturais subterrâneas. Essa aplicação deve levar em consideração as peculiaridades dos ambientes cavernícolas, assim como um amplo entendimento dos processos dinâmicos atuantes na cavidade para uma visão real dos possíveis impactos que a cavidade está exposta. Uma caracterização preliminar da cavidade e um zoneamento de fragilidade geotécnica se mostra um recurso muito importante, pois através dele é possível escolher o método de monitoramento, dimensionar corretamente os equipamentos, além da definição dos locais prioritários para a instalação dos sensores.

O monitoramento de locais prioritários é de grande importância, uma vez que caso ocorra alguma manifestação causada por agentes externos, estes serão identificados com uma maior rapidez nos locais de maior fragilidade. Desta forma, ações mitigadoras dos impactos, caso sejam identificados, podem ser tomadas com maior antecedência, mantendo o patrimônio espeleológico protegido.

A realização de estudos de vibração detalhados permite a idealização de curvas de danos e atenuação para diferentes tipos de ambientes. Desta forma, seriam necessárias bibliotecas com uma quantidade de informações considerável acerca do comportamento das vibrações, além da disponibilização de informações detalhadas sobre a geologia do local e plano de fogo utilizado na área.

Para compor o estado da arte da espeleologia, com aderência aos princípios de confiabilidade do controle geotécnico de cavidades que sofram impactos ou situem-se adjacentes a empreendimentos de alto impacto, julgam-se necessários incentivar e sistematizar as ações de monitoramento contínuo, com vistas ao estabelecimento de parâmetros seguros de operação em qualquer contexto espeleológico, colaborando com a estruturação da análise de impactos de empreendimentos frente áreas de influências de cavidades. Esse procedimento, certamente, aumentará a segurança operacional dos grandes empreendimentos e, concomitantemente, permitirá maior controle e precisão na valorização e preservação do patrimônio espeleológico nacional.

ESTUDOS DE CASO II – PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM MINAS SUBTERRÂNEAS

5.1 MONITORAMENTO DE CONVERGÊNCIA EM GALERIA

Com o objetivo de validar a metodologia proposta neste trabalho, foram realizados testes na Mina Cuiabá, de propriedade da empresa AngloGold Ashanti, em uma galeria (*drive*), com dimensões de 5,5 x 5,5 m, sobrejacente à área da lavra no nível nove, numa profundidade de seiscentos e setenta metros (Figura 5.1).

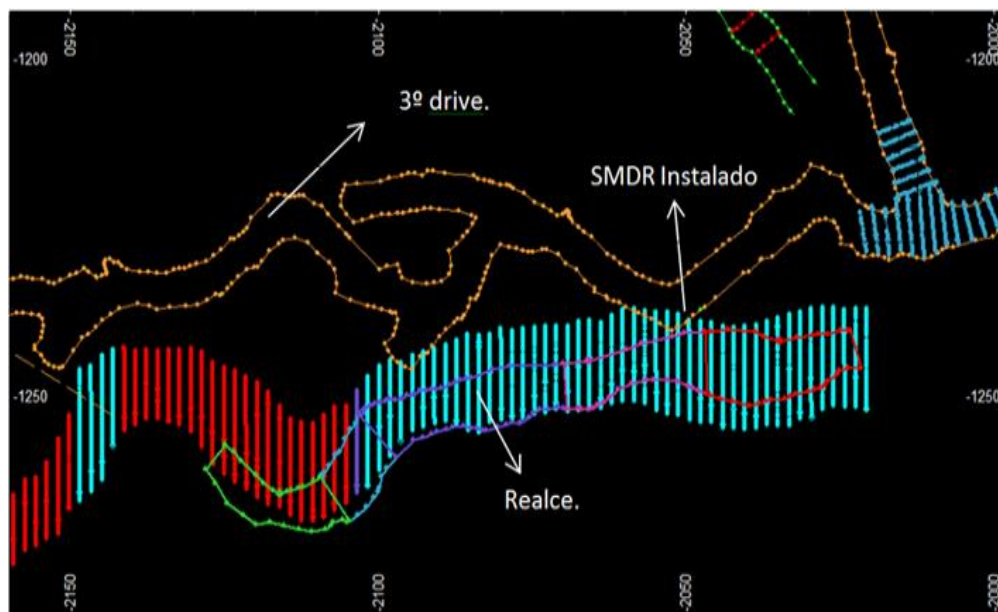


Figura 5.1 - Localização da instalação do sistema SMDR na Mina Cuiabá - Gontijo et al., (2014).

De maneira simplificada, a sequência litológica presente na região das atividades compreendem sericita clorita xisto no *hanging wall*, BIF's (*Banded Iron Formation*) como minério e xisto carbonoso no *footwall*; e de acordo com o mergulho e potência do corpo de minério o método de lavra definido foi corte e enchimento (*cut and fill*), porém em suas etapas finais, foram desenvolvidas galerias sobrejacentes (*drives*) no contato do minério com o *FootWall*, para a realização de perfuração longa.

Detonações do realce, associados com a curvatura da galeria, permitiram que ambas escavações se aproximassem, chegando a uma distância mínima vertical de 1,6 m (Figura 5.2).

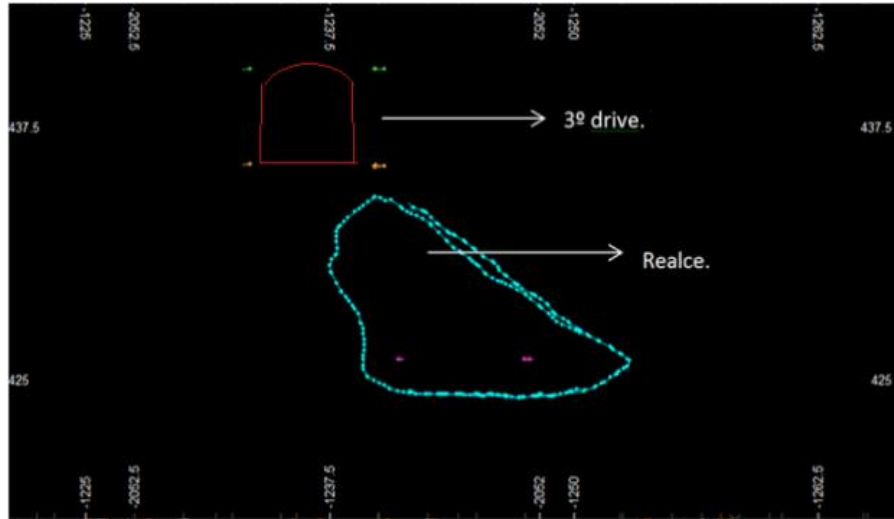


Figura 5.2 - Pilar entre Realce e galeria onde foi instalado o SMDR - Gontijo et al., (2014).

Para a validação dos resultados do sensor de distância ótico conectado ao SMDR, a equipe Geomecânica - *AngloGold* instalou três seções de convergência, de cinco pontos, com espaçamentos de cerca de 2,0m (Figura 5.3).



Figura 5.3 - Galeria de instalação do SMDR juntamente com 03 seções de convergência convencionais utilizadas pela Mina Cuiabá - Gontijo et al., (2014).

As leituras de convergência da *AngloGold* foram realizadas periodicamente através de convergenciômetros analógicos medidos através da utilização de fios invar. A Figura 5.4 exemplifica os procedimentos de uma medição de convergência manual, executada pela equipe instrumentista de campo.



Figura 5.4 - Operação de Medidas de Convergência.

Durante um período de 28 dias, o SMDR trabalhou continuamente, coletando dados a cada intervalo de cinco segundos. A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos com o SMDR durante o período em que o mesmo ficou instalado na Mina Cuiabá, sendo possível verificar uma comparação entre os dados não tratados obtidos pelo SMDR e as medições realizadas, convencionalmente, pela equipe da *AngloGold* na seção mais próxima do local de instalação do sensor ótico.

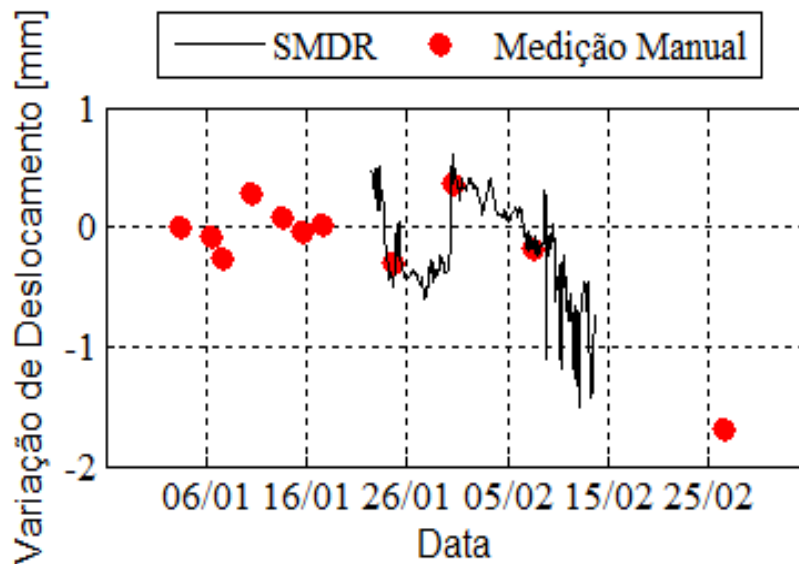


Figura 5.5 - Resultados das medições de campo.

Inicialmente observa-se que os pontos medidos pela equipe da *AngloGold* estão coerentes com os medidos pelo SMDR e indicam uma tendência de convergência na galeria monitorada.

Também é possível observar que a quantidade de pontos medidos manualmente, no monitoramento discreto, é muito inferior à quantidade medida pelo SMDR (Tabela 5.1), devido ao fato de que, operacionalmente, é necessário um desprendimento de equipe para a realização das leituras, o que dificulta uma sequência intensa de dados.

Tabela 5.1 - Taxas de Aquisição de dados do SMDR e da medição direta.

Tipo de Medição	Taxa de Aquisição Média (pontos/dia)
SMDR	46.000
Medição Manual	0,1

A maior capacidade de aquisição de dados do equipamento proposto permite uma melhor caracterização do comportamento da escavação. Por exemplo, na medição manual não se observa o pico de deslocamento entre os dias 16/01 e 26/01. Também há um deslocamento acentuado de 1.5 mm de amplitude entre os dias 07/02 e 26/02 que necessita de 19 dias para ser percebido devido à ausência de medições no período.

A partir do dia 07/02, iniciou-se um trânsito constante de equipamentos pesados (caminhões e carregadeiras) próximo ao SMDR. E é possível notar ainda que, após este dia, os dados do SMDR tornaram-se mais ruidosos devido à presença de máquinas em operação e detonações nas proximidades (raio mínimo de 30 m). Como a convergência implica a medição de variações dos deslocamentos de superfície de escavação, acredita-se que pequenas amplitudes de vibrações, detonações e trânsito de equipamentos pesados possam movimentar levemente tais blocos, em escavações onde o mecanismo de ruptura for gravitacional ou por plastificação, o que ratifica a recomendação da qualidade de instalação das seções, explícita na norma D4403 (ASTM, 2005).

A Figura 5.6 apresenta o sensor ótico de convergência fixado no maciço rochoso com o elemento de ligação, entre o tirante e rocha, de resina de poliéster.

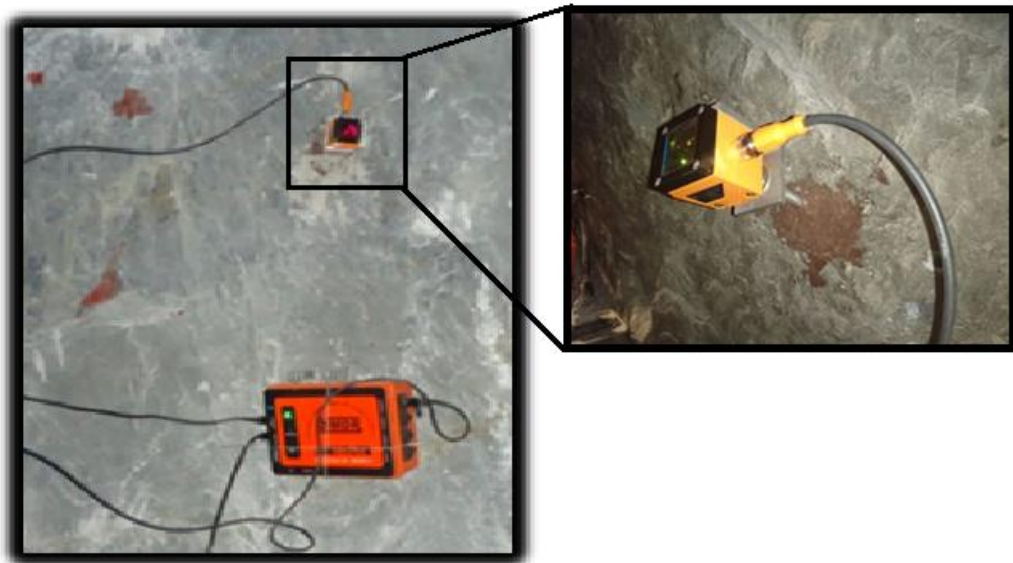


Figura 5.6 - SMDR instalado na lateral da escavação; sensor ótico fixado com resina de poliéster.

Para facilitar a análise de convergência da galeria, o sistema permite também gerar os dados eliminando ruídos presentes no sinal como mostrado na Figura 5.7.

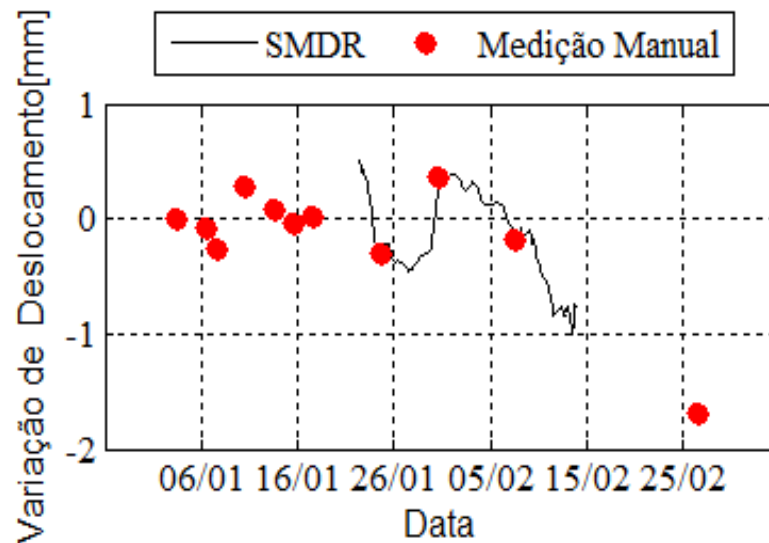


Figura 5.7 - Dados filtrados dos deslocamentos medidos na seção.

A Tabela 5.2 apresenta os erros relativos da medição do SMDR em relação aos dados obtidos pela *AngloGold*. Para os dados disponíveis, os erros relativos referentes ao novo sistema de monitoramento contínuo de convergência proposto, em relação aos das medições diretas efetuadas pela *AngloGold*, são inferiores a 4.3%.

Tabela 5.2 - Erros Relativos dos dados do SMDR e da medição direta.

Dia	Erro Relativo [%]	Deslocamento SMDR [mm]	Deslocamento AngloGold [mm]
24/01	2.7	-0.292	-0.30
30/01	-4.3	0.354	0.37
07/02	3.9	-0.173	-0.18

Como dados adicionais, são apresentados os dados de temperatura da galeria durante o período do ensaio e os dados de umidade relativa. Considerando a Figura 78a, verifica-se que o aumento da temperatura coincide com o início das atividades no local, onde o trânsito de máquinas e pessoas promoveu a elevação da temperatura em, aproximadamente, 1°C, o que não ultrapassa as temperaturas máximas recomendadas pela NR-22. Em relação a umidade verifica-se que a mesma se manteve constante em todo período de observações (Figura 5.8b).

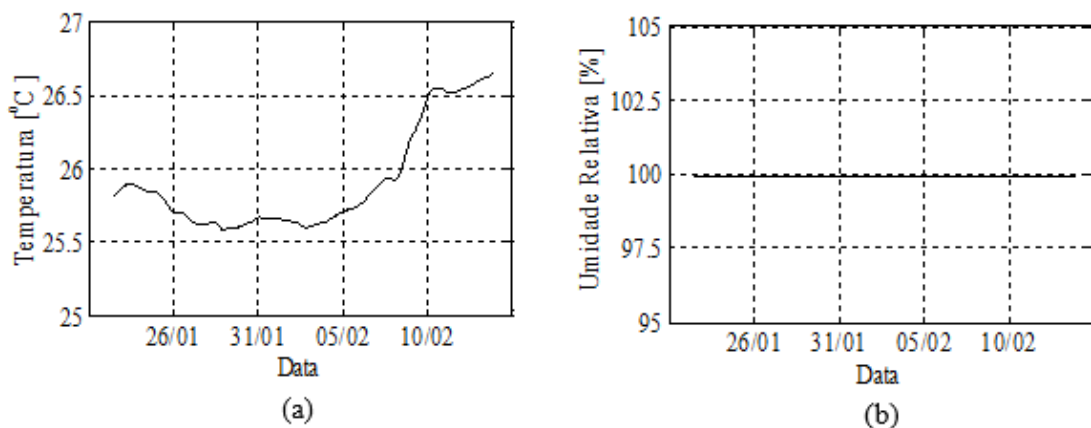


Figura 5.8 - Dados de temperatura (a) e de umidade (b) da seção monitorada.

5.2 MONITORAMENTO EM ÁREA DE LAVRA COM RECUPERAÇÃO DE PILARES

Buscando aumentar a taxa de extração na lavra de uma mina subterrânea (cujo nome não será mencionado por questões de sigilo), foram desenvolvidos estudos e trabalhos geomecânicos, em um projeto piloto, que permitiu uma recuperação de pilares já lavrados, além de uma revisão no projeto mineiro com redimensionamento das câmaras e pilares das próximas lavras planejadas.

Este estudo de caso apresenta os resultados dos trabalhos pilotos desenvolvidos para recuperação de pilares horizontais de um corpo mineralizado da mina. A câmara de lavra, onde seu principal corpo mineralizado localiza-se aproximadamente a 216m de profundidade a partir da superfície, e este foi exposto pelo método de câmara e pilares sem enchimento a partir de seu contato superior. A jazida está disposta em forma sub-horizontal (20° ao longo do *plunge*) e com potência máxima de 20m.

A área piloto, onde os pilares foram previamente modelados no topo e na base, está localizado no extremo sul da mina isolado de outras áreas com atividades rotineiras. Não há existência de câmaras exauridas superior ou inferior da câmara piloto. O objetivo é recuperar a reserva remanescente mantendo a estabilidade dos pilares esbeltos modelados após o desmonte. Para isso serão necessários vários controles, além de medições de convergência e de vibração, equipamentos a controle remoto afim de não expor o funcionário em local de risco. A lavra deverá obrigatoriamente ser realizada em forma de recuo. O desafio operacional foi o de viabilizar a lavra do minério remanescente sem comprometer a estabilidade dos pilares e, conseqüentemente, a possibilidade de recuperação da reserva local.

Para a execução dos trabalhos de recuperação de pilares da galeria estudada, adotou-se a seguinte metodologia:

- (i) caracterização e classificação geomecânica do maciço rochoso local, por meio do sistema de classificação RMR desenvolvido por Bieniawski (1974) e pelo método Q de Barton *et al.* (1974);
- (ii) dimensionamento das câmaras e pilares, com definição dos vãos críticos, possíveis de serem praticados nas profundidades do estudo de caso;
- (iii) avaliação das condições de estabilidade das câmaras e pilares para a lavra praticada e recomendações de tratamentos para o maciço rochoso, em função dos parâmetros geomecânicos obtidos através dos trabalhos de caracterização geomecânica, objetivando a recuperação dos pilares e adoção dos novos dimensionamentos para as câmaras e pilares;
- (iv) programa de monitoramento para acompanhamento dos trabalhos de recuperação dos pilares;
- (v) verificação das condições de estabilidade das aberturas e pilares, por meio de métodos empíricos e computacionais.

Com relação à classe geomecânica, os maciços rochosos observados e caracterizados ao longo da galeria, foram classificados, no âmbito geral, como de boa qualidade (Figura 5.9), com valores de Q na faixa entre 10,0 e 40,0 pontos. Tais condições correspondem a maciços autoportantes que demandam apenas aplicação de reforço adicional esporádico em faixas específicas, de acordo com particularidades presentes em regiões restritas lateralmente. Entretanto, para o caso da galeria estudada, o levantamento geomecânico não apontou a necessidade de nenhum tipo de reforço adicional ao longo das paredes e tetos da região.

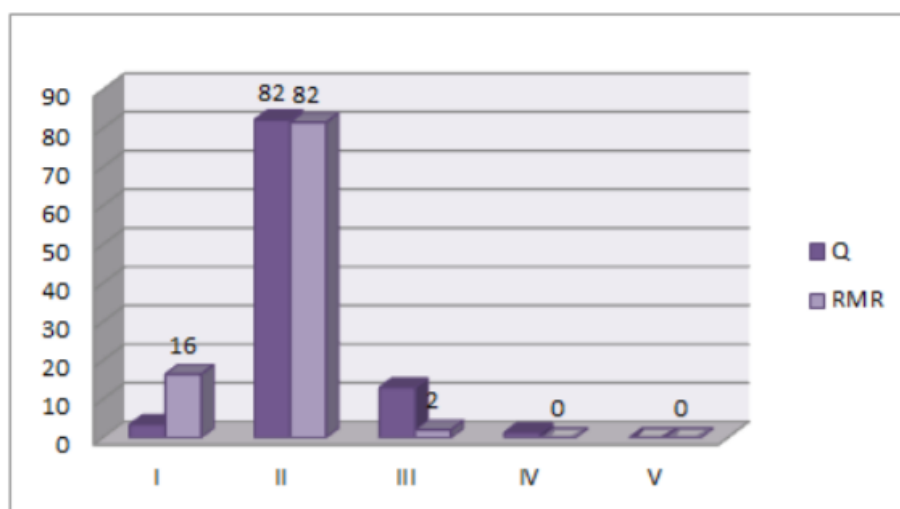


Figura 5.9 - Classes geomecânicas dos maciços rochosos da galeria estudada.

A maioria dos maciços rochosos contém planos de falhas pré-existent (descontinuidades) conhecidas como juntas, falhas, etc. No âmbito geral e de acordo com o levantamento estrutural das descontinuidades, o maciço rochoso típico da galeria apresenta duas famílias de fraturas mais uma aleatória, com orientações cujas atitudes são de 286/51 e 266/47, ou seja, aparentemente, tais famílias formam cunhas no maciço rochoso.

Segundo Hedley, Grant (1972 *apud* Brandani, 2011) a teoria implica no carregamento em cada pilar em função dos esforços que resultam de sua área tributária.

Estudos mais sofisticados podem ser formulados por métodos numéricos para se determinar a distribuição das tensões em pilares de várias geometrias. No presente estudo, modelos bidimensionais obtidos por meio do *software Phases2* de elementos finitos foram comparados com a teoria da área tributária. Esses resultados permitiram determinar

o número mínimo de pilares requeridos na análise bidimensional a fim de se obter uma representação das tensões obtidas numa operação de método câmaras e pilares.

O programa para o método de elementos finitos oferece uma função adicional para determinar a redistribuição de tensões durante a análise de ruptura de pilares. O método de elementos finitos adequa-se especialmente às condições do maciço, é uma técnica já estabelecida no campo da análise mecânica em geral, e hoje tem capacidade de simular quaisquer condições, tanto de geometria do meio quanto de propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

Como dados de entrada, o *Phase2* necessita, além da geometria do meio, de parâmetros de resistência, de deformabilidade dos materiais e peso específico, além do valor de k e definição de modelo constitutivo. O modelamento através deste método leva em consideração a interação entre as estruturas do teto e pilar, a distribuição não uniforme de cargas, a heterogeneidade das propriedades mecânicas e a anisotropia do comportamento mecânico.

Para a determinação dos fatores de segurança, foram utilizados os dados de resistência encontrados através da classificação geomecânica do maciço rochoso, por meio de metodologias empíricas, ao passo que as solicitações em cada pilar foram estabelecidas com base na teoria da área tributária. A Figura 5.10 apresenta a geometria e as dimensões que foram praticadas na lavra para as câmaras e os 23 pilares da galeria em estudo, verificando-se que os pilares estão superdimensionados, com vãos livres muito reduzidos, possibilitando elevadas recuperações dos teores de minério remanescente.

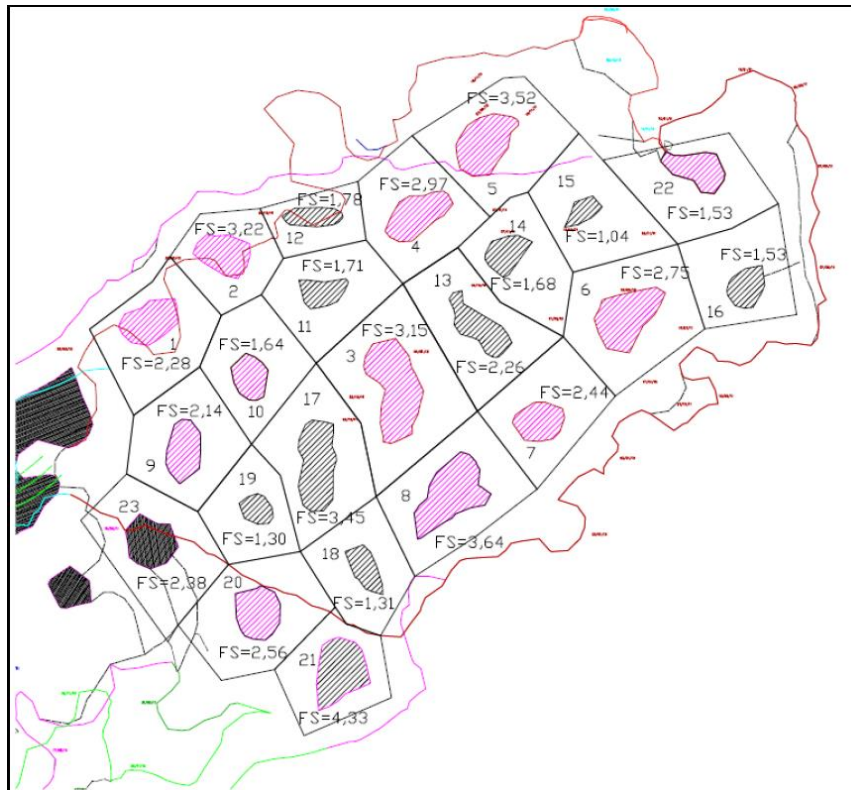


Figura 5.10 - Fatores de segurança dos pilares existentes na galeria.

Simulações numéricas foram implementadas para a simulação dos fatores de segurança após retirada total ou parcial dos pilares, num arranjo geral estável (FS maiores que 1,0). Ficou claro que não é viável nem seguro retirar todos os pilares mineralizados pois uma grande maioria dos pilares remanescentes ficaram com fator de segurança abaixo de 1,0. Assim, pilares mineralizados foram deixados sem lavrar para redistribuir melhor as áreas tributárias e conseqüentemente otimizar os fatores de segurança de todos os pilares remanescente (Figura 5.11).

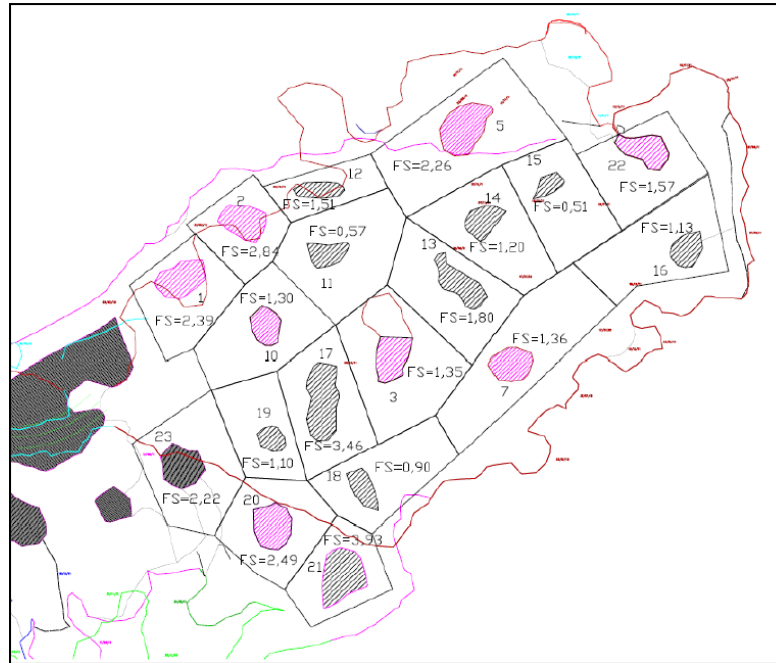


Figura 5.11 - Plano de otimização do arranjo dos pilares da galeria.

Para realização da recuperação dos pilares mineralizados, adotou-se um processo de recuo, com início de desmonte nos pilares de número 5, recuando até a direção dos pilares de número 1 e 20. Para o controle efetivo das atividades de escavação adicional do domínio da galeria, sistemas de monitoramento de convergência foram instalados nas galerias de transporte e de acesso à área piloto (Figura 5.12).

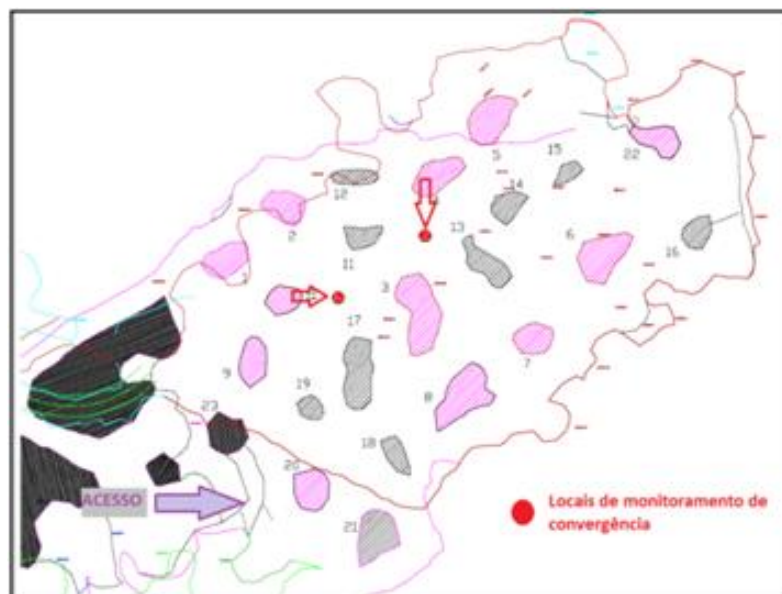


Figura 5.12 - Pontos de monitoramento de convergência.

O sistema de monitoramento foi instalado com a finalidade básica de monitorar potenciais flambagens do teto, razão pela qual os sensores foram instalados nesta região da galeria (Figura 5.13), com auxílio de plataforma. A Figura 5.14 mostra a etapa de aquisição e dados *in situ*.



Figura 5.13 - Instalação do refletor do sensor de convergência no teto da galeria.



Figura 5.14 - Fase de aquisição dos dados em campo.

O monitoramento via laser possui a vantagem de realizar medições remotamente sem a necessidade de expor o funcionário. Qualquer eventual anomalia constatada nos gráficos devido a movimentação do maciço, a ação imediata é o bloqueio do acesso a câmara até análise mais aprofundada do comportamento do maciço.

Após cerca de um ano de monitoramento, foi possível identificar a condição e estabilidade geomecânica de todo o maciço rochoso da galeria, não se constatando a presença de feições instáveis devido a flambagens ou deformações acentuadas (Figura 5.15). A oscilação constatada na fase inicial do monitoramento (destacada na Figura 5.15) foi interpretada como associada a efeitos da fase de cura do elemento de ligação do fixador do sensor laser. As lacunas de descontinuidade dos registros foram devidas a quedas de energia nos períodos específicos.

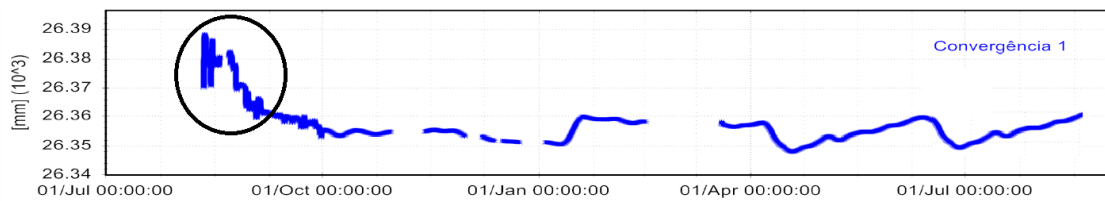


Figura 5.15 - Resultados do monitoramento de convergência da galeria.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES COMPLEMENTARES

6.1 INTRODUÇÃO

Apesar do assunto instrumentação geomecânica em ambientes subterrâneos estar bem disseminado, constantes evoluções na engenharia ocorrem a todo momento, onde se faz necessário inovações e desenvolvimento de novas tecnologias visando atender às particularidades e a novos desafios. A ideia de um desenvolvimento tecnológico ocorreu com a intenção de acompanhar a evolução da engenharia subterrânea, buscando maior segurança operacional e um maior aproveitamento dos recursos minerais disponíveis.

Ao longo dos capítulos anteriores, foi apresentado em detalhes todo o desenvolvimento do projeto de um sistema de monitoramento de convergência contínuo (SMDR), desde os princípios de funcionamento à utilização em campo e resultados. De acordo com os resultados de estudos de caso realizados, e comparativos com métodos tradicionais, o sistema proposto apresenta desempenho adequado para as finalidades a que se propõe.

Neste capítulo condensam-se, de forma conclusiva, as avaliações realizadas nessa dissertação, identificando-se as limitações encontradas e propõem-se estudos futuros.

6.2 CONCLUSÕES

3.2.7 Importância de um Plano de Instrumentação Geomecânica

Foram apresentadas as premissas básicas e necessárias para se executar um plano de monitoramento geomecânico conceitual / executivo, o que permitirá uma abordagem de qualquer trabalho de instrumentação, em ambientes subterrâneos, mais adequados a diferentes situações, minimizando falhas de interpretação e prevendo com maior acurácia os potenciais imprevistos das áreas analisadas.

A necessidade de calibrar os projetos conceituais de estabilidade, desenvolvidos nos *softwares* específicos para uma realidade, é um desafio para os geomecânicos e a solução encontrada tem sido a utilização de sensores para quantificar e controlar quaisquer

possíveis variações já previstas. Em alguns casos, onde o risco existente pode ser superior a um controle de medições esporádicas (semanais; quinzenais, etc), tende-se a trabalhar com sistemas de monitoramento contínuo, onde é possível ter uma vigilância geotécnica de um risco conhecido.

3.2.8 Sistemas de Convergência

Mesmo que a curva de reação do terreno apresente uma estabilização da escavação, teoricamente, após a instalação dos sistemas de ancoragens, em minerações, outras variáveis, tais como detonações em outras galerias próximas ou tensões induzidas de outras aberturas, podem induzir a ocorrência de convergência em uma escavação próxima já existente.

O uso de monitoramento contínuo de convergência se faz de extrema necessidade devido à enorme relevância em entender o comportamento da escavação no decorrer do tempo.

Neste contexto, os resultados dos estudos de caso de minerações subterrâneas, apresentados e discutidos neste trabalho, comprovaram a eficiência do sistema em controlar riscos geomecânicos continuamente, voltados à variação de deslocamentos ou de convergência durante uma operação mineira, que tem o seu monitoramento em tempo integral, ou seja, durante vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana.

3.2.9 Desenvolvimento Tecnológico

O desenvolvimento tecnológico associado à implantação do SMDR é evidente pela versatilidade e pelos resultados obtidos com as técnicas propostas neste trabalho, que visaram, primariamente, reduzir a exposição do homem em locais de risco, por meio de um monitoramento contínuo e absolutamente confiável.

Por outro lado, o Brasil está atualmente dependente de tecnologias estrangeiras no tema de monitoramento, e a ideia de inovação deve ser uma premissa básica dos estudos geotécnicos de uma maneira geral e, em ambientes subterrâneos de modo particular. A implantação de um sensor de vibração triaxial trabalhando simultaneamente com os sensores de convergência constitui uma sistemática que deverá contribuir, de forma significativa, nas respostas em termos de correlações entre operações de desmonte e indução das deformações correspondentes, por exemplo.

Todo o sistema foi desenvolvido envolvendo comunicações com fibra ótica ou via rádio, permitindo serviços de controle e de monitoramento de obras geotécnicas em tempo real.

6.3 ESTUDOS COMPLEMENTARES

3.2.10 Implantar o SMDR em monitoramentos remotos / tempo real

A necessidade de uma vigilância ou monitoramento de obras geotécnicas em tempo real se faz necessário no cenário atual brasileiro, pois otimiza o processo e facilita tomadas de decisão rápida.

Em muitos casos o monitoramento, sendo remoto, pode controlar riscos constantes e qualquer dessas variações de resultados, ultrapassando limites já definidos, alarmes e sinais de emergência podem ser configurados e quando acionados, o local em estudo pode ser isolado até uma avaliação mais criteriosa com detalhes.

Para estudos futuros, a ideia é desenvolver a comunicação remota, em tempo real e implantar alarmes ou sinais de emergência para prescindir da intervenção humana em todos os casos. Recomenda-se expressamente a extrapolação das experiências descritas neste trabalho a outros ambientes subterrâneos, visando difundir a técnica e melhorar a integridade dos dados obtidos, de forma a tornar, assim, a instrumentação a distância uma premissa corrente no projeto das grandes obras geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 4403. (2004). *Standard practice for extensometers used in rock*.
- ASTM D 4435. (2008). *Standard Test Method for Rock Bolt Anchor Pull Test*.
- ASTM F 432. (2010). *Standard Specification for Roof and Rock Bolts and Accessories*.
- AULER, A. *Perímetro de Proteção Cavidade CAI-03* – Anglo American. Carste Consultores Associados Ltda. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2011, p.18.
- BARBOSA, E. S. *Avaliação do Suporte com cabos de aço na Mina Cuiabá. Mestrado Profissional*. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas/UFOP. 2008.
- BARTON, N.R., LIEN, R., Lund, J. *Engineering Classification of Rock Masses for the desing of Tunnel Support*. Rock Mech. 6(4). 1974 p.189-239.
- BERNARDO, P.A.M. *Impactos Ambientais do uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com ênfase nas vibrações*. IST – U.T.L. Lisboa. 2004.
- BIENIAWSKI, Z. T. *Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelin*. In: Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mech. 1974. p. 27-32.
- BRANDANI, B. D. *Estudo do Comportamento Geomecânico de Pilares Esbeltos Modelados em Rocha Dura na Bacia do Corpo I*. 2011. Mina Nova – Crixás/GO.
- BRASIL. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. (2008). Decreto nº 6.640, 7 novembro 2008, Dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5o e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional.
- BRITO, F. *Mecanismo de Ruptura da Rampa Fonte Grande Sul*. Mina Cuiabá/Sabará e sua Interação com Concreto Projetado. Encontro Geotécnico AngloGold Ashanti Brasil. 2015.
- CACCIARI P. P., FUTAI M. M. *Mapeamento de Descontinuidades Geológicas em Túneis Utilizando Imagens Geradas por Scanner a Laser 3D*. Submetido para o 6 simpósio Brasileiro de Mecânica das rochas (SBMR) Goiânia-GO. 2014.
- Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE. (2015). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Disponível em: < <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 10 jan. 2015.
- CARRANZA-TORRES, C. *Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium, edited by J.A. Hudson and Xia-Ting Feng, Volume 41, Issue 3. 2004.
- COTA, R. F. *Utilização de Extensômetros e Televisionamento de Furos para Estudo de Estabilidade do Hanging Wall*. Realce 10.2. Fonte Grande Sul, Mina Cuiabá – Sabará/MG. 2011.
- DIAS, C. *Procedimentos Para Estudos de Conservação da Integridade Física de Cavidades Naturais Subterrâneas*. 2012.

- DOWDING, C. H. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1985, p. 297.
- DUNCAN FAMA, M. E. *Numerical modeling of yield zones in weak rocks*. In *Comprehensive rock engineering*, (ed. J.A. Hudson) 2. Pergamon, Oxford. 1993, p. 49-75.
- DUNNICLIFF, J. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, Wiley Interscience, New York. 1988. P. 577.
- FEKETE, S., DIEDERICHS, M. *Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rock masses*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. V. 57. 2013, p. 11-23.
- GAMA, D. (2004). *A method for continuous monitoring of tunnel deformations during construction and services phase*.
- GEOKON. *Geotechnical and Structural Instrumentation*. Disponível em: <<http://www.geokon.com/>>. Acesso em 3 de outubro de 2016.
- GONTIJO, A., RENO, R., OLIVEIRA, G., ALVES, T., SOUZA, F. (2016a). *Instrumentação Geotécnica da Caverna CAI-03*. Anglo American, Conceição do Mato Dentro-MG. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, Anais. 2016.
- GONTIJO, A., LOPEZ, J., BRITO, F., HASHIMOTO, G., SILVA, J. (2016b). *Parâmetros Relevantes e Críticos que Influenciam no Atirantamento utilizando Cartuchos de Resina de Poliéster*. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, Anais. 2016a.
- GONTIJO, A., SILVA FILHO, A., REIS, F., MALAQUIAS, I., MARTINS, P., GOMES, R., (2014) *Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos*. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, COBRAMSEG 2014, Goiânia, Anais. 2014.
- HADJIGEORGIOU, J., POTVIN, Y. *Hard Rock Ground Control with Steel Mesh and Shotcrete*. Chapter 8.6. SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed. 2011.
- HILLS, P. B., WALTON, R. J. *Calibrated geotechnical measurement to provide a quantitative understanding of rockmass conditions at the Tasmania Gold Mine*, Beaconsfield, Tasmania. 2010.
- HOEK, E., BROWN, E.T. *Practical Estimates of Rock mass Strength*, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci. And Geomech. Abstr., Vol 34, No. 8. 1997, p. 1165-1186.
- HUTCHINSON, D. J., DIEDERICHS, M. S. *Cablebolting in Underground Mines*. Richmond: BiTech Publishers Ltd, Hammersmith way, Richmond, British Columbia, Canada. 1996.
- HYETT, A., BAWDEN, W., REICHERT, R. *The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 29. 1992, p. 503-524.
- HYETT, A., MITRI, H. *Validation of two new technologies for monitoring the in situ performance of rock bolts*. 2012.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. *Blue Book – Suggested Methods for RockBolt Testing*. 1981.

- KUCHTA, M. E. *Quantifying the increase in adhesion strength of Shotcrete applied to surfaces treated with high-pressure water*. SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, USA. 2002.
- LOPEZ, J. Workshop PRODIMIN. Lima, Peru. 2012.
- MECROC ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.mecroc.com.br/>>. Acesso em 10 de outubro de 2016.
- MENDECKI, A., LYNCH, R., MALOVICHKO, D. *Routine Micro-Seismic Monitoring in Mines*. Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference Perth, Western Australia. 2010.
- MOREIRA, C. M. da C. *Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. 2009, p. 10-15.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. (2004). Resolução CONAMA n° 347, de 10 de setembro 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>>. Acesso em: 30mar. 2016.
- NBR 9653/2005. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*. Procedimento. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2005.
- RISPIN, M., BROOKS, J. *Shotcrete in North American underground mines: yesterday, today and tomorrow*. Master Builders, Inc Cleveland, Ohio, USA. 2001.
- SILVA, B. C. *Aplicabilidade e Limitações do Método de Convergência-Confinamento em Projetos de escavações Subterrâneas*. Mestrado Profissional. NUGEO. 2015.
- STACEY, T. R., ORLEPP, W. D. *Yielding rock support: The capacities of deferent types of suport, and matching of support type to seismic demand. In Challenges in Deep and High Stress Mining*. Edited by Y. Potvin, J. Hadjigeorgiou, and D. Stacey. Nedlands, Western Australia: ACG. 2007.
- TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N. *Theory of Elasticity*, 3rd ed. Wiley: New York. 1970.
- TOD, J., LAUSCH, P. *Interpreting and Troubleshooting SMART Instrumentation, 18 AMQ Ground Control Colloque, Val d'Or, Quebec, Canada*. 2003.
- TRAJANO, BICHUETTE. *Relevância de cavernas: Porque estudos ambientais espeleobilógicos não funcionam*. 2010.
- TROPIA, A. *Análise de tensões in situ em ambiente de lavra subterrânea*. Mina Cuiabá – Sabará/MG. Mestrado Profissional. Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas/UFOP. 2013.
- VOTORANTIM METAIS. *Relatório Técnico de Ensaios de Arrancamento*. Aprovação Cartuchos de Resina Rock Support. Junho, 2016.
- VLACHOPOULOS, N. *Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels*. 2009.
- YIELDPOINT. Disponível em: <<http://www.yieldpoint.com/>>. Acesso em 3 de outubro de 2016.