UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO GRAUTE NO SISTEMA ROCHA/GRAUTE/CABO COM INSTALAÇÃO ASCENDENTE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Philippe Fernandes Silva Resende

MONOGRAFIA nº 418

Ouro Preto, janeiro de 2022

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO GRAUTE NO SISTEMA ROCHA/GRAUTE/CABO COM INSTALAÇÃO ASCENDENTE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.ª Dr.ª Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.ª Dr.ª Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Ms. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 418

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO GRAUTE NO SISTEMA ROCHA/GRAUTE/CABO COM INSTALAÇÃO ASCENDENTE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Philippe Fernandes Silva Resende

Orientador

Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 401, ano 2020/2.

OURO PRETO

2022

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br
Escola de Minas - http://www.em.ufop.br
Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.
Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Philippe Fernandes Silva Resende

Catalogação elaborada pela Biblioteca Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526 do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

R433e Resende, Philippe Fernandes Silva
Estudo da resistência do graute no sistema rocha/graute/cabo com instalação ascendente em escavações subterrâneas. [manuscrito] / Philippe Fernandes Silva Resende. - 2022.
Res59

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica.

1. Mecânica de rochas. 2. Concreto - Aditivos - Graute. 3. Lavra subterrânea. 4. Rochas - Escavação. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.121

http://www.sisbin.ufop.br

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: ESTUDO DA RESISTÊNCIA DO GRAUTE NO SISTEMA ROCHA/GRAUTE/CABO COM INSTALAÇÃO ASCENDENTE EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

AUTOR: PHILIPPE FERNANDES SILVA RESENDE

ORIENTADOR: Guilherme Jorge Brigolini Silva

Aprovado em: 13 de janeiro de 2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva _____ DECIV/UFOP

Prof. Dr. Leonardo Martins Graça _____ DEGEO/UFOP

Engenheiro João Pedro Amaral _____ AngloGold Ashanti

Ouro Preto, 14/01/2022

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS viii
SUMÁRIO x
LISTA DE FIGURAS xii
LISTA DE TABELAS xiv
RESUMO xix
ABSTRACT xvii

INTRODUÇÃO 16

1.1 APRESENTAÇÃO 16

1.2 MINERAÇÃO SERRA GRANDE 16

1.3 OBJETIVOS 17

1.4 JUSTIFICATIVA 17

1.5 CONTEXTO GEOLÓGICO 18

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1.1 Métodos de lavra subterrâneos utilizados na MSG 22

2.1.2 Classificação de corpos mineralizados com base na geometria 22

2.1.3 Câmaras e pilares 23

2.1.4 Corte e enchimento 23

2.1.5 Lavra em realce 24

2.1.6 Raio hidráulico 24

2.1.7 Diluição 25

2.1.8 Avaliação técnica do sistema de cabeamento 26

2.1.9 Tipos de cabo 26

2.1.10 Graute 28

2.1.11 Instalação ascendente de cabos 31

2.1.12 Funcionamento do sistema de cabeamento 32

2.1.13 Tipos de falha do sistema de cabeamento 33

2.1.14 Ensaio de compressão uniaxial 34

2.1.15 Teste de arrancamento 35

2.1.16 MasterRheobuild (1000) e MasterSet Delvo (aditivos utilizados) 35

3 MATERIAIS E MÉTODOS 38

3.1 Ensaios de compressão uniaxial 38

3.2 Teste de arrancamento 40

3.3 Teste do sistema de injeção ascendente de graute 41

4 RESULTADOS 43

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL 43

4.2 TESTES DE ARRANCAMENTO 44

4.3 TESTE DE ENSAIO ASCENDENTE 45

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS 52

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL 52

5.2 TESTE DE ARRANCAMENTO 54

5.3 TESTE DE ENSAIO ASCENDENTE 55

1. CONCLUSÕES 58

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização da Mineração Serra Grande. Fonte: Google Earth (2021)...17

Figura 2.1 - Representação esquemática de uma lavra por câmaras e pilares da MSG. (Lima, 2016). 23

Figura 2.2 - Representação esquemática de lavras por corte e enchimento na MSG. (Lima, 2016) 24

Figura 2.3 - Representação esquemática do método de lavra por realce na MSG. (Lima, 2016)....24

Figura 2.4 -Exemplificação da influência do raio hidráulico na zona de falha. (autor próprio) 25

Figura 2.5 - Resistência a tração do sistema de cabeamento com utilização de um ou dois cabos. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996) 28

Figura 2.6 - Resistência a compressão uniaxial associada ao fator água/cimento. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996) 30

Figura 2.7 - Influência do tempo de cura na resistência a compressão simples do graute. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996) 30

Figura 2.8 - Influência do tempo de cura na resistência ao teste de arrancamento do graute. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996) 31

Figura 2.9 - Representação esquemática do processo de instalação de cabos no formato ascendente com utilização de suspiro. (Adaptado de: Hutchinson and Diederichs, 1996) 32

Figura 2.10 - Fluxograma de instalação do sistema de cabeamento no formato ascendente. Fonte: Hutchinson and Diederichs (1996) 32

Figura 2.11 - Redistribuição de tensões durante o tensionamento do sistema de cabeamento. (Adaptado de: Evert Hoek, 2008) 33

Figura 2.12 - Tipos de falha no sistema de cabeamento. (Fonte: Hutchinson and Diederichs, 1996) 34

Figura 2.13 - Ensaio de compressão uniaxial. (Adaptado de: Hutchinson and Diederichs, 1996) 35

Figura 3.1 - Forma para confecção das amostras de compressão uniaxial. 39

Figura 3.2 - Ilustração esquemática da prensa Servo Controlado utilizada para realização dos ensaios de compressão uniaxial. 39

Figura 3.3a - Bomba hidráulica elétrica - **Figura 3.3b** - Cilindro para teste de arrancamento. 40

Figura 3.4 - Cano de PVC de 9 metros posicionado a 90° para instalação dos cabos. 41

Figura 3.5 - Tubos de PVC com cabos e suspiros posicionados - Figura 3.5b – Cano de PVC já com a mangueira de injeção do graute e selado com cimento fosseco. 41

Figura 4.1 - Ilustrando o vazamento de graute durante a injeção no tubo. **Figura 4.2B** – Ilustrando a ruptura da emenda do ensaio 5. 46

Figura 4.2 - Borbulhas de ar na água evidenciando a fuga de ar durante a injeção de graute no tubo. 46

Figura 4.3 - Tubos de injeção de graute selados para impedir vazamento de graute do sistema. 47

Figura 4.4 - Amostras retiradas da altura de 8,7 a 8,9 metros dos ensaios. 47

Figura 5.1 - Nódulo e tubo de suspiro preenchidos por graute. 56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tipos de cabos de aço. (Fonte: Windsor, 1992) 27

Quadro 2.2 - Propriedades do graute relacionadas ao fator Água/Cimento. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996) 29

Quadro 4.3 - Ensaios de UCS realizados com seus respectivos tempos de cura. 43

Quadro 4.4 - Quantidade de ensaios de arrancamento realizados e seus respectivos tempos de cura. 45

Quadro 4.5 - Seções obtidas para os ensaios 1 e 2. 48

Quadro 4.6 - Seções obtidas para os ensaios 3 e 4. 49

Quadro 4.7 - Seções obtidas para os ensaios 5 e 6. 50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Resultados obtidos para os ensaios de compressão uniaxial classificados conforme a receita utilizada. 44

Gráfico 4.2 - Resultados dos ensaios de densidade para diferentes tempos de cura classificados com base na receita utilizada. 44

Gráfico 4.3 - Resultados obtidos no teste de arrancamento para diferentes tempos de cura. 45

Gráfico 5.1 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,4. 52

Gráfico 5.2 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,4 com a utilização de aditivos. 53

Gráfico 5.3 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,3 com a utilização de aditivos. 53

Gráfico 5.4 - Delimitação dos intervalos para estimativa da relação A/C utilizada correlacionada com o tempo de cura. 54

Gráfico 5.5 - Correlação logarítmica entre a carga obtida nos ensaios de arrancamento e o tempo de cura. 55

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Uma das funções da Geomecânica em minerações subterrâneas é realizar a estabilização do maciço rochoso, como garantia de segurança operacional, assim como minimização da diluição nas lavras. Uma das práticas usuais para esse desafio, é a instalação de sistemas de estabilização artificiais na escavação, dentre estes sistemas abordaremos o cabeamento. O sistema de cabeamento é instalado no maciço rochoso a partir da perfuração e posteriormente, cimentação destes cabos no maciço, criando um sistema conhecido como Cabo/Graute/Maciço Rochoso. Dentre as variáveis presentes no sistema temos o tipo de maciço, que não pode ser modificado e o cabo e o graute que podem ser sujeitos a estudos de melhoria para serem adequados para cada situação. Segundo Hutchinson and Diederichs (1996) o graute, objeto de estudo deste trabalho, é um composto químico, produto da mistura de água e cimento, onde geralmente é utilizado o Cimento Portland V devido a sua propriedade de garantir maior resistência para curtos intervalos de tempo.

O presente trabalho será realizado na Mineração Serra Grande pertencente ao grupo AngloGold Ashanti e pretende determinar a resistência do Graute no sistema Rocha/Graute/Cabo em diferentes tempos de cura e com diferentes receitas, a fim de determinar o tempo mínimo para utilização do sistema de reforço. Além disso simularemos o preenchimento da graute no sistema de instalação ascendente com utilização de “suspiro” a partir de simulações em laboratório, e por fim, a partir dos estudos realizados, propor ferramentas de controle de qualidade para o processo operacional.

1.2 MINERAÇÃO SERRA GRANDE

O presente trabalho foi desenvolvido na Mineração Serra Grande (MSG). A MSG é composta por um conjunto de minas de ouro pertencentes ao grupo AngloGold Ashanti. Sua operação está situada na região centro-oeste do Brasil no munícipio de Crixás ao norte do estado de Goiás (Figura 1.1). Seus corpos de minério são explotados por minas à céu aberto e principalmente em minas subterrâneas profundas, próximas de 1000 metros de profundidade. A geometria dos corpos vária de acordo com a profundidade, sendo mais horizontalizado próximo da superfície e mais inclinado em profundidade. A partir dessa característica, associada a espessura de em média 1 metro, são realizadas lavras em realce, com desenvolvimento de interníveis produtivos.

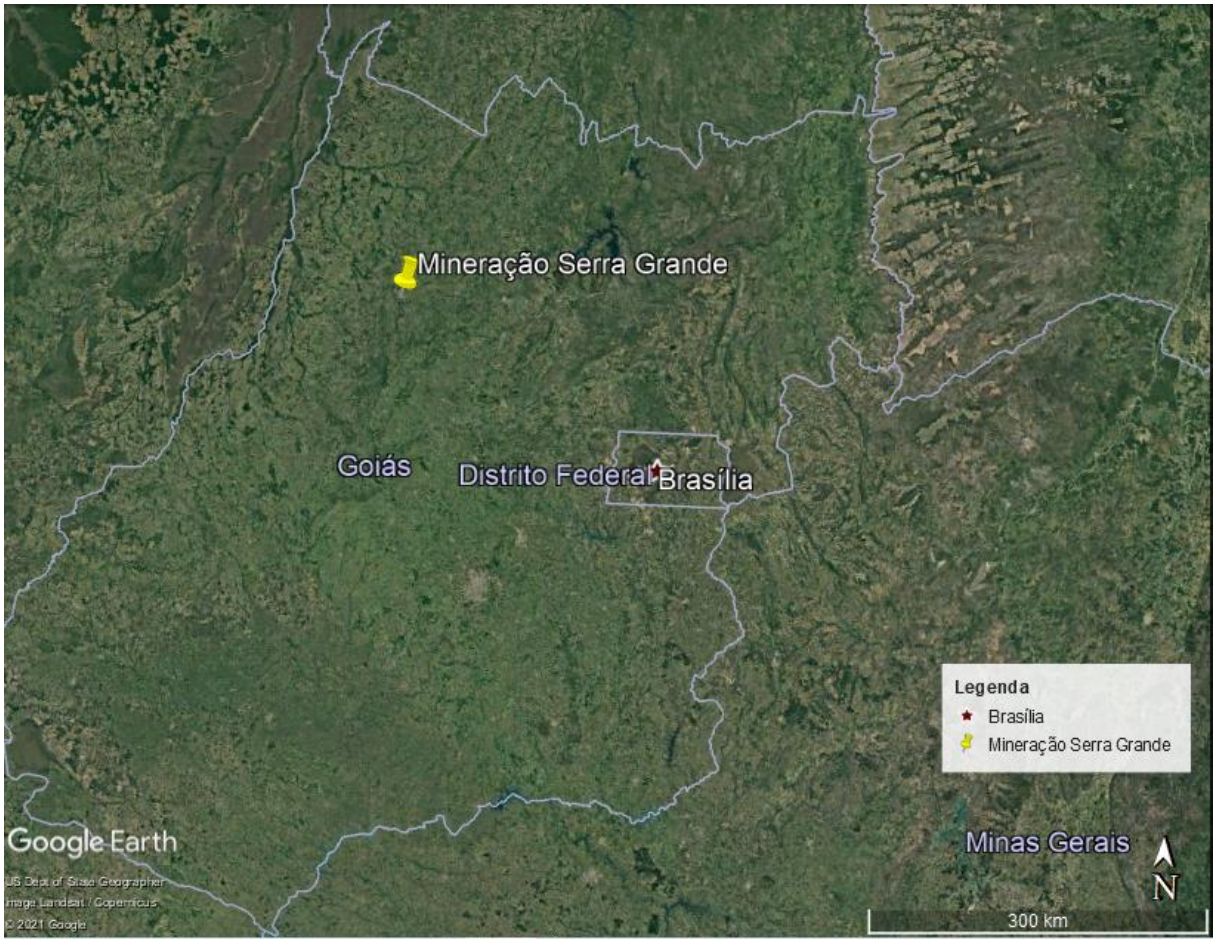


Figura 1.1 - Localização da Mineração Serra Grande. Fonte: Google Earth (2021).

1.3 OBJETIVOS

O desenvolvimento deste trabalho tem por principal objetivo, determinar a partir de ensaios laboratoriais de compressão uniaxial simples e de campo com testes de arrancamento, uma receita de graute que garanta a ancoragem referente a resistência do cabo de aço com tempo de cura ótimo. Também será testado, para fim de validação, o sistema de injeção ascendente de graute com a utilização do "suspiro", verificando possíveis anomalias.

Além do objetivo principal, ao fim do trabalho, com as etapas do processo operacional de instalação do sistema cabo/graute/rocha bem definidas, pretende-se propor ferramentas de controle de qualidade que visem evitar os desvios operacionais, garantindo a execução da instalação do sistema de cabeamento conforme planejado e consequentemente elevando padrões de segurança e produtividade.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem sua motivação embasada em dois pilares, sendo estes: a complexidade operacional do processo de instalação de cabos de aço em escavações subterrâneas e a importância desse sistema para estabilização de escavações com raio hidráulico elevado, sejam estas, realces de lavra,

alargamentos, interseções ou outras. Entendendo que o sistema de cabeamento é, em muitos casos, o único tipo de contenção artificial possível de reduzir a diluição de lavras em escavações subterrâneas e é passível de ser utilizado para garantir a estabilidade do teto em escavações com raio hidráulico não suportado apenas por atirantamento, justifica-se pesquisar e testar o sistema cabo/graute/rocha.

Com a conclusão do trabalho espera-se validar a metodologia operacional de instalação de cabos ascendentes, experimentar e definir a melhor relação água/cimento com a utilização de aditivos ou não, criar ferramentas de controle de qualidade que consigam eliminar/minimizar os desvios operacionais durante a instalação do sistema de estabilização. Tendo em vista que, o sistema de cabeamento é uma das principais alternativas para controle de diluição em lavras subterrâneas e em alguns casos um dos únicos sistemas de suporte possíveis de serem utilizados em minerações subterrâneas para contenção de grandes blocos em escavações com raio hidráulico elevado, testar e validar esse sistema se faz essencial para garantia da segurança e redução de quebras excessivas/diluição em lavras.

1.5 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área ocupada pela Mineração Serra Grande está localizada na região da Província Tocantins um extenso orógeno que compreende: Faixa Brasília, Faixa Araguai, Faixa Paraguai, Maciço de Goiás e Arco Magmático de Goiás (Almeida *et. al*., 1968; Pimentel, 2016). Tal província foi dividida com base no contexto estrutural de cada uma de suas regiões sendo: região central (Maciço de Goiás), região oriental (Faixa Brasília) e região ocidental (Faixas Paraguai e Araguai).

O Maciço de Goiás (MG), região de interesse deste estudo, compreende cerca de 18.000 km² da parte central do Estado. Este é composto por associações granito-gnáissicas de TTG arqueanas e segundo Jost *et al*. (2014) trata-se de um terreno alóctone de crosta arqueana-paleoproterozóica unida a Faixa Brasília no final do Ciclo Brasiliano. O MG apresenta cinco Greenstone Belts (GB): Crixás, Guarinos, Pilar de Goiás, Faina e Serra de Santa Rita com dimensões que variam de 40 km e 100km de comprimento e largura média de 6km (Figura 1.2).

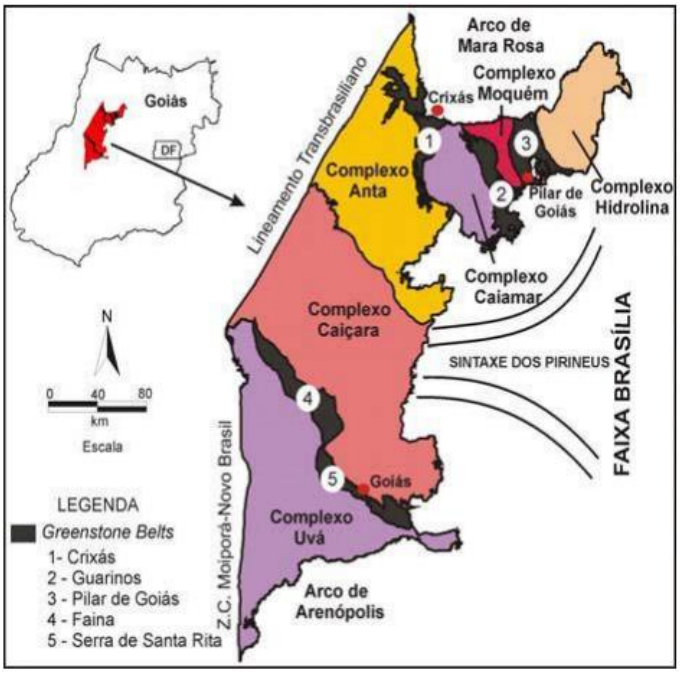


Figura 1.2 - Ilustrando a posição e dimensões dos Greenstone Belts do Maciço de Goiás. Extraído de Jost *et al*. (2014).

As pilhas estratigráficas (Figura 1.3) de todos os cinco GB estão preservadas, deslocadas por transporte tectônico e são tratadas como grupos independentes e diferentes, apesar das semelhanças estratigráficas. Ambos possuem a suas bases compostas por rochas metavulcânicas básicas, semelhante em todos os GB e composta por metakomatiitos e metabasaltos, sobrepostas por pacotes metassedimentares.

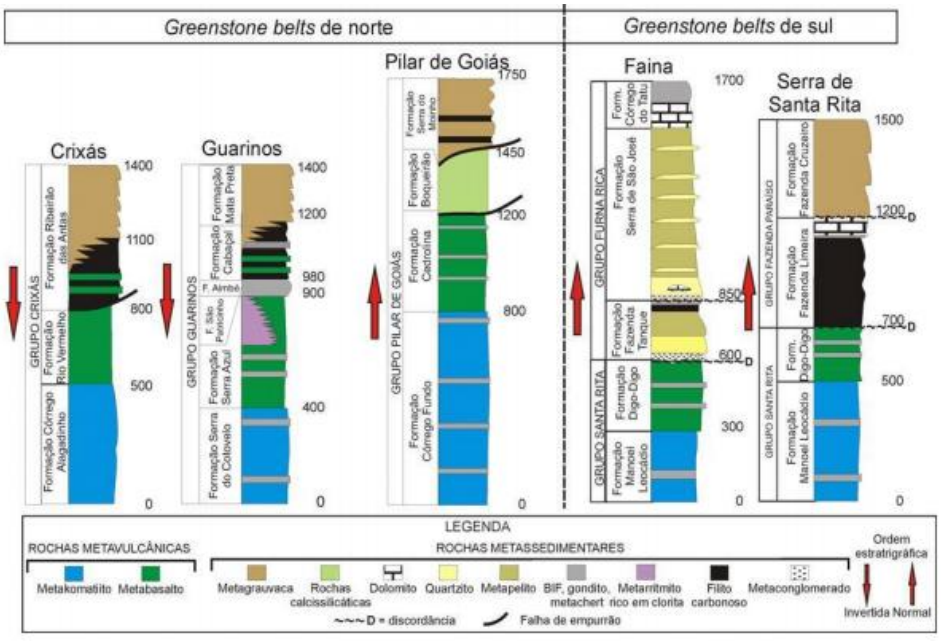


Figura 1.3 - Sequências estratigráficas dos Greenstone Belts presentes no Maciço de Goiás.

Os terrenos granito-gnáissicos limítrofes ao Greenstone Belt de Crixás (GBC) são compostos por batólitos tonalíticos, granodioríticos e graníticos juvenis, tais terrenos sofreram intenso retrabalhamento devido a exposição aos ciclos Transamazônico e Brasiliano. A oeste do GBC temos o complexo Anta, a leste e sul o Complexo Caiamar e a norte este é sobreposto tectonicamente pelos metassedimentos do Arco Magmático de Mara Rosa.

O Greenstone Belt Crixás é composto por uma sequência Vulcano-sedimentar metamorfisada em fáceis que variam de xisto verde a anfibolito inferior e possui geometria alongada e orientada NNW-SSE. A divisão da sequência estratigráfica foi proposta por Jost *et al*. (2019), da base para o topo, como: Formação Córrego Alagadinho, Formação Rio Vermelho, Formação Ribeirão das Antas e Formação Córrego Geral.

A Formação Córrego Alagadinho possui cerca de 500 m de espessura e é composta por komatiitos com intercalações de formações ferríferas, diques e sills de peridotitos e piroxenitos.

A Formação Rio Vermelho possui aproximadamente 350 m de espessura, é composta por rochas basálticas com intercalações de formações ferríferas e/ou formações de manganês, filitos carbonosos e pequenos sills e diques de gabros e Peridotitos.

A Formação Ribeirão das Antas possui cerca de 150 m de espessura e é composta por filitos carbonosos, com ocorrências na zona da granada, intercalados com lentes de dolomito. O contato entre os metassedimentos e o metabasalto, citado anteriormente, são abruptos.

A Formação Córrego Geral, apresenta aproximadamente 300m de espessura, sendo composta por metarenitos que variam a metassiltitos. Por conta de tal variação granulométrica optou-se por designa-los como metagrauvaca.

Alguns diques máficos seccionam toda a sequência sedimentar e parte da sequência vulcânica. Estes possuem baixo grau de deformação, leve foliação, espessura entre 1-20 m e contatos termais com as encaixantes metassedimentares.

Os dados estruturais indicam uma evolução deformacional complexa, com uma fase de distensão e consequentemente formação de bacia e pelo menos três fases com eventos deformacionais compressivos (Kuyumijan & Araújo, 1984, Jost & Fortes, 2001). Considerando as estruturas que são descritas na região, atesta-se um caráter dominantemente dúctil na história deformacional ao qual foram submetidos estes materiais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para embasar este trabalho foi utilizado como base o livro "Cablebolting in Underground Mines" publicado por Hutchinson and Diederichs (1996) em conjunto com artigos, teses de mestrado e trabalhos de conclusão de curso que envolvem metodologias utilizadas na rotina de empreendimentos minerários. Para entender sobre os processos envolvidos no cabeamento abordaremos métodos de lavra, parâmetros utilizados para estabilização de escavações, processos operacionais envolvidos na instalação do sistema de cabeamento e fatores que influenciam na resistência do graute, principal objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1 Métodos de lavra subterrâneos utilizados na MSG

Segundo Dirige (1996) para definir de forma adequada o método de lavra para cada corpo de minério, é necessário analisar diversos aspectos, dentre eles destacaremos: teor médio, geometria do corpo de minério, geologia estrutural, geomecânica/geotecnia do ambiente e das encaixantes, porte dos equipamentos e necessidade de infraestrutura nos *oredrives*. Os dois últimos aspectos são abordados neste tema pois, influenciam diretamente na taxa de produção almejada pelo empreendimento. Após abordar todos estes parâmetros, será possível realizar mais de um método de lavra, sendo geralmente escolhido aquele que garantir os menores custos para cada unidade de minério, está escolha poderá variar em função da taxa de recuperação almejada, risco operacional associado a cada metodologia e aquisição de novas informações com avanço do projeto.

Devido a heterogeneidade dos corpos de minério da MSG são empregados mais de um método de lavra, sendo estes: câmaras e pilares, corte e enchimento e Sublevel Stoping.

2.1.2 Classificação de corpos mineralizados com base na geometria

A escolha da melhor metodologia de lavra para um depósito é fundamental para a performance de uma mina subterrânea. De maneira geral, os fatores que influenciarão nessa escolha serão a inclinação e espessura do corpo de minério.

Quando discutimos sobre inclinação Nicholas (1968) propôs que os corpos podem ter três classificações: suave, médio e inclinado. Estes correspondem respectivamente a corpos com menos de 20°, entre 20° e 50° e por fins superiores a 50°.

Quanto a espessura (potência) podemos classificar os corpos segundo Nicholas (1968) como estreitos (<10m), intermediários (10m a 20m), espessos (20m a 100m) e muito espessos (>100m).

A partir dessas classificações os corpos mineralizados da MSG se classificam como veios estreitos que apresentam mergulho variando de baixo mergulho a inclinado.

2.1.3 Câmaras e pilares

Segundo Lima (2016) as lavras por câmaras e pilares da MSG são geralmente utilizadas para corpos com inclinação suave e espessura definida. O desenvolvimento das galerias é realizado dentro do corpo de minério e à medida que as escavações avançam, se faz necessário conservar pilares para garantir estabilização do *hangwall*. Estes pilares devêm ter dimensão e localização estratégica, a fim de garantir a maior recuperação de minério. Para auxiliar na estabilização do *hangwall* também são utilizados sistemas de estabilização artificiais. A representação esquemática (Figura 2.1) publicada por Lima (2016) exemplifica as lavras por câmaras e pilares da MSG.

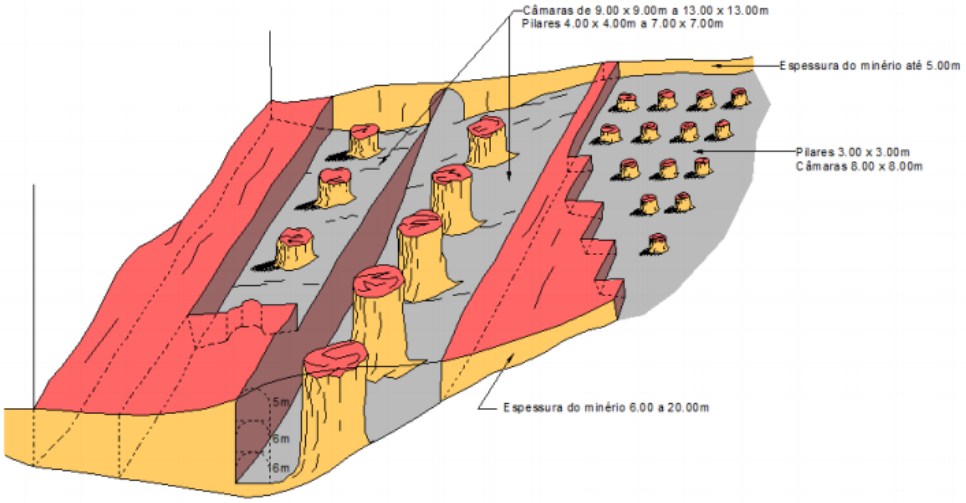


Figura 2.1 - Representação esquemática de uma lavra por câmaras e pilares da MSG. (Lima, 2016).

2.1.4 Corte e enchimento

As lavras por corte e enchimento geralmente são utilizadas em corpos com inclinação média e espessura definida. Com base em Lima (2016), neste método o corpo mineralizado é lavrado da base para o topo em escavações horizontais (Figura 2.2), como o próprio nome diz é feito primeiramente este corte na base e posteriormente está camada é preenchida com material para que possibilite a continuidade vertical da lavra e auxilie na estabilização das paredes. O corte e enchimento apresenta vantagens como a taxa de recuperação e baixa diluição dos minérios quando comparado a outros métodos. Atualmente ele é pouco utilizado na MSG, tendo sido muito utilizado no início das escavações de uma mina específica.

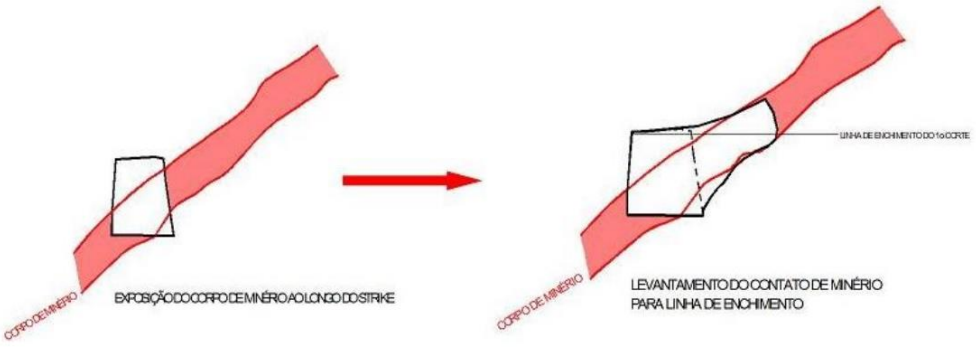


Figura 2.2 - Representação esquemática de lavras por corte e enchimento na MSG. (Lima, 2016)

2.1.5 Lavra em realce

De acordo com Batista (2019) as lavras em realce são utilizadas ultimamente na MSG para corpos com inclinação superior a 32° (Figura 2.3). Este tipo de lavra garante uma taxa de produção elevada quando comparada aos outros métodos. O método consiste no desenvolvimento de uma galeria paralela as horizontais do plano do corpo mineralizado. Após o desenvolvimento, utiliza-se equipamentos de perfuração longa que possibilitem o desmonte de grandes tiras verticais paralelas as linhas de máximo declive do plano mineralize. Para garantir a estabilização do hangwall dos realces escavados são posicionados pilares de rocha, estes podem ser classificados como ribpillars ou sill pillars a depender da sua orientação, sendo os ribpillars paralelos a linha de máximo declive e os sill pillars as horizontais do plano. Além dos pilares, anteriormente a abertura das lavras, também podem ser instalados cabos de aço com comprimento, orientação e mergulho projetadas para auxiliar na redução da diluição.

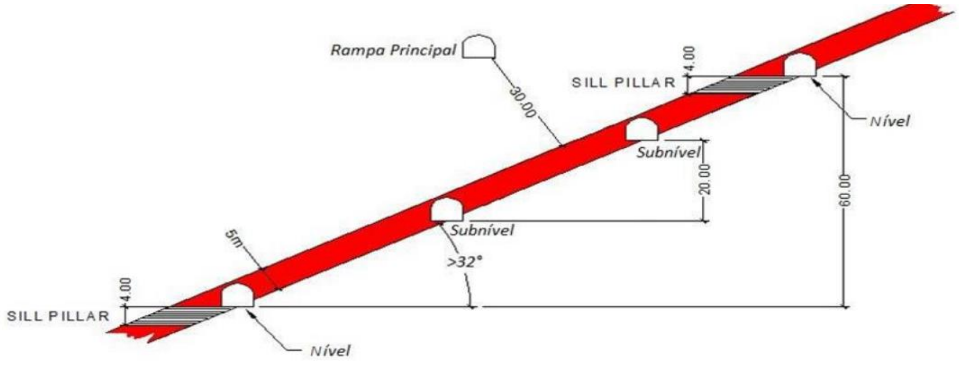


Figura 2.3 - Representação esquemática do método de lavra por realce na MSG. (Lima, 2016)

2.1.6 Raio hidráulico

Um conceito importante para o desenho do sistema de suporte é a definição do raio hidráulico da escavação. O cálculo do raio hidráulico é feito com base na área escavada sobre

o perímetro da escavação. Quanto maior o raio hidráulico, maiores são as cunhas possíveis de serem formadas. Com o aumento das cunhas e entendendo a necessidade de garantir a estabilização do maciço rochoso no entorno das escavações, se faz necessário instalar sistemas de estabilização com pontos de ancoragem cada vez mais distantes da superfície da escavação. Está afirmação é exemplificada na Figura 2.4 onde fica visível o aumento da zona de falha à medida que aumentamos o raio hidráulico da escavação.

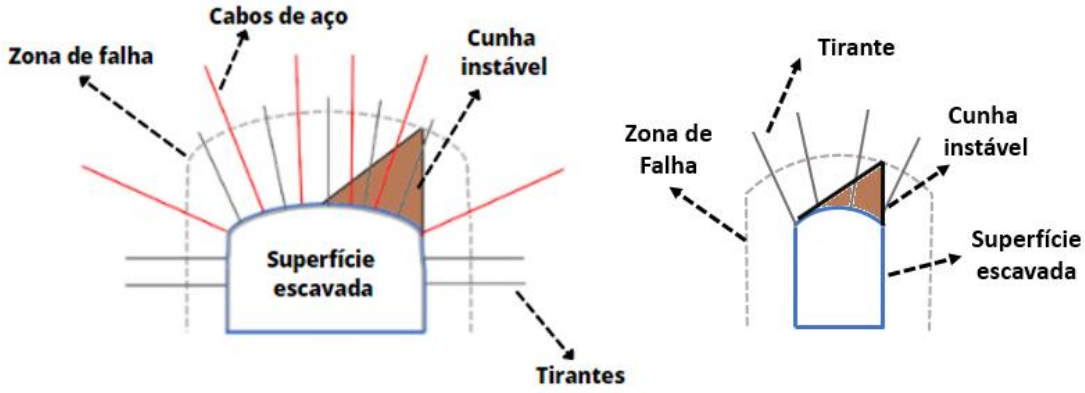


Figura 2.4 -Exemplificação da influência do raio hidráulico na zona de falha. (autor próprio)

Sem entrar em pormenores, observamos que com a variação na largura da escavação também tivemos uma variação no raio hidráulico e consequentemente da zona de falha. É factível observar também, que essa variação no tamanho da zona de falha também é determinante no ponto de ancoragem do sistema de estabilização, tendo em vista que este, precisa de um comprimento mínimo fora da zona de falha para sustentar as cunhas.

2.1.7 Diluição

A diluição é definida por Anderson and Grebenc (1995) como a contaminação do minério pelo estéril, provocando a redução do teor lavrado. Esta pode ser dividida em duas classes: a diluição planejada e não planejada.

O primeiro caso ocorre quando durante o planejamento do bloco a ser lavrado, fica operacionalmente inexecutável a separação dos dois, com isso o estéril é incorporado a lavra.

O secundo caso ocorre quando as encaixantes estéreis, as vezes mineralizadas, mas economicamente inviáveis de serem lavradas, se misturam com o minério devido a instabilidades geotécnicas ou erros operacionais durante a execução da lavra.

Juntamente com a diluição não planejada estão associados custos de transporte, beneficiamento e disposição do rejeito deste material não contabilizado na fase de

planejamento. Para se evitar a diluição não planejada, é preciso um estudo geomecânico para definir o design da lavra e sistema de estabilização adequado, além disso, é preciso um forte controle operacional durante a fase de instalação do sistema de estabilização, perfuração e desmonte da lavra.

2.1.8 Avaliação técnica do sistema de cabeamento

A partir da descrição dos itens anteriores é possível perceber que durante a execução de um projeto de mineração subterrânea, são realizadas escavações de diferentes formatos. Com base em Bieniawski (1989) estes diferentes formatos implicam em avaliações geotécnicas individuais, que a depender de fatores como: qualidade do maciço rochoso, orientação da escavação em relação as famílias de descontinuidade, raio hidráulico, condições do ambiente e outros, exigirão intervenções ou não para garantir a estabilização da escavação.

Segundo Potvin (1988) o raio hidráulico é utilizado em muitas análises empíricas de projetos de estabilização. Um ponto que chama atenção é que à medida que se aumenta o raio hidráulico das escavações, sejam estas: pontos de alargamento, interseções de escavações, regiões de lavra ou outros, a partir de um determinado ponto, se faz necessário utilizar o sistema de cabeamento devido às limitações operacionais de outros sistemas de contenção pontual rígidos, para garantir a estabilização. Como já abordado, essa estabilização fornecerá além de segurança operacional, garantindo um ambiente seguro para trânsito de pessoas e equipamentos nas escavações, também serão minimizados custos com diluição não planejada e um aumento da segurança do processo de retirada do minério pós-lavra, tendo em vista que geralmente o único sistema de estabilização artificial instalado nestes locais é o cabeamento.

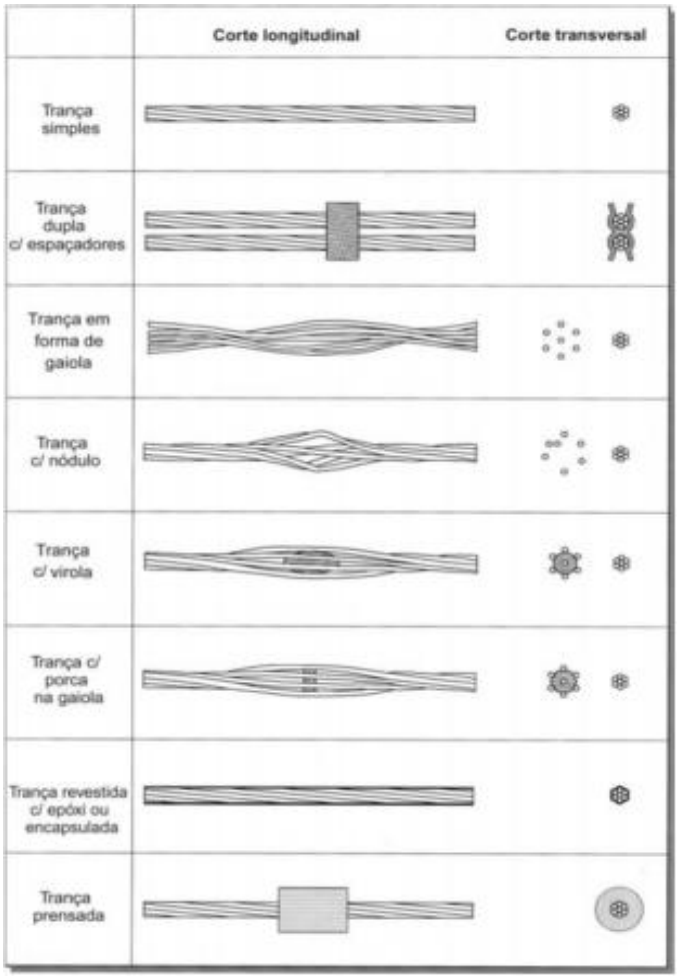
Para instalar os cabos no maciço rochoso, realiza-se furos com o comprimento do cabo e, em seguida, os cabos são inseridos até que atinjam o fundo do furo. Com os cabos posicionados a última etapa é realizar a cimentação dos cabos no maciço rochoso. Como se trata de uma atividade com um certo grau de complexidade é necessário que durante as etapas operacionais controles sejam seguidos, para garantir a qualidade e funcionamento do sistema.

2.1.9 Tipos de cabo

Como os cabos de aços são aplicáveis em diferentes ambientes com a necessidade de diferentes soluções, se fez necessário a criação de diferentes tipos de cabo. No Quadro 2.1 proposto por Windsor, 1992 mostra diferentes modelos, onde temos como primeiro descrito o cabo simples, cabo mais comum utilizado para contenção de blocos. Como vai ser discutido no

capítulo a seguir, o cabo necessita de atrito com o graute e consequentemente com o maciço rochoso para garantir a estabilização. A partir dessa observação times de engenharia buscaram desenvolver outros formados de cabo que visassem aumentar a aderência do sistema e consequentemente reduzir o risco de falha do sistema. Para essa situação foram pensados formatos com a presença de nódulos, variações no formato das tranças e outros como descritos no Quadro 2.1. Apesar dessas variações podemos observar que em todos os cabos há a semelhança com as tranças do cabo simples que garantem o funcionamento do sistema.

Quadro 2.1 - Tipos de cabos de aço. (Fonte: Windsor, 1992)



Quando se realiza o dimensionamento do sistema de cabeamento ficou evidente também, a partir de pesquisas, que existe a possibilidade de se utilizar mais de um cabo por furo. Segundo Hutchinson and Diederichs (1996), para estas situações o sistema oferece cerca de duas vezes a resistência a tração do sistema com cabo simples, sendo cerca de 25 toneladas para cabos simples e 50 toneladas para cabos duplos (Figura 2.5). Existem situações também que exigem que o sistema de cabeamento garanta resistência a outros fatores, como por

exemplo, o intemperismo em casos de maciços rochosos com a presença de água. Para este tipo de situação, caso seja uma galeria que será utilizada por intervalo de tempo maior do que o de resistência ao intemperismo do cabeamento, se faz necessário utilizar cabos como o revestido por epóxi ou encapsulado.

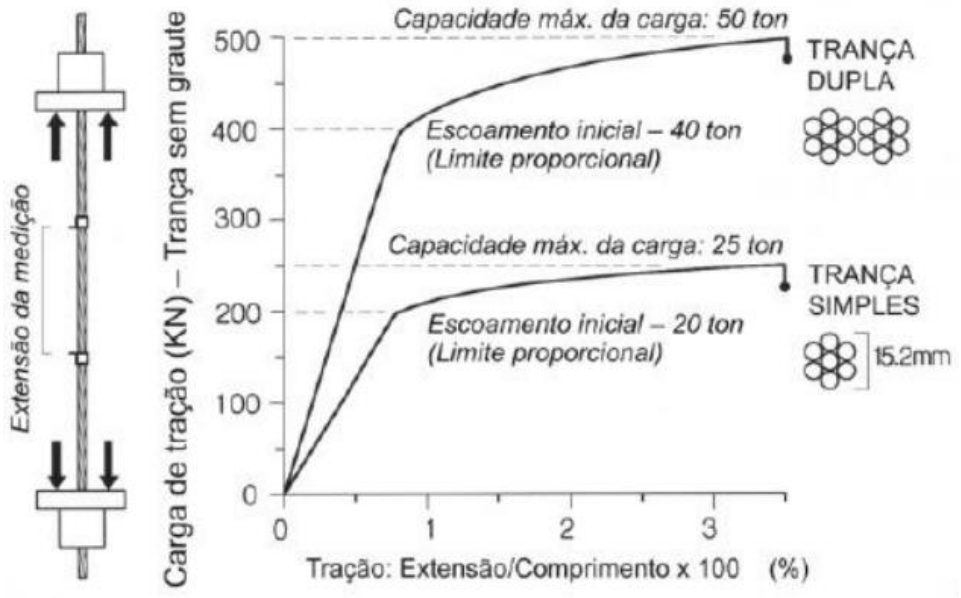
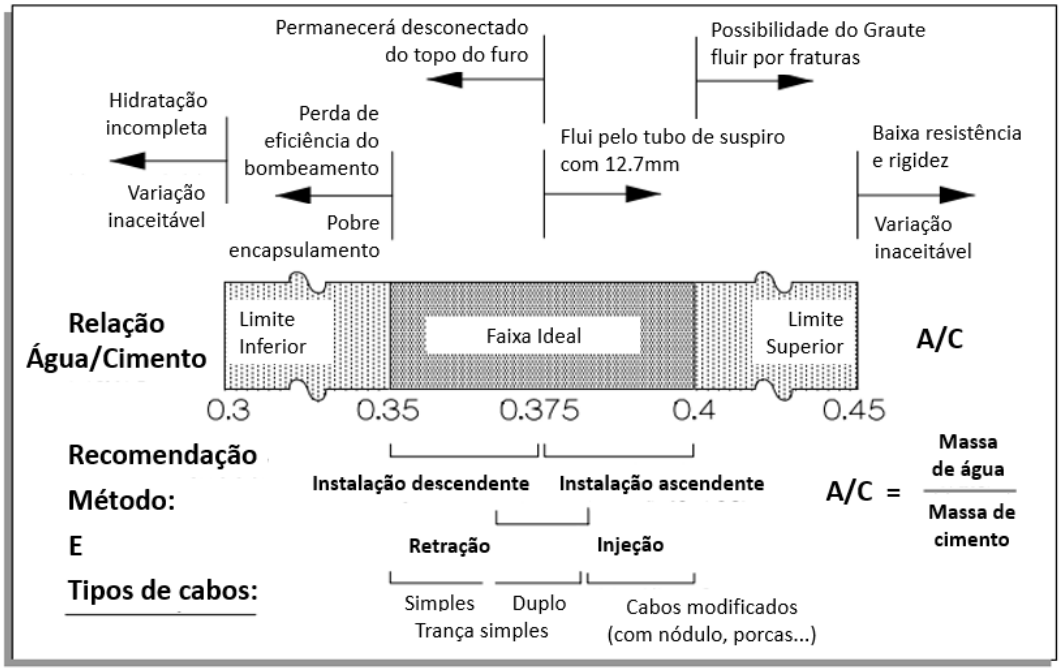


Figura 2.5 - Resistência a tração do sistema de cabeamento com utilização de um ou dois cabos. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996)

2.1.10 Graute

O graute é um composto químico a base de água e cimento com a possibilidade ou não de adição de aditivos. O cimento geralmente utilizado para este tipo de sistema é o Portland V devido a sua característica de entregar uma maior resistência em curtos intervalos de tempo. A quantidade de água no sistema também pode variar, sendo este uma das etapas que necessita de controles de engenharia. Essa necessidade se dá pois é preciso uma concentração ideal que garanta uma boa relação de trabalhabilidade com resistência do graute. O Quadro 2.2 publicado por Hutchinson and Diederichs (1996) mostra como essa variação influência no tipo de instalação, tipo de cabo, trabalhabilidade e resistência do graute.

Quadro 2.2 - Propriedades do graute relacionadas ao fator Água/Cimento. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996)



A partir do Quadro 2.2, percebemos que com a redução do fator A/C aumentamos a resistência do graute. Essa afirmação fica evidente a partir do gráfico de resistência a compressão uniaxial (Figura 2.6) proposto por Hyett *et al*., (1992). Outras informações também podem ser obtidas nesse gráfico, como, o aumento da dispersão da resistência do graute para relações A/C inferiores a cerca de 0.38. Podemos interpretar essa variação pela não hidratação completa do cimento quando estamos neste sistema onde não há abundância de água, da mesma forma quando trabalhamos com abundância da água no sistema faz com que a massa incorpore essa água na mistura resultando em micro vazios e perda de resistência do graute.

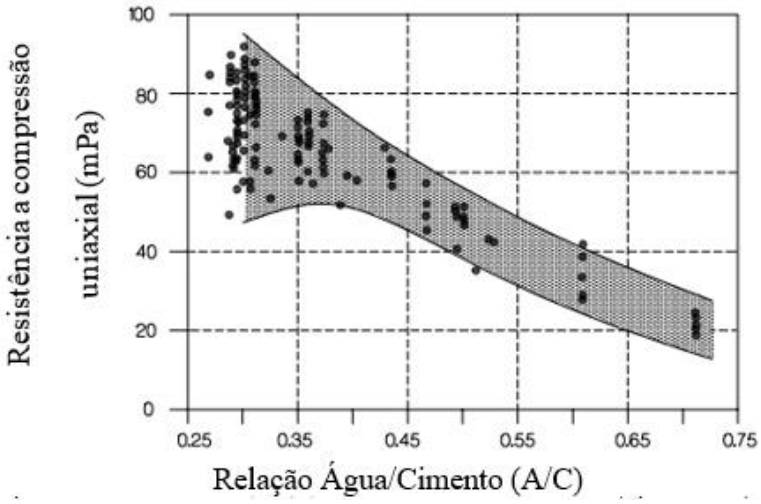


Figura 2.6 - Resistência a compressão uniaxial associada ao fator água/cimento. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996)

Um outro fator que influência na resistência do graute é o tempo de cura, as recomendações técnicas publicadas por Hutchinson and Diederichs (1996) apontam um tempo mínimo de 24 horas antes da utilização do sistema e um ganho de resistência à medida que o tempo passa até que completem 28 dias de tempo de cura, tempo aproximado necessário para completa hidratação do graute. Os gráficos (Figura 2.7 e Figura 2.8) publicados por Littlejohn e Bruce (1975) e Goris *et al* (1994) respectivamente, apontam como essa variação no tempo de cura influência na resistência a tração a partir de teste de arrancamento em cabos e ensaios de resistência a compressão uniaxial com diferentes tempos de cura.

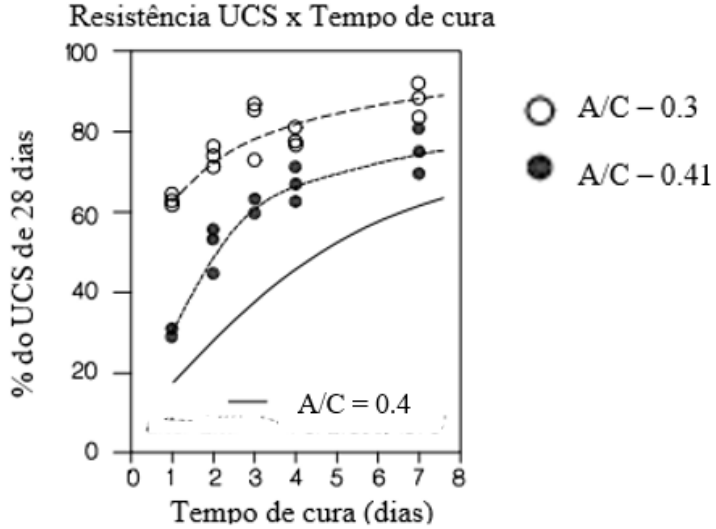


Figura 2.7 - Influência do tempo de cura na resistência a compressão simples do graute. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996)

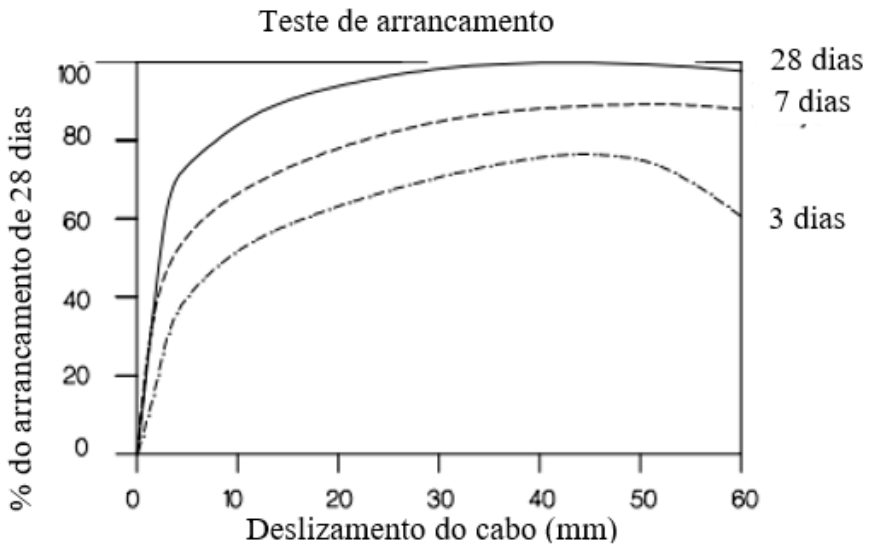


Figura 2.8 - Influência do tempo de cura na resistência ao teste de arrancamento do graute. (Adaptado de Hutchinson and Diederichs, 1996)

2.1.11 Instalação ascendente de cabos

O processo de instalação do sistema de cabeamento no formato ascendente em escavações subterrâneas possui um grau de complexidade ligado as várias etapas presentes neste processo (Figura 2.9). Segundo Hutchinson and Diederichs (1996) no formato ascendente, o furo é tamponado com o cabo e uma mangueira, popularmente conhecida como suspiro, de tal forma que permita que o graute seja injetado a partir da boca do furo, sendo bombeado da base para o topo do furo até que toda a coluna seja preenchida com graute. A garantia de que a coluna foi toda preenchida por graute é feita com base no suspiro que é posicionado dentro de um recipiente com água e à medida que o graute vai ocupado espaço dentro do furo, o ar é expulso causando borbulhas no recipiente, quando as borbulhas param é entendido que a coluna está toda preenchida. Para conseguir realizar este tipo de instalação, o graute precisa estar com uma viscosidade que permita o bombeamento, para isso, a determinação do fator água e cimento e a utilização ou não de aditivos que aumentem a trabalhabilidade do graute é essencial.

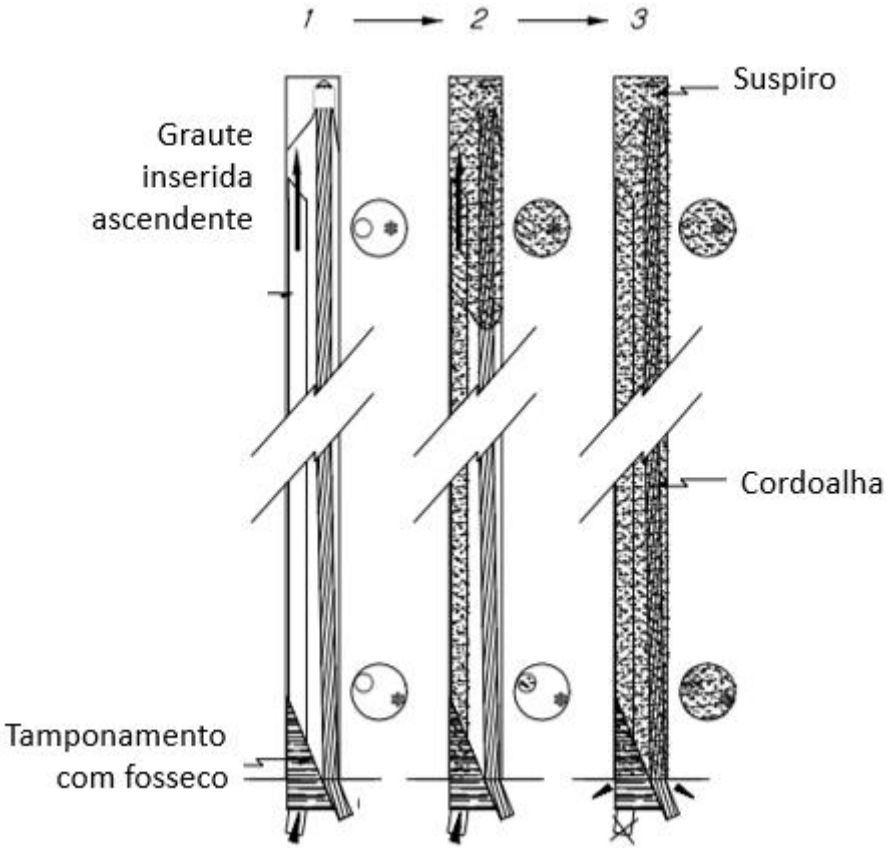


Figura 2.9 - Representação esquemática do processo de instalação de cabos no formato ascendente com utilização de suspiro. (Adaptado de: Hutchinson and Diederichs, 1996)

Após a realização do projeto de dimensionamento e malha dos cabos, dá-se início aos processos operacionais de instalação. A figura 2.10, mostra a sequência das atividades necessárias para instalação.

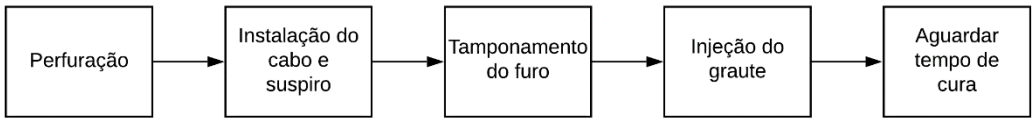


Figura 2.10 - Fluxograma de instalação do sistema de cabeamento no formato ascendente. Fonte: Hutchinson and Diederichs (1996)

2.1.12 Funcionamento do sistema de cabeamento

Segundo Yazici e Kaiser (1992), quando o sistema de cabeamento é tensionado acontece uma redistribuição de força devido ao caráter espiral dos cabos de aço trançados (Figura 2.11). Essa redistribuição de força causa um deslocamento radial que induz uma tensão de confinamento proporcional a rigidez da graute e do maciço rochoso. A tensão de cisalhamento do cabo, que resiste ao deslizamento do cabo, é resultado da pressão de confinamento e do

coeficiente de atrito entre a graute e os fios do cabo. A partir dessa afirmação fica evidente a necessidade de garantir que o graute esteja rígido durante a utilização do sistema e que com o aumento dessa rigidez também há um ganho de resistência no sistema.

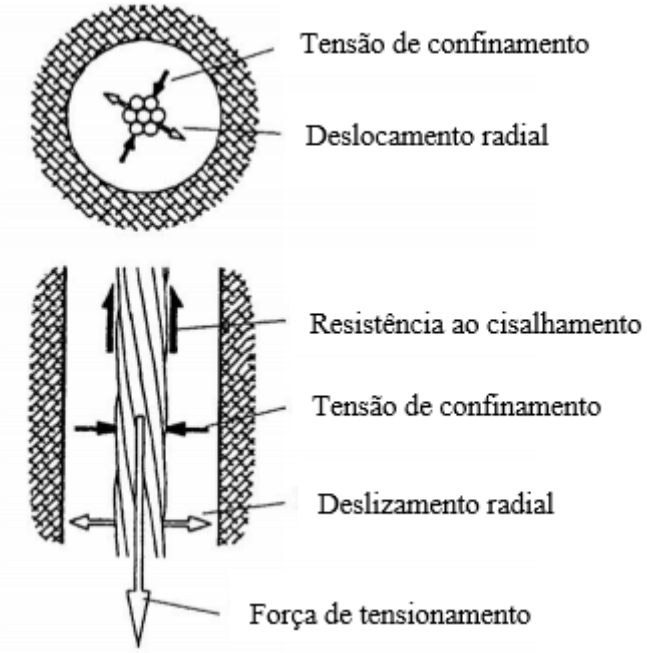


Figura 2.11 - Redistribuição de tensões durante o tensionamento do sistema de cabeamento. (Adaptado de: Evert Hoek, 2008)

2.1.13 Tipos de falha do sistema de cabeamento

De acordo com Jeremic e Delaire (1983), dentro de sistema de cabeamento temos a interação entre rocha, graute e cabo. A depender dos parâmetros geotécnicos destes três itens e da interação entre eles podemos ter os seguintes tipos de falha, evidenciados na Figura 2.12.

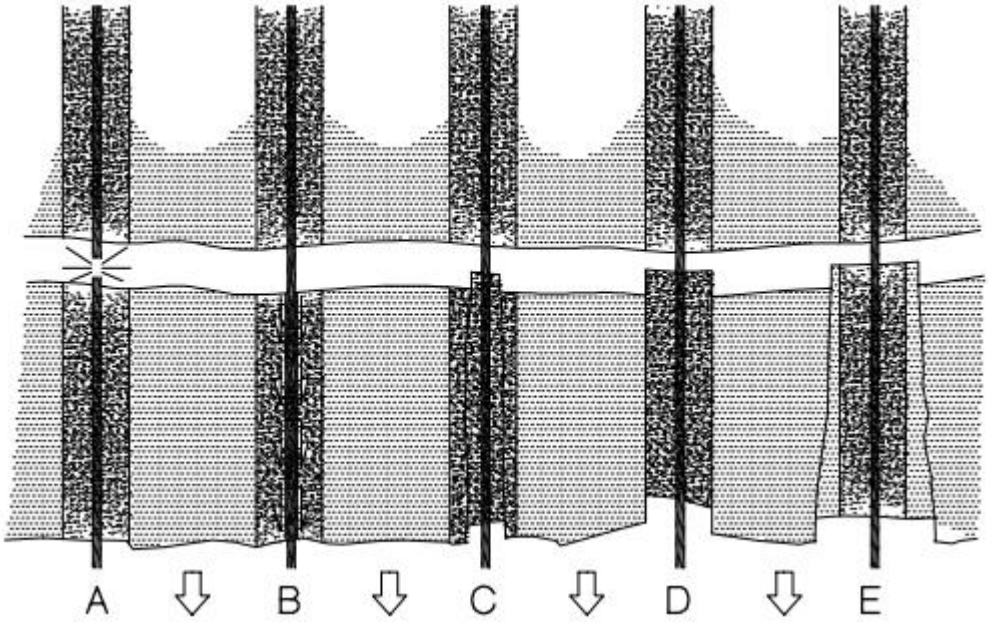


Figura 2.12 - Tipos de falha no sistema de cabeamento. (Fonte: Hutchinson and Diederichs, 1996)

A – Ruptura do cabo de aço

B – Deslizamento por falha na interação cabo/graute

C – Ruptura na graute

D – Deslizamento por falha na interação graute/rocha

E – Ruptura no maciço rochoso.

Como o graute está presente em três dos cinco tipos de falha no sistema de cabeamento fica evidente a necessidade de testar e garantir a maior resistência deste elemento.

2.1.14 Ensaio de compressão uniaxial

Um dos ensaios mais práticos para definir a resistência do graute é o ensaio de compressão uniaxial (Figura 2.13). Neste tipo de ensaio, a amostra na forma cilíndrica ou em cubos é submetida a uma força compressiva até ser levada a ruptura. Ao final do ensaio deve-se identificar e anotar o maior valor obtido antes da ruptura da amostra. Os ensaios desse tipo devêm seguir as diretrizes presentes na NBR 15845/2010, que prevê parâmetros para determinar a dimensão das amostras e taxas de carregamento dos equipamentos.

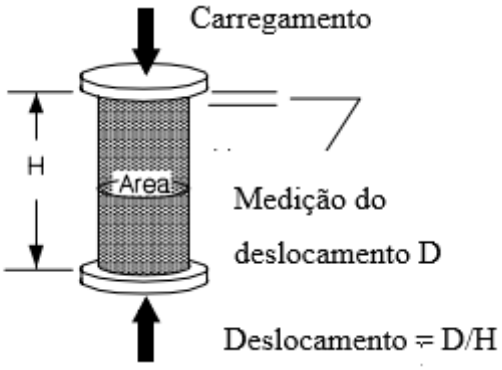


Figura 2.13 - Ensaio de compressão uniaxial. (Adaptado de: Hutchinson and Diederichs, 1996)

A partir do valor de força obtido no ensaio em conjunto com a área da seção transversal da amostra, é possível calcular a resistência a compressão uniaxial que deve ser uma medida de pressão.

2.1.15 Teste de arrancamento

O teste de arrancamento, como o próprio nome diz, é realizado para tentar arrancar o cabo já instalado. Ele tem como principal objetivo testar a resistência a tração máxima do sistema e com isso validar ou não o seu funcionamento. Para realizar esse teste, é utilizado um cilindro expansível que é preso ao cabo, à medida que é feita uma pressão de fluido no cilindro ele faz uma força tracionando o cabo. O ensaio termina com a ruptura, deslizamento do cabo ou caso atinja o valor de pressão referente a resistência máxima do cabo.

2.1.16 MasterRheobuild (1000) e MasterSet Delvo (aditivos utilizados)

Como já apresentado, existe uma janela de tolerância para a relação A/C em sistemas de injeções ascendentes. Está janela tem por objetivo garantir o bombeamento/preenchimento da coluna e a resistência da graute. Para melhorar a trabalhabilidade da graute, ou seja, facilitar o bombeamento e garantir uma viscosidade que não atrapalhe no preenchimento da coluna, podem ser utilizados aditivos que alterem as propriedades físico-químicas da graute. As informações descritas neste capítulo estão disponíveis nos portifólios do fabricante.

O MasterRheobuild (1000), um dos aditivos utilizados, tem como finalidade reduzir a necessidade de injeção de água no sistema, garantindo a trabalhabilidade da pasta com relações A/C menores. Consequentemente, ao se reduzir a água há um ganho de competência do material. Dentre as principais melhorias podemos destacar o: aumento na coesão, aumento no módulo de elasticidade e aumento na resistência a compressão. Vale destacar também que segundo o fabricante não há alteração no tempo de pega do cimento Portland.

O MasterSet Delvo, aditivo também utilizado neste trabalho, funciona como um estabilizador que retarda a hidratação e consequentemente facilita o processo de bombeamento, tendo em vista que, este irá atrasar o processo de solidificação da graute. Essa característica também permite uma redução na relação A/C e consequentemente um ganho de competência na graute utilizada.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para testar o funcionamento do sistema de cabeamento serão utilizados três métodos com objetivos distintos. O primeiro método será o teste de compressão uniaxial, que tem por objetivo testar diferentes relações água e cimento, estes serão testados com diferentes tempos de cura e com a presença de plastificantes e estabilizadores. O segundo teste irá simular o sistema de instalação ascendente em um tubo de PVC para validar o funcionamento do suspiro e consequentemente o preenchimento total da coluna. O terceiro método será a realização de testes de arrancamento em cabos instalados no maciço rochoso também com diferentes tempos de cura para determinação do tempo mínimo para utilização do sistema.

3.1 Ensaios de compressão uniaxial

Entendendo que o graute necessita de uma viscosidade baixa em instalações ascendentes, que é concedida com relações água/cimento a partir de 0.375 e que para o preenchimento de cabos com nódulos se faz necessário utilizar uma relação água/cimento de 0.4. Em relações A/C inferiores a este limite serão utilizados plastificantes e estabilizadores para reduzir a viscosidade do sistema e atrasar a reação de endurecimento do graute. Com isso, realizou-se ensaios com objetivo de testar as seguintes relações:

- 0,4 sem a adição de aditivos;
- 0,35 com a adição de plastificantes e estabilizadores;
- 0,3 com a adição de plastificantes e estabilizadores;

Estes ensaios serão realizados para diferentes tempos de cura para que seja possível definir a equação de resistência em função do tempo para cada uma das receitas de graute.

As amostras serão confeccionadas com uma geometria padronizada, sendo cilindros com diâmetro de 50mm e comprimento de 100mm, estas dimensões estão de acordo com a norma brasileira para ensaios de compressão uniaxial. Para garantir esse padrão geométrico serão utilizadas formas (Figura 3.1) durante a confecção das amostras. Mesmo com o padrão, antes de cada ensaio será utilizado um paquímetro para mensurar com maior precisão (+- 0.05mm) o comprimento e o diâmetro das amostras.

Figura 3.1 - Forma para confecção das amostras de compressão uniaxial.

Serão coletados também o peso das amostras antes do ensaio com a finalidade de construir uma equação que forneça a partir da densidade e tempo de cura a relação A/C utilizada para confecção do graute, está será uma ferramenta de controle de qualidade criada para estudo do processo operacional de instalação do cabeamento.

Para realização dos ensaios de compressão uniaxial será utilizada uma prensa modelo Servo Controlado (Figura 3.2) fabricada pela empresa Martins Campelo Testing Systems do laboratório de mecânica de rochas da MSG. O equipamento possui precisão de +-0.1kN e será utilizada com a taxa de incremento de carga de 10kN por minuto. Será coletado ao final de cada ensaio a carga máxima antes da ruptura do graute.

Figura 3.2 - Ilustração esquemática da prensa Servo Controlado utilizada para realização dos ensaios de compressão uniaxial.

Após a coleta das dimensões das amostras será calculado a área da seção transversal e volume das amostras. Com essas medidas em conjunto com o peso das amostras e o carregamento máximo obtido em cada ensaio de compressão simples, serão calculados a densidade das amostras a partir da equação 1 e a resistência a compressão simples a partir da equação 2.

$$Densidade = Massa/Volume \quad (2.1)$$

$$UCS = (Carregamento\ máximo)/(Área) \quad (2.2)$$

Com os valores de resistência a compressão uniaxial e densidade mensurados, os dados serão organizados em planilhas de Excel para que sejam definidas as equações de correlação entre "resistência a compressão simples x tempo de cura" e "densidade x tempo de cura" para cada uma das receitas utilizadas para confecção do graute.

3.2 Teste de arrancamento

Para realizar os testes de arrancamento utilizou-se uma bomba hidráulica (Figura 3.3a) automática conectada a um cilindro expansível (Figura 3.3b) que será posicionado em contato com o maciço rochoso para arrancar o cabo. Os cabos serão instalados no maciço rochoso em uma escavação subterrânea, para que posteriormente, sejam testados com diferentes tempos de cura e receitas de graute. Os cabos serão instalados com comprimento de 1 metro dentro do maciço rochoso, visto que este valor já é capaz de garantir a resistência máxima do sistema que deve ser equivalente a resistência do cabo. O graute utilizado para instalação destes cabos será com relação A/C de 0,4 sem aditivos. Após a instalação realizou-se, os testes de arrancamento com intervalos de tempo pré-definidos para mensurar a influência do tempo de cura na resistência do sistema. Serão realizados pelo menos 3 testes para cada tempo de cura e receita. Com estes ensaios espera-se determinar o tempo mínimo para obtenção da carga máxima do sistema, 25 toneladas para cabos simples, considerando o cabo como elo mais fraco do sistema.

Figura 3.3a - Bomba hidráulica elétrica - **Figura 3.3b -** Cilindro para teste de arrancamento.

3.3 Teste do sistema de injeção ascendente de graute

Com a finalidade de testar o preenchimento de graute na instalação ascendente, realizou-se uma simulação do sistema de cabeamento. Para isso serão utilizados seis canos de PVC, que serão posicionados com angulação próxima de 90° e comprimento de 9 metros (Figura 3.4). Neste cano será colocando um cabo de aço com o suspiro (Figura 3.5a) e tamponado com cimento fosseco (Figura 3.5b) para que posteriormente seja injetado o graute com relação A/C de 0,4 sem aditivos. Após realizar a injeção, o cano continuará na posição vertical durante o tempo de cura do graute, cerca de 24 horas. Após esse tempo, o cano de PVC será serrado, em seções transversais, para que seja possível visualizar como está o preenchimento e qualidade do graute ao longo da coluna.

Figura 3.4 - Cano de PVC de 9 metros posicionado a 90° para instalação dos cabos.

Figura 3.5 - Tubos de PVC com cabos e suspiros posicionados - Figura 3.5b – Cano de PVC já com a mangueira de injeção do graute e selado com cimento fosseco.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os dados brutos obtidos para os ensaios propostos. Foram realizados um total de 141 ensaios de compressão uniaxial, 90 testes de arrancamento e 6 ensaios de injeção ascendente.

4.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Foram realizados um total de 141 ensaios de compressão uniaxial. Como descrito nos métodos seguiu-se um padrão geométrico para os corpos de prova variando apenas a receita utilizada para confecção do graute, a utilização ou não de aditivos e o tempo de cura de cada amostra. O Quadro 4.1 sintetiza as receitas de graute utilizadas e a quantidade de ensaios para cada uma e seus respectivos tempos de cura.

Quadro 4.3 - Ensaios de UCS realizados com seus respectivos tempos de cura.

	Quantidade de ensaios realizados		
	A/C 0.4	A/C 0.35 (c/ aditivos)	A/C 0.3 (c/ aditivos)
0 à 12 horas	8	5	0
12 à 24 horas	14	28	3
24 à 48 horas	12	19	9
> 48 horas	19	40	26

Em cada uma das amostras foi mensurado o peso e a resistência à compressão simples. Os dados referentes a cada uma dessas informações estão ilustrados nos gráficos 4.1 e 4.2, onde, estão geradas correlações entre a Resistência à Compressão Uniaxial x Tempo de Cura x Receita utilizada e Densidade x Tempo de Cura x Receita realizada. Para o gráfico de resistência observou-se um ganho de resistência com o aumento do tempo de cura e também com a redução do fator A/C, ambos resultados eram esperados conforme literatura disponível. Para os ensaios de densidade também observou-se um ganho de densidade com a redução do fator A/C e uma perda com o aumento do tempo de cura, provavelmente relacionada a perda de água ao longo da reação química.

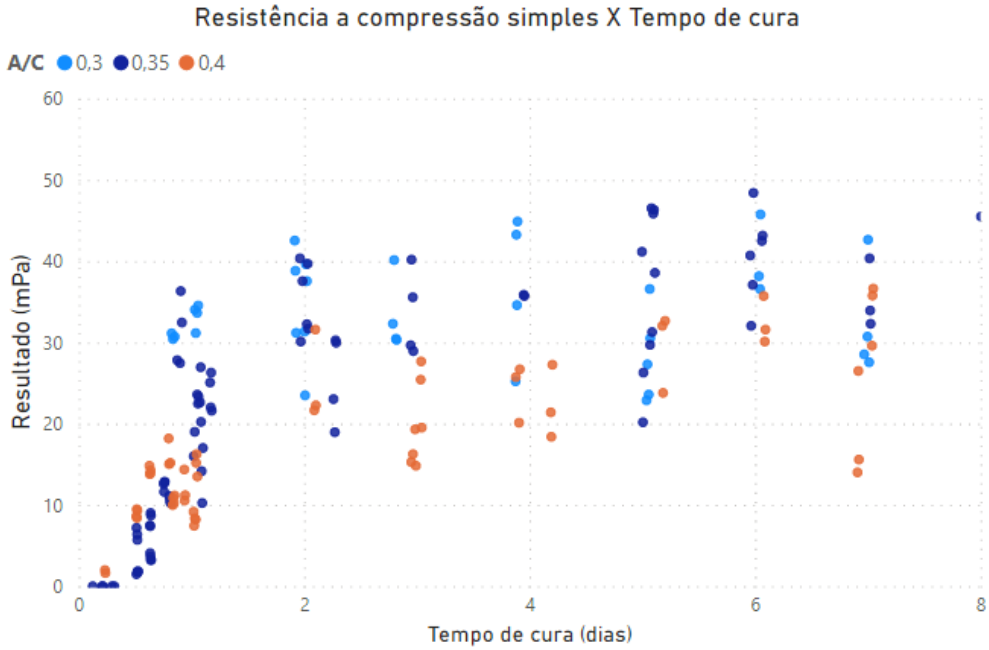


Gráfico 4.1 - Resultados obtidos para os ensaios de compressão uniaxial classificados conforme a receita utilizada.

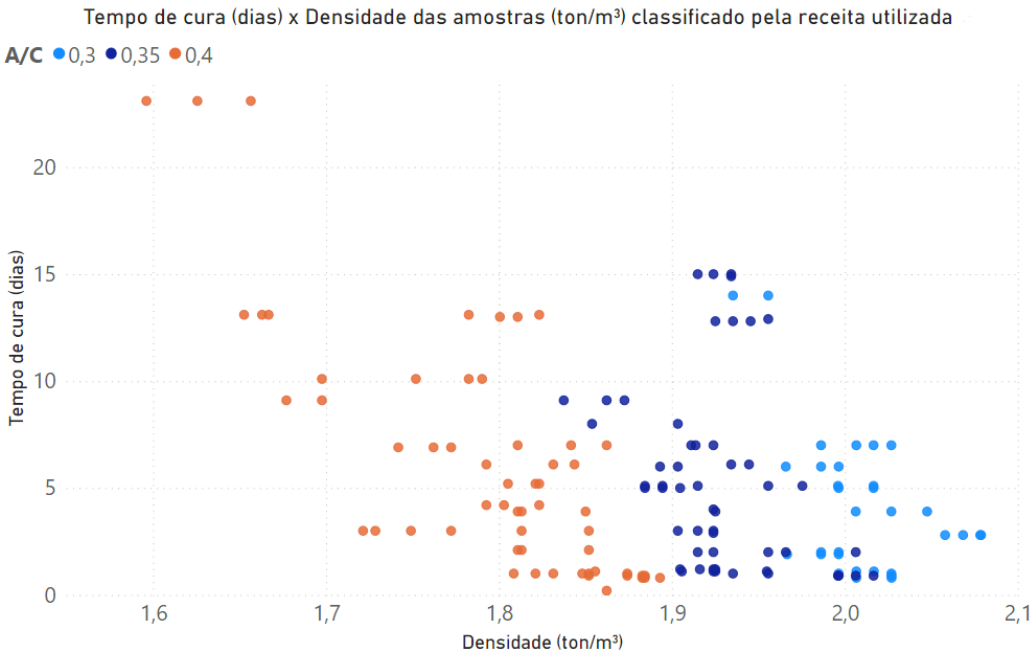


Gráfico 4.2 - Resultados dos ensaios de densidade para diferentes tempos de cura classificados com base na receita utilizada.

4.2 TESTES DE ARRANCAMENTO

Foram realizados um total de 90 testes de arrancamento. Como mencionado no capítulo anterior, nestes testes foi utilizada uma relação A/C de 0,4 com testes ensaiados em tempos de cura distintos para

estudo da influência deste parâmetro. O Quadro 4.2 mostra a quantidade de ensaios realizados e seus respectivos tempos de cura.

Quadro 4.4 - Quantidade de ensaios de arrancamento realizados e seus respectivos tempos de cura.

Intervalo (horas)	Quantidade de ensaios realizados
0 à 10	15
10 à 20	28
20 à 30	27
30 à 40	0
40 à 50	20

O gráfico 4.3 mostra a relação entre a capacidade de carga máxima obtida em toneladas no teste de arrancamento e o tempo de cura da graute de cada ensaio. Assim como no gráfico de resistência a compressão simples, observa-se um ganho de resistência com o aumento do tempo de cura. Segundo a bibliografia, este ensaio deve resistir a uma carga mínima de cerca de 20 toneladas a partir de 24 horas de tempo de cura, no gráfico é possível observar ensaios onde esta resistência foi obtida com intervalos de tempo menores e ensaios onde, mesmo após 24 horas, não foi obtida a resistência esperada.

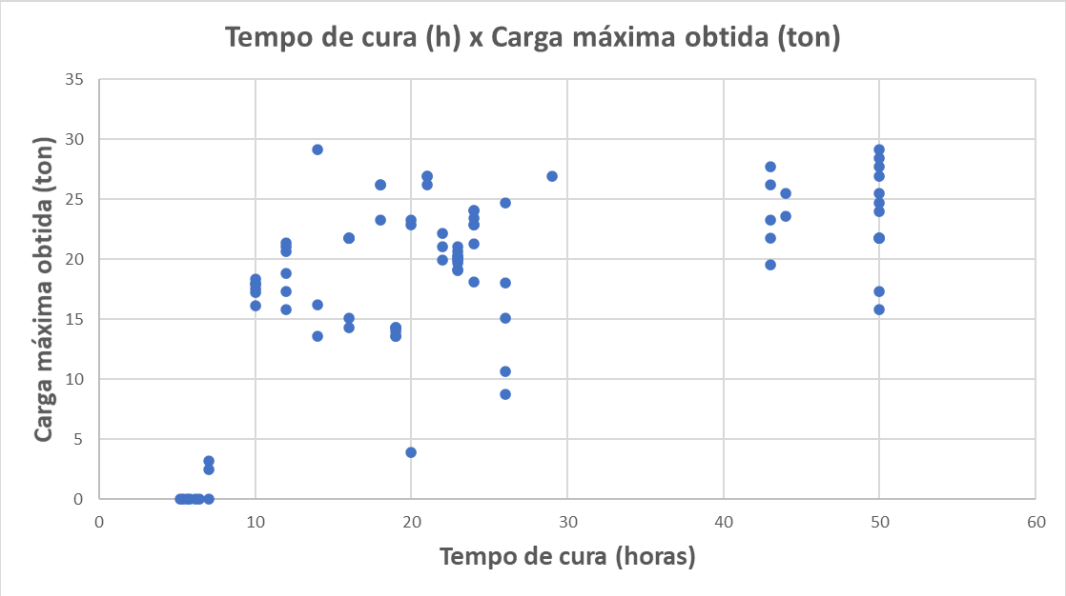


Gráfico 4.3 - Resultados obtidos no teste de arrancamento para diferentes tempos de cura.

4.3 TESTE DE ENSAIO ASCENDENTE

Durante a injeção de graute nos tubos de PVC houve problema em dois ensaios que não apresentaram a vedação adequada dos tubos (Figura 4.1A e 4.2B). No decorrer dos ensaios foi

possível observar o funcionamento do suspiro durante a injeção, onde, foi percebido a fuga de ar do sistema pela mangueira (Figura 4.2) enquanto não houvesse o preenchimento total da coluna. Após a injeção, as mangueiras foram seladas conforme o procedimento para que não houvesse vazamento de graute do sistema (Figura 4.4).

Figura 4.1 - Ilustrando o vazamento de graute durante a injeção no tubo. **Figura 4.2B** – Ilustrando a ruptura da emenda do ensaio 5.

Figura 4.2 - Borbulhas de ar na água evidenciando a fuga de ar durante a injeção de graute no tubo.

Figura 4.3 - Tubos de injeção de graute selados para impedir vazamento de graute do sistema.

Após aguardar o tempo de cura do graute, os tubos foram serrados com auxílio de uma lixadeira elétrica nas posições 4,5 metros, 8 metros, 8,7 metros e 8,9 metros para que fosse possível visualizar o preenchimento e qualidade do graute dessas posições. Os Quadro 4.3, 4.4 e 4.5 mostram as seções obtidas para cada ensaio realizado e sua respectiva profundidade. Além destas seções foram cortados também, de forma longitudinal, os testemunhos de 10 cm do topo e os de 20cm entre 8,7 e 8,9 metros de altura. As Figura 4.5 mostra as amostras de 20cm obtidas nos ensaios.

Figura 4.4 - Amostras retiradas da altura de 8,7 a 8,9 metros dos ensaios.

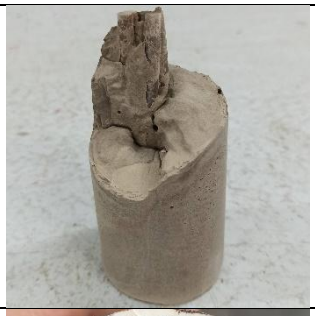
Quadro 4.5 - Seções obtidas para os ensaios 1 e 2.

	FURO 1	FURO 2
Topo do cabo		
8,9 metros		
8,7 metros		
8 metros		
4,5 metros		

Quadro 4.6 - Seções obtidas para os ensaios 3 e 4.

	FURO 3	FURO 4
Topo do cabo		
8,9 metros		-
8,7 metros		
8 metros		
4,5 metros		

Quadro 4.7 - Seções obtidas para os ensaios 5 e 6.

	FURO 5	FURO 6
Topo do cabo		
8,9 metros		
8,7 metros		
8 metros		
4,5 metros		

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos.

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

A partir dos ensaios de compressão uniaxial foi possível constatar resultados já esperados com base na revisão bibliográfica realizada. Houve um ganho de resistência com a redução do fator A/C e um aumento da dispersão dos resultados obtidos, estas afirmações podem ser constatadas a partir das curvas de tendência logarítmicas dos Gráficos 5.1, 5.2 e 5.3. Como a trabalhabilidade da receita de relação A/C 0,35 com aditivos se mostrou melhor que a de 0,4 e, apesar do aumento na dispersão dos resultados, houve um ganho de resistência no graute, esta pode ser uma alternativa de melhor desempenho para a instalação do sistema de cabeamento nas escavações subterrâneas. Apesar dos bons resultados de resistência, a receita de 0,3 com aditivos não apresentou uma trabalhabilidade interessante, visto que a viscosidade obtida não permite o bombeamento adequado garantindo o preenchimento total do furo.

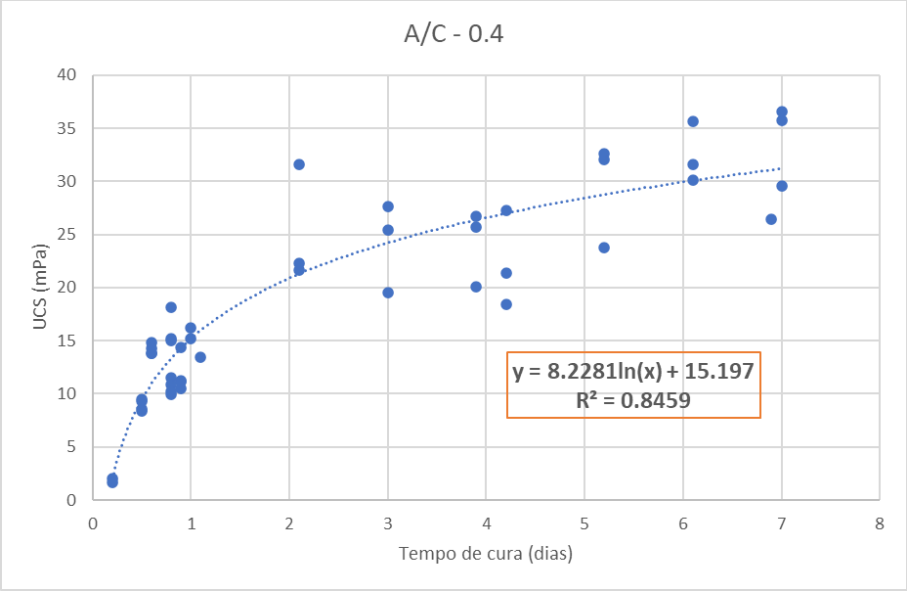


Gráfico 5.1 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,4.

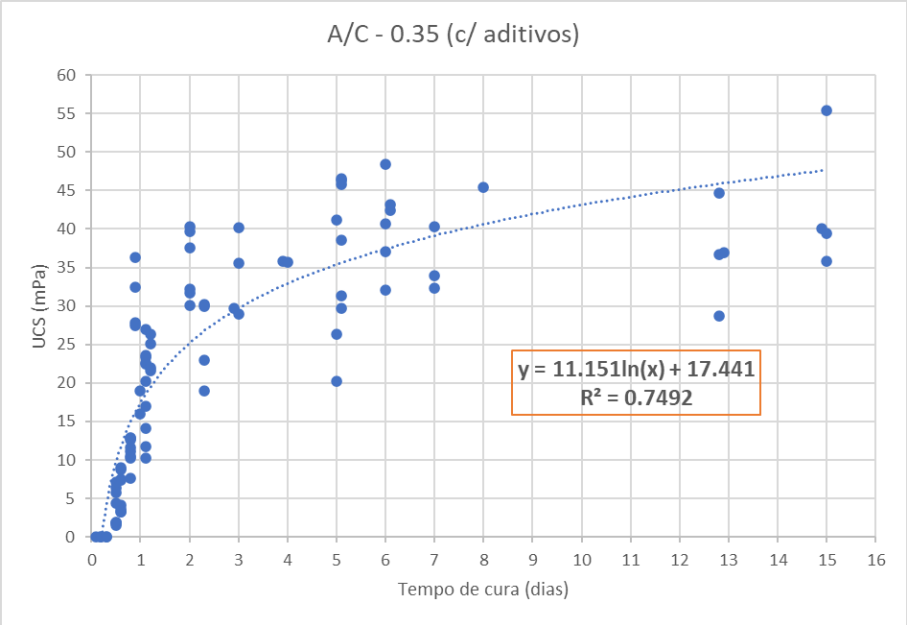


Gráfico 5.2 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,4 com a utilização de aditivos.

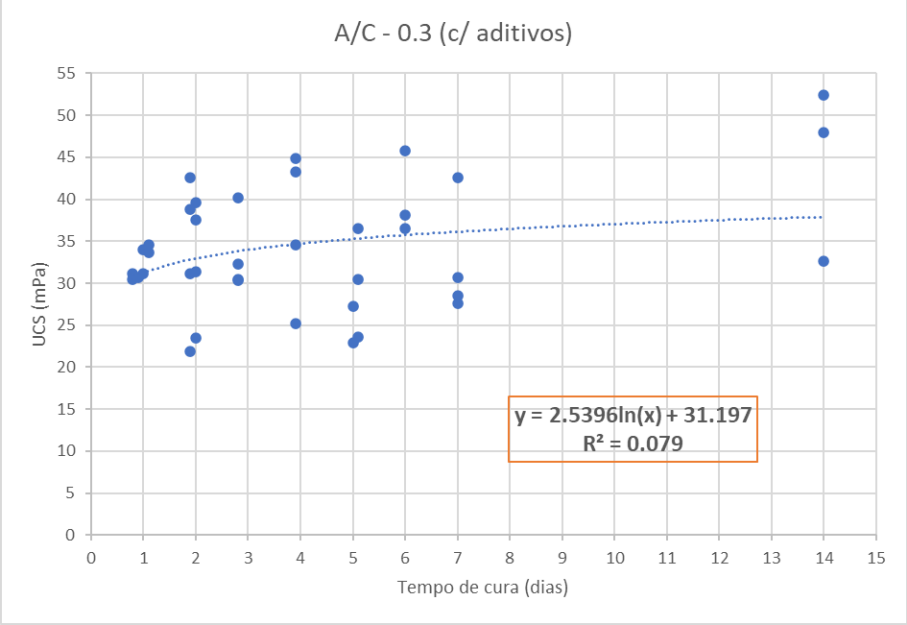


Gráfico 5.3 - Correlação entre resistência a compressão uniaxial e o tempo de cura para receita de A/C 0,3 com a utilização de aditivos.

Para os ensaios de densidade, foi possível estimar intervalos de densidade relacionados com o tempo de cura. Estes intervalos estão representados no Gráfico 5.4 e podem seguir como um guia para estimativa da relação A/C utilizada na confecção da graute.

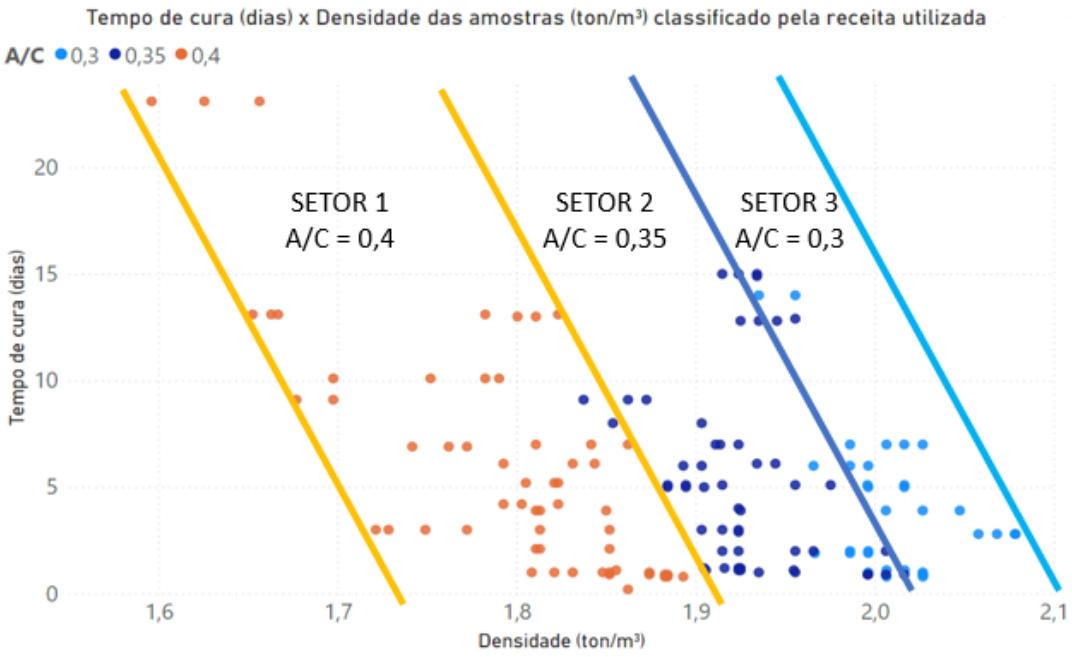


Gráfico 5.4 - Delimitação dos intervalos para estimativa da relação A/C utilizada relacionada com o tempo de cura.

5.2 TESTE DE ARRANCAMENTO

Os dados obtidos no teste de arrancamento apresentaram uma dispersão elevada o que é possível observar através da confiança obtida para a reta de correlação logarítmica (Gráfico 5.4). Apesar da baixa correlação, os dados mostram um ganho de resistência no sistema com o aumento do tempo de cura nas primeiras 50 horas. Quando observamos os valores com tempo de cura superior a 24 horas, temos que 9 dos 39 ensaios apresentaram resultado inferior a 18 toneladas. Estes resultados não confirmam que um cabo com 1 metro de comprimento ancorado é capaz de suportar a carga máxima do cabo para estes tempos de cura.

É importante destacar também, de forma positiva, que 15 ensaios apresentaram resistência superior a 20 toneladas com tempo de cura inferior a 24 horas. Como todos os ensaios seguiram o mesmo método para confecção da graute, tipos de cabos e instalação é difícil atribuir uma explicação para estas variações positivas e negativas nos resultados, sendo, portanto, atribuídas a dispersão do ensaio de arrancamento.

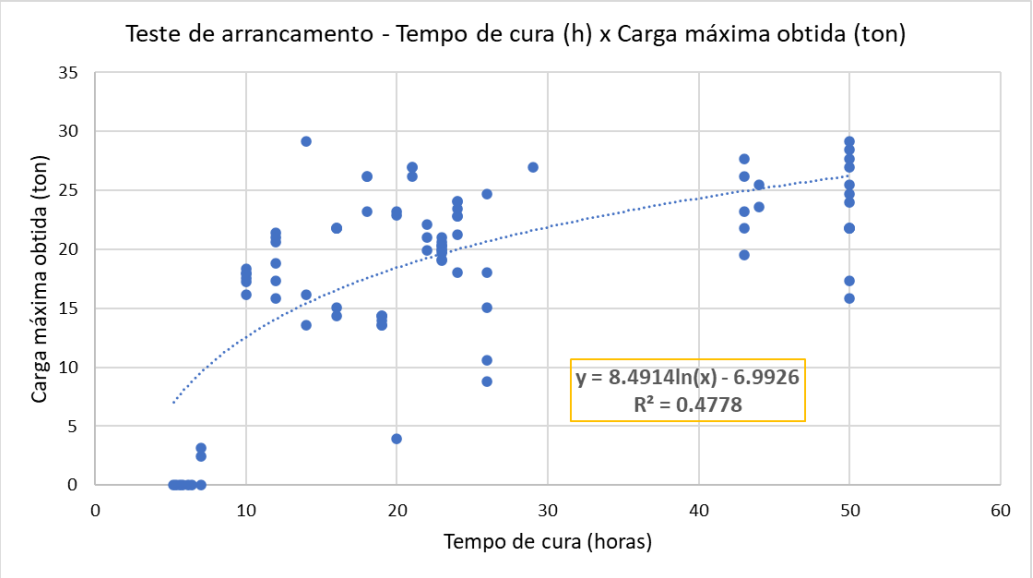


Gráfico 5.5 - Correlação logarítmica entre a carga obtida nos ensaios de arrancamento e o tempo de cura.

5.3 TESTE DE ENSAIO ASCENDENTE

Os resultados dos ensaios realizados para simular o preenchimento ascendente de graute na coluna se mostraram satisfatórios, onde, apesar dos ensaios 4 e 5 terem apresentado problemas durante a injeção, todos os ensaios tiveram a coluna preenchida até a altura de 8,9 metros o que reflete um resultado de pelo menos 98,8% da coluna preenchida. Se observarmos apenas os tubos onde não houve problema durante a injeção, 3 dos 4 ensaios preencheram todo o cabo com graute e o quarto restou apenas 3 cm sem preenchimento.

Observando também a qualidade do preenchimento, é possível verificar o preenchimento da graute dentro dos nódulos do cabo e em alguns momentos até mesmo dentro do tubo de suspiro (Figura 5.1). A graute não apresentou grandes vazios, podendo ser classificada de forma geral como um material maciço dentro do furo. Em alguns casos foram verificadas pequenas trincas na graute que podem ser decorrentes do desconfinamento resultante da retirada do tubo de PVC ou do próprio corte em seção realizado.

Quanto ao funcionamento do suspiro durante os ensaios, foi observado que, todos funcionaram de acordo com o esperado. É importante ressaltar que, nos dois ensaios onde ocorreu a ruptura da emenda do cano de PVC, houve uma demora maior na paralização do bombeamento na betomaq após o suspiro parar de emitir ar. Essa informação mostra um ponto de atenção durante a instalação dos cabos que deve ter seu bombeamento paralisado juntamente com funcionamento do suspiro.

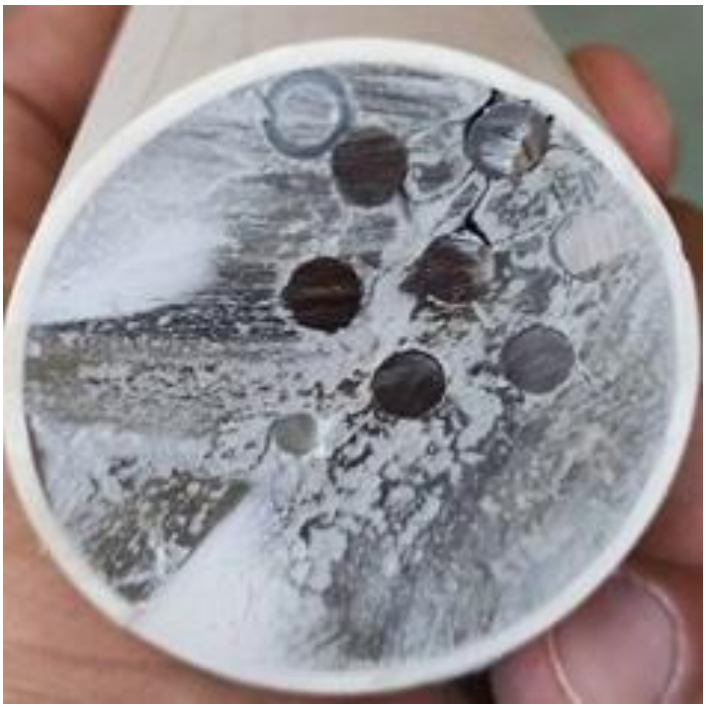


Figura 5.1 - Nódulo e tubo de suspiro preenchidos por graute.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Os estudos de resistência e metodologia de injeção da graute presente neste trabalho obtiveram resultados satisfatórios alinhados com a bibliografia disponível. O ensaio de injeção ascendente conseguiu validar o preenchimento da coluna por graute e, consequentemente, o funcionamento do sistema de suporte. As análises apresentadas para a resistência à compressão simples variando a relação A/C, com a utilização ou não de aditivos, mostrou uma oportunidade de estudo para a substituição da receita com 0,4 para a relação 0,35 com aditivos. Se comprovado o aumento da resistência à tração e a capacidade de bombeamento/preenchimento da graute, pode apresentar um ganho de resistência para menores tempos de cura. Além dos resultados de resistência a compressão, os ensaios de densidade também forneceram intervalos interessantes para estimativa da relação A/C com base na densidade. Os testes de arrancamento, assim como apontado na bibliografia, apresentaram grande dispersão nos resultados devido à incerteza do método, mas, tiveram seus resultados aderentes à bibliografia quando avaliamos o ganho de resistência correlacionado com o tempo de cura da graute.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, B., & Grebenc, B. (1995). Controlling dilution at the Golden Giant mine. *Proceedings of the 12th CIM Mine Operators Conference, Timmins*.

BATISTA, GAP. (2019). Calibração do modelo numérico por meio da abordagem probabilística e da diluição estruturalmente controlada no método de lavra sublevel stoping.

Bieniawski, Z. (1988). The rock mass rating (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice. In *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM International.

Cordani, U. G., Melcher, G. C., & Almeida, F. F. M. de. (1968). Outline of the Precambrian geochronology of South America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *5*(3), 629–632.

DIRIGE, A. P. (1996). A proposed procedure for preliminary mining method selection for narrow vein. *Mine Planning and Equipment Selection, Balkema, Rotterdam*.

Fortes, P., Gaspar, J. C., Coelho, R. F., Giuliani, G., Jost, H., Costa Júnior, C. N., Moraes, R., Kuyumjian, R. M., Santos, R. V, & Pimentel, M. M. (2001). Geologia das jazidas auríferas Mina III e Mina Nova, greenstone belt de Crixás (GO). *Caracterização de Depósitos Auríferos Em Distritos Mineiros Brasileiros, DNPM/ADIMB*, 243–300.

Goris, J. M., Nickson, S. D., & Pakalnis, R. (1994). *Cable bolt support technology in north America. Information circular/1994*. Bureau of Mines, Spokane, WA (United States). Spokane Research Center.

Hoek, E., & Karakas, A. (2008). Practical rock engineering. *Environmental and Engineering Geoscience*, *14*(1), 55.

Hutchinson, D. J., & Diederichs, M. S. (1996). *Cablebolting in underground mines*.

Hyett, A. J., Bawden, W. F., & Coulson, A. L. (1992). Physical and mechanical properties of normal Portland cement pertaining to fully grouted cable bolts. *International Symposium on Rock Support*, 341–348.

Jeremic, M. L., & Delaire, G. J. P. (1983). Failure mechanics of cable bolt systems. *CIM Bull.;(Canada)*, *76*(856).

Jost, H, Carvalho, M. J., Rodrigues, V. G., & Martins, R. (2014). Metalogênese dos greenstone belts de Goiás. *Metalogênese Das Províncias Tectônicas Brasileiras, Belo Horizonte, CPRM*, 141–168.

Jost, Hardy, Apollo, J. F. H., Weber, W., dos Reis Salles, R., Marques, J. C., Massucatto, A. J., Costa, D. A., & dos Santos, B. A. (2019). Stratigraphic update, paleotectonic, paleogeographic, and depositional environments of the Crixás Greenstone Belt, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, *96*, 102329.

Kaiser, P. K., Yazici, S., & Nose, J. (1992). Effect of stress change on the bond strength of fully grouted

cables. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, *29*(3), 293–306.

KUYUMJIAN, R. M., & DE ARAÚJO FILHO, J. O. (1984). CONTRIBUIÇÃO À TECTÔNICA DO, GREENSTONE BELT DA FAIXA CRIXÁS. *Revista Brasileira de Geociências*, *14*(2), 92–96.

Lima, T. C. A. (2014). *Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Alteração do Padrão de Cabeamento Utilizado nas Minas Subterrâneas da Mineração Serra Grande, Crixás–GO.*

Littlejohn, G. S., & Bruce, D. A. (1975). Rock anchors-state of the art. Part 1: design. *Ground Engineering*, *8*(3).

Nicholas, D. E. (1981). Method selection-A numerical approach. *Design and Operation of Caving and Sublevel Stoping Mines*, 39–53.

Pimentel, M. M. (2016). The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, *46*, 67–82.

Potvin, Y. (1988). *Empirical open stope design in Canada*. University of British Columbia.

Windsor, C. R. (1992). Cable bolting for underground and surface excavations. *International Symposium on Rock Support*, 349–366.