



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



## **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DOS LITOTIPOS DA MINA INGÁ, CRIXÁS (GO)**

**Camila Broetto Milli**

**MONOGRAFIA nº 413**

Ouro Preto, Outubro de 2021



**ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS LITOTIPOS DA MINA  
INGÁ, CRIXÁS (GO)**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 413**

## **ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS LITOTIPOS DA MINA INGÁ, CRIXÁS (GO)**

**Camila Broetto Milli**

*Orientador*

**Prof. Dr. Luis de Almeida Prado e Bacellar**

*Co-Orientador*

**Jairo Henrique da 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 413, ano 2020/2.

**OURO PRETO**

**2021**

---

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: Camila Broetto Milli

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

### SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M654a Milli, Camila Broetto.

Análise dos fatores condicionantes da resistência à compressão dos litotipos da Mina Ingá, Crixás (GO). [manuscrito] / Camila Broetto Milli. - 2021.

73 f.: il.: color., gráf., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar. Coorientador:  
Jairo Henrique da Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Maciços rochosos. 3. Fácies (Geologia) - Litotipo. 4. Resistência dos materiais. 5. Deformações e tensões. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Silva, Jairo Henrique da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



# Ficha de Aprovação

---

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO: ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DOS LITOTIPOS DA MINA INGÁ, CRIXÁS (GO)**

**AUTORA:** CAMILA BROETTO MILLI

**ORIENTADOR:** Luis de Almeida Prado Bacellar

**Aprovada em:** 01 de outubro de 2021

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Assinado de forma digital por LUIS  
DE ALMEIDA PRADO  
BACELLAR:06498594802  
Dados: 2021.10.03 20:37:51 -03'00'

DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão



DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Pedro M. Alameda Hernández



DEURB/UFOP

**Ouro Preto, 01/10/21**



## Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente a Deus, por ter iluminado meus passos durante essa jornada.

Agradeço aos meus pais, Sildo Milli e Marluce Broetto Milli, por sempre estarem ao meu lado e me incentivarem, independente das minhas escolhas. Ao Pedro Antonio, por todo tempo de qualidade e compreensão dedicados durante grande parte da graduação.

Aos amigos do Espírito Santo, por me acompanharem desde o início e compreenderem a minha ausência, sempre acreditando em mim. Aos amigos da geologia 16.1 e todos os demais que fizeram parte dessa jornada.

Ao Grupo Universitário de Inteligência Aplicada (GUIA), ao Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas, à Geoconsultoria Jr., e ao UFOP SEG *Student Chapter*, entidades as quais contribuíram para meu conhecimento e aprimoramento como estudante e como pessoa por meio de projetos de extensão, não esquecendo do Serviço Geológico do Brasil na presença dos professores orientadores durante a Iniciação Científica.

A todos os amigos da AngloGold Ashanti da unidade Mineração Serra Grande, em especial à equipe da Mecânica de Rochas, pelos ensinamentos e experiências vividas. À AngloGold Ashanti pela disponibilização dos dados e pela oportunidade de conhecimento técnico e prático.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), à Escola de Minas, ao Departamento de Geologia (DEGEO) e a todos os professores que sempre contribuíram para a disseminação do conhecimento com a notória qualidade do ensino da universidade pública.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	12
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.4 JUSTIFICATIVA .....	14
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 Província Tocantins .....	15
2.1.1 O Maciço de Goiás.....	17
2.1.2 O <i>Greestone Belt</i> Crixás .....	18
2.1.3 Quadro Estratigráfico .....	18
2.1.4 Formação Córrego Alagadinho .....	19
2.1.5 Formação Rio Vermelho .....	19
2.1.6 Formação Ribeirão das Antas .....	19
2.2 Corpo Ingá.....	24
2.3 Características Geotécnicas dos litotipos da Mina Ingá .....	25
2.3.1 Evolução Deformacional do <i>Greenstone Belt</i> Crixás .....	27
2.4 Descrição de Testemunhos de Sondagem .....	28
2.5 Ensaio de Resistência à Compressão .....	28
1.7 Tipo e geometria de quebra .....	32
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1 Revisão bibliográfica.....	35
3.2 Levantamento de banco de dados.....	35
3.3 Análise qualitativa .....	35
3.4 Integração das informações .....	35
3.5 Metodologia dos Ensaio.....	35
3.6 Cálculo de Resistência.....	48

3.4 Análise dos dados.....	49
RESULTADOS.....	51
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	65
5.1 Fatores que influenciam a resistência à compressão uniaxial.....	65
5.2 Comparação entre os ensaios e domínios geotécnicos.....	68
CONCLUSÕES .....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização do Município de Crixás no mapa de Goiás (A); vias de acesso para a cidade de Crixás (GO) .....	13
<b>Figura 2.1</b> - Distribuição das rochas Paleoproterozóicas no escudo brasileiro. T Província Tocantins, Província Borborema, M Província Mantiqueira, A Cinturão Araguaia.....	15
<b>Figura 2.2</b> - Mapa Geológico simplificado da porção centro-leste da Província Tocantins. 1) Bloco Arqueano de Crixás-Goiás; 2) Terrenos Paleoproterozóicos de Almas.....	16
<b>Figura 2.3</b> - Bloco Arqueano de Goiás. Contexto regional do <i>greestone belt</i> Crixás.....	17
<b>Figura 2.4</b> - a) Mapa Geológico do <i>greenstone belt</i> de Crixás; b) Coluna estratigráfica do Grupo Crixás.....	18
<b>Figura 3.5</b> – Fotomicrografia de anfibolito (MBA). Abreviações: Hb (hornblenda); Pl (plagioclásio).....	19
<b>Figura 2.6</b> - Filito Carbonoso (GXN). A) testemunho de sondagem. B) fotomicrografia de filito carbonoso formado por material carbonoso de comportamento.....	20
<b>Figura 2.7</b> - Carbonato Clorita Xisto (CBCX). A e B) representação em testemunho de sondagem. C) fotomicrografia de quartzo-clorita-carbonato-sericita xisto em .....	21
<b>Figura 2.8</b> - Clorita Xisto Verde (CXV) A) Testemunho de sondagem; B) fotomicrografia do CXV em nicóis paralelos, constituídos por uma matriz de .....	21
<b>Figura 2.9</b> - Metavulcânica Ácida (MVA), fotomicrografia de MVA caracterizado por cristais de quartzo e plagioclásio de granulação grossa englobados por uma.....	22
<b>Figura 2.10</b> -Metagrauvaca (MG) A) Testemunho de sondagem; B) fotomicrografia de metagrauvaca caracterizada por cristais de granulação média a grossa e hábito.....	23
<b>Figura 2.11</b> – Quartzo-biotita-muscovita-granada xistos (GNCX), fotomicrografia sob nicóis cruzados. Abreviações: Gt (granada); Qz (quartzo); Bt (biotita);.....	23
<b>Figura 2.12</b> – Perfil estratigráfico da região com foco para localização da Mina Ingá. A Mina é desenvolvida atrás (3D) do local indicado pelo perfil (2D).....	24
<b>Figura 2.13</b> - Classificação dos domínios geotécnicos e do sistema de suporte sugerido das minas da Mineração Serra Grande. Legenda de mapeamento de suportes.....	25
<b>Figura 2.14</b> – Furos de sondagem com retirada de corpos de prova para ensaios em laboratório externo. As cores dos testemunhos ilustram a elevação, representada.....	26
<b>Figura 2.15</b> – Exemplo de interpretação de teste com construção de Círculo de Mohr tensão de cisalhamento x normal stress com quatro ensaios.....	26
<b>Figura 2.16</b> – Representação das forças aplicadas nos ensaios de compressão uniaxial (laboratório interno) e nos ensaios de compressão triaxial (laboratório externo).....	27
<b>Figura 2.17</b> – Esquema da curva típica do ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial, tensão ( <i>stress</i> ) x deformação ( <i>strain</i> ).....	29

<b>Figura 2.18</b> - Curva de resistência teórica de uma rocha anisotrópica, com a seção curva correspondendo à ruptura ao longo dos planos de fraqueza e a seção reta.....	30
<b>Figura 2.19</b> – Variação da resistência da rocha de acordo com o ângulo $\theta$ que representa o ângulo da descontinuidade .....	30
<b>Figura 2.20</b> - Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões principais.....	31
<b>Figura 2.21</b> – Tipos de quebra válidas e não válidas em ensaio de carga pontual (modificada de Basu <i>et. al</i> 2013).....	33
<b>Figura 2.22</b> - Desenhos esquemáticos mostrando o tipo de quebra em ensaios PLT. As setas vermelhas indicam a direção da tensão principal máxima.....	33
<b>Figura 2.23</b> - Representação esquemática de diferentes geometrias de quebra sob compressão uniaxial.....	33
<b>Figura 2.24</b> - Ilustração esquemática da geometria da quebra. As setas vermelhas indicam a direção da tensão. (A) Tipo de quebra ao longo.....	34
<b>Figura 3.1</b> – Quatro caixas totalizando 20 metros de testemunhos de sondagem utilizados para descrição geotécnica, onde é retirado um metro (lote) para realizar os ensaios.....	36
<b>Figura 3.2</b> – a) Ilustração da região do nível 689 ao nível 800 da Mina Ingá. Representação das.....	37
<b>Figura 3.3</b> – Resultados de ensaios de resistência de rocha intacta após a ruptura. a) Ensaios de UCS ( <i>Uniaxial Compressive Strenght</i> ); b) ensaios PLT ( <i>Point Load Test</i> ).....	37
<b>Figura 3.4</b> – Procedimento A) de lavar e B) de secar as amostras.....	39
<b>Figura 3.5</b> – Ilustração do corpo de prova com a direção do eixo do furo em relação ao ângulo da foliação.....	39
<b>Figura 3.6</b> – Organização das amostras PLT de acordo com o lote. Para UCS a mesma organização é seguida.....	40
<b>Figura 3.7</b> – Marcação dos corpos de prova para identificação.....	40
<b>Figura 3.8</b> – Fotografia dos corpos de prova a) antes e b) após a ruptura. Exemplos para amostras PLT.....	40
<b>Figura 3.9</b> – Marcação do centro das amostras de PLT para melhor centralização das mesmas na realização do ensaio.....	41
<b>Figura 3.10</b> – Equipamento utilizado para realização de ensaios de UCS e PLT. Na imagem, corpo de prova de UCS.....	41
<b>Figura 3.11</b> – Exemplo de representação dos resultados de ensaio em andamento no software.....	42
<b>Figura 3.12</b> – Representação do tipo de quebra. A) quebra na Rocha Intacta (RI); B) quebra na Foliação (Sn); C) quebra na Rocha Intacta e na Foliação.....	42
<b>Figura 3.13</b> – Ilustração do nível de confiança para classificação do tipo de quebra. A) Quebra exclusivamente na rocha intacta, atribuindo alta confiança; b e c) quebra.....	43



<b>Figura 3.14</b> – Classificação do tipo de quebra de ensaios PLT de acordo com a rocha intacta e a validade do ensaio, além de foliação, fraturas pré-existentes e zonas.....	44
<b>Figura 3.15</b> – Classificação do tipo de quebra de ensaios UCS de acordo com a rocha intacta e a validade do ensaio, além de foliação, fraturas pré-existentes e zonas.....	45
<b>Figura 3.16</b> – Geometria de quebra para ensaios UCS com ilustração teórica e prática com os ensaios das litologias da Mina Ingá.....	46
<b>Figura 3.17</b> – Geometria de quebra para ensaios PLT com ilustração teórica e prática com os ensaios das litologias da Mina Ingá.....	47
<b>Figura 3.18</b> – Fluxograma com as etapas do processo de realização dos ensaios.....	47
<b>Figura 3.19</b> – Banco de dados com as informações coletadas.....	48
<b>Figura 4.1</b> – Gráficos ilustrando a variação dos resultados dos ensaios UCS conforme ângulo da foliação em relação ao eixo do furo para quatro litologias com valores suficientes para serem representados graficamente.....	52
<b>Figura 4.2</b> – Ilustração gráfica da média dos valores de resistência de ensaios UCS com relação ao ângulo da foliação em relação ao eixo do furo.....	53
<b>Figura 4.3</b> – Gráficos representativos com os valores de resistência e os tipos de quebra de acordo com o eixo do furo em relação ao ângulo da foliação por litologia.....	54
<b>Figura 4.4</b> – Variação da resistência do ensaio PLT conforme o ângulo entre a foliação e o eixo do furo para cinco litologias.....	55
<b>Figura 4.5</b> – Ilustração gráfica da média dos valores de resistência de ensaios PLT conforme o ângulo entre foliação e o eixo do furo.....	56
<b>Figura 4.6</b> – Resumos de ensaios PLT conforme ângulo da foliação e o eixo do furo e por tipo de quebra.....	57
<b>Figura 4.7</b> – Gráficos representativos com os valores de resistência e os tipos de quebra de acordo com o eixo do furo em relação.....	58
<b>Figura 4.8</b> – Diagrama de caixa para resultados de ensaios UCS.....	59
<b>Figura 4.9</b> – Diagramas de caixa por litologia e por tipo de quebra dos resultados dos ensaios UCS.....	59
<b>Figura 4.10</b> - Diagrama de caixa para resultados dos ensaios PLT.....	60
<b>Figura 4.11</b> – Diagramas de caixa por litologia e por tipo de quebra dos resultados dos ensaios PLT.....	60
<b>Figura 4.12</b> – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios PLT com tipo e geometria de quebra válida e nível de confiança médio e alto.....	61
<b>Figura 4.13</b> – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios PLT com tipo e geometria de quebra válidas e nível de.....	61
<b>Figura 4.14</b> – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios UCS com tipo e geometria de quebra válida e nível de confiança médio e alto.....	61

<b>Figura 4.15</b> – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios UCS com tipo e geometria de quebra válidas e nível de confiança médio e alto, setorizados por quebra.....	62
<b>Figura 4.16</b> – Comparação dos três tipos de ensaios para rocha intacta.....	62
<b>Figura 4.17</b> - Correlação entre UCS e PLT para litologia MG com ruptura na rocha intacta de mesmo lote amostral.....	63
<b>Figura 5.1</b> – Ordem do valor da resistência de acordo com o tipo de quebra.....	66
<b>Figura 5.2</b> - Escavações do nível 700 da Mina Ingá com a representação do corpo de minério, os furos de sondagem, a região de retirada de amostra para confecção.....	67

## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 2.1</b> - Informações de ensaios realizado em laboratório externo.....	29
<b>Tabela 4.1</b> - Média dos valores de resistência de ensaios UCS com relação ao ângulo da foliação em relação ao eixo do furo divididos em 10°.....	53
<b>Tabela 4.2</b> - Resumos de ensaios UCS por ângulo da foliação em relação ao eixo do furo e por tipo de quebra. SN= foliação; RI = Rocha Intacta; FR = fratura.....	54
<b>Tabela 4.3</b> - Média dos valores de resistência de ensaios UCS conforme o ângulo entre foliação e o eixo do furo.....	55
<b>Figura 4.4</b> – Valores de resistência de cada tipo de ensaio classificado por litologia e local de quebra.....	62
<b>Tabela 4.5</b> - Informações de tempo médio para ensaio de lotes de corpos de prova.....	63



## Resumo

---

Os trabalhos geotécnicos são fundamentais para compreender o comportamento de maciços rochosos e, conseqüentemente, para tomada de decisões em projetos de escavação. A caracterização geotécnica de campo (classificação da qualidade do maciço rochoso com mapeamento geotécnico), a descrição de testemunhos de sondagem e a caracterização física em laboratório com testes de ensaio de resistência *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) e *Point Load Test* (PLT), são atividades realizadas na Mineração Serra Grande (MSG) da AngloGold Ashanti, em Crixás/GO. Com o objetivo de analisar os fatores condicionantes da resistência à compressão dos litotipos da Mina Ingá, foram realizados e analisados 1646 ensaios, sendo 1536 de PLT e 97 de UCS (laboratório interno) e 13 de UCS de laboratório externo. O presente trabalho é justificado pois valores de resistência à compressão permitem a aquisição de parâmetros fundamentais para geração e análise de modelos numéricos, dimensionamento de vãos e pilares e definição de sistema de suporte. A metodologia contou com o levantamento do banco de dados, preparo de amostras, confecção dos ensaios e definição de critério de classificação e interpretação dos resultados, eliminando *outliers*. Os resultados refletem a correlação dos domínios geotécnicos estruturais definidos pelo mapeamento de galeria subterrânea com os resultados de resistência à compressão, permitindo estimar parâmetros e características para o maciço rochoso. Deste modo, foi possível concluir que existem quatro fatores que influenciam nos valores de resistência. O primeiro é a litologia; o segundo a estrutura representada pelo local de ruptura do ensaio (rocha intacta, foliação e fratura); o terceiro, o ângulo da foliação em relação ao eixo do furo e o quarto, a influência da geometria e do tipo de quebra com a classificação do nível de confiança. A comparação dos ensaios ilustra a relação entre UCS e PLT, possibilitando recomendações de ensaios necessários para dar continuidade aos trabalhos de desenvolvimento de galerias subterrâneas com segurança.

**Palavras chave:** Maciço Rochoso, Ensaio de Resistência, *Uniaxial Compressive Strength*, *Point Load Test*.



## Abstract

---

The geotechnical works are fundamental to understand the behavior of rock mass and to make decisions in excavation projects. The field geotechnical characterization (rock mass quality classification with geotechnical mapping), the description of drill holes and the physical characterization in the laboratory with Uniaxial Compressive Strength (UCS) and Point Load Test (PLT), are activities carried out at Mineração Serra Grande (MSG) of AngloGold Ashanti, in Crixás/GO. In order to analyze the conditioning factors of the compressive strength of the lithotypes at Mina Ingá, 1646 tests were performed and analyzed, being 1536 PLT, 97 UCS and 13 triaxial. The present work is justified because compressive strength values allow the acquisition of fundamental parameters for the generation and analysis of numerical models, dimensioning of pillars and definition of the support system. The methodology was to survey the database, prepare samples, prepare the tests and define classification criteria and interpret the results, eliminating outliers. The results reflect the correlation of the structural geotechnical domains defined by underground mapping with the compressive strength results. In this way it is possible to estimate parameters and characteristics for the rock mass. It was possible to conclude four factors that influence the resistance values: lithology, the test site of rupture (intact rock, foliation and fracture), the angle of foliation in relation to the hole axis and the influence of geometry and type of failure with the confidence level rating. The comparison of tests illustrates the relationship between UCS and PLT, enabling recommendations for tests necessary to continue the work of developing underground galleries safely.

**Keys words:** Rock Mass, Strength Tests, Uniaxial Compressive Strength, Point Load Test.







# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

Diversos tipos de mineração, tanto para escavações a céu aberto como para escavações subterrâneas, necessitam de uma compreensão geomecânica do maciço rochoso. Não apenas o conhecimento acerca da geometria do corpo do minério ou do projeto que se deseja desenvolver é suficiente para compreender parâmetros geomecânicos que influenciam na segurança e na otimização do desenvolvimento. É necessário compreender uma série de outros fatores e como esses fatores se correlacionam para compor um conhecimento amplo sobre o maciço rochoso.

A área da Mecânica de Rochas, de maneira simplificada, é um ramo da geotecnia que estuda o comportamento e a natureza mecânica de maciços rochosos em obras de engenharia. Em escavações subterrâneas, classificações relevantes para maciços rochosos tem de ser consideradas, como o RQD (*Rock Quality Designation*), proposto por Deere (1964), a Classificação RMR (*Rock Mass Rating*), sugerida por Bieniawski (1973, 1989), e o Sistema Q (*Rock Tunelling Quality Index*), implementado por Barton (1974).

A classificação de maciço rochoso é realizada de acordo com sugestões presentes nas edições das publicações da *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering* (ISRM), com informações de descrição geológica e geotécnica de furos de sondagem, com o mapeamento de escavações subterrânea *in situ* e com o modelamento geológico dessas informações. Além disso, dados laboratoriais de ensaio de resistência de rocha são realizados com a finalidade de ter uma compreensão mais ampla acerca do maciço. Isso vai de acordo com a sugestão de Hoek *et al.* (1995), que recomenda a utilização de pelo menos dois métodos de classificação de maciço durante a implementação de um projeto.

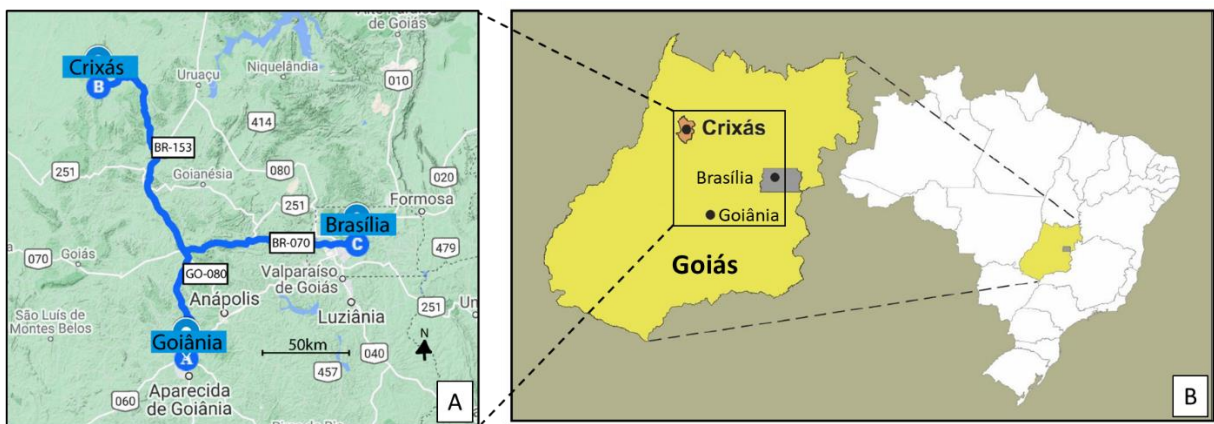
Desenvolvida a mais de 1000 metros de profundidade, a Mina Ingá é uma das principais minas responsáveis pela produção de minério de ouro da Mineração Serra Grande, unidade da mineradora AngloGold Ashanti. O depósito aurífero possui 32 corpos de minério na zona superior e 15 corpos na zona inferior.

No presente trabalho se pretende apresentar uma análise dos ensaios de resistência *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) e *Point Load Test* (PLT) com corpos de prova da Mina Ingá, considerando ensaios laboratoriais realizados em laboratório interno e externo, buscando a compreensão e a correlação com litologia, mineralogia, direção do ângulo da foliação em relação ao eixo do furo e

com estruturas como fraturas e foliação, existentes no maciço rochoso, e relacionar com resultados de laboratório externo.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

Situada no estado de Goiás, a cidade de Crixás fica localizada a 450 km de Brasília e a 322 km de Goiânia. O acesso a partir de Brasília pode ser feito pela BR-070 até a rodovia federal BR-153. Trafega-se até a entrada para a rodovia estadual GO-336, seguindo até Crixás pela GO-154. O acesso a partir de Goiânia é realizado pela GO-080 até a BR-153. É acessada a GO-336, e posteriormente a GO-154. Na cidade de Santa Terezinha de Goiás, pela GO-347, chega-se ao destino final (Figura 1.1).



**Figura 1.1** – Mapa de Localização. A) Localização do Município de Crixás no mapa de Goiás ; B) vias de acesso para a cidade de Crixás (GO). Souza (2018), Modificado.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo primordial deste trabalho é analisar ensaios de resistência com corpos de prova obtidos em furos de sondagem realizados na Mina Ingá, considerando informações que ainda não são claramente correlacionadas, como resultados de ensaios de resistência de rocha intacta, de testemunhos de sondagem e de dados de mapeamento de mina subterrânea.

Como objetivo principal, pretende-se compreender e avaliar os fatores que influenciam na resistência à compressão de rochas anisotrópicas com ensaios de resistência de rocha intacta.

Os objetivos secundários contemplam a análise dos métodos para observar padrões de tipo de quebra e geometria, além do tratamento estatístico dos dados para otimizar a compreensão das informações dos valores de resistência de cada litologia e como é o comportamento das mesmas diante de possíveis variáveis.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

É fundamental compreender como os valores de resistência de rocha intacta influenciam e se relacionam com as informações já existentes sobre o comportamento do maciço rochoso da Mina Ingá. Classificações de maciço são realizadas considerando descrição de testemunhos de sondagem aliada ao mapeamento geotécnico *in situ* e informações sobre ensaios de resistência complementam a análise e projeção das escavações.

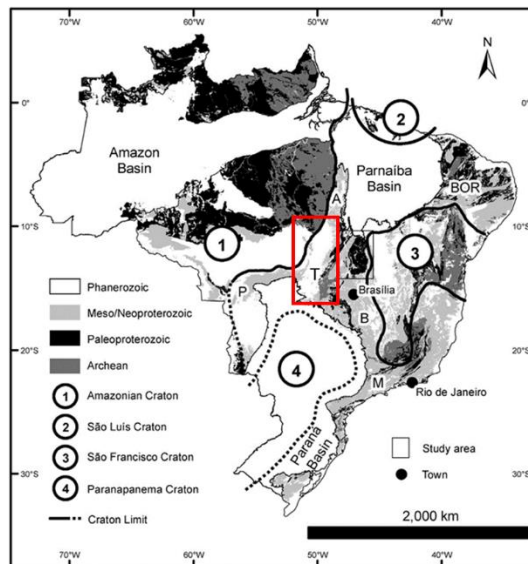
O trabalho é justificado devido a importância de se ter bem caracterizada a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. Ensaios de resistência permitem compreender o comportamento do maciço, a competência da rocha em relação a capacidade de suportar carga, os níveis toleráveis de deformação, o grau de alteração e fraturamento e a influência de estruturas como foliação e fraturas.

Além disso, há a necessidade de compreender a variabilidade do comportamento geotécnico do maciço rochoso da Mina Ingá, a fim de utilizar informações coerentes com a realidade da mina para que sejam feitas análises de estabilidade confiáveis, permitindo que sejam propostos *designs* de escavações que possibilitem a maior recuperação possível de minério, garantindo sempre a segurança do projeto e dos envolvidos. Espera-se como resultado determinar os fatores que influenciam nos valores de resistência do maciço rochoso, a nível de ensaio de resistência, permitindo a definição de fatores de correlação a partir delas.

Dessa forma, o presente trabalho é justificado pela escassez de pesquisas direcionadas às análises geomecânicas de classificação de maciço rochoso considerando ensaios de resistência de rocha intacta e suas variáveis na Mina Ingá.

### 2.1 Província Tocantins

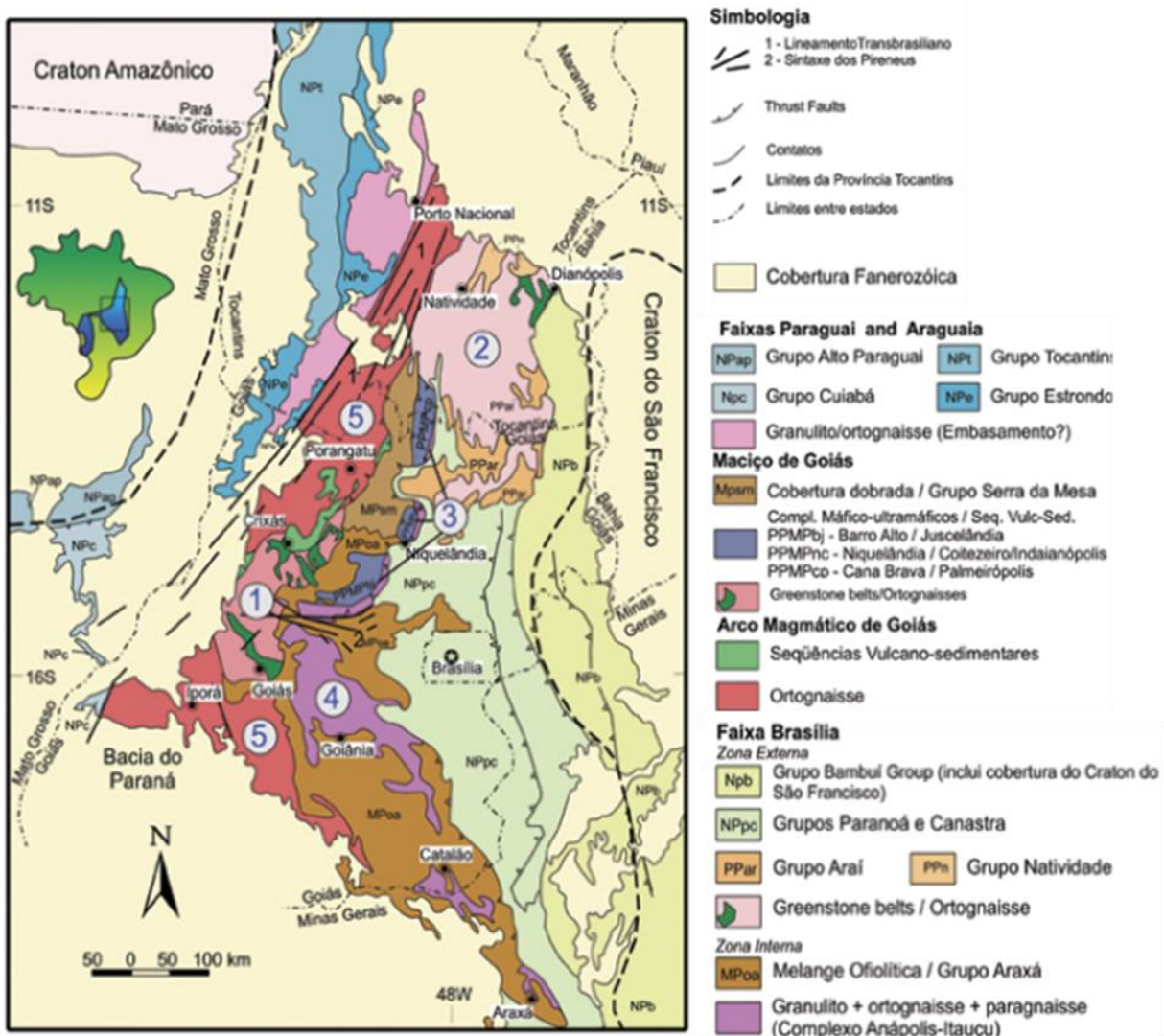
A Província de Tocantins (Almeida *et al.*, 1981; Marini *et al.*, 1984), localizada no Brasil central é um grande orógeno neoproterozóico. É oriunda da colisão de três grandes blocos continentais: a oeste, o paleocontinente Amazônico, a leste, o continente São Francisco-Congo e a sul o bloco Paranapanema, atualmente coberto por rochas fanerozóicas da Bacia do Paraná (Fuck *et al.* 2014) (Figura 2.1).



**Figura 2.1** - Distribuição das rochas paleoproterozóicas no escudo brasileiro. T Província Tocantins, BOR Província Borborema, M Província Mantiqueira, A Cinturão Araguaia, P Cinturão Paraguai, B Cinturão Brasília. Fuck et al. 2014 com base em Bizzi et al. (2003).

A Província Tocantins está localizada entre o Cráton São Francisco e o Cráton Amazônico e é composta pela Faixa Brasília, Faixa Paraguai, Faixa Araguaia, bem como o Arco Magmático de Goiás, Maciço de Goiás e a Zona Cratônica que representa exposições de embasamento com coberturas fanerozóicas. A Faixa Brasília é dividida em Zona Interna e em Zona Externa, sendo a primeira caracterizada por rochas do Grupo Arai, Serra da Mesa e Araxá, e pelo embasamento entre as faixas de rochas metavulcânicas e metassedimentares. A Zona Externa é caracterizada por unidades metassedimentares dos Grupos Paranoá, Bambuí, Canastra e Ibiá e da Formação Vazante, Fuck (2004). O Maciço de Goiás é composto por rochas arqueanas em terrenos de *greenstone belts*, sequências vulcano sedimentar paleoproterozoica, terrenos granito-gnaissicos, complexo granulítico e terrenos ortognaissicos Vulcano-sedimentar neoproterozoico do Arco Magmático de Goiás, Pimentel *et. al.*

(2004). O Arco Magmático de Goiás é composto por seqüências Vulcano-sedimentares neoproterozoicas e ortognaisses subordinados (Pimentel & Fuck, 1992) (Figura 2.2). Todos estes componentes fazem parte da amálgama do Gondwana Ocidental durante o neoproterozóico (Pimentel, 2016).



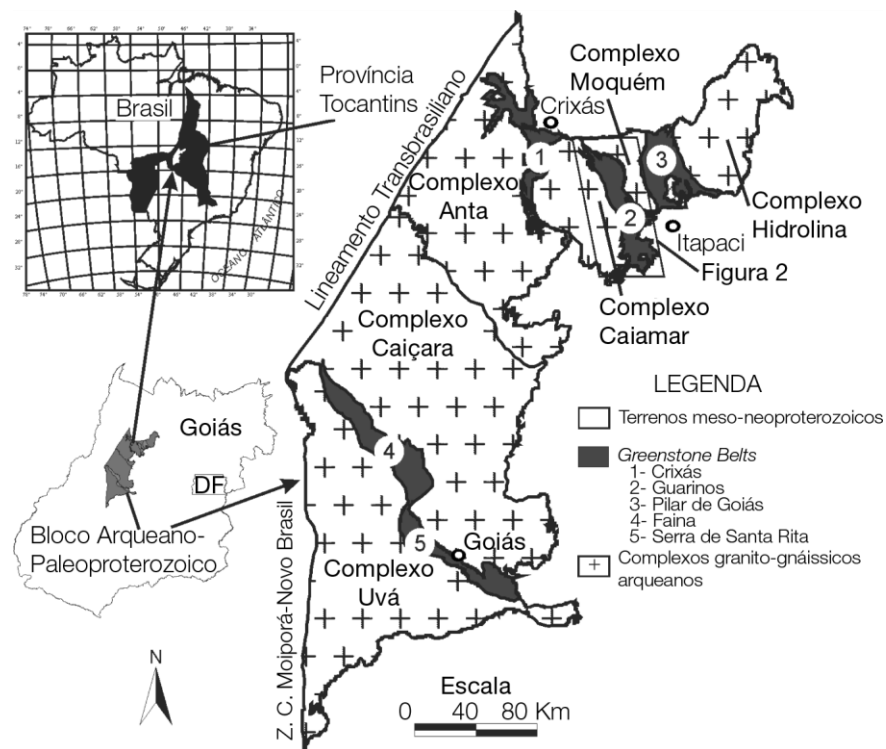
**Figura 2.2** - Mapa Geológico simplificado da porção centro-leste da Província Tocantins. 1) Bloco Arqueano de Crixás-Goiás; 2) Terrenos Paleoproterozóicos de Almas-Natividade; 3) Complexos máficos-ultramáficos; 4) Complexo Anápolis-Itaçu; 5) Arco Magmático de Goiás. Fonte: Pimentel *et al.* (2004).

As faixas de dobramentos supracitadas, que compõem a Província Tocantins (Faixa Paraguai, Faixa Araguaia e Faixa Brasília), são produtos do Ciclo Orogênico Brasileiro. A área de estudo está situada no domínio da Faixa Brasília com o Maciço de Goiás.

### 2.1.1 O Maciço de Goiás

O Maciço de Goiás foi amalgamado à margem oeste da Faixa Brasília durante o Ciclo Brasileiro e possui fragmento de crosta arqueana alóctone com cerca de 17.000 km<sup>2</sup>. A conformação atual composta por complexos granito-gnaissicos e *greenstone belts* passou por uma evolução policíclica, permitindo dividir o maciço hoje nos segmentos meridional e setentrional, cada um com sua própria evolução geológica e metalogênica (Jost, 2009).

- Segmento Meridional: composto pelo *greenstone belt* Faina, *greenstone belt* Serra de Santa Rita e complexo granito-gnaissico Uvá.
- Segmento Setentrional: *greenstone belt* Crixás, *greenstone belt* Guarinos, *greenstone belt* Pilar de Goiás, Complexo do Anta, Complexo Caiamar, Complexo Moquém e Complexo Hidrolina. (Fig. 2.3)



**Figura 2.3** – Bloco Arqueano de Goiás. Contexto regional do *greenstone belt* Crixás. Jost *et al.* (2012)

O Complexo Uvá é o complexo granito-gnáissico mais velho e situa-se no extremo sul da região. As faixas de Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás, possuem orientação geral norte-sul, com seções inferiores de metakomatiitos, metabasaltos e rochas metassedimentares. Os *greenstone belts* do norte possuem alto potencial aurífero enquanto os de sul possuem baixo potencial (Jost, 2009).

### 2.1.2 O *Greestone Belt* Crixás

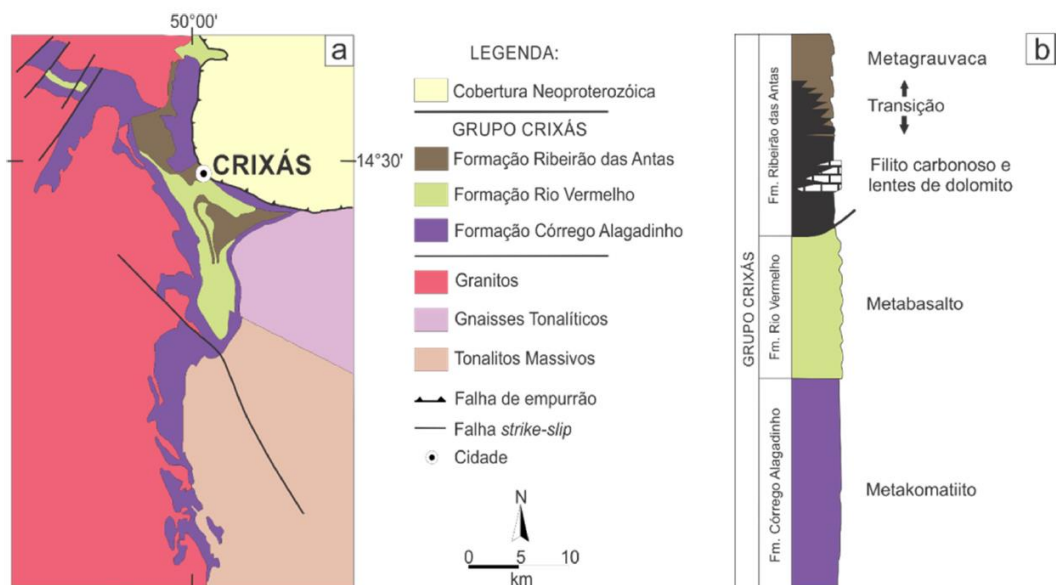
O *greenstone belt* Crixás se distribui ao longo de 6 km de largura e 45 km de comprimento em uma faixa alongada em um eixo aproximadamente norte-sul. Há três formações, segundo Sabóia & Teixeira (1980), da base para o topo: Formação Córrego Alagadinho, com 500m de espessura; Formação Rio Vermelho com 350m de espessura e Formação Ribeirão das Antas com 700m (Figura 2.4). As formações possuem baixo grau metamórfico ao longo de uma sequência metavulcano-sedimentar.

A mineralização aurífera ocorreu após dois eventos de dobramento e metamorfismo regionais e durante um evento de cavalgamento epidérmico com a formação de duplex e antes da intrusão de diques segundo dados estruturais. A mineralização é fruto de um processo distribuído nas rochas metavulcânicas ultramáficas, máficas basais, metassedimentares siliciclásticas e químicas superiores (Jost *et al.* 2009).

O controle da mineralização é litológico exercido pelo pacote sedimentar, sobretudo pelos filitos carbonosos intercalados com metagrauvaca e dolomito. Os corpos possuem controle por falhas de empurrão de baixo ângulo, acompanhadas de dobras recumbentes (Jost *et al.* 2014).

### 2.1.3 Quadro Estratigráfico

O mapa geológico do *greenstone belt* Crixás com a coluna estratigráfica do Grupo Crixás pode ser observada na Figura 2.4.



**Figura 2.4** - a) Mapa Geológico do greenstone belt de Crixás (modificado de Jost & Fortes 2001 in Castoldi 2015). b) Coluna estratigráfica do Grupo Crixás. Modificado de Jost *et al.* (2010 in Castoldi 2015).



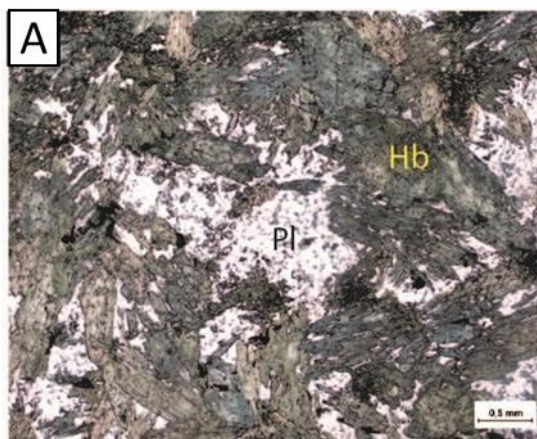
### 2.1.4 Formação Córrego Alagadinho

A Formação Córrego Alagadinho possui predominantemente metakomatiitos, (Jost *et al.* 2010). Feições primárias do tipo *spinifex* são preservadas, comprovando o baixo grau metamórfico. Rochas como peridotitos, piroxenitos e dunitos metamorfizados compõem a unidade, os quais contam com presença de talco, serpentina, anfibólio e clorita. O contato com a próxima formação (Formação Rio Vermelho) possui intercalação de rochas máficas ultramáficas (Sobiesiak, 2011).

### 2.1.5 Formação Rio Vermelho

A Formação Rio Vermelho é caracterizada por metabasaltos intercalados com formações ferríferas. Estruturas primárias como *pillow lavas* são preservadas nos basaltos, que ocorrem intercalados com xistos carbonosos, formações ferríferas e rochas metavulcânicas intermediárias. Anfibolito, anfibolito xisto e metabasaltos komatiíticos pouco expressivos são litologias dessa formação. O contato com a próxima formação (Formação Ribeirão das Antas) possui intercalação de metabasaltos com sedimentos grafitosos (Jost & Oliveira, 1991).

A litologia dessa formação é cartografada no banco de dados da Mineração Serra Grande como um Metabasalto (MBA). Possui coloração verde escuro, é maciça e levemente foliada, de granulação fina a grossa e composta predominantemente por hornblenda e plagioclásio (Figura 2.5) (Borges & Campos, 2019).



**Figura 2.5** – Fotomicrografia de anfibolito (MBA). Abreviações: Hb (hornblenda); Pl (plagioclásio). Modificado de Borges & Campos (2019)

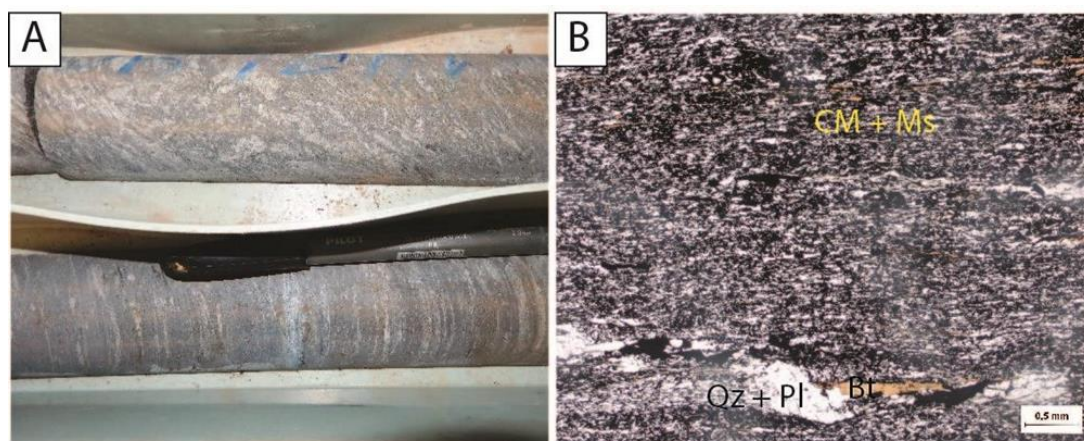
### 2.1.6 Formação Ribeirão das Antas

Na Formação Ribeirão das Antas predominam rochas metassedimentares, (Jost *et al.*, 2010). Metarenitos, xistos carbonosos, metassiltitos, quartzitos carbonosos, metacherts carbonosos e

ferruginosos, dolomitos e calcários, e metavulcanoclásticas são rochas características dessa formação. Possui três membros: Membro Vulcanossedimentar, caracterizado por filitos carbonosos; Membro Carbonático, com mármore laminados maciços depositados em planícies de maré e intermaré, caracterizado por brechas carbonáticas, em alguns casos, e o Membro Silicilástico provavelmente oriundo de correntes de turbidez com característica rítmica acamadada, com laminação plano-paralela e cruzada e com granodecrescência nos metarenitos, metasiltilitos e metafolhelhos (Theodoro, 1995).

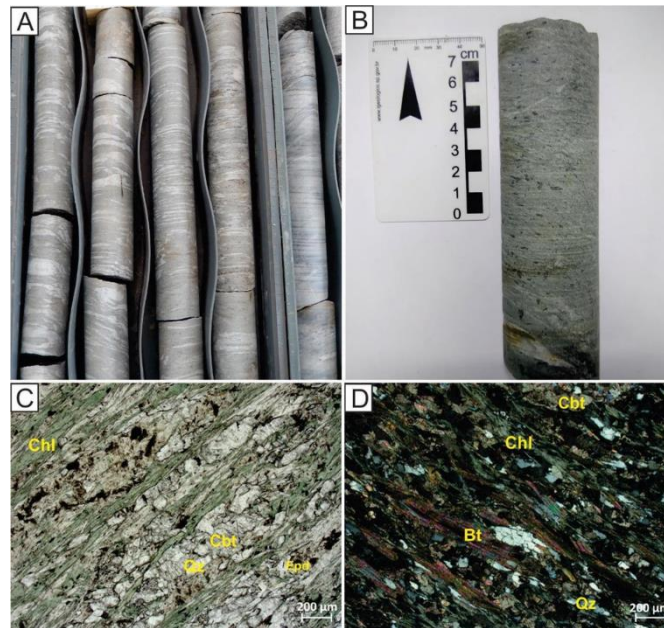
A Formação Ribeirão das Antas abrange as litologias que compõem o maciço rochoso da Mina Ingá, descritos a seguir, conforme definição do banco de dados da Mineração Serra Grande e descrito por Borges & Campos (2019).

O Filito Carbonoso (GXN) é uma rocha foliada de coloração negra, friável e composto predominantemente por material carbonoso, quartzo, muscovita e biotita de granulação fina (Figura 2.6). Possui venulações preenchidas por quartzo e carbonato, e disseminações de sulfeto são comuns (Borges & Campos, 2019).



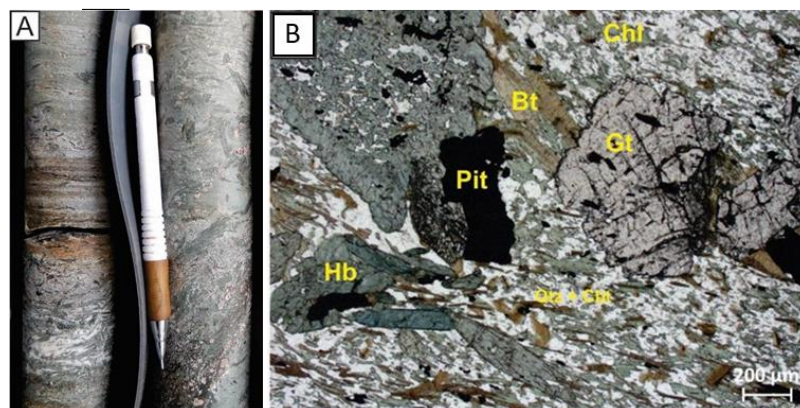
**Figura 2.6** - Filito Carbonoso (GXN). A) testemunho de sondagem. B) fotomicrografia de filito carbonoso formado por material carbonoso de comportamento óptico opaco, quartzo, muscovita e biotita. Abreviações dos minerais: CM (material carbonoso); Qz (quartzo); Pl (plagioclásio); Bt (biotita); Ms (muscovita). Modificado de Borges & Campos (2019)

O Quartzo-Clorita-carbonato xisto (CBCX) possui coloração predominantemente verde clara, fortemente foliada e de granulação fina, caracterizada pela alternância de níveis milimétricos a centimétricos de coloração escura constituídos por clorita e biotita, com níveis milimétricos a centimétricos de coloração esbranquiçada compostos por quartzo e carbonato (Figura 2.7). Em alguns intervalos há cristais de hornblenda de granulação média presentes, podendo ocorrer vênulas preenchidas por quartzo e/ou carbonato (Borges & Campos, 2019).



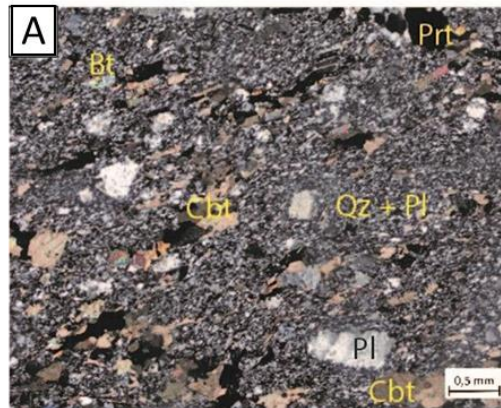
**Figura 2.7** - Carbonato Clorita Xisto (CBCX). A e B) representação em testemunho de sondagem. C) fotomicrografia de quartzo-clorita-carbonato-sericita xisto em nicóis paralelos; D) Fotomicrografia de quartzo-clorita-carbonato-sericita xisto em nicóis cruzados constituído por níveis de biotita e clorita intercrescidos, orientados segundo o plano de foliação da rocha, definindo níveis de textura lepidoblástico. Abreviações: (biotita); Chl (clorita); Cbt (carbonato); Ep (epidoto); Qz (quartzo) (Borges & Campos, 2019)

O Clorita Xisto Verde (CXV) ocorre com coloração variando entre verde claro a verde escuro, com composição modal mineralógica bastante variada. Comumente ocorre como uma rocha de coloração verde escuro, foliada, caracterizada pela alternância de níveis milimétricos a centimétricos compostos por clorita, muscovita e biotita com níveis esbranquiçados constituídos por carbonato e quartzo (Figura 2.8) (Borges & Campos, 2019).



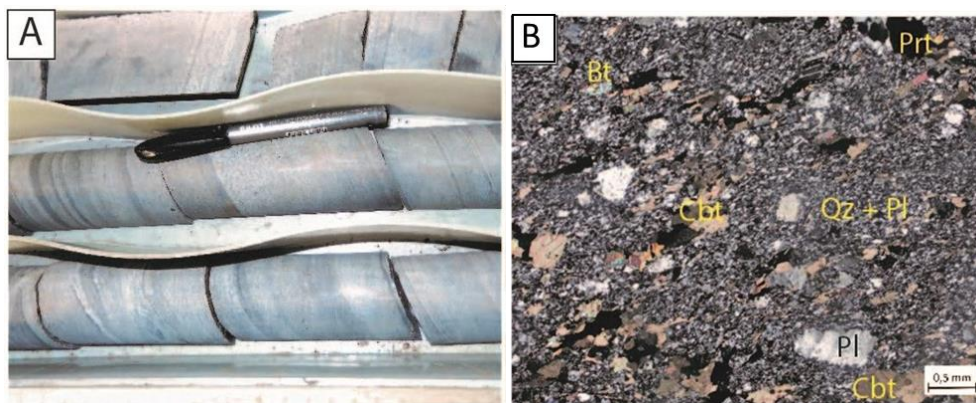
**Figura 2.8** - Clorita Xisto Verde (CXV) A) Testemunho de sondagem; B) fotomicrografia do CXV em nicóis paralelos, constituídos por uma matriz de quartzo e carbonato envolvendo porfiroblastos de hornblenda e granada sin-pós tectônica, além de clorita e biotita intercrescidas. Abreviações: Bt (biotita); Chl (clorita); Qz(quartzo); Tr (tremolita); Pit (pirrotira); Gt (granada). Modificado de Borges & Campos (2019)

A Metavulcânica Ácida (MVA) possui coloração bege claro, foliada e constituída por cristais arredondados de granulação média a grossa de quartzo e feldspato envolvidos por uma matriz fina composta por quartzo, feldspato, muscovita e biotita, a rocha apresenta inúmeras venulações preenchidas por carbonato, plagioclásio e quartzo, e disseminações de sulfeto, principalmente pirrotita (Figura 2.9) (Borges & Campos, 2019).



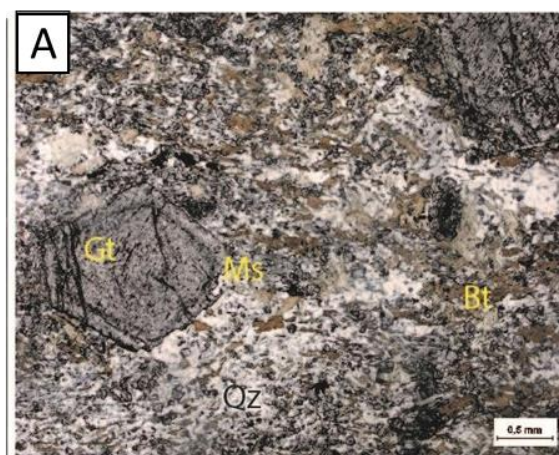
**Figura 2.9** - Metavulcânica Ácida (MVA), fotomicrografia de MVA caracterizado por cristais de quartzo e plagioclásio de granulação grossa englobados por uma matriz fina recristalizada de quartzo e plagioclásio, muscovita e biotita. Abreviações dos minerais: Pl (plagioclásio); Qz (quartzo); Cc (carbonato); Bt (biotita); Ms (muscovita); Prt (pirrotita). Modificado de Borges & Campos (2019)

A Metagrauvaca (MG) é uma rocha foliada, com laminação bem marcada por estratos milimétricos de coloração amarronzada intercalados com estratos milimétricos de coloração cinza escura, possivelmente devido à presença de material carbonoso. A rocha é constituída predominantemente por uma matriz de granulação fina composta por quartzo, feldspato, muscovita e biotita. Imersos na matriz ocorrem cristais arredondados de quartzo e feldspato de granulação média a grossa e porfiroblastos de granada de granulação média. Disseminações de sulfeto e venulações preenchidas por quartzo e carbonato são comuns (Figura 2.10) (Borges & Campos, 2019).



**Figura 2.10** -Metagrauvaca (MG) A) Testemunho de sondagem; B) fotomicrografia de metagrauvaca caracterizada por cristais de granulação média a grossa e hábito subedral a anedral de plagioclásio e quartzo englobados por matriz fina de quartzo, plagioclásio e muscovita. Abreviação dos minerais: Qz (quartzo); Pl (plagioclásio); Bt (biotita); Ms (muscovita); Gt (granada). Modificado de Borges & Campos (2019)

O Quartzo-biotita-muscovita-granada xistos (GNCX) é formado por porfiroblastos milimétricos a centimétricos de granada de coloração vermelha imersos em matriz fina, foliada e de coloração cinza escuro composta por quartzo, biotita e muscovita. A rocha contém disseminações de sulfeto e é cortada por vênulas de quartzo e/ou carbonato (Figura 2.11) (Borges & Campos, 2019).



**Figura 2.11** – Quartzo-biotita-muscovita-granada xistos (GNCX), fotomicrografia sob nicóis cruzados. Abreviações: Gt (granada); Qz (quartzo); Bt (biotita); Chl (clorita). Modificado de Borges & Campos (2019)

O Dolomito (DOL) possui coloração cinza claro, maciça a levemente foliada, constituída predominantemente por carbonatos e quartzo de granulação fina. Nos níveis foliados, observa-se lâminas milimétricas de coloração mais escuras constituídas por material carbonoso, orientados segundo o plano da foliação intercalados com níveis milimétricos a centimétricos de colocação mais clara compostos por quartzo e carbonato.

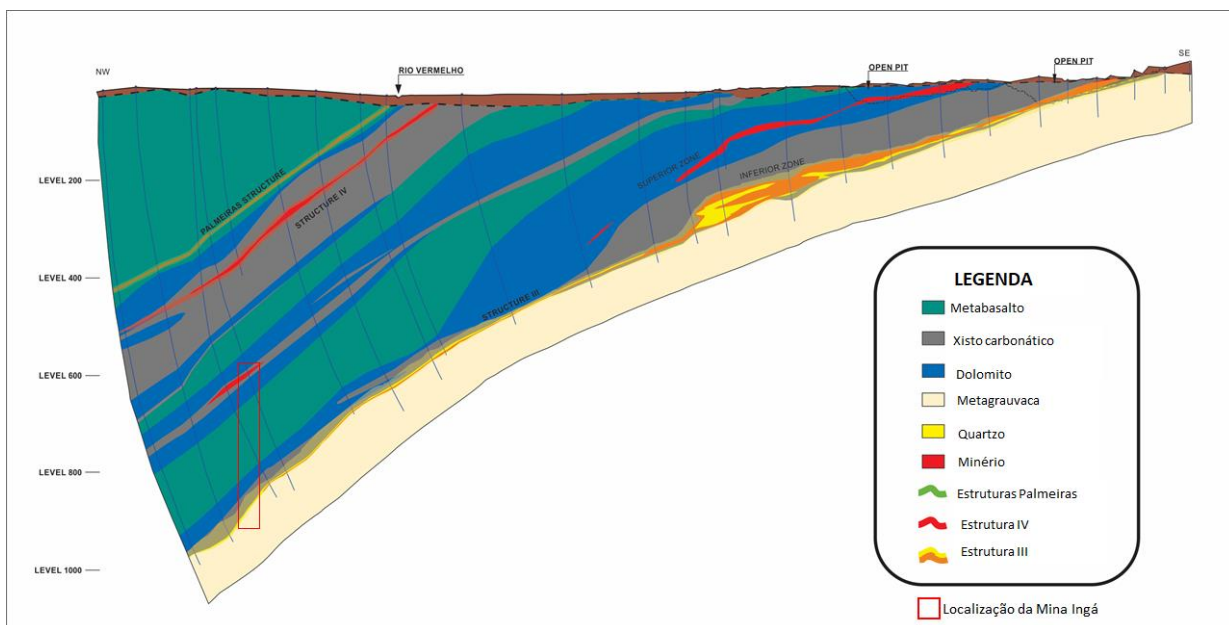
## 2.2 Corpo Ingá

O Corpo Ingá estratigraficamente está localizado na Formação Ribeirão das Antas, com orientação azimutal para 300° (Castoldi, 2015). É dividido em duas zonas de mineralização, a Zona Superior e a Zona Inferior, sendo a superior caracterizada por minério aurífero na forma de lentes de sulfeto maciço inclusas no dolomito (DOL) e a Inferior com a ocorrência do minério associada a um Veio de Quartzo (VQZ) descontínuo e espesso junto a um Xisto Grafitoso (GXN) associados a sulfetos.

O depósito é composto pelas seguintes rochas, da base para o topo: Metagrauvaca (MG), quartzo-clorita-sericita-granada xisto (GNCX), veio de quartzo (VQZ), xisto carbonoso (GXN) e dolomito (DOL). Ocorrem diques de biotita-clorita xisto e quartzo-granada-sericita xisto cortando a sequência. A MG possui contato gradual interdigitado com o GNCX (Castoldi, 2015).

O complexo de minas de ouro da Mineração Serra Grande é formado por várias operações subterrâneas profundas e a céu aberto nas instalações da AngloGold Ashanti (Ramires *et al.* 2019). Os minérios estão presentes no sulfeto maciço, no veio de quartzo e no sulfeto disseminado. O desenvolvimento da mina é feito por técnicas de perfuração e detonação e seus corpos de minério estão sendo lavrados pelo método *Sublevel Open Stopping* (Batista *et al.* 2015).

No perfil estratigráfico (Figura 2.12) é observada a localização da Mina do Corpo Ingá em relação a estruturação estratigráfica da região.



**Figura 2.12** – Perfil estratigráfico da região com foco para localização da Mina Ingá. A Mina é desenvolvida através (3D) do local indicado pelo perfil (2D). Estruturas III e IV representam áreas mineralizadas. Mineração Serra Grande (2019)

### 2.3 Características Geotécnicas dos litotipos da Mina Ingá

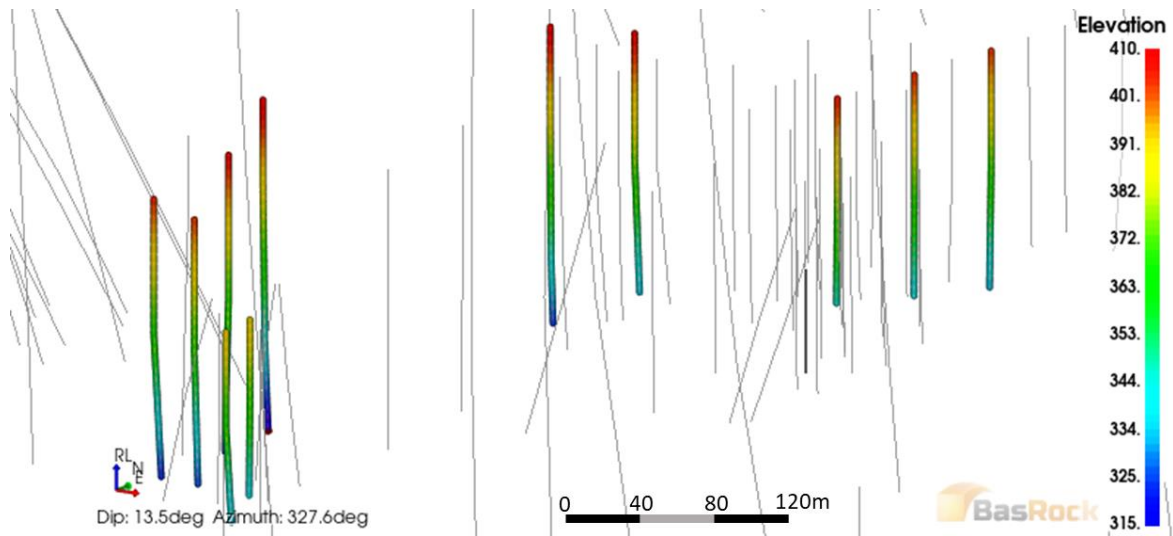
O mapeamento geotécnico de galerias subterrâneas pode ser feito a partir da definição de janelas geotécnicas, que são pontos de domínios estruturais diferenciados através do número de descontinuidades presentes na rocha. Para cada janela é gerada a classificação pontual do maciço com os parâmetros de *Q Value*: RQD, Jn, Jr, Ja, Jw e SRF (Barton *et al.* 1974). O ponto mais expressivo do maciço, com todas as principais características geotécnicas, é o local em que as medidas são aferidas e é definido o ponto representativo de um intervalo do maciço. Desta maneira, foram identificados cinco domínios geotécnicos estruturais dentro da área da Mina Ingá, sendo eles: Zonas de Cisalhamento (ZC), xisto grafitoso (GXN), xistos não grafitosos (Xisto) e veios de quartzo (VQZ). Cada um desses grupos, exceto as zonas de cisalhamento, são subclassificados em três subdomínios (+ 1, + 2 e + 3), de acordo com o número de conjuntos de estruturas presentes na janela de mapeamento (Ramires *et al.* 2019) (Figura 2.13).

Classificação de Domínios			
GEM4D		Maciço Rochoso	Classificação
Dado	Domínio	Litologia	Valor de Q
1	ZC	ZC	0.2 - 6.5
2	GXN + 3	GXN	0.7 - 13.9
3	GXN + 2		14.0 - 28.3
4	GXN + 1		25.9 - 56.6
5	XISTO + 3	MG/CBCX/CXV/G NCX/XISTOS	1.6 - 15.0
6	XISTO + 2		10.3 - 26.3
7	XISTO + 1		25.0 - 66.6.0
8	DOL + 3	DOL	12.5
9	DOL + 2		20.0 - 23.0
10	DOL + 1		50.0 - 75.0
11	VQZ + 3	VQZ	2.7 - 6.0
12	VQZ + 2		12.2 - 20.0
13	VQZ + 1		25.0 - 50.0

**Figura 2.13** - Classificação dos domínios geotécnicos das minas da Mineração Serra Grande. Fonte: Mineração Serra Grande (2018)

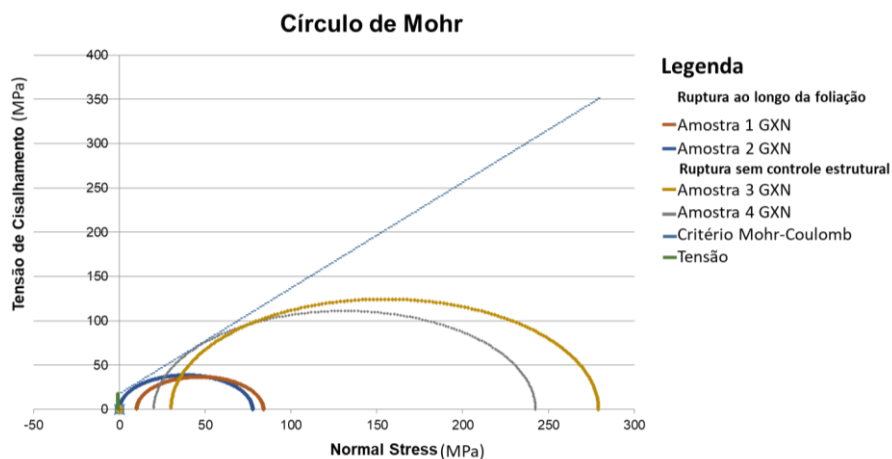
Além dos domínios observados no mapeamento de galerias, ensaios geotécnicos prévios para as litologias que compõem a mina foram realizados em laboratório externo (na Austrália) para realização de ensaios uniaxiais.

Há 33 ensaios de resistência à compressão triaxial feitos em laboratório externo (Austrália), sendo treze deles com sigma 3 igual a zero, tornando-se ensaios UCS (Tabela 2.1), com corpos de prova dos litotipos da Mina Ingá (AnglogGold Ashanti, 2019). Na Figura 2.14 é possível observar espacialmente os furos de sondagem que tiveram retirada de material para confecção de corpos de prova para tais ensaios.



**Figura 2.14** – Furos de sondagem com retirada de corpos de prova para ensaios em laboratório externo. As cores dos testemunhos ilustram a elevação, representada na legenda. Fonte: autor com dados de Mineração Serra Grande (2021)

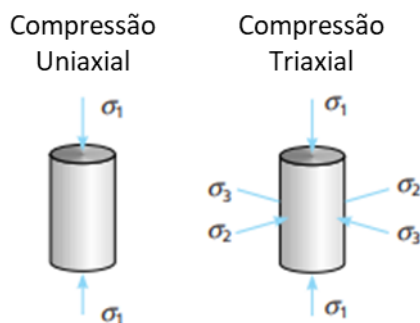
Com os resultados dos ensaios, círculos de Mohr representando a tensão de cisalhamento x tensão normal foram elaborados (Figura 2.15). A figura representa quatro ensaios triaxiais, sendo dois com ruptura ao longo da foliação e dois com ruptura sem qualquer controle estrutural para o xisto grafitoso (GXN).



**Figura 2.15** – Exemplo de interpretação de teste com construção de Círculo de Mohr tensão de cisalhamento x normal stress em MPa com quatro ensaios. Fonte: Mineração Serra Grande (2019)

Como o presente trabalho aborda ensaios de compressão uniaxial, os resultados de laboratório externo também são uniaxiais, representados por ensaios UCS (Figura 2.16). Os resultados dos ensaios estão no Tabela 2.1.





**Figura 2.16** – Representação das forças aplicadas nos ensaios de compressão uniaxial (laboratório interno) e nos ensaios de compressão triaxial (laboratório externo). Modificado de Vallejo (2005).

**Tabela 2.1** - Informações de ensaios UCS realizados em laboratório externo. Fonte: Mineração Serra Grande (2019).

<b>s1 (Mpa)</b>	<b>Modo de Ruptura</b>	<b>Litologia</b>
57.1	-	CBCX
132.3	-	DIQUE
108.5	Not observed	DOL
49	shear	GXN
65.3	Not observed	GXN
77.6	Not observed	GXN
78.1	foliation	GXN
81.4	Parallel to S1	GXN
106.2	-	GXN
120.7	Parallel to S1	GXN
41.8	-	MBA
125.3	shear	MG
199.2	-	MG

### 2.3.1 Evolução Deformacional do *Greenstone Belt* Crixás

O Greenstone Belt Crixás passou por quatro eventos deformacionais, com uma fase distensiva seguida por três eventos compressivos. A mineralização foi alocada nos eventos compressivos. Seu desenvolvimento iniciou com os derrames komatiíticos, seguido por derrames toleíticos. Diante da sobrecarga destes derrames de litologias com alta densidade devido a composição ferromagnésiana, foi desenvolvida uma bacia rasa flexural, possibilitando a deposição de sedimentos terrígenos e químicos, como pelitos carbonosos. A deposição de arenitos em um contato gradacional aumentou a carga sedimentar, promovendo um evento distensivo, espessando a camada de arenitos e aumentando a granulometria dos sedimentos (Massucato, 2004).

O evento D1 gerou falhas de empurrão de baixo ângulo norte sul com geração de pequenas zonas de cisalhamento rúptil-dúctil, as quais geraram a foliação S1 plano axial e foliação metamórfica. Tal evento deu origem a dobras assimétricas, lineação mineral e de estiramento de direção 119/10, falhas de

empurrão e indicadores cinemáticos com vergência para SE. O evento D2, por sua vez, possui como característica a compressão norte sul com vergência para sul. Foram geradas estruturas de dobras abertas com plano axial subvertical e eixo sub-horizontal subparalelo ao eixo das dobras posteriores, falhas reversas, foliação S-C e movimento para SW, além da foliação S2 com direção 306/15, foliação S com direção 267/68 e foliação com direção 240/47. Foram formadas dobras F2 (296/19), permitindo a remobilização do ouro, gerando uma concentração secundária que se instala paralela aos eixos de dobra coincidente com o *plunge* da mineralização. O evento D3 é definido por uma compressão leste-oeste, posterior às mineralizações, com estruturas de dobras suaves, crenulações tipo *kink band*. A foliação S3 possui direção 89/74 e eixo WNW, além de lineação de interseção ESSE. O evento D4 é tardio às mineralizações e representa uma compressão NNW-SSE com estruturas de dobras suaves (Massucato, 2004).

## 2.4 Descrição de Testemunhos de Sondagem

A finalidade principal da execução de furos de sondagem é a obtenção dos níveis de teor de ouro, além de definir a geometria do corpo mineralizado. Na Mecânica de Rochas se utiliza desses testemunhos para a descrição geotécnica, permitindo avaliar previamente a qualidade do maciço rochoso das escavações a serem realizadas. Os testemunhos de sondagem são descritos e analisados e por meio deles é possível obter informações sobre a litologia, a mineralogia e estruturas geotécnicas, as quais alimentam um robusto banco de dados.

Parâmetros geotécnicos são levantados por meio da descrição de testemunhos de sondagem, que objetiva além da análise do maciço construir o modelo geotécnico computacional para as escavações. Quanto menor a distância entre os furos de sondagem com informações, maior o nível de confiabilidade no modelo Carvalho (2018).

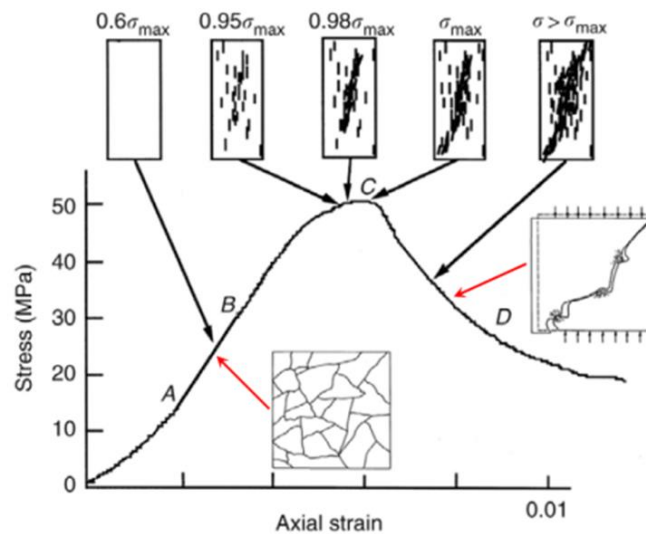
Os testemunhos de sondagem possibilitam também a caracterização do maciço por meio dos ensaios de resistência de rocha intacta.

## 2.5 Ensaios de Resistência à Compressão

O comportamento mecânico das rochas é definido pela resistência à compressão e pela deformabilidade. A resistência depende de diversos fatores, como: o tipo de rocha; a mineralogia; a distribuição granulométrica; microfissuras entre outras estruturas.

Os ensaios UCS ilustram a resistência medida em corpos de prova de rocha não confinados. A resistência é obtida na direção em que a maior tensão de cisalhamento é exercida, formando um ângulo específico em relação à direção da carga aplicada. As rochas vão fissurando

progressivamente e coalescem até ocorrer a ruptura na tensão de pico (Azevedo & Marques, 2012) (Figura 2.17).



**Figura 2.17** – Esquema da curva típica do ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial, tensão (*stress*) x deformação (*strain*). Azevedo & Marques (2002)

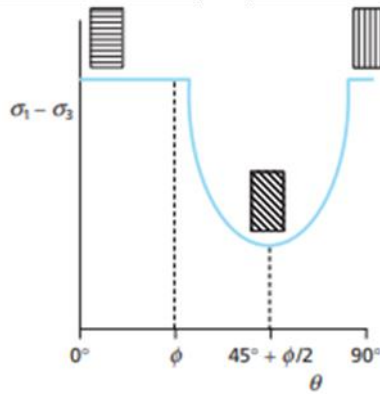
De acordo com o círculo de Mohr, a ruptura em rochas isotrópicas ocorrerá segundo a equação 2.1. (ISRM 1981).

$$2\theta = 90^\circ + \varphi \text{ ou } \theta = 45^\circ + \varphi / 2 \quad (\text{Equação 2.1})$$

A coesão (C) é a força de ligação entre as partículas minerais que constituem a rocha. O ângulo de atrito interno,  $\varphi$ , entre duas superfícies da mesma rocha é o ângulo mínimo de inclinação de uma superfície que ocasiona o cisalhamento. Para a maioria das rochas, o ângulo varia entre  $25^\circ$  e  $45^\circ$ . A força de atrito depende do ângulo de atrito e da tensão normal,  $\sigma_n$ , atuando no plano em questão. Condições como a magnitude das tensões de confinamento, a presença de água nos poros ou a taxa de aplicação de carga podem interferir no valor de  $\varphi$  (ISRM, 1981).

O ângulo da foliação em relação ao eixo do furo tem de ser considerado para todas as análises de resistência de rocha, uma vez que a direção mais favorável à ruptura corresponde ao ângulo representado na equação 2.2. Essa relação ilustra que a resistência da rocha será mínima se os planos de fraqueza tiverem a orientação que satisfaz a equação. De modo análogo, a resistência será máxima para orientações de  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 0^\circ$ . O valor da resistência irá variar para os valores do ângulo  $\theta$  situados entre esses extremos (ISRM, 1981) (Figura 2.18).

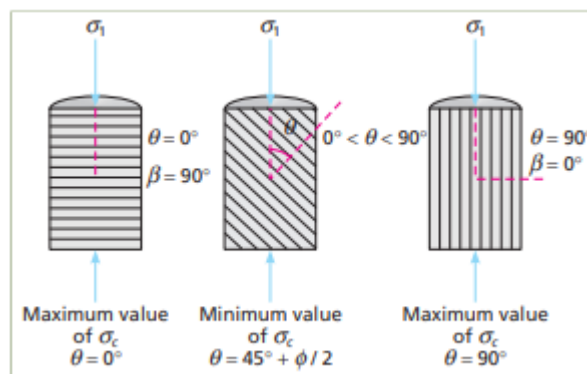
$$\theta = 45^\circ + \phi / 2 \quad (\text{Equação 2.2})$$



**Figura 2.18** - Curva de resistência teórica de uma rocha anisotrópica, com a seção curva correspondendo à ruptura ao longo dos planos de fraqueza e a seção reta correspondendo à ruptura através do material rochoso. Modificado de Vallejo (2005)

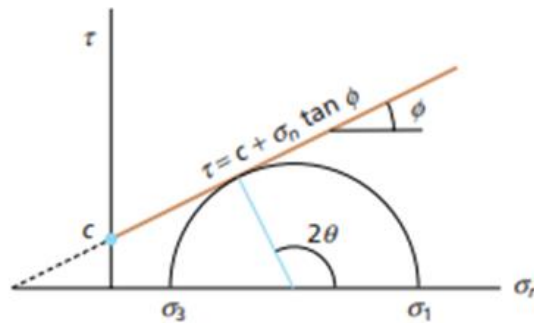
A variabilidade da resistência à compressão em rocha intacta mostra que um valor para  $\sigma_1$  não pode ser atribuído com assertividade. Quando a rocha é anisotrópica, sua resistência à compressão para o mesmo estado de tensão varia de acordo com o ângulo entre os planos de anisotropia (Equação 2.3) e a direção da carga aplicada. Isso implica em valores diferentes a depender do ângulo (Figura 2.19), enfatizando que o valor mínimo de resistência em um espécime de rocha com planos de laminação ou foliação é encontrado quando a ruptura ocorre ao longo dos planos de fraqueza. A força máxima corresponde a ângulos  $\theta$  iguais a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  (ISRM, 1985). Devido a essa relação de ângulo que rochas anisotrópicas são difíceis de testar, uma vez que a resistência varia, demandando muitos testes para obter parâmetros representativos.

$$\beta (\beta = 90 - \theta) \quad (\text{Equação 2.3})$$



**Figura 2.19** – Variação da resistência da rocha de acordo com o ângulo  $\theta$  que representa o ângulo da descontinuidade em relação à aplicação de  $\sigma_1$ . Ramamurthy (1993) in Vallejo (2005)

Uma maneira de analisar a resistência da rocha intacta por meio de um corpo de prova isotrópico, é por meio do critério de Mohr-Coulomb, adequado para representar o comportamento real da rocha (ISRM,1985) (Figura 2.20).



**Figura 2.20** - Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões principais (Vallejo, 2005).

Segundo ISRM (1985) a sugestão é que os corpos de prova para UCS sejam cilíndricos, com 50mm de diâmetro e a altura três vezes o diâmetro, cerca de 150mm.

Para os ensaios PLT, que medem o índice de resistência de carga pontual de amostras de rocha, o  $I_s$  é usado como um índice para classificação de resistência e para correlação com a resistência à compressão uniaxial da rocha. O ensaio consiste na quebra de um corpo de prova de rocha com a aplicação de uma carga pontual, podendo ser realizado em máquina de ensaio laboratorial ou com equipamento portátil. Os corpos de prova usados podem ser cilíndricos, obtidos de testemunhos de sondagem, ou irregulares (ISRM, 1985). O procedimento de teste consiste em inserir uma amostra de rocha entre dois cones de aço por onde se aplica a carga. A distância  $D$  entre os pontos do cilindro é registrada. Em seguida, tensão ( $P$ ) é continuamente aumentada até a ruptura. As informações a seguir foram extraídas do ISRM (1985).

O  $I_s$  é calculado a partir da carga de ruptura (Equação 2.4):

$$I_s = P / De^2 \quad (\text{Equação 2.4})$$

Onde  $P$  é a carga aplicada e  $De$  é o diâmetro equivalente.

Amostras que possuem diâmetro diferente necessitam de uma correção para obter o Índice de resistência de carga pontual corrigido, o  $I_s(50)$ , que é dado pela Equação 2.5.

$$I_s(50) = F \times I_s \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde  $F$  é um fator de correção de tamanho, obtido da equação 2.6.

$$F = (De/50)^{0,45} \quad (\text{Equação 2.6})$$

A equação do fator de correção pode ser aplicada independentemente do grau de anisotropia da amostra e da direção de carregamento.

O  $I_s(50)$  pode ser utilizado diretamente como índice para classificação da resistência da rocha, e também para prever a resistência à compressão uniaxial. Ensaio PLT são mais simples e baratos de serem realizados e podem ser convertidos de maneira próxima dos valores de ensaios de UCS. Essa conversão é padronizada para ensaios em corpos de prova oriundos de furos de sondagem de 50mm de diâmetro.

É calculado o valor médio de  $I_s(50)$  para cada amostra, após excluir os dois valores mais altos e mais baixos de 10 ou mais testes válidos. A relação entre  $\sigma_c$  e o índice de resistência de carga pontual é expressa pela equação 2.7.

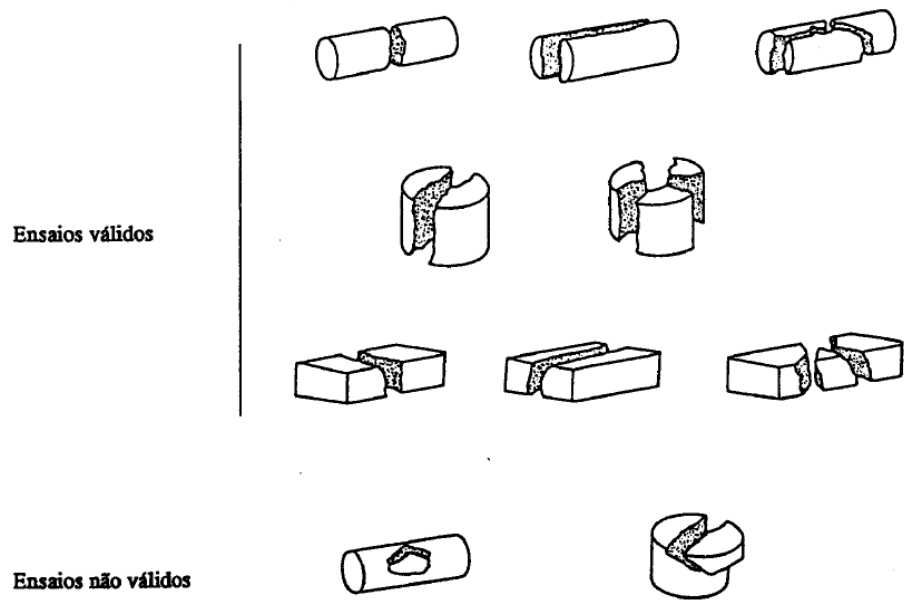
$$\sigma_c = f \times I_s(50) \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde  $f$  é o fator de conversão, que varia geralmente entre 25 e 20 dependendo do tipo de rocha, sendo o maior valor para rochas mais resistentes, mas pode variar entre 15 e 50, para rochas anisotrópicas. A precisão do PLT na previsão da resistência à compressão uniaxial depende da razão entre o  $\sigma_c$  e a resistência à tração. Para a maioria das rochas frágeis, a proporção é de aproximadamente 10. Para argilitos e argilitos macios, no entanto, a proporção pode ser mais próxima de 5. Isto é, os resultados de PLT devem ser interpretados de forma diferente para as rochas brandas. A precisão da estimativa também depende do número de testes realizados (ISRM, 1985).

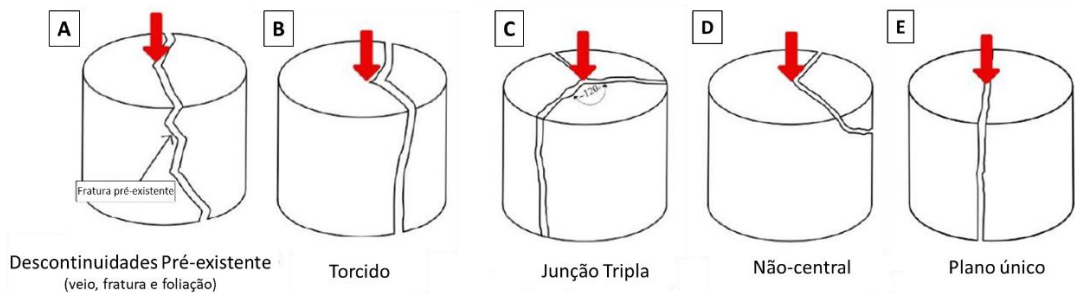
A resistência de carga pontual muitas vezes substitui a resistência à compressão uniaxial,  $\sigma_c$ , quando há confiança suficiente na relação entre PLT e  $\sigma_c$  obtido a partir de testes diretos de UCS, uma vez que quando conduzido corretamente, o PLT é tão confiável e muito mais rápido de medir (ISRM, 1985).

### 1.7 Tipo e geometria de quebra

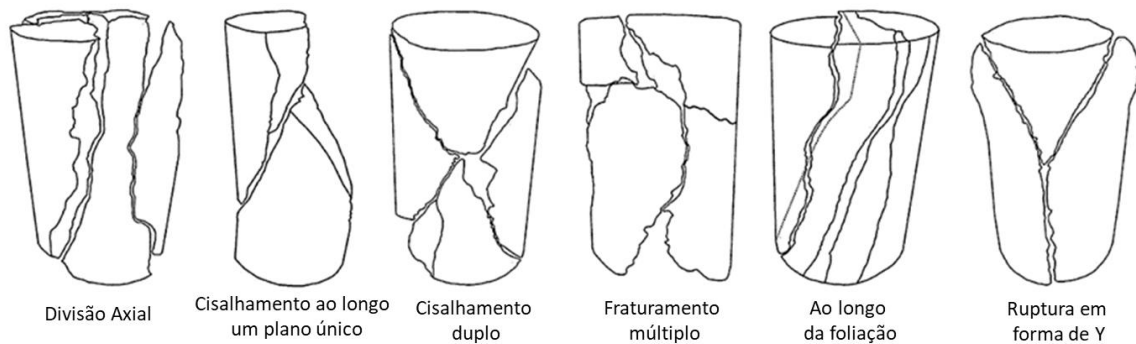
Tipo e geometria de quebra são critérios que permitem validar os ensaios realizados nos corpos de prova. ISRM (1985), Basu *et al.* (2013) e Everall & Sanislav (2018) ilustram que é necessário analisar o tipo de quebra, tanto de ensaios UCS quanto de PLT para validá-los. Ensaio PLT válidos são os que rompem de ponta a ponta do corpo de prova, sem aproveitar alguma estrutura (Figura 2.22). Por exemplo, a ruptura ao longo da foliação invalida o ensaio. Ensaio UCS com ruptura ao longo da foliação e de descontinuidades pré-existentes também são considerados inválidos, como ilustram as figuras 2.21, 2.23 e 2.24.



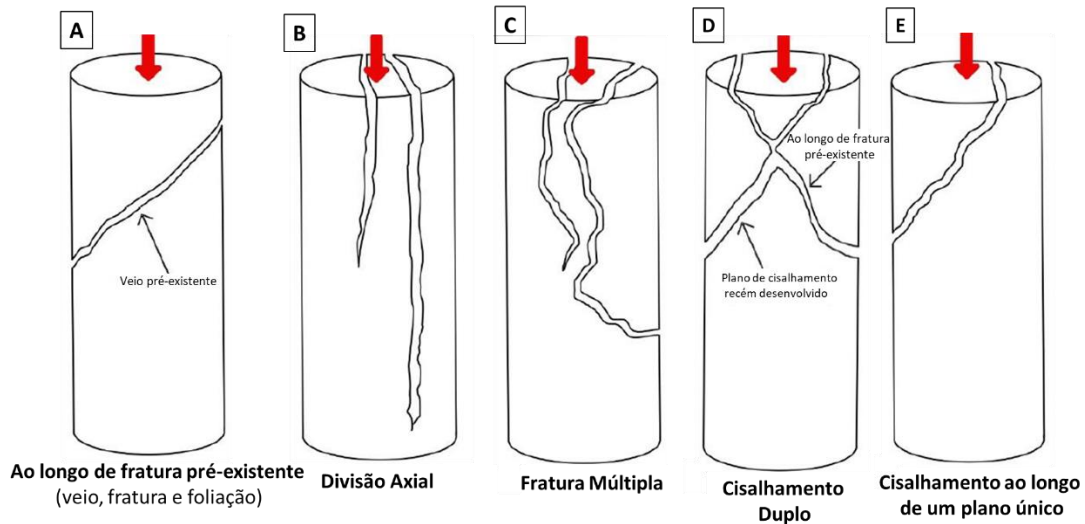
**Figura 2.21** – Tipos de quebra válidas e não válidas em ensaio de carga pontual. Modificado de ISRM (1985)



**Figura 2.22** - Desenhos esquemáticos mostrando o tipo de quebra em ensaios PLT. As setas vermelhas indicam a direção da tensão principal máxima. (A) Exemplo de falha ao longo de uma fraqueza pré-existente (um veio); (B) Exemplo de ruptura torcida; (C) Exemplo de ruptura por junção tripla; (D) Exemplo de ruptura não central; (E) Exemplo de ruptura em um único plano. Modificado de Everall & Sanislav (2018)



**Figura 2.23** - Representação esquemática de diferentes geometrias de quebra sob compressão uniaxial (Basu *et. al* 2013)



**Figura 2.24** - Ilustração esquemática da geometria da quebra. As setas vermelhas indicam a direção da tensão. (A) Tipo de quebra ao longo fraqueza pré-existente (veios, fraturas ou foliação); (B) Tipo de quebra de divisão axial; (C) Tipo de quebra por múltiplas fraturas; (D) Tipo de quebra por cisalhamento duplo (ao longo de planos de fraqueza pré-existent e planos de cisalhamento recém-desenvolvidos); (E) Tipo de quebra ao longo de um único plano (plano de falha recém-desenvolvido). Modificado de Everall & Sanislav (2018).

Em suma, os tipos de quebra possuem relação com a maneira que o corpo de prova rompe. O ideal é o corpo de prova romper com simetria e de ponta a ponta. Para ensaios PLT, rupturas dos tipos plano único e junção tríplice caracterizam ensaios válidos e em descontinuidades pré-existentes, torcido e não central caracterizam ensaios inválidos.

A geometria de quebra para amostras UCS pode ocorrer de acordo com as classificações: ao longo de fraturas pré-existentes, divisão axial, fratura múltipla, cisalhamento duplo, cisalhamento ao longo de um plano único, divisão axial, fraturamento e ruptura em Y. As geometrias de quebra que não envolvem estruturas existentes no maciço, mas que rompem na rocha intacta, são consideradas válidas, como ilustrado nas figuras pelos autores acima.



## CAPITULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

O trabalho foi realizado conforme as etapas a seguir:

#### 3.1 Revisão bibliográfica

A principal base de consulta bibliográfica foram artigos de pesquisadores da área, como Jost (1991; 2009; 2010; 2012), Pimentel (1992; 2004; 2016) e Fuck (1994; 2014). Além da revisão bibliográfica da informação regional, informações técnicas acerca da mecânica de rochas também foram levantadas, considerando as normas técnicas e os parâmetros já estabelecidos e aceitos internacionalmente para análise de maciço rochoso, mapeamento e descrição geotécnica, como Deere (1994; 1966), Barton (1974), Bieniawski (1973; 1989) e as sugestões da ISRM (*International Society For Rock Mechanics*) (1998; 2007).

#### 3.2 Levantamento de banco de dados

Utilizou-se neste trabalho o banco de dados da Mineração Serra Grande, da empresa AngloGold Ashanti, com informações do levantamento das escavações da Mina Ingá, levantadas pela topografia, bem como informações da malha de descrição geológica e geotécnica de testemunhos de sondagem, levantados pela equipe de Mecânica de Rochas, para confecção das imagens 3D. O principal levantamento foi sintetizado em planilha, que representa o banco de dados com informação dos ensaios de resistência de ensaios UCS e PLT de lotes diferentes para garantir uma análise randomizada.

#### 3.3 Análise qualitativa

A partir do banco de dados, foram geradas informações espacialmente distribuídas. Para isto, o *software* GEM4D (2021) foi utilizado para confecção de figuras e visualização espacial das amostras. Os resultados foram processados com ferramentas estatísticas como coeficiente de variação, média, quartis e mediana, para desconsiderar os *outliers* e definir tendências. Dessa forma, é esperado o maior nível de confiabilidade nos dimensionamentos geomecânicos em termos de parâmetros de resistência, para compreender os fatores que condicionam a resistência à compreensão dos litotipos.

#### 3.4 Integração das informações

Posteriormente às análises qualitativas, foi feita a integração dos dados obtidos na descrição de testemunhos de sondagem e com os resultados das análises dos ensaios de resistência de rocha intacta. Com o aporte desses dados, é possível a análise e interpretação, correlacionando-se as informações.

#### 3.5 Metodologia dos Ensaios

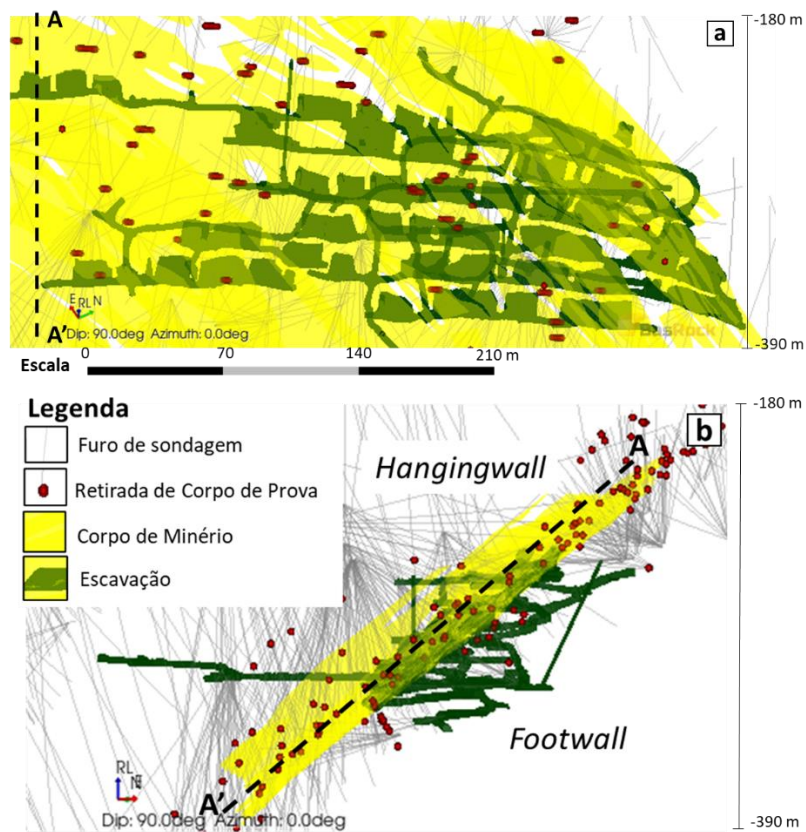
A metodologia dos ensaios de resistência é descrita em todas as etapas, uma vez que na mecânica de rochas a resistência e a deformabilidade, bem como as características dos maciços rochosos, são estimadas pelo comportamento da rocha intacta. A metodologia dos ensaios se desenvolveu em onze etapas.

A primeira etapa consistiu na revisão bibliográfica bem como da compreensão dos conceitos e dados analisados segundo as referências internacionais.

A segunda etapa ocorreu após descrição geotécnica dos testemunhos de sondagem pelo setor de geologia de mina ou exploração e pela equipe de mecânica de rochas. Os testemunhos são dispostos em uma malha de 25x25 metros de furos de sondagem. Após a descrição, é retirado um metro de uma caixa de testemunho de sondagem, gerando uma amostra daquele intervalo (Figura 3.1), que irá compor um lote, localizado no *hangingwall* ou no *footwall*, até 20 metros do corpo de minério. *Hangingwall* e *footwall* são termos referentes à localização próxima de um corpo tabular de minério (Figura 3.2). Então é coletada a metragem mais isotrópica possível, isto é, com o menor número de discontinuidades, uma vez que o maciço é transversalmente anisotrópico. Essa amostra irá auxiliar na determinação de propriedades mecânicas da rocha intacta (resistência e deformabilidade).



**Figura 3.1** – Quatro caixas totalizando 20 metros de testemunhos de sondagem utilizados para descrição geotécnica, onde é retirado um metro (lote) para realizar os ensaios.



**Figura 3.2** – a) Ilustração da região do nível 689 ao nível 800 da Mina Ingá. Representação das escavações, do corpo de minério e dos furos de sondagem; b) Seção AA’ ilustrando o local em que são retiradas as amostras para ensaios em relação ao *hanging* e ao *footwall*

Os ensaios realizados foram os de UCS (*Uniaxial Compressive Strength*) e os de PLT (*Point Load Test*) (Figura 3.3).



**Figura 3.3** – Resultados de ensaios de resistência de rocha intacta após a ruptura. a) Ensaios de UCS (*Uniaxial Compressive Strength*); b) ensaios PLT (*Point Load Test*)

Os ensaios de UCS são os mais usuais no ramo da mecânica de rochas por serem mais simples e baratos, fornecendo diretamente a resistência a compressão uniaxial e a deformabilidade. Com estes ensaios é possível estabelecer um critério de resistência para o material. Existem recomendações para a execução destes ensaios, e neste trabalho serão utilizadas as do ISRM (1978). O mesmo ocorre para ensaios de PLT, que são mais simples e por meio de uma relação simples, os resultados são convertidos para valores análogos de ensaios de UCS (ISRM, 1985).

Na terceira etapa foi realizado o corte dos corpos de prova de acordo com as normas ISRM (1985), sendo gerados em média 6 corpos de prova para UCS para cada amostra, com 100mm de altura e 36mm de diâmetro (diâmetro dos testemunhos de sondagem). Também foram feitas em média 12 amostras para o ensaio PLT do mesmo intervalo, com 20mm de altura e 36mm de diâmetro.

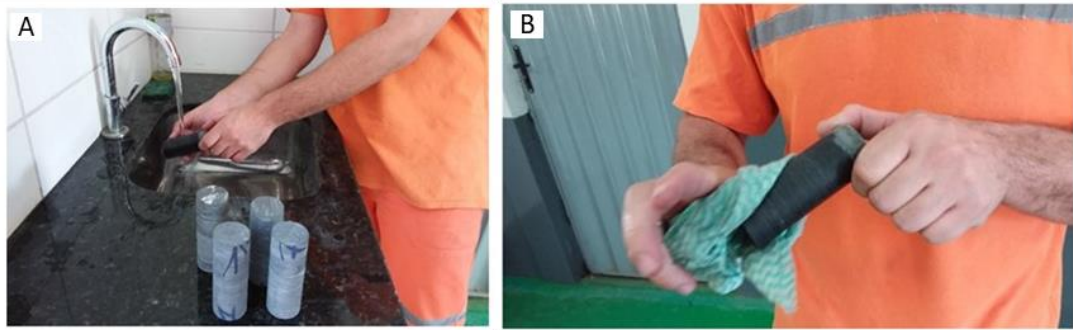
Segundo ISRM, (1985) a sugestão é que os corpos de prova para UCS sejam cilíndricos, com 50mm de diâmetro e a altura três vezes o diâmetro. Os corpos de prova deste trabalho foram adaptados para o diâmetro dos furos de sondagem, em torno de 36mm.

O diâmetro sugerido na norma é fruto da consideração que ensaios com corpos de prova com grandes cristais podem influenciar na estrutura que se busca analisar (rocha intacta). Como a maioria das rochas tem cristais inferiores a 5mm, um corpo de prova com 50mm é representativo pois permite amostrar pelo menos 10 cristais, um número mínimo para representatividade na rocha (Vutukuri, 1974). As litologias da Mina Ingá em sua maioria não possuem fenocristais expressivos, permitindo a relação sugerida com os cristais e o diâmetro do testemunho de sondagem, possibilitando o emprego do diâmetro em 36mm.

A relação da altura de três vezes o diâmetro tem de ser respeitada (ISRM, 1985), pois ao realizar o ensaio, o corpo de prova será submetido ao atrito do cilindro de aço do equipamento

Definida a relação entre altura e diâmetro do corpo de prova, a quarta etapa constituiu no preparo da amostra para o ensaio. Ele é cortado na altura recomendada, é levado para uma retífica a fim de mantê-lo o mais regular possível na base e no topo. A irregularidade máxima do topo tem de ser no máximo de 0.02mm e de 0.30mm nas laterais. As geratrizes também são analisadas para que não existam desconformidades. Essas irregularidades não podem existir, caso existam o equipamento pode vir a apoiar em pontos específicos do corpo de prova, não distribuindo uniformemente a carga. Com a concentração de cargas em pontos específicos, uma carga alta é distribuída em uma pequena área e isso tende a dar uma tensão infinita, gerando uma ruptura localizada em um ponto.

Após a retífica, a quinta etapa consistiu na lavagem e secagem das amostras (figura 3.4).



**Figura 3.4** – Procedimento A) de lavar e B) de secar as amostras

A sexta etapa consistiu nas aferições das amostras. Com um transferidor com um prolongador dexter, o ângulo da foliação em relação ao eixo do furo é medido (figura 3.5). Caso não exista ângulo de foliação, a informação inserida no banco de dados é 0 (ângulo 0) ou “caótico”, sem predomínio de uma direção. Com um paquímetro, o diâmetro e o comprimento do corpo de prova são medidos.

Informações como o furo, o número da amostra, a orientação (*from* e *to*) do furo que a amostra foi retirada, o diâmetro, o comprimento e a foliação são levantados e inseridos no banco de dados. Cada amostra possui um papel de identificação junto a cada lote e todas são identificadas (figura 3.6).



**Figura 3.5** – Ilustração do corpo de prova com a direção do eixo do furo em relação ao ângulo da foliação



**Figura 3.6** – Organização das amostras PLT de acordo com o lote. Para UCS a mesma organização é seguida

Também são feitas marcações com pincel atômico em números romanos (Figura 3.7) e as amostras são fotografadas antes e após a ruptura dos ensaios, de frente e de cima (figura 3.8). Isso é fundamental para validar o tipo de quebra, o qual possui influência na análise dos parâmetros de resistência. É fundamental salvar as imagens das amostras após os ensaios caso necessário reanalisar aspectos da ruptura. É um processo que poupa o armazenamento das amostras em espaço físico do laboratório. Os ensaios de UCS são também filmados.

Para amostras de PLT, o centro das amostras é marcado (figura 3.9) para melhor centralização do equipamento de ensaio.



**Figura 3.7** – Marcação dos corpos de prova para identificação



**Figura 3.8** – Fotografia dos corpos de prova a) antes e b) após a ruptura. Exemplos para amostras PLT



**Figura 3.9** – Marcação do centro das amostras de PLT para melhor centralização das mesmas na realização do ensaio

Quanto ao número de ensaios, a recomendação da norma ISRM (1978) é de que no mínimo sejam realizados 5 ensaios para determinar a resistência a compressão uniaxial por meio de ensaios UCS, retirando os dois valores mais discrepantes e considerando os três intermediários. Para PLT, o número de ensaios recomendados pela ISRM (1978) é de 6, com variação dos resultados inferior à 30%.

Na sétima etapa os ensaios de UCS e PLT foram realizados com os corpos de prova ensaiados em um equipamento servo controlado que suporta até 200 kN (figura 3.10). Todos os ensaios foram levados à ruptura, obtendo-se leitura de carga com valores de resistência em kN. A Figura 3.11 ilustra como cada resultado foi obtido pelo software PLT automático.

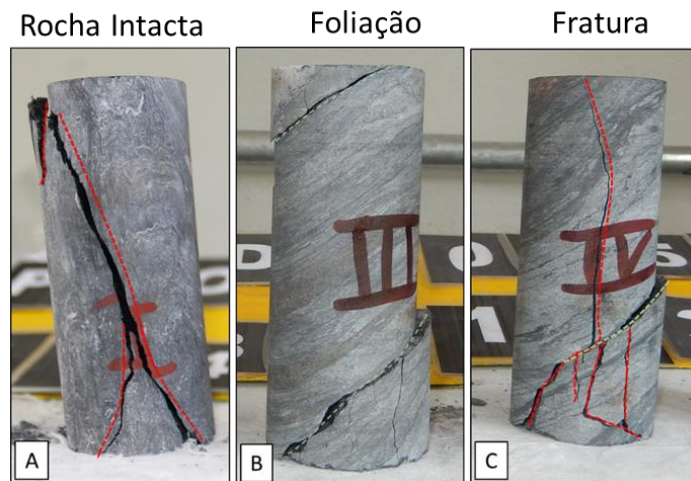


**Figura 3.10** – Equipamento utilizado para realização de ensaios de UCS e PLT. Na imagem, corpo de prova de UCS



**Figura 3.11** – Exemplo de representação dos resultados de ensaio em andamento no software PLT Automático (2019). Representação da curva tempo x carga antes da ruptura

A oitava etapa ocorreu após a ruptura do corpo de prova, com a avaliação dos tipos de quebra ao longo da foliação (Sn), da Fratura (Fr) ou na Rocha Intacta (RI) (figura 3.12).

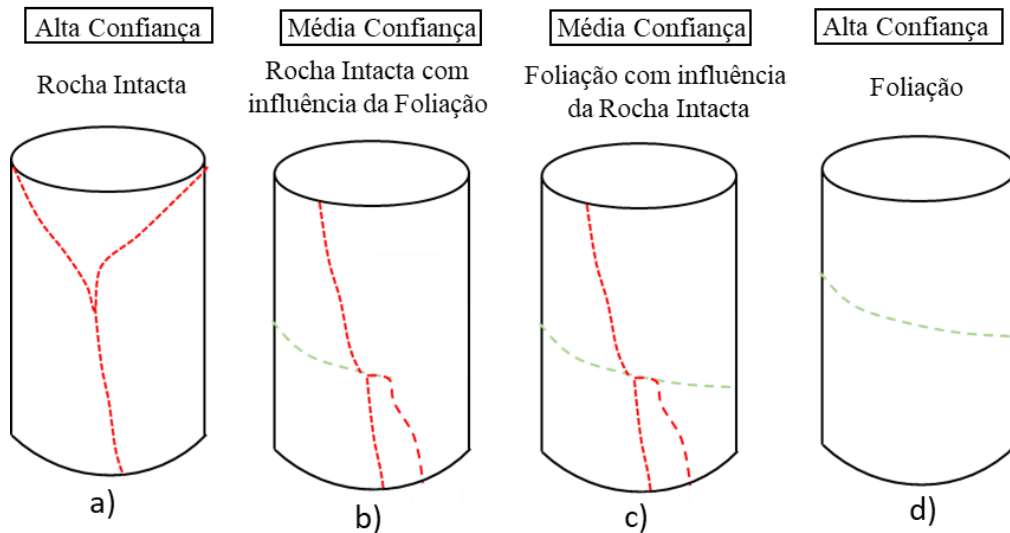


**Figura 3.12** – Representação do tipo de quebra. A) quebra na Rocha Intacta (RI); B) quebra na Foliação (Sn); C) quebra na Rocha Intacta e na Foliação

Atribui-se neste trabalho um grau de confiança (alta, média ou baixa), para avaliação da acurácia do tipo de quebra. Por exemplo, um ensaio que possui um tipo de quebra claramente na rocha intacta (Figura 3.13 a) ou na foliação (Figura 3.13 d), possui alto grau de confiança. Já um ensaio com quebra na foliação, mas também pela rocha intacta (Figura 3.13 b e c), possui um grau de confiança médio. Caso um ensaio possua tipo de quebra que não permita definir se foi pela foliação ou pela rocha intacta,



o grau de confiança atribuído é baixo. Isto foi feito para valores de foliação e fraturas pré-existentes não impactarem no valor da rocha intacta e vice-versa. Para este estudo foram utilizados apenas tipos de quebra de alta e média confiança.

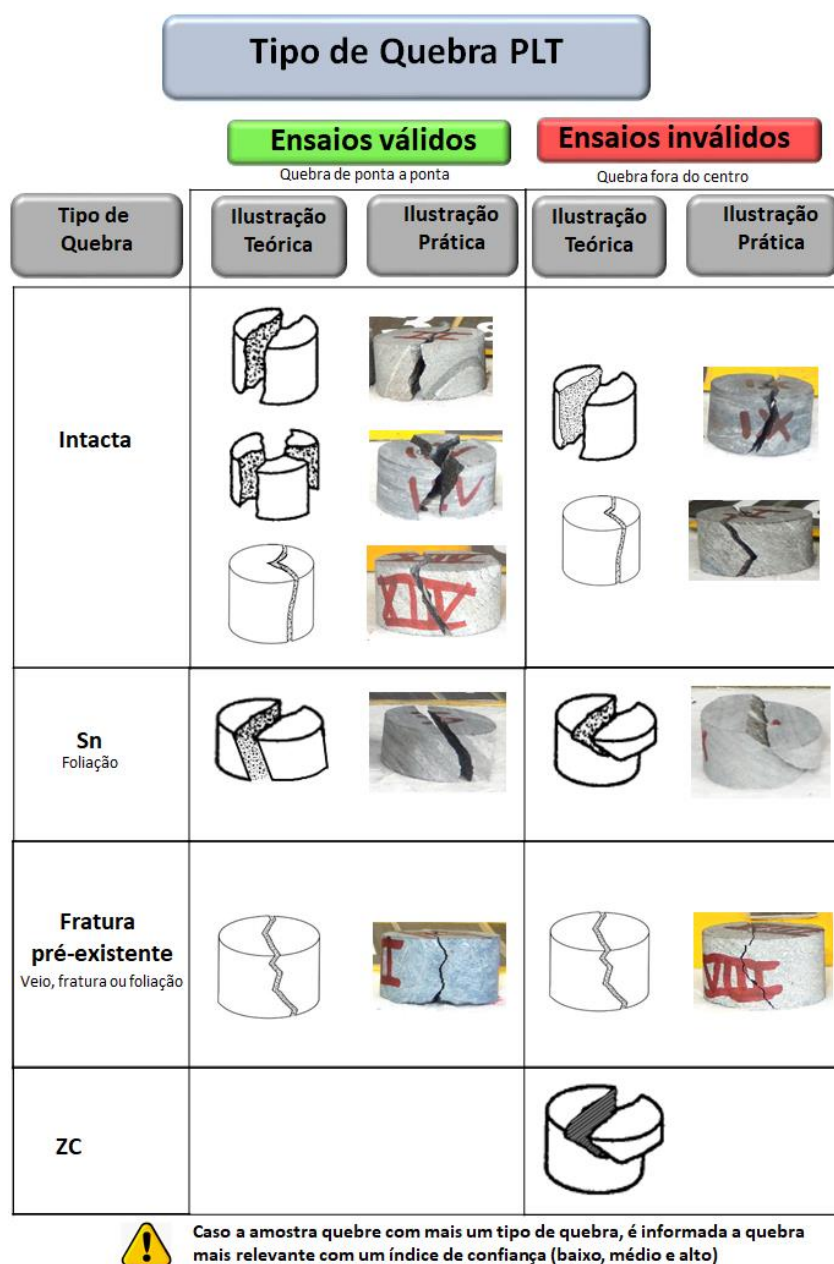


**Figura 3.13** – Ilustração do nível de confiança para classificação do tipo de quebra. A) Quebra exclusivamente na rocha intacta, atribuindo alta confiança; b e c) quebra na rocha intacta e na foliação, com média confiança; e d) quebra na foliação com alta confiança. Fonte: Autor

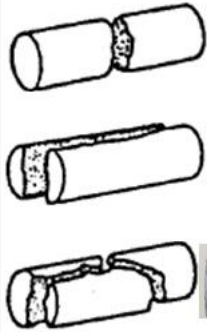



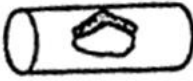


A nona etapa consistiu em mais uma classificação do corpo de prova, quanto ao tipo e a geometria de quebra (ISRM, 1985). Além de realizar os ensaios, é fundamental compreender o que o valor do ensaio representa, analisando o tipo e a geometria de quebra. Uma amostra que rompeu na rocha intacta fornece o valor de UCS. Em contrapartida, caso a rocha tenha rompido ao longo de uma descontinuidade pré-existente, o ensaio não é considerado válido.

De forma mais detalhada, o tipo de quebra de ambos ensaios (PLT (Figura 3.14) e UCS (Figuras 3.15 e 3.16) pode ocorrer segundo à rocha intacta ou ao longo de alguma anisotropia ou descontinuidade da rocha, como fraturas, zonas de cisalhamento e diques.

Ensaio PLT e UCS que possuem tipo de quebra na foliação, em fraturas pré-existente e em zona de cisalhamento, são considerados inválidos. Ensaio PLT com ruptura na rocha intacta, mas sem simetria, também são inválidos (Figuras 3.14 e 3.15).



**Figura 3.14** – Classificação do tipo de quebra de ensaios PLT de acordo com a rocha intacta e a validade do ensaio, além de foliação, fraturas pré-existentes e zonas de cisalhamento. Ilustrações teóricas e práticas com os ensaios das litologias da Mina Ingá. Modificado de ISRM (1985)

<b>Tipo de Quebra UCS</b>					
		<b>Ensaio válidos</b>		<b>Ensaio inválidos</b>	
Tipo de Quebra	Ilustração Teórica	Ilustração Prática	Ilustração Teórica	Ilustração Prática	
<b>Intacta</b>					
<b>Sn</b> Foliação					
<b>Fratura pré-existente</b> Veio, fratura ou foliação					
<b>ZC</b>					

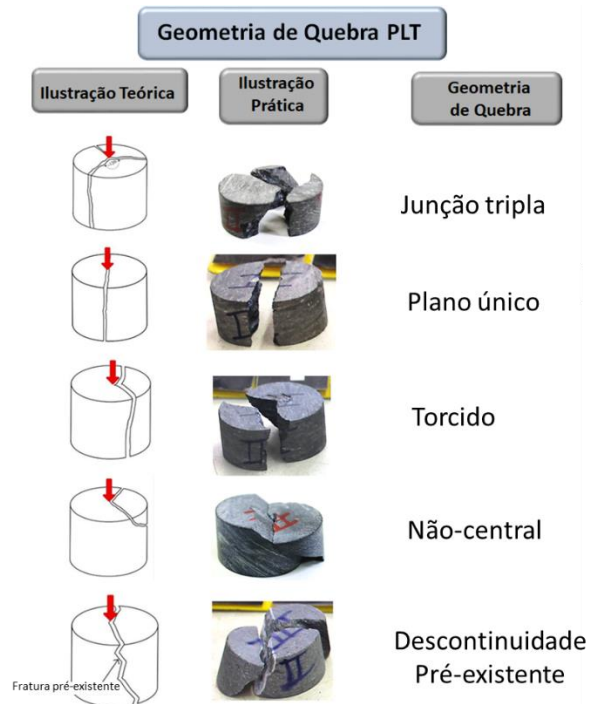
**Figura 3.15** – Classificação do tipo de quebra de ensaios UCS de acordo com a rocha intacta e a validade do ensaio, além de foliação, fraturas pré-existentes e zonas de cisalhamento. Ilustrações teóricas e práticas com os ensaios das litologias da Mina Ingá. (modificado de ISRM, 1985).

Além do tipo de quebra, é fundamental compreender a geometria da quebra para ambos ensaios, uma vez que isto invalida um ensaio mesmo que tenha sido validado por um tipo de quebra de acordo com Basu *et al.* (2013). A geometria de quebra para amostras UCS pode ocorrer de acordo com as classificações: ao longo da foliação; divisão axial; fraturamento múltiplo; cisalhamento ao longo de um único plano e ruptura em forma de Y, sendo inválidas as geometrias ao longo da foliação e divisão axial (Figura 3.16).



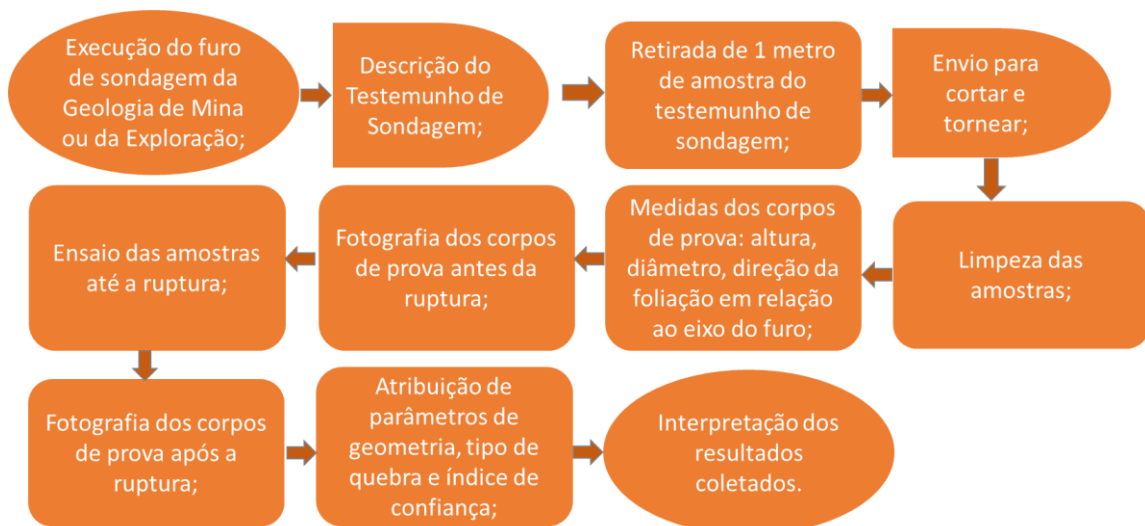
**Figura 3.16** – Geometria de quebra para ensaios UCS com ilustração teórica e prática com os ensaios das litologias da Mina Ingá. Modificado de Basu *et al.* (2013)

Para amostras PLT, a quebra pode ocorrer com as seguintes geometrias: junção tripla, plano único, torcido, não-central e descontinuidade pré-existente, sendo inválidas as geometrias torcida, não-central, descontinuidade pré-existente e plano único sem simetria (Figura 3.17).



**Figura 3.17** – Geometria de quebra para ensaios PLT com ilustração teórica e prática com os ensaios das litologias da Mina Ingá. Modificado de Everall & Sanislav (2018).

A décima etapa consistiu na interpretação dos resultados coletados e inseridos no banco de dados. Os processos foram sumarizados no fluxograma abaixo (Figura 3.18)



**Figura 3.18** – Fluxograma com as etapas do processo de realização dos ensaios.



$$\text{se } 50 < \text{Diâmetro} \leq 60, ((\text{Diâmetro} - 50) * 0.15) + 23 \quad \text{Equação (3.7)}$$

$$\text{se } \text{Diâmetro} > 60, ((\text{Diâmetro} - 60) * 0.2) \quad \text{Equação (3.8)}$$

Valores sugeridos por Bieniawski (1973) foram interpolados para uma adaptação do diâmetro dos testemunhos, e deste modo, C é dado por:

$$C = (0.18 * \text{Diâmetro}) + 13.8 \quad \text{Equação (3.9)}$$

A resistência à compressão simples é calculada do seguinte modo:

$$\text{Resistência à compressão simples} = Is50 \text{ (MPa)} * C \quad \text{Equação (3.6)}$$

A resistência uniaxial (MPa), é dada por:

$$\text{Resistência Uniaxial} = C * Is50 \quad \text{Equação (3.10)}$$

Para os ensaios de UCS, inicialmente é preciso conhecer a resistência para o diâmetro do testemunho de sondagem de 35mm:

$$\text{Resistência 35mm MPa} = \frac{\frac{\text{Leitura de Carga (kN)}}{(\pi * (\frac{\text{Diâmetro} * 0.001}{2})^2)}}{1000} \quad \text{Equação (3.11)}$$

Como a amostra não possui 50mm, como sugerido pelo ISRM (1978), é necessário aplicar um fator de correção do diâmetro. De fato, a resistência e os parâmetros de deformabilidade da rocha intacta são sempre referidos ao diâmetro padrão de 50mm. Como o estudo depende de furos de sondagem previamente feitos com 35mm em média é aplicado o fator de correção proposto por Hoek & Brown (1980).

$$\text{Resistência 50mm (MPa)} = \text{Resistência 35mm (MPa)} * \left(\frac{50}{\text{Altura}}\right)^{0.18} \quad \text{Equação (3.13)}$$

### 3.4 Análise dos dados

A décima primeira etapa é a análise dos dados, onde foram sumarizadas informações de 1633 ensaios, sendo 1536 de PLT e 97 de UCS considerando a setorização dos ensaios por ângulo da foliação em relação ao eixo do furo, a litologia e o tipo de quebra - na Rocha Intacta (RI), na foliação (Sn) ou em alguma Fratura (Fr).

Inicialmente, por meio da média aritmética, foram analisados os resultados resistência de ensaios UCS e PLT separados por litologia. Também foi setorizado os valores de resistência de acordo com o ângulo da foliação em relação ao eixo do furo. O ângulo foi disposto em gráfico e posteriormente

em tabelas, com a disposição da média aritmética de blocos de valores de resistência divididos a cada 10°. Foram produzidos gráficos e tabelas referentes ao modo em que a rocha se rompe (na foliação, na rocha intacta ou na fratura). Como o tipo e geometria de quebra são complexos, essas informações também serão consideradas, incluindo o grau de confiança dessas informações. A última análise foi feita para ensaios com quebra na rocha intacta, foliação e fratura, com tipo e geometria de quebra válidas e com médio e alto nível de confiança.

De modo a otimizar a visualização dos dados, foram utilizados gráficos de diagrama de caixa (*boxplot*). Este gráfico é construído com valores máximos, mínimos, e três quartis, os quais garantem a visualização dinâmica da mediana, da média e garante a eliminação dos *outliers* da análise visual.

Para completar as análises, foram comparados os dados de ensaios UCS de laboratório externo, além de comparações entre UCS e PLT e correlações entre litologia e ângulo da foliação em relação ao eixo do furo.



## CAPITULO 4

### RESULTADOS

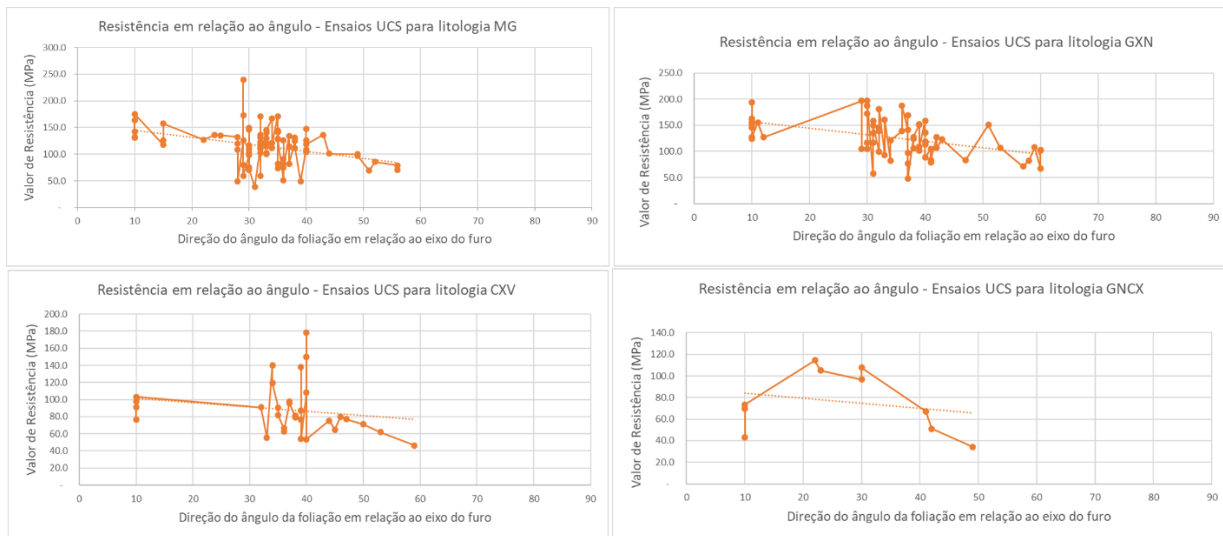
---

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios UCS e PLT. Como os corpos de prova ensaiados no presente estudo são de rocha sem alteração, os valores obtidos foram tratados como UCS. Sendo assim, as quebras que não ocorreram em rocha intacta, mas que se aproveitam do plano da foliação ou de fratura pré-existentes, foram contabilizadas como resistência influenciada por descontinuidades.

Com uma seleção prévia, será atribuída a média aritmética para obtenção da resistência de rocha intacta, e com influência da foliação e de fratura para cada litologia, setorizando ângulo da foliação em relação ao eixo do furo, junto a uma análise de diagramas de caixa, com uma melhor visualização da distribuição das informações.

Há poucas informações de ângulo do ensaio em relação ao eixo do furo maior que  $50^\circ$ , pois não são realizados furos pela operação paralelos à espessura da litologia, mas perpendiculares, à fim de interceptar a real dimensão do corpo do minério. Isso traz um prejuízo na tratativa de dados, mas são observadas tendências de aumento do ângulo e diminuição do valor de resistência.

Inicialmente, para ensaios UCS, considerando o ângulo e a litologia, tem-se os resultados para essa relação ilustrados na Figura 4.1, com declínio no valor da resistência conforme o aumento do ângulo da foliação em relação à sigma 1, entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$ , para litologias MG (metagrauvaca), GXN (filito carbonoso), CXV (clorita xisto verde) e GNCX (Quartzo-biotita-muscovita-granada xistos). A linha de tendência do gráfico ilustra a diminuição no valor de resistência conforme o aumento do ângulo da foliação em relação à sigma 1.

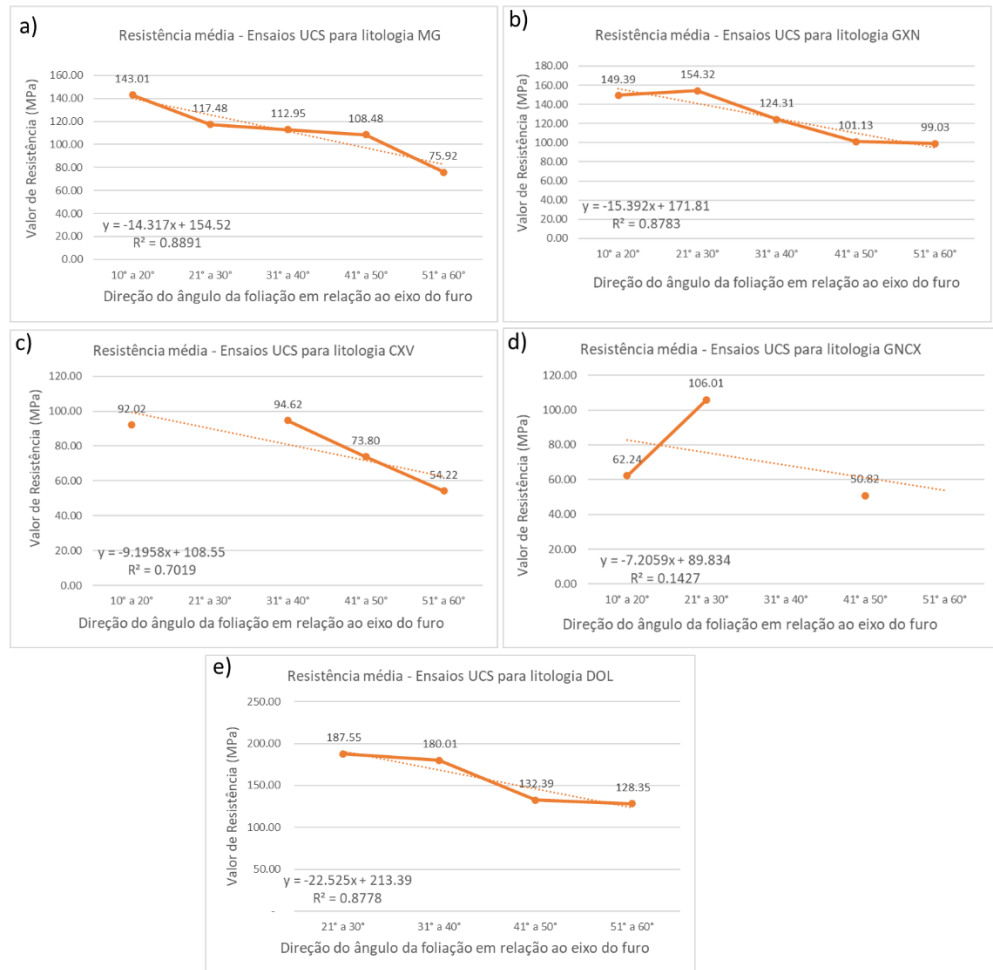


**Figura 4.1** – Gráficos ilustrando a variação dos resultados dos ensaios UCS conforme ângulo da foliação em relação ao eixo do furo para quatro litologias com valores suficientes para serem representados graficamente

Refinando os dados considerando a média aritmética em intervalo de 10°, é possível obter os resultados da tabela 4.1, plotados na figura 4.2 que evidenciam o declínio da resistência em relação ao ângulo entre 0° e 60°.

**Tabela 4.1** - Média dos valores de resistência de ensaios UCS com relação ao ângulo da foliação em relação ao eixo do furo divididos em 10°.

Ângulo/Resistência (Mpa)	MG	GXN	GNCX	CXV	DOL
10° a 20°	143.01	149.39	62.24	92.02	
21° a 30°	117.48	154.32	106.01		187.55
31° a 40°	112.95	124.31		94.62	180.01
41° a 50°	108.48	101.13	50.82	73.80	132.39
51° a 60°	75.92	99.03		54.22	128.35



**Figura 4.2** – Ilustração gráfica da média dos valores de resistência de ensaios UCS com relação ao ângulo da foliação em relação ao eixo do furo

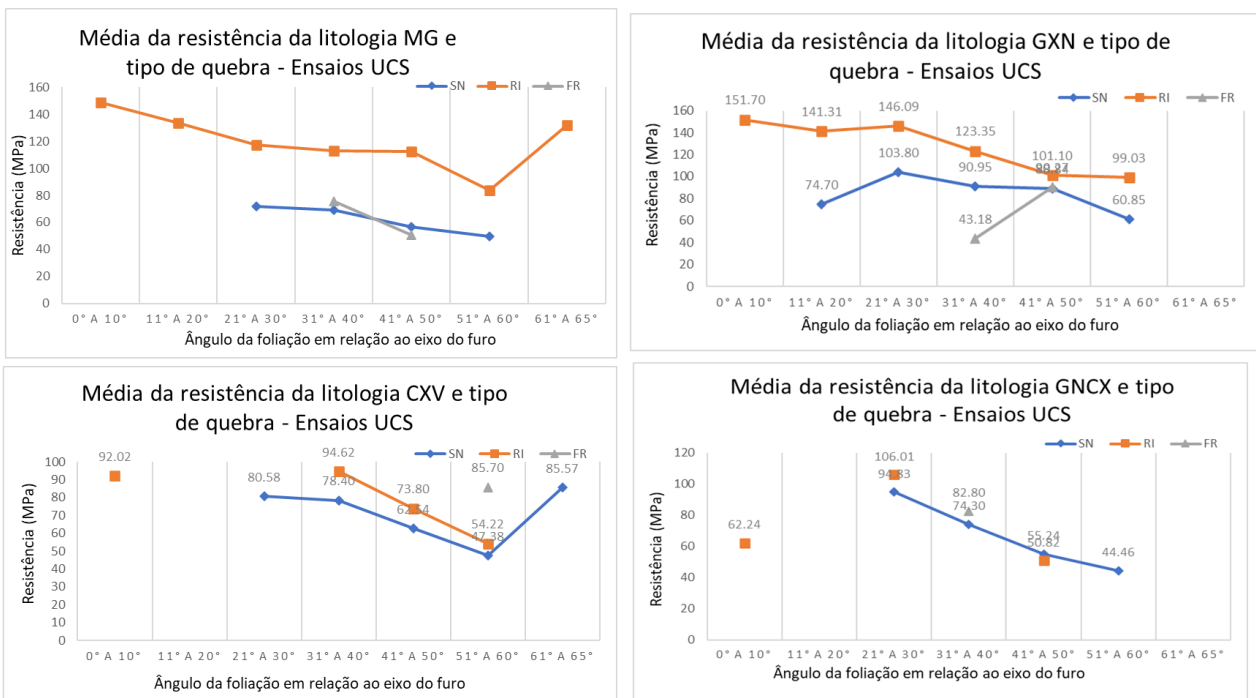
Contudo, é preciso analisar a quebra (Figura 3.13) para aprimorar este tipo de análise. Assim, as amostras, além de serem separadas por litologias, foram classificadas pelo tipo de quebra (tabela 4.2 e figura 4.3).

**Tabela 4.2** - Resumos de ensaios UCS por ângulo da foliação em relação ao eixo do furo e por tipo de quebra. SN= Foliação; RI = Rocha Intacta; FR = Fratura.

Ângulo/Resistência (Mpa) - MG	SN	RI	FR	Ângulo/Resistência (Mpa) - GXN	SN	RI	FR
0° a 10°		148.64		0° a 10°		151.70	
11° a 20°		133.62		11° a 20°	74.70	141.31	
21° a 30°	72.02	117.48		21° a 30°	103.80	146.09	
31° a 40°	69.02	112.95	75.56	31° a 40°	90.95	123.35	43.18
41° a 50°	56.79	112.30	50.65	41° a 50°	88.84	101.10	90.27
51° a 60°	49.86	83.90		51° a 60°	60.85	99.03	
61° a 65°		132.09		61° a 65°			

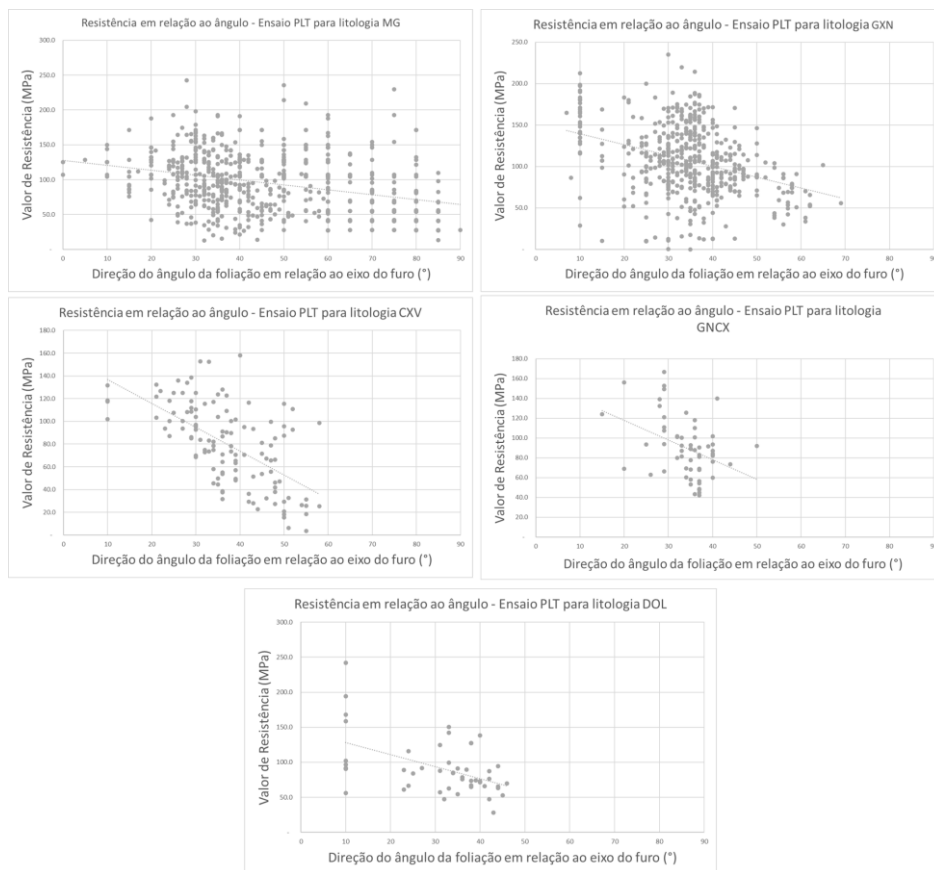
  

Ângulo/Resistência (Mpa) - CXV	SN	RI	FR	Ângulo/Resistência (Mpa) - GNCX	SN	RI	FR
0° a 10°		92.02		0° a 10°		62.24	
11° a 20°				11° a 20°			
21° a 30°	80.58			21° a 30°	94.83	106.01	
31° a 40°	78.40	94.62		31° a 40°	74.30		82.80
41° a 50°	62.54	73.80		41° a 50°	55.24	50.82	
51° a 60°	47.38	54.22	85.70	51° a 60°	44.46		
61° a 65°	85.57			61° a 65°			



**Figura 4.3** – Gráficos representativos com os valores de resistência e os tipos de quebra de acordo com o eixo do furo em relação ao ângulo da foliação por litologia. (Sn= Foliação; RI= Rocha Intacta; FR= Fratura)

Para ensaios PLT, a análise foi semelhante (Figura 4.4), com os valores de resistência das litologias MG, GXN, CXV, GNCX e DOL com o ângulo da foliação em relação à sigma 1 entre 0° e 90°, a depender do número de amostras por litologia.

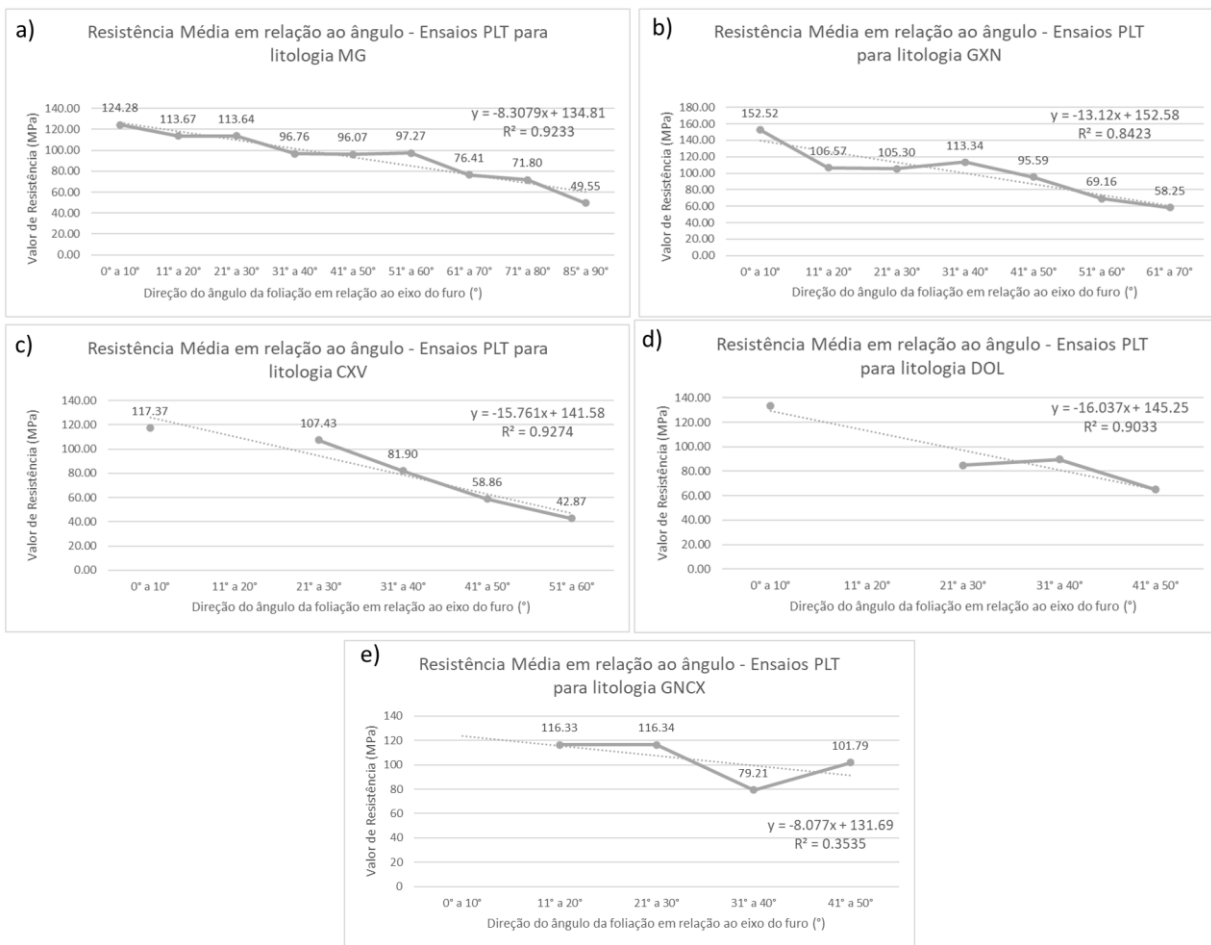


**Figura 4.4** – Variação da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT conforme o ângulo entre a foliação e o eixo do furo para cinco litologias

A Tabela 4.3 e a Figura 4.5 ilustram uma setorização mais detalhada, a cada 10°, das informações da Figura 4.4.

**Tabela 4.3** - Média dos valores da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT conforme o ângulo entre foliação e o eixo do furo.

Ângulo/Resistência(MPa)	MG	GXN	GNCX	CXV	DOL	CBCX
0° a 10°	124.28	152.52		117.37	133.32	
11° a 20°	113.67	106.57	116.33			
21° a 30°	113.64	105.30	116.34	107.43	84.75	
31° a 40°	96.76	113.34	79.21	81.90	89.50	63.87
41° a 50°	96.07	95.59	101.79	58.86	64.97	
51° a 60°	97.27	69.16		42.87		
61° a 70°	76.41	58.25				
71° a 80°	71.80					
85° a 90°	49.55					



**Figura 4.5** – Ilustração gráfica da média dos valores de resistência à compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT conforme o ângulo entre foliação e o eixo do furo

Refinando as informações e considerando além da litologia, do ângulo da foliação em relação ao eixo do furo e a resistência, a Figura 4.6 retrata uma análise levando em consideração também o tipo de quebra, a qual é ilustrada graficamente na Figura 4.7, para as litologias MG, GNCX, GXN, CXV, DOL e CBCX.

Ângulo/Resistência (MPa) - MG	SN	RI	FR
0° a 10°			
11° a 20°	81.18	98.40	
21° a 30°	79.43	110.69	55.77
31° a 40°	88.00	94.86	83.97
41° a 50°	54.17	77.11	
51° a 60°	49.06	60.24	
61° a 70°			
71° a 80°			
81° a 90°			

Ângulo/Resistência (MPa) - GNCX	SN	RI	FR
0° a 10°			
11° a 20°		116.33	
21° a 30°	66.19	119.06	139.26
31° a 40°	74.43	78.62	88.48
41° a 50°	73.57	115.90	
51° a 60°	85.68		
61° a 70°			
71° a 80°			
81° a 90°			

Ângulo/Resistência (MPa) - GXN	SN	RI	FR
0° a 10°		154.45	
11° a 20°		128.59	
21° a 30°	114.57	127.65	123.32
31° a 40°	109.88	103.78	99.49
41° a 50°	93.31	96.11	78.83
51° a 60°	59.09	74.47	
61° a 70°		58.54	
71° a 80°			
81° a 90°			

Ângulo/Resistência (MPa) - CXV	SN	RI	FR
0° a 10°		117.37	
11° a 20°			
21° a 30°	117.35	104.95	
31° a 40°	77.41	82.80	
41° a 50°	60.58	60.96	28.69
51° a 60°	30.43	80.77	24.07
61° a 70°			
71° a 80°			
81° a 90°			

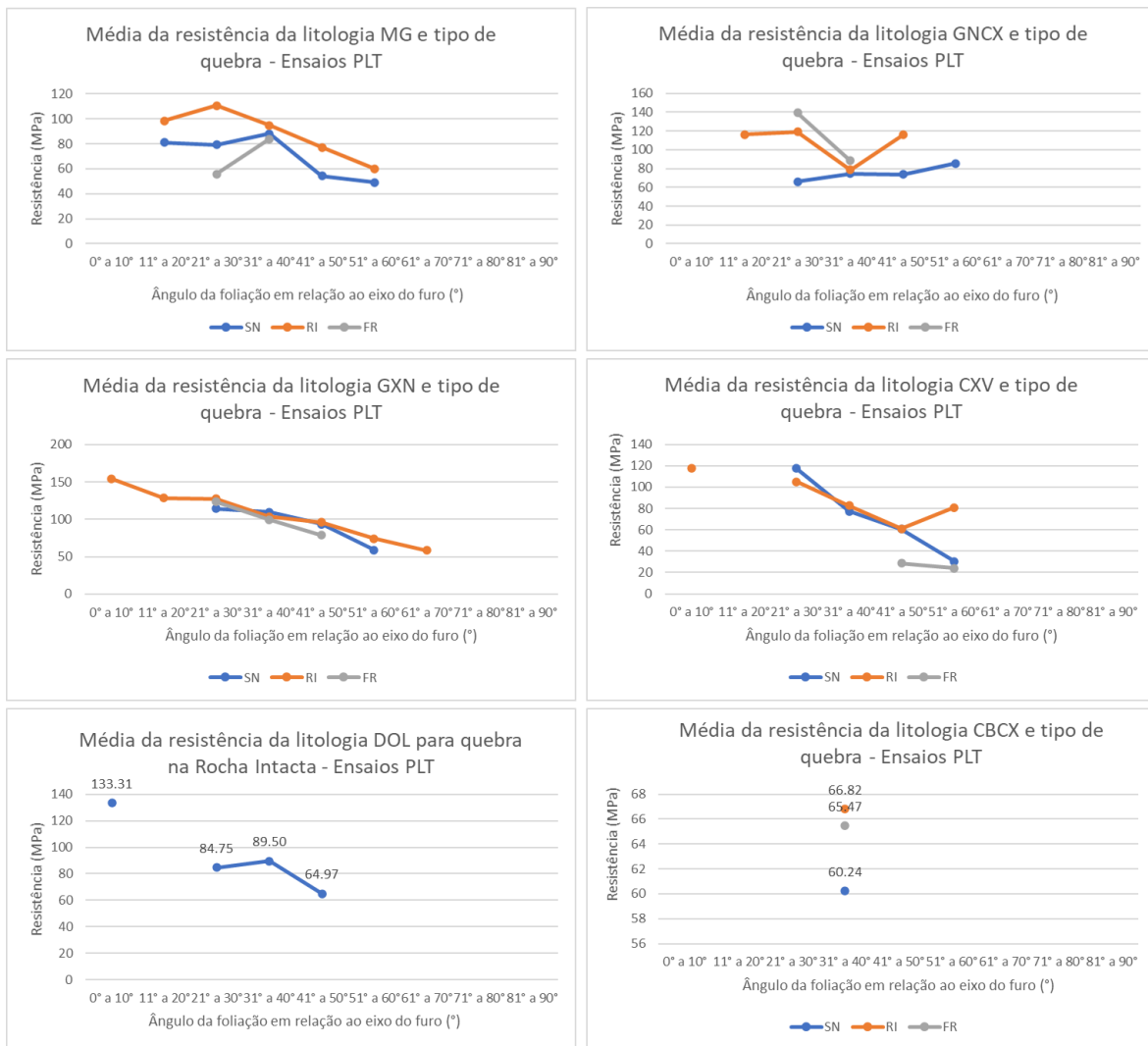
  

Ângulo/Resistência (MPa) - DOL	RI
0° a 10°	133.31
11° a 20°	
21° a 30°	84.75
31° a 40°	89.50
41° a 50°	64.97
51° a 60°	
61° a 70°	
71° a 80°	
81° a 90°	

Ângulo/Resistência (MPa) - CBCX	SN	RI	FR
0° a 10°			
11° a 20°			
21° a 30°			
31° a 40°	60.24	66.82	65.47
41° a 50°			
51° a 60°			
61° a 70°			
71° a 80°			
81° a 90°			

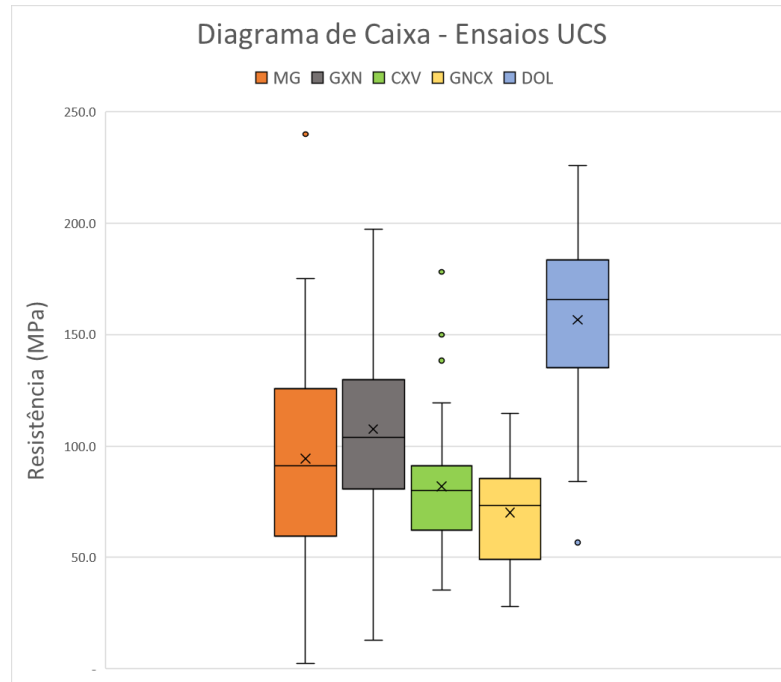
**Figura 4.6** – Resumos de ensaios de resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT conforme ângulo da foliação e o eixo do furo e o tipo de quebra



**Figura 4.7** – Gráficos representativos com os valores de resistência e os tipos de quebra de acordo com o eixo do furo em relação ao ângulo da foliação por litologia para ensaios a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT. (Sn= foliação; RI= Rocha Intacta; FR= Fratura)

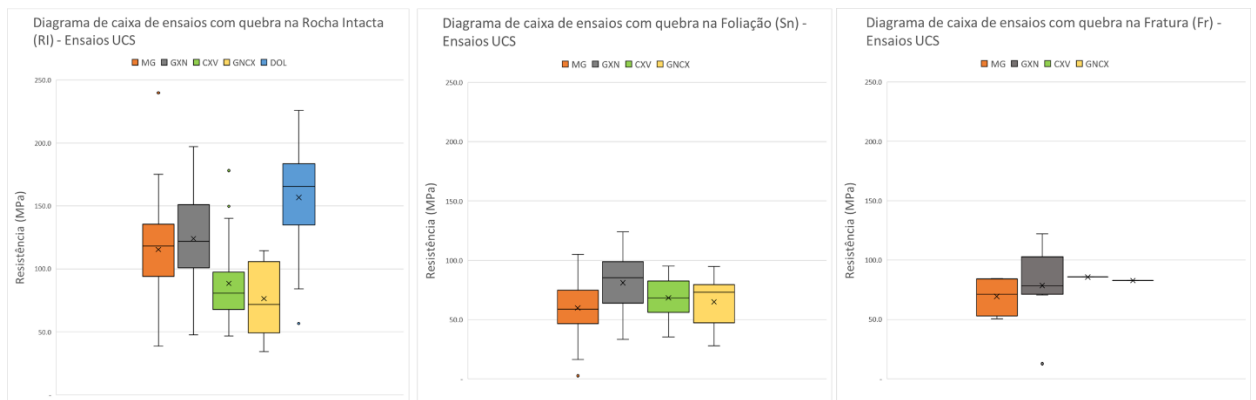
De modo a otimizar a visualização dos dados e eliminar *outliers*, diagramas de caixa para ensaios UCS e PLT foram elaborados, considerando valores de resistência e litologia (Figuras 4.8 e 4.10). Para que os valores de resistência à compressão não fossem diluídos, diagramas de caixa com informações de valores de resistência, litologia e tipo de quebra foram construídos para ensaios UCS e PLT (Figuras 4.9 e 4.11). As figuras fornecem uma variação visual das informações, evidenciando a influência do DOL em romper na rocha intacta e a susceptibilidade de litologias como GNCX de ter a ruptura influenciada pela foliação.





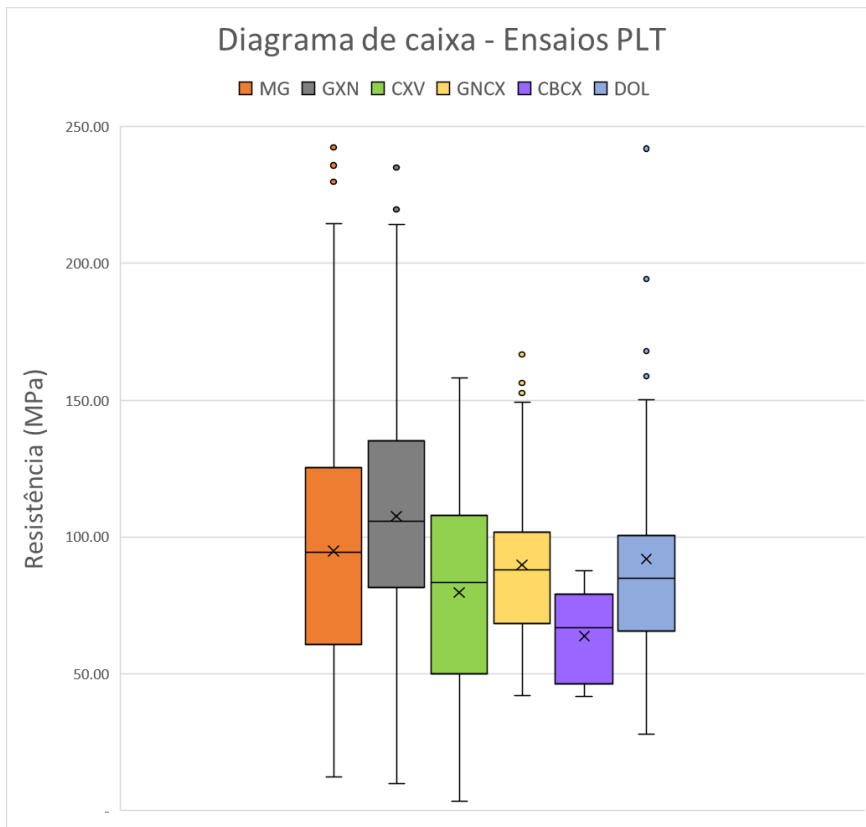
**Figura 4.8** – Diagrama de caixa para resultados de ensaios UCS

Mas quando se consideram todos os ensaios sem influência das estruturas, os valores podem ser mascarados ou diluídos em meio aos resultados (Figura 4.9).

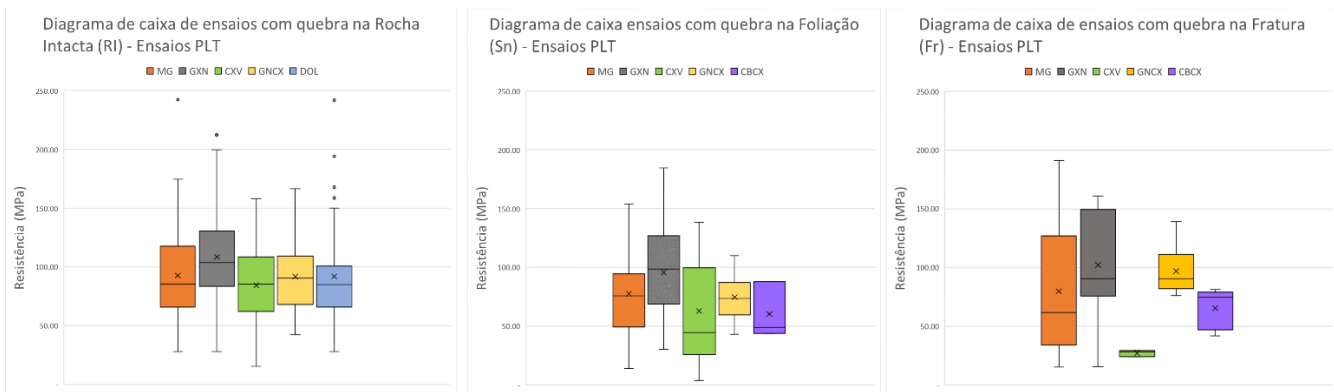


**Figura 4.9** – Diagramas de caixa por litologia e por tipo de quebra dos resultados dos ensaios UCS

O mesmo ocorre para ensaios PLT (Figura 4.10). Litologias como CBCX tendem a romper sob influência da foliação, mascarando os valores de resistência quando não analisados de acordo com o tipo de quebra.



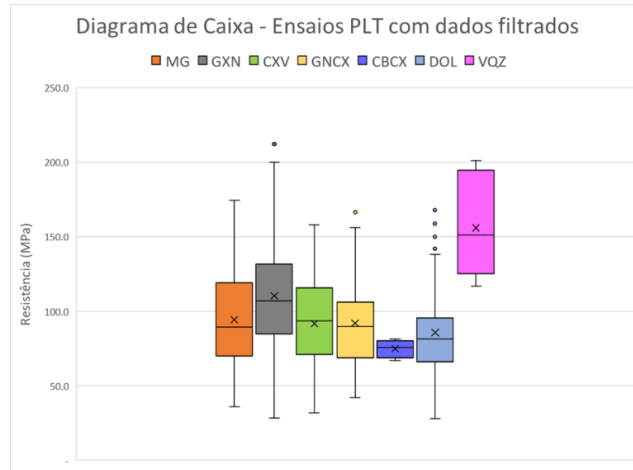
**Figura 4.10** - Diagrama de caixa para resultados dos ensaios da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT



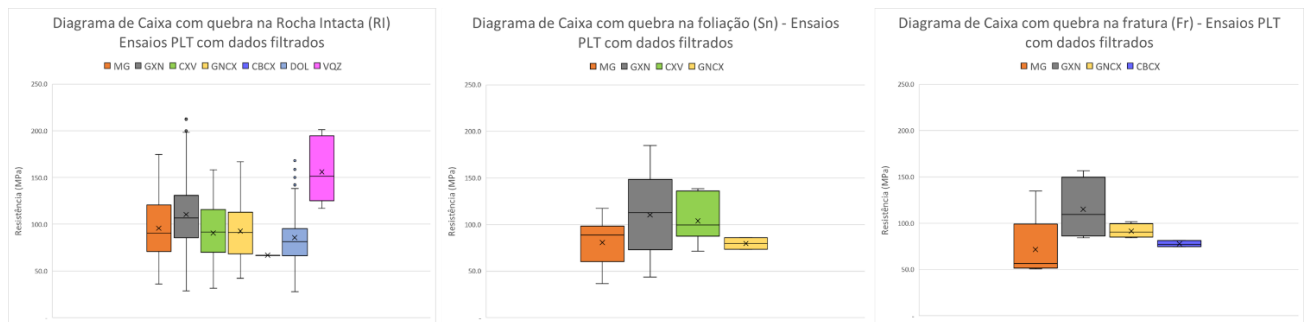
**Figura 4.11** – Diagramas de caixa por litologia e por tipo de quebra dos resultados dos ensaios da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT com valores convertidos

Filtrando mais os dados, foram considerados apenas os ensaios com tipo e geometria de quebra válidas (Figuras 3.15, 3.16, 3.17 e 3.18), com alta e média confiança (Figura 33.13) quanto à quebra, ilustrados nas Figuras 4.12 e 4.14. Para não mascarar os valores de resistência, diagramas de caixa foram feitos setorizando o local de quebra para PLT (Figura 4.13) e para UCS (Figura 4.15). É visível pela

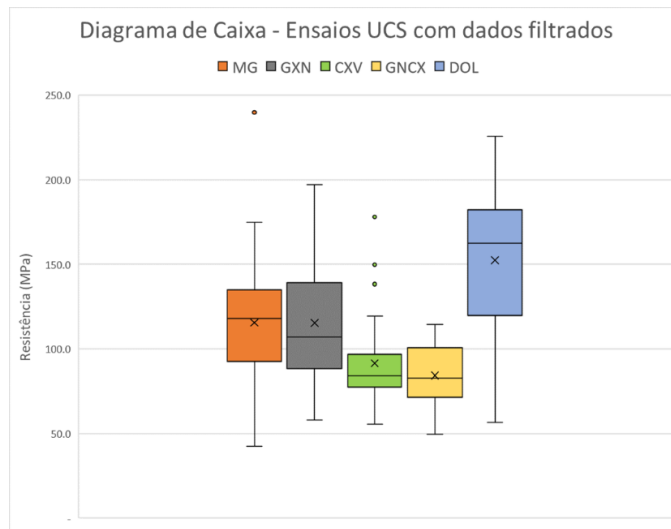
distribuição dos valores discrepantes e dos *outliers* a predominância da ruptura do DOL e do VQZ na rocha intacta e do GXN pela foliação (Figura 4.13).



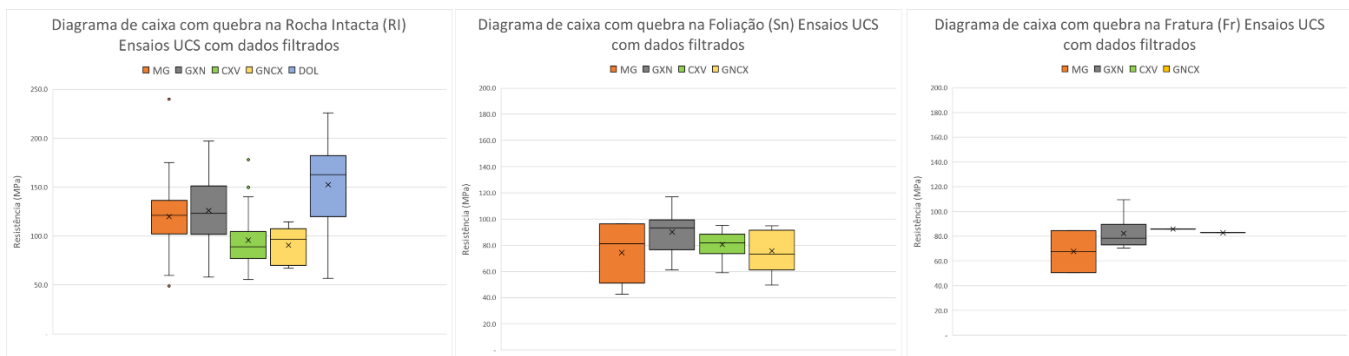
**Figura 4.12** – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT com tipo e geometria de quebra válida e nível de confiança médio e alto



**Figura 4.13** – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios da resistência a compressão uniaxial estimada a partir dos valores dos Is dos ensaios PLT com tipo e geometria de quebra válidas e nível de confiança médio e alto, setorizados por quebra (rocha intacta, foliação e fratura)

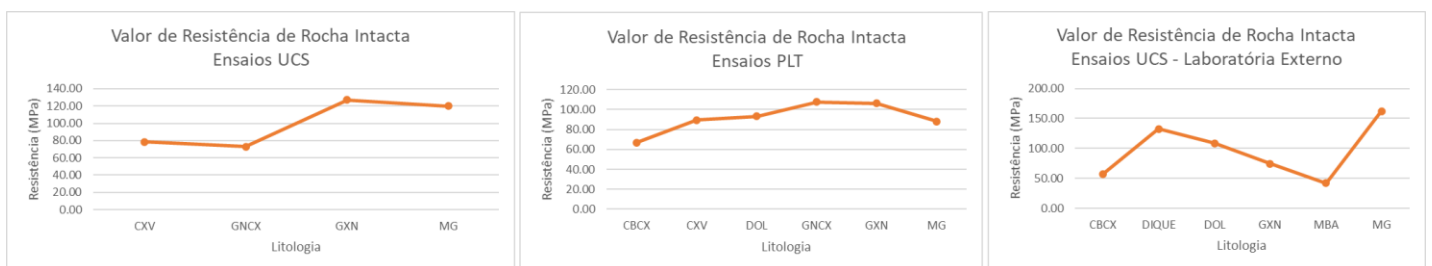


**Figura 4.14** – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios UCS com tipo e geometria de quebra válida e nível de confiança médio e alto.



**Figura 4.15** – Diagrama de caixa com resultados dos ensaios UCS com tipo e geometria de quebra válidas e nível de confiança médio e alto, setorizados por quebra (rocha intacta, foliação e fratura)

Após as análises, a Figura 4.16 traz uma comparação com os três tipos de ensaios de rocha intacta: ensaios UCS, ensaios PLT (uniaxiais) e ensaios UCS realizados em laboratório externo.



**Figura 4.16** – Comparação os tipos de ensaios para rocha intacta

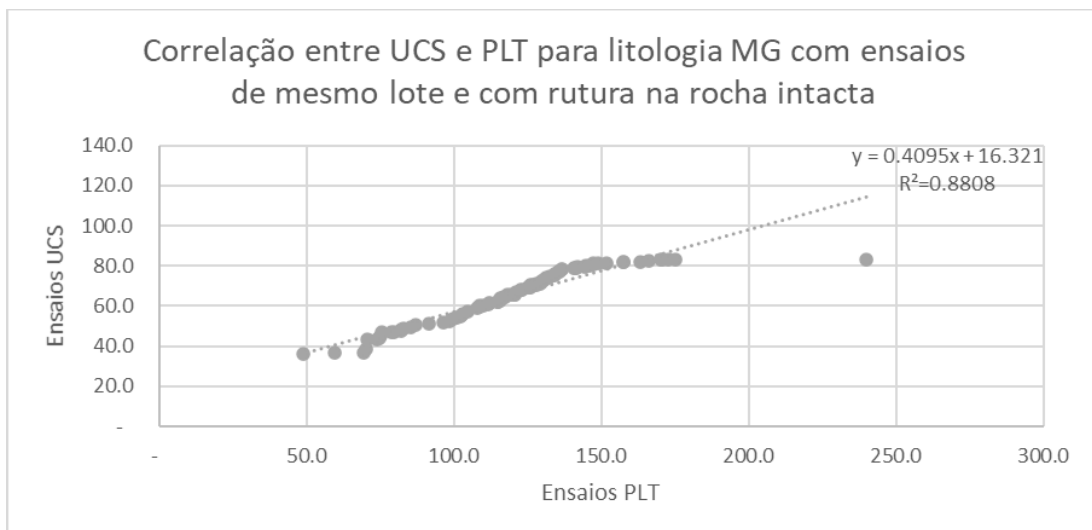
Uma comparação geral pode ser feita por litologia, por tipo de ensaio e por local de quebra, segundo a Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Valores de resistência de cada tipo de ensaio classificado por litologia e local de quebra.

Valores de resistência dos ensaios (MPa)

Litologia	Ensaio PLT			Ensaio UCS			Ensaio UCS (Laboratório Externo)	
	RI	Sn	Fr	RI	Sn	Fr	RI	Sn
CBCX	91.96	60.24	65.47				57.10	
CXV	83.53	62.89	27.15	88.50	68.30	88.52		
DOL				156.70		156.70	108.50	
GNCX	91.78	74.67	96.94	76.30	64.90	76.32		
GXN	108.46	95.89	102.00	124.00	81.00	125.42	74.52	93.40
MG	92.67	77.63	79.74	115.30	59.80	115.00	162.25	

É possível correlacionar os resultados de resistência à compressão de ensaios UCS e de ensaios PLT convertidos uma vez que diante de um mesmo lote amostral, com ambos ensaios, o  $R^2$  se apresenta acima de 0,8 (Figura 4.17).

**Figura 4.17** - Correlação entre UCS e PLT para litologia MG com ruptura na rocha intacta de mesmo lote amostral

Além de compreender os valores de resistência dos ensaios, é necessário fazer o controle de qualidade para avaliar a condição em que são realizados, como são interpretados e o tempo médio para realizar cada um. A Tabela 4.5 sumariza as informações referentes ao tempo médio para confecção de um lote de cada tipo de ensaio.

**Tabela 4.5** - Informações de tempo médio para ensaio de lotes de corpos de prova

Tipo de Ensaio	Tempo médio para ensaio de um lote (minutos)		Tempo Total de realização do Ensaio
	Preparo da amostra (da limpeza à fotografia)	Realização do Ensaio (Ensaio da amostra até a ruptura)	
PLT	12	34	46 minutos
UCS	10	25	35 minutos

Vale considerar que para amostras com maior resistência o tempo de ensaio até a ruptura aumenta. Além disso, ensaios de PLT com muita variação de resultados, isto é, maior que 30%, necessitam de que outras amostras sejam ensaiadas, elevando o tempo de execução. De modo geral, é muito mais fácil obter corpos de prova de PLT, mas para este estudo de caso, a escolha entre a obtenção de corpos de prova de UCS ou de PLT ocorre do mesmo modo, a partir de testemunhos de sondagem.

Neste cenário, com a contabilização do tempo é possível planejar e otimizar a execução e os resultados dos ensaios realizados.

## CAPITULO 5

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

---

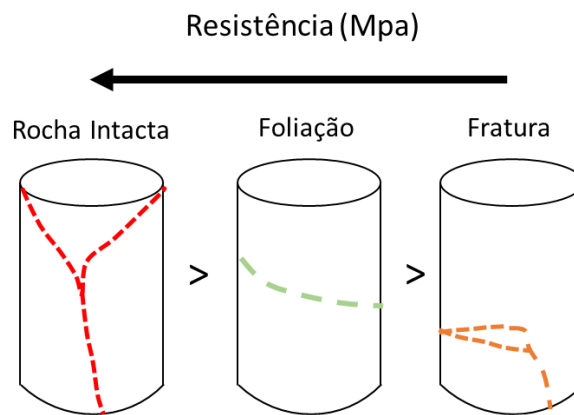
#### 5.1 Fatores que influenciam a resistência à compressão uniaxial

Com as informações supracitadas, no geral, foi possível identificar quatro fatores que influenciam nos valores de resistência à compressão uniaxial.

O primeiro fator é a litologia. Os resultados mostram a variação existente nos valores de resistência à compressão para cada litotipo. A composição mineralógica e a disposição dos minerais influenciam nos valores de resistência, uma vez que podem apresentar resistência maior quando próximo das regiões de silicificação e carbonatação, superestimando os valores de resistência. Desse modo, o arranjo mineralógico reflete a estrutura, que por sua vez também é um fator.

Representando a estrutura, o segundo fator é o tipo de ruptura. Resultados de ensaios com valores de resistência com quebra na rocha intacta, no geral, são superiores que os com influência de quebra na foliação, que por sua vez são superiores que os com influência de quebra na fratura (Figuras 4.3 e 4.7). Há alguns casos em que os valores de ruptura na fratura são superiores até que da rocha intacta, e isso pode ser fruto da rugosidade e preenchimento destas estruturas.

O terceiro fator é o ângulo da foliação em relação ao eixo do furo. Os valores ilustram o que é apresentado na literatura (Figura 2.11), os menores e maiores ângulos (próximos de  $0^\circ$  e de  $90^\circ$ ) mostram os valores máximos de resistência, e os próximos a  $45^\circ$ , os menores para UCS. Há uma queda nos valores de resistência conforme o aumento do ângulo da foliação em relação ao eixo do furo para os dados analisados, uma vez que há poucas informações com ângulo superior a  $60^\circ$ . A variação para valores de ruptura ao longo de fraturas também é aceitável, uma vez que estas apresentam condições de rugosidade distintas.



**Figura 5.1** – Ordem do valor da resistência de acordo com o tipo de quebra.

O quarto fator é a influência da geometria e do tipo de quebra com a classificação do nível de confiança. Ao filtrar as informações considerando o tipo e a geometria de quebra válidas (para UCS: fraturamento múltiplo; cisalhamento ao longo de um único plano e ruptura em forma de Y e para PLT: junção tripla, plano único, torcido), os dados foram refinados e se apresentaram mais assertivos (Figuras 4.13 e 4.15).

Quando se trata de comportamento de rocha intacta tem de ser considerada a escala. Toda amostra de rocha é única e representa um pedaço amostral do todo, sendo assim, a rocha intacta é considerada uma representação em escala regional. Aumentando a escala e se tratando de maciço rochoso, é necessário ensaiar e determinar o comportamento da rocha intacta e das descontinuidades para estimar o comportamento do maciço.

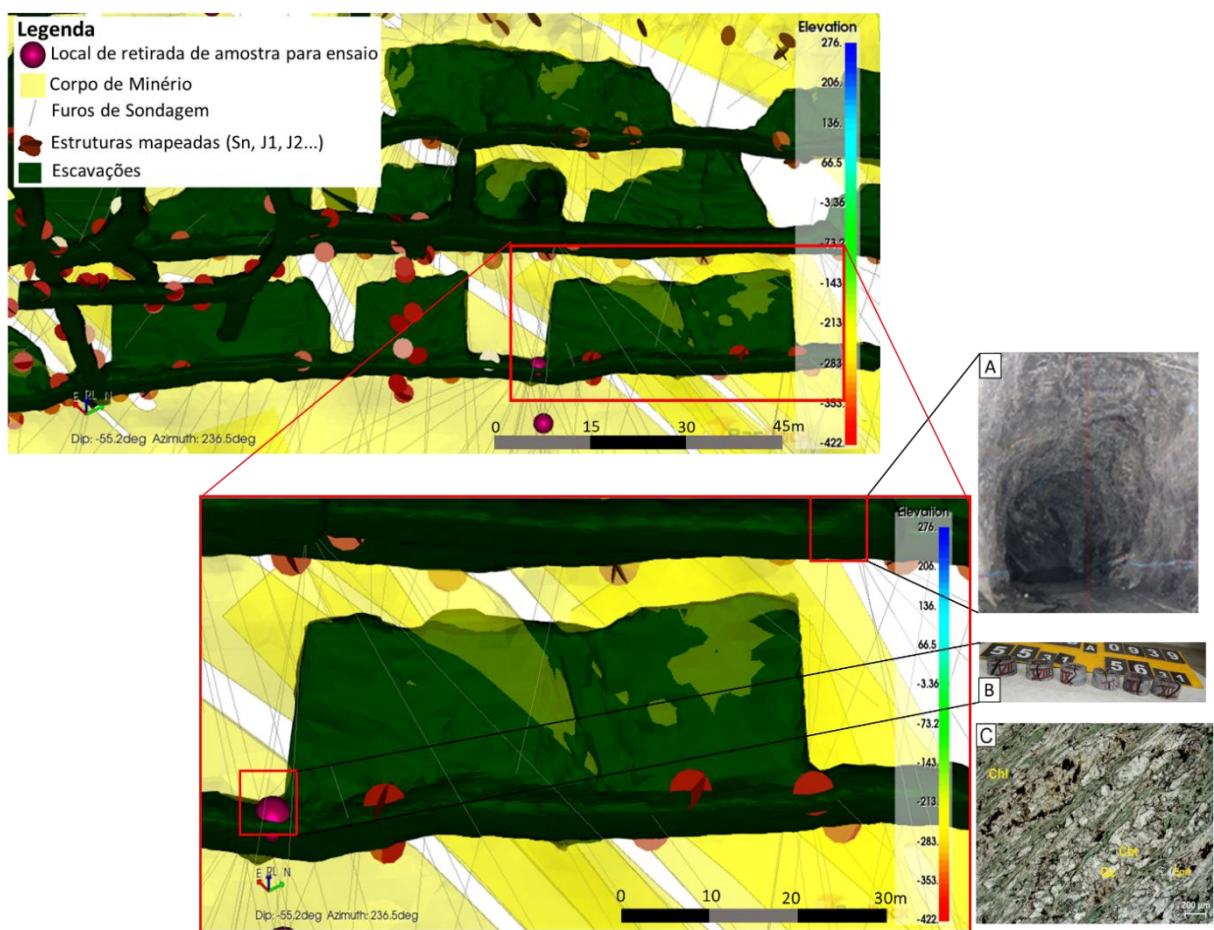
Analisando a escala de detalhe neste trabalho, uma lâmina delgada vista em microscópio evidencia fragmentações como compartimento de cristais com microfissuras, direções preferenciais de cristalização e de deformação, por exemplo. Em média escala, a rocha intacta mantém as características da lâmina (microescala) e se assemelha com o maciço rochoso (macroescala), que pode se apresentar fraturado, composto de blocos com as descontinuidades do meio anisotrópico.

Assim como o maciço rochoso na macroescala é um ente rígido, com interfaces que são as descontinuidades, as lâminas na microescala possuem componentes análogos, sendo os cristais o ente mais rígido e as interfaces entre cristais representam as superfícies de fraquezas, como microfissuras, análogas às descontinuidades macroscópicas. Unindo essas escalas, a rocha intacta é um ilustrativo do comportamento desses meios, podendo ser comparada com um modelo do estado físico em escala reduzida do maciço rochoso e em escala ampliada da rocha intacta.



Dessa maneira, tudo que é compreendido sobre a rocha intacta em laboratório é útil para compreensão do maciço rochoso em grande escala, e na microescala possui informações relevantes, pois os materiais são análogos em proporção de escala e se adequam à escala de mina do porte da Mina Ingá. As similaridades dos materiais guardam a proporção de escala e diante disso, serão analisados valores de ensaios laboratoriais setorizados por litologias.

As estruturas existentes no maciço rochoso (Foliação (Sn)), e famílias descontinuidades (J1, J2,...) são representadas também em microescala, uma vez que a direção da foliação é a mesma da orientação dos minerais em lâmina delgada da litologia CBCX (figura 5.2), uma vez que coincide com os domínios estruturais propostos pela metodologia de mapeamento. Os ensaios de rocha intacta também representam essas estruturas em seus resultados em média escala.



**Figura 5.2** - Escavações do nível 700 da Mina Ingá com a representação do corpo de minério, os furos de sondagem, a região de retirada de amostra para confecção de ensaios e as principais estruturas mapeadas nas galerias, como fraturas e foliação. No detalhe da imagem, a representação de A) Seção representando maciço rochoso em macroescala; B) maciço em média escala com ensaios de resistência; C) maciço em microescala com lâmina delgada de CBCX com a orientação dos grãos na mesma direção da foliação.

Devido a essa característica, os ensaios podem ser atribuídos na representação do maciço rochoso.

## 5.2 Comparação entre os ensaios e domínios geotécnicos

Fazendo uma comparação dos três tipos de ensaios, UCS e PLT (laboratório interno) e UCS de laboratório externo, algumas litologias refletem valores assertivos, como no caso do valor de resistência do CXV (Tabela 4.5). Há divergências em alguns valores de resistência, mas no geral tendem a ser semelhantes (Figura 4.16). A variação apresentada é aceitável uma vez que cada corpo de prova é uma representação única de uma litologia anisotrópica, além do número de amostras para cada tipo de ensaios variar consideravelmente, o que interfere na tratativa dos dados e como consequência, nos resultados. Além disso, a comparação não foi feita para o mesmo lote de amostras. A relação entre UCS e PLT aparentemente funcionou (Figura 4.16), sobretudo para litologias com pouca variação na composição mineralógica e com maior número de ensaios.

Os cinco domínios geotécnicos estruturais existentes na Mina Ingá (Figura 2.13), definidos pelo mapeamento de galeria subterrânea, são refletidos nos resultados de resistência. Os valores tendem a obedecer a ordem dos domínios estruturais, do mais para o menos resistente: xistos grafitosos (GXN), xistos não grafitosos (Xistos), dolomito (DOL) e veios de quartzo (VQZ).

Os domínios são classificados em três subdomínios (+ 1, + 2 e + 3) (Figura 2.13) seria adequado que as litologias também tivessem uma subclassificação antes dos ensaios dos corpos de prova serem realizados, uma vez que nem todas as litologias classificadas como metagrauvaca (MG) possuem a mesma característica, tendo eventualmente maior resistência devido a percolação de fluidos silicificados e carbonatados. Isto também ocorre com a litologia GXN, sobretudo quando próximo a zona mineralizada e cisalhada, que apresenta uma menor resistência nos ensaios. Isso reflete a grande distância entre valores máximos e mínimos de resistência para litologias com maior quantidade de ensaios, por estarem na região do *hangingwall* e do *footwall*.

A litologia mais resistente observada é o DOL e a menos resistente o GXN.

Os resultados de PLT apresentaram uma maior variabilidade, além de demandarem muito tempo para serem realizados, necessitam do fator de correção e de maior número de ensaios para compor um lote (Tabela 4.5).

## CAPITULO 6

### CONCLUSÕES

---

Com este trabalho foi possível verificar quatro fatores que influenciam nos valores de resistência à compressão uniaxial e fazer uma comparação entre os tipos de ensaios UCS, PLT e UCS de laboratório externo, e dos domínios estruturais geotécnicos definidos pelo mapeamento de galeria subterrânea.

O primeiro fator é a litologia, que se reflete nos valores de resistência. A litologia filito carbonoso (GXN) apresentou o menor valor de resistência e o dolomito (DOL) o maior valor. Essa informação enfatiza a importância da classificação correta de cada litologia antes dos ensaios. Além disso, a resistência foi mais baixa nas litologias que têm a foliação bem marcada. Isso ilustra que no geral, rochas mais foliadas e com maior presença de minerais micáceos orientados apresentam menor resistência. O segundo fator é o local de quebra, que reflete as descontinuidades existentes nas rochas, e como consequência no maciço rochoso, as quais têm influência nos resultados de resistência, nessa ordem: fratura, foliação e rocha intacta, do menor para o maior. Os casos em que a fratura apresenta maiores valores de resistência que da foliação e até que da rocha intacta, são justificados pela rugosidade da estrutura planar e/ou material de preenchimento mais resistente. O terceiro fator é o ângulo da foliação em relação a  $\sigma_1$ , que com os dados presentes, segue a relação citada na literatura, com maiores valores de resistência próximo ao ângulo  $0^\circ$  e menores para ângulos entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ . O quarto fator é a influência da geometria e do tipo de quebra junto ao índice de confiança na classificação das amostras pós ruptura. Classificar as informações referentes ao tipo de ruptura tem grande reflexo nos resultados e interpretações.

A correlação do UCS e do PLT funcionou, sobretudo para litologias que possuem pouca variação na classificação litológica, como presença de setores silicificados e carbonatados e com mais de 30 ensaios. Para litologia metagrauvaca (MG), ensaios UCS e PLT de mesmo lote possuem  $R^2$  de 0.88. Comparando os ensaios UCS e PLT com UCS de laboratório externo, algumas litologias e estruturas possuem boa correlação. Para valores que destoam, a variação é aceitável, uma vez que os corpos de prova são anisotrópicos, o número para cada tipo de ensaio varia bastante (alguns inclusive com menos de 30 corpos de prova), e a comparação não foi feita para o mesmo lote.

Há um claro reflexo dos cinco domínios geotécnicos estruturais definidos pelo mapeamento de galeria subterrânea nos resultados de resistência. Os valores tendem a obedecer a ordem dos domínios estruturais, na ordem de resistência do menor para o maior: xistos grafitosos (GXN), xistos não grafitosos (Xistos), dolomito (DOL) e veios de quartzo (VQZ). Assim como os domínios são classificados em subdomínios (+ 1, + 2 e + 3), é recomendável que a classificação das litologias adote

um critério semelhante quanto a composição e presença de silicificação e carbonatação de cada litologia antes de ensaiar os corpos de prova, de modo a diminuir a variabilidade dos dados.

Os dados ilustram que ensaios de resistência permitem estimar parâmetros e características para o maciço rochoso, mostrando que há variabilidade espacial da resistência para cada litologia. Além disso, ilustram que locais com uma litologia com resistência baixa, não necessariamente indicam condições de instabilidade, uma vez que há outras estruturas que podem influenciar na condição geotécnica do maciço, como fraturas e foliação, por exemplo.

Considerando a alta anisotropia do sistema, sobretudo pela quantidade de eventos deformacionais e mineralizantes que a região foi submetida, é recomendável ter subclassificações para as litologias metagrauvaca (MG) e filito carbonoso (GXN), sobretudo em regiões que se apresentam silicificadas ou dolomitizadas, aumentando a resistência do corpo de prova.

Devido ao tempo necessário para ensaiar um lote de corpos de prova de ensaios PLT (31% a mais do tempo para ensaiar um lote de corpos de prova UCS) e diante de grande número de lotes a serem amostrados, é recomendável que sejam realizados apenas ensaios UCS, atingindo o objetivo do ensaio em um menor tempo.

Para trabalhos futuros é sugerido analisar a relação entre UCS e PLT para amostras exclusivas do mesmo lote amostral, bem como fazer uma classificação criteriosa das litologias antes de ensaiar os corpos de prova, evitando viés de interpretação prévio da descrição da Geologia de Mina que considera o critério de mineralização frente ao critério geotécnico. É sugerido também que a altura dos corpos de prova passe a ter 108mm de altura (e não 100mm), obedecendo a relação recomendada de altura 3 vezes o diâmetro do corpo de prova.

Os objetivos do trabalho foram concluídos, uma vez que as informações sumarizadas sintetizam as variáveis que podem vir a influenciar na resistência à compressão e contribuem para o planejamento de lavra, para o dimensionamento das escavações, para assertividade na escolha do sistema de suporte, otimizando a produção e mantendo as escavações seguras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17 (1), p. 1–29.
- Azevedo, I. C. D. & Marques. E. A. G. Introdução à Mecânica das Rochas – Caderno Didático 85, Viçosa: UFV. Ed. 2002.
- Barton N., Lien, R., Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, p.189-236
- Basu, A., Mishra, D. A., Roychowdhury, K., 2013 - Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. article in bulletin of engineering geology and the environment · DOI 10.1007/s10064-013-0505-4.p.464
- Batista, G.A.P. and Campos, M.P. 2015. Aplicações Geotécnicas para Redução da Diluição Operacional na Lavra Subterrânea: Estudo de Caso Mineração Serra Grande. *In 4º Congresso Brasileiro de Túneis – CBT: 9*, p. 125-129
- Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *South African Institution of Civil Engineering*, p.335-343.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. New York, John Wiley & Sons, p. 250.
- Borges, C. C. A, Campos, L. M., 2019. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS DO GREENSTONE BELT/CRIXÁS. Acordo de cooperação científica entre Universidade de Brasília e AngloGold Ashanti –Mineração Serra Grande. Instituto de Geociências – IG - CRIXÁS GOLD PROJECT, Relatório Interno.
- Carvalho R.S. 2005. Mapeamento Geológico Estrutural da Faixa Leste-Oeste ao Norte do Greenstone Belt de Crixás (GO). Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, p. 45.
- Carvalho, A. D. 2018. – Correlação entre os modelos geotécnicos de curto e médio prazo da Mina Ingá, Crixás, Goiás. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. P. 4-39.
- Castoldi, M.A.S. 2015. *O distrito aurífero de Crixás-GO: caracterização do novo corpo de minério Ingá*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 177 p.
- Deere DU, Miller RP (1966) Engineering classification and index properties for intact rocks. Tech Rep Air Force Weapons Lab, New Mexico, no AFNL-TR, pp 65–116
- Deere D.U. 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1:17-22.
- Everall, T. J., Sanislav, I. V., 2018 - The Influence of Pre-Existing Deformation and Alteration Textures on Rock Strength, Failure Modes and Shear Strength Parameters. *Artigo Geosciences* 2018, 8, 124; doi:10.3390/geosciences8040124 p.8
- Fuck, R.A 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica da Província Tocantins. In: SBG, Simp. de Geologia do Centro-Oeste, IV. Anais, p. 184-187.
- Fuck et. al, 2014. Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research* 244 (2014) 53–74
- Gráficos Mohr Plotw Tensilew FailureID\_up\_to\_33\_cases – Relatório Interno. AngloGold Ashanti Mineração Serra Grande, 2019. Lote 1.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Balkema, 215 p.

Milli, B. C. 2021, Análise dos fatores condicionantes da resistência à compressão dos litotipos...

ISRM (1985) - Int. Soc. of Rock Mechanics. Commission on Testing Methods. Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. And Geomech. Abstr.* 22, 51-60.

ISRM (1981) International Society For Rock Mechanics – Rock characterization, testing and monitoring – ISRM suggested methods. E.T.Brown, 211 p.

ISRM (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. ISRM Commission on standardization of laboratory and field tests. *Int. J. of Rock Mech. And Min. Sci., Geomechanical Abstracts*, vol. 16.

Jost, H. & Oliveira, A.M. 1991. Stratigraphy of the greenstone belts, Crixás region, Goiás, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **4**: 201-214.

Jost, H. 2009. EVOLUÇÃO CRUSTAL E DEPÓSITOS MINERAIS DO BLOCO ARQUEANO DE GOIÁS. *In* II Simpósio Brasileiro de Metalogenia. Épocas metalogenéticas brasileiras. Ciclos tectônicos e Modelos Metalogenéticos. Gramado 2009.

Jost, H., Chemale Jr., Dussin, A. I., Tassinari, G. C. C., Martins, R., 2009 – Idade das rochas encaixantes e da mineralização aurífera da Mina III, Greenstone Belt de Crixás, Goiás. *In*: II Simpósio Brasileiro de Metalogenia. Épocas metalogenéticas brasileiras. Ciclos tectônicos e Modelos Metalogenéticos. Gramado 2009. 07 a 10 de junho

Jost, H., Scandolaro, J.E. 2010. Características estruturais, petrográficas e geoquímicas de enxame de diques máficos intrusivos em rochas metassedimentares do greenstone belt de Crixás, Goiás. *Geologia USP. Série Científica*, **10**: 119-134.

Jost, H., Carvalho, M. J., Rodrigues, V. G., Martins, R., 2014. Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras - Metalogênese dos *Greestone Belts* de Goiás p.144-146

Jost, H., Rodrigues, V. G., Carvalho, M. J., Chemale Jr, F., Marques, J. C., 2012. Estratigrafia e geocronologia do greenstone belt de Guarinos, Goiás. *In*: Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP, Sér. Cient., São Paulo, v. 12, n. 2, p. 1-48,

Li, Yanrong - *Handbook of Geotechnical Testing: Basic Theory, Procedures and Comparison of Standards*, 12/2019 - pag. 76

Marini, O.J., Fuck, R.A., Danni, J.C.M., Dardenne, M.A., Loguercio, S.O.C., Ramalho, R., Coutinho, M.G., 1984. As Faixas de Dobramentos Brasília, Uruacu e Paraguai-Araguaia e o Maciço de Goiás. *In*: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Derze, G.R., Asmus, H.E. (Org.), *Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM, p.251–303.

Massucato, A.J. 2004. Relatório de Geologia Estrutural - Aspectos Estruturais do Greenstone Belt de Crixás – GO, Crixás, AngloGold Ashanti, 30p. Relatório Interno.

Perfil Estratigráfico das Escavações da Mineração Serra Grande. Relatório Interno, 2021.

Pimentel M.M. & Fuck R.A. 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology*, 20: 375-379.

Pimentel, M.M., Jost, H., Fuck, R.A. 2004 O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. *In*: Mantesso Neto, V. et al. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 355-368.

Pimentel, M.M. 2016, - The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. Article. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl 1): 67-82

Procedimento de Mapeamento Geotécnico – Operações Subterrâneas – Relatório Interno. p.4.

Ramires, J.E.F., G.A.P. Batista, J.H. da Silva, M.P. Campos and J.M. Seery. 2019. Q-system classification applied to geotechnical-structural domain mapping. *In*: proceedings of the International Society of Rock Mechanics conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development, Foz do Iguaçu. 520-527

Ramires et al. 2020 - Q-System Implicit Block Modelling for the Prediction of Ground Conditions at Ingá Underground Gold Mine. *In*: ARMA 2020.

- Ramamurthy, T. (1993) Strength, Modulus Responses of Anisotropic Rocks: In: Hudson, J.A., Ed., Compressive Rock Engineering, Vol. 1, Pergamon, Oxford, 313-329.
- Sabóia, L.A. & Teixeira, N.A. 1980. Lavas ultrabásicas da unidade basal do greenstone belt de Crixás (GO): Uma nova classe de rochas ultrabásicas no Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 10: 28-42.
- Souza, R. G. 2018 – Caracterização do corpo aurífero Mangaba, estrutura IV, greenstone belt de Crixás, GO. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências, 12 p.
- Sobiesiak, M.S. 2011. – Caracterização de depósito aurífero no corpo Pequizão, Crixás – GO. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências, 23 p.
- The ISRM Suggested Methods for a Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014 – International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods.* 29 p.
- Theodoro, S.M.C.H. 1995. Ambiente de sedimentação da Formação Ribeirão das Antas, Grupo Crixás. – Goiás. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Brasília, 44 p.
- Vallejo, L. I. G. 2005; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C.. Ingeniería Geológica - Parte I e II. Madrid: Prentice Hall, 2010. ISBN 84-205-3104-9.
- Vutukuri, V. S.; R. D. Lama & S. S. Saluja (1974). Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Vol. 1, 1st edition, Clausthal: Trans Tech Publications, 280 p.

**Programas e conjuntos de softwares:**

- GEM4D 2021. Basrock. Beta-Version. Version 1.8.4.4, Windows 7 to 10, OpenGL 3.2. Frans Basson. Basrock.net. Beta-stage
- MICROSOFT 2016. Project for Windows 10, version Excel 7.1: project planning software. Redmond, Microsoft Corporation.