



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



**MARCELA CHINEN MACHADO**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA**  
**CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PELO MÉTODO *GEOLOGICAL***  
***STRENGTH INDEX* - GSI**

**OURO PRETO - MG**

**Janeiro de 2022**

**MARCELA CHINEN MACHADO**

**DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PELO MÉTODO *GEOLOGICAL  
STRENGTH INDEX - GSI***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas/Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Elton Destro  
(*DEMIN/EM/UFOP*)

**OURO PRETO - MG**

**Janeiro de 2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M149d Machado, Marcela Chinen.

Desenvolvimento de aplicativo computacional para classificação de maciços rochosos pelo método Geological Strength Index - GSI. [manuscrito] / Marcela Chinen Machado. - 2022.

41 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

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

1. Mecânica de rochas. 2. Geotecnia. 3. Software - Desenvolvimento. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.121

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



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezessete dias do mês de janeiro de 2022, às 15h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da discente **Marcela Chinen Machado** matrícula: 17.2.1356, intitulado: **“DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS PELO MÉTODO GEOLOGICAL STRENGTH INDEX - GSI”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho Prof. Dr. Elton Destro, Prof. Dr. Daniel Silva Jaques, e Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu à discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas à candidata sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues, segundo, o Prof. Dr. Daniel Silva Jaques e, em último, o Prof. Dr. Elton Destro. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou à discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão da discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que a discente foi aprovada por unanimidade, com a nota 9,5 (nove vírgula cinco). A discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão.

Ouro Preto, 17 de janeiro de 2022.

Presidente: Prof. Dr. Elton Destro

Membro: Prof. Dr. Daniel Silva Jaques

Membro: Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues

Discente: Marcela Chinen Machado

À minha família, que a cada dia me faz uma profissional e uma pessoa melhor.

## AGRADECIMENTOS

À minha família pelo suporte e apoio incondicional em tudo que sempre quis fazer. A motivação e a vibração a cada conquista são essenciais para continuar seguindo, bem como o acolhimento perante os fracassos. Agradeço especialmente aos meus pais, Rosiney e Neila, por serem meu exemplo e meu porto seguro.

À minha irmã Carol por ser minha referência de dedicação, compaixão e modelo profissional.

À querida colega e amiga Laura pelas incontáveis discussões técnicas e suporte nas mais diversas dificuldades.

Ao geólogo e companheiro Victor pela motivação e toda a ajuda com a tradução de termos técnicos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elton Destro por todo o conhecimento compartilhado e compreensão nos momentos difíceis, e principalmente pela dedicação aos alunos e a esse trabalho, além do acolhimento e orientação nas inúmeras incertezas que surgiram nesse processo.

Ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto por propiciar a realização desse estudo e por tudo que me foi oferecido ao longo dos anos.

A todos os professores que, durante o curso de Engenharia de Minas, dividiram comigo um pouco do seu conhecimento e se dedicaram a me tornar uma profissional melhor.

Aos meus colegas de turma pelos anos de convívio, somando muitas risadas, estudo e diversão, mesmo nos momentos em que a pandemia nos separou fisicamente e o ensino remoto nos trouxe uma realidade nova a qual tivemos que nos adaptar. Tudo é mais fácil quando temos uns aos outros.

A todos os colegas da Mineral Geologia pelo apoio diário e pela compreensão nos momentos em que o curso exigiu mais de mim.

“A vida não é sobre o que você faz. É mais sobre como você faz.”

**Lulu Wang**

## RESUMO

Classificações geomecânicas são extremamente necessárias para avaliar a qualidade de maciços rochosos, especialmente em formações geológicas complexas. Diversos métodos foram criados nas últimas décadas, na qual se destacam o *Rock Quality Designation* (RQD), Sistema Q e *Rock Mass Rating* (RMR). O *Geological Strength Index* (GSI) surge para a permitir a estimativa de propriedades dos maciços rochosos e sua aplicação no critério de ruptura de Hoek-Brown, em casos de rochas com comportamento homogêneo e isotrópico, a partir de dados geológicos de campo, inseridos de forma qualitativa. Ao longo dos anos, várias modificações foram feitas, resultando no ábaco atual do GSI, de Hoek & Marinos (2000), bem como o surgimento de outro ábaco para rochas heterogêneas e algumas propostas de quantificação. Com o intuito de facilitar a aplicação do GSI, este trabalho objetiva desenvolver um aplicativo computacional em que seja possível plotar dados de maciços rochosos no ábaco, permitindo a sua classificação a partir de uma interface gráfica. Utilizou-se a plataforma IDE do Lazarus, na linguagem de programação Pascal, para criar o programa, no qual pode-se avaliar até 20 unidades geotécnicas ao mesmo tempo, bem como plotar um ponto no ábaco e variar sua posição em tempo real. O aplicativo foi validado com dados de mapeamento geotécnico da Mina Capiro, em Rio Branco do Sul/PR, no qual foi possível classificar o maciço segundo o GSI de forma visual. Comparando com o cálculo do GSI a partir da soma dos valores de condição de superfície (SCR) e da estrutura da rocha (SR), como proposto por Hoek *et al.* (2013), percebe-se que há pouca variação nos resultados, considerada desprezível pela precisão requerida pelos autores. Percebe-se também que o aplicativo atingiu o objetivo de permitir ao usuário a classificação segundo o GSI de forma simples e intuitiva, tornando-se uma boa contribuição à comunidade científica se for distribuído de forma livre, ampliando o acesso de profissionais da área de geotecnia a programas computacionais específicos.

**Palavras-chave:** Mecânica de rochas, Classificação geomecânica, *Geological strength index*, Desenvolvimento de *software*

## ABSTRACT

Geomechanics classification systems are extremely necessary to assess rock mass quality, especially in complex geological formations. Many methods were created in the last decades, like *Rock Quality Designation* (RQD), Q-System and *Rock Mass Rating* (RMR). The *Geological Strength Index* (GSI) arises to allow rock mass properties estimations from field data entered qualitatively and its application at Hoek-Brown failure criterion, for rocks of homogeneous and isotropic behaviour. Over the years, the method faced many modifications, resulting in the current GSI chart, from Hoek & Marinos (2000), as well as the development of another chart for heterogeneous rocks and some quantification proposals. In order to facilitate the application of GSI, this study aims to develop a computational application in which is possible to plot rock mass data at a chart, allowing its classification in a graphical interface. The IDE Lazarus platform was used to create the program, in Pascal programming language, in which up to 20 geotechnical units can be evaluated at the same time, as well as the plotting and real-time manipulation of a point's position at the chart. The app has been validated with geotechnical mapping data of Capiru mine, in Rio Branco do Sul, state of Paraná, in which it was possible to visually classify the rock mass according to GSI. Comparing this method with the GSI calculation from the sum of surface condition (SCR) and rock structure (SR) values, as proposed by Hoek et al (2013), minimal variance was verified between the results, which can be considered insignificant by the precision required by the authors. From those results, it is possible to conclude that the app reached its goal of allowing the user to classify according to GSI in a simple and intuitive way, and being freely distributed also expands the access of geotechnical professionals to some specific computational programs thus becoming a fine contribution to the scientific community.

**Keywords:** Rock mechanics, Geological strength index, Geomechanics classification systems, Software development

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ábaco original do GSI proposto por Hoek & Marinos (2000). .....	15
Figura 2: Ábaco do GSI para rochas heterogêneas proposto por Hoek & Marinos (2000). ....	16
Figura 3: Aplicação do GSI segundo diferentes escalas de projeto. ....	18
Figura 4: ábaco do GSI de Hoek e Marinos (2000) com as escalas A e B e seus respectivos intervalos .....	21
Figura 5: Gráfico com a relação dos valores de GSI obtidos pelo ábaco e pelo somatório das escalas A e B.....	22
Figura 6: Interface do programa <i>Lazarus</i> . Em vermelho, encontra-se o menu do <i>software</i> ; em verde, o editor de códigos e, em amarelo, o inspetor de objetos. O formulário, onde se faz a interface gráfica, consta no retângulo laranja, e as mensagens estão no polígono azul .....	25
Figura 7: Aba principal do <i>GSI Plotter</i> . .....	27
Figura 8: Imagem do <i>Autocad</i> com o ábaco original do GSI inserido. Os círculos vermelhos correspondem aos pontos que formam as linhas de valores de GSI; os azuis correspondem aos extremos das linhas de N/A e, o ponto verde, simboliza a origem. As linhas de cor magenta foram utilizadas para definir a posição dos pontos a partir dos seus comprimentos, como consta grifado em amarelo no lado esquerdo da ilustração. ....	28
Figura 9: Imagem da planilha da aba “Inserir Pontos” na qual é possível adicionar os dados de caracterização dos maciços rochosos. ....	30
Figura 10: Aba "Sobre o aplicativo". ....	31
Figura 11: Arquivo de texto criado a partir do aplicativo. ....	33
Figura 12: Resultado do ábaco do GSI a partir da plotagem dos dados das unidades geotécnicas da Mina Capiçu. ....	34
Figura 13: Gráfico com os valores de GSI obtidos de diferentes formas, no qual é possível observar a pouca variação entre os resultados. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição e intervalo de valores utilizado no SCR com base no ábaco de Hoek & Marinos (2000). .....	20
Tabela 2: Descrição e intervalo de valores utilizado no SR com base no ábaco de Hoek & Marinos (2000). .....	20
Tabela 3: Tabela com os pontos medidos no <i>Autocad</i> e os valores obtidos, bem como as posições que representam os extremos das linhas desenhadas no ábaco no <i>Lazarus</i> .....	29
Tabela 4: Caracterização das unidades geotécnicas segundo SCR e SR.....	32
Tabela 5: Valores de GSI obtidos do ábaco e da soma de SCR e SR para as unidades geotécnicas da Mina Capiçu. ....	35

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. OBJETIVO GERAL.....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS.....	10
3.2. ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICO - GSI.....	12
3.2.1. Origem e Modificações .....	13
3.2.2. Aplicação e Limitações do GSI.....	17
3.2.3. Propostas de Quantificação do GSI.....	18
3.3. CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK-BROWN .....	23
3.4. PROGRAMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	24
3.5. O <i>LAZARUS</i> .....	24
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. DESENVOLVIMENTO DO <i>GSI PLOTTER</i> .....	26
4.2. VALIDAÇÃO DO APLICATIVO.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
6. CONCLUSÕES.....	37
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

A natureza complexa e o comportamento incerto devido a anisotropias e a presença de inconformidades fazem dos maciços rochosos um material de difícil modelagem empírica e numérica. Além disso, a modelagem de forma precisa para reduzir as incertezas associadas ao processo de caracterização é um trabalho complicado (HUSSIAN *et al.*, 2020).

Por isso, as diversas classificações geomecânicas surgem de forma a ajudar os profissionais a definir índices de qualidade dos maciços rochosos e, conseqüentemente, prever seu comportamento. Isso permite a definição de parâmetros da estrutura que busquem evitar sua ruptura, ou mesmo a implantação de obras de estabilização ou contenção.

De acordo com Fiori & Carmignani (2009), os sistemas de classificação mais utilizados são o Q de Barton *et al.* (1974) e o RMR de Bieniawski (1974). Com suas limitações, o *Geological Strength Index* – GSI de Hoek surge em 1994 para classificar maciços rochosos com base em observações geológicas de campo, com a proposta de ser um método simples e rápido de ser utilizado, além de permitir a estimativa de propriedades dos maciços para a aplicação no critério de ruptura de Hoek-Brown.

Na geotecnia, diversos *softwares* são utilizados para facilitar e agilizar a análise dos profissionais, desde os mais simples até os mais complexos, que permitem fazer em minutos uma modelagem que poderia levar meses. Porém, para a classificação geomecânica, poucos são os programas disponíveis no mercado e mesmo os existentes não costumam classificar segundo o GSI, mesmo sendo um parâmetro essencial para o critério de Hoek-Brown.

Além disso, os custos elevados da aquisição das licenças dos *softwares* dificultam a popularização da modelagem geotécnica, restringindo profissionais e empresas que não dispõem de recursos financeiros à aplicação de métodos menos precisos para realizar seus trabalhos. O desenvolvimento de *softwares* livres permite o acesso desses engenheiros e geólogos a uma gama de possibilidades antes elitizadas, restritas a grandes empresas, fazendo com que a ciência e a sociedade ganhem com a qualidade do serviço prestado pelos profissionais, aumentando a segurança dos empreendimentos e o aproveitamento dos recursos naturais.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um programa computacional capaz de plotar dados referentes às condições de superfície e estruturais de maciços rochosos de forma a classificá-los segundo o método do Índice de Resistência Geológico (*Geological Strength Index* - GSI) de Hoek & Marinos (2000).

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Apresentar a origem e modificações do método GSI ao longo dos anos, bem como as propostas de uso com dados quantitativos, além de suas aplicações e limitações;
- 2) Discutir as formas qualitativa e quantitativa da aplicação do GSI;
- 3) Desenvolver um aplicativo computacional que permita ao usuário plotar dados geológicos de campo e classificar um maciço rochoso segundo o GSI, que possa ser distribuído em regime de licenciamento aberto para a comunidade científica;
- 4) Mostrar a diferença do uso do ábaco original do GSI e o resultado a partir da soma dos valores dos eixos proposta por Hoek *et al.* (2013) utilizando as escalas A e B, e discutir os resultados.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, informações bibliográficas sobre as principais classificações geomecânicas e o método do GSI, bem como *softwares* de classificação de maciços rochosos e o programa Lazarus são trazidas de forma a embasar o trabalho.

#### 3.1. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

Um maciço rochoso é essencialmente heterogêneo, anisótropo e descontínuo, composto por blocos de rocha intacta e descontinuidades, na qual sua complexidade é produto da evolução geológica a que foi submetido. A definição das características que condicionam seu comportamento perante as solicitações é chamada de caracterização geomecânica, e a hierarquização e organização desses atributos a fim de se associar comportamentos consiste na classificação geomecânica (SERRA JUNIOR & OJIMA, 1998).

Fiori & Carmignani (2009) contam que os sistemas de classificação geomecânica surgiram com Terzaghi em 1946, aparecendo mais classificações ao longo do tempo devido ao aumento de obras e do entendimento de diversos fatores antes desconhecidos. Os autores também afirmam que as mais utilizadas são as classificações de Barton *et al.* (1974) e Bieniawski (1974), que aplicam parâmetros quantitativos e introduzem índices de ponderação de cada classe. Ainda assim, as classificações geomecânicas são variadas, tanto em complexidade quanto na forma da sua aplicação.

Na comunidade geotécnica, é amplamente aceito que as propriedades geomecânicas de maciços rochosos são mais importantes que as da rocha intacta, bem como a influência das descontinuidades em sua qualidade. Portanto, as classificações que têm sucesso abordam medidas geométricas e propriedades das descontinuidades (FIORI & CARMIGNANI, 2009). Os autores também contam que as primeiras classificações eram mais simples, e tinham principalmente caráter qualitativo. Propriedades como o grau de alteração do maciço rochoso, e o espaçamento, orientação, persistência e rugosidade das descontinuidades surgem em métodos modernos.

Em 1967, Deere *et al.* desenvolveram o *Rock Quality Designation* (RQD), aplicado em testemunhos de sondagem na qual conta-se os comprimentos dos pedaços superiores a 10 centímetros, cujo somatório, dividido pelo comprimento total, fornece o valor da qualidade da rocha (DEERE *et al.*, 1967 *apud* FIORI & CARMIGNANI, 2009).

O *Rock Mass Rating* (RMR) é a classificação geomecânica proposta por Bieniawski (1973), com diversas alterações de sua forma original desde então, com destaque para a versão de 1989 que corresponde ao método utilizado atualmente. Para a avaliação, atribui-se pesos a cinco parâmetros: resistência à compressão simples, RQD, espaçamento das fraturas, condições físicas e geométricas das fraturas e a presença de água, além de um ajuste de acordo com a orientação das descontinuidades. Cada parâmetro tem subdivisões que recebem pontos ponderados, cuja soma atinge no máximo o valor de 100, na qual é possível dividir os maciços em cinco classes que vão desde muito bom até muito pobre. Em determinadas aplicações, desconta-se uma quantidade de pontos do valor final de acordo com a relação entre a orientação das descontinuidades e do talude.

Em 1985, Romana propôs uma variação do RMR para taludes, chamada de *Slope Mass Rating* (SMR). Essa classificação surgiu de forma a permitir a aplicação do RMR em taludes sem o desconto dos valores extremos proposto por Bieniawski. Assim, Romana cria quatro fatores que são somados ao valor original do RMR. O primeiro está relacionado ao paralelismo entre as descontinuidades e o talude ( $F_1$ ), e o segundo é relativo à probabilidade de cisalhamento de uma descontinuidade ( $F_2$ ), na qual leva-se em conta o mergulho da estrutura. Já o terceiro fator depende da relação dos mergulhos do talude e da descontinuidade ( $F_3$ ), e o quarto é uma correção baseada no método de escavação ( $F_4$ ). Dessa forma, os fatores  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  podem causar um decréscimo no valor do RMR, e o fator  $F_4$  pode aumentá-lo (ROMANA *et al.*, 2015).

Barton *et al.* (1974) propuseram uma classificação específica para túneis, chamada de Sistema Q. Esse método inclui aspectos tridimensionais do maciço rochoso, definindo índices com valores ponderados, sendo eles o índice de qualidade de rocha (RQD), índice do número de famílias de fraturas ( $J_n$ ), índice de rugosidade das fraturas ( $J_r$ ), índice de alteração das paredes das fraturas ( $J_a$ ), índice da influência da água subterrânea ( $J_w$ ) e o índice de influência do estado de tensão do maciço no entorno da abertura (SRF). Os parâmetros são combinados de acordo com uma equação específica, e os valores de Q podem variar de 0,001 a 1000, representando a qualidade do maciço rochoso.

Bar & Barton, em 2015, publicaram o método chamado Q-Slope, o qual já vinham estudando e aplicando há quase uma década. Essa classificação consiste em utilizar o Sistema Q para uma aplicação em taludes, em que se permite estimar ângulos de inclinação de suas faces a partir de poucas mudanças na atribuição de valores dos parâmetros (BAR & BARTON, 2017). Os autores propuseram o *O-factor*, na qual a orientação das descontinuidades em relação à direção do talude define o peso que os parâmetros  $J_r$  e  $J_a$  terão no cálculo. O  $J_w$  se torna  $J_{wice}$ , e leva em consideração as condições ambientais em que o talude está exposto, e o SRF aplicado

será o valor menos favorável entre três possibilidades, definidas em tabelas específicas, e passa a se chamar  $SFR_{slope}$ . Bar & Barton (2017) afirmam que esse método não pode ser aplicado em maciços de material inconsolidado ou com alturas superiores a 50 metros.

O GSI foi desenvolvido por Hoek em 1994 e Hoek *et al.* em 1995 para coletar informações de campo e incorporar às equações do critério de ruptura de Hoek-Brown. A classificação foi formulada considerando os dois principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas de um maciço rochoso: a estrutura e a condição das juntas (HOEK & BROWN, 2018).

O índice de resistência geológico (*Geological Strength Index* – GSI é uma ferramenta de caracterização de maciços rochosos desenvolvida para projetos de túneis e outras estruturas subterrâneas, baseado em observações de campo de geólogos e engenheiros experientes, provendo dados confiáveis sobre as propriedades do maciço, utilizados posteriormente em soluções analíticas ou numéricas (HUSSIAN *et al.*, 2020). O sistema classifica o maciço em cinco classes, de acordo com sua qualidade. Os autores afirmam que o método obteve grande aceitação como ferramenta empírica de estimativa de características de resistência e deformação de rochas muito fraturadas. A excepcionalidade do GSI em relação a outros métodos empíricos está na determinação de propriedades dos maciços rochosos de resistência baixa a muito baixa, além de rochas heterogêneas.

### 3.2.ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICO - GSI

O GSI é um método de classificação desenvolvido para suprir a necessidade de dados confiáveis de propriedades de maciços rochosos para aplicar em soluções numéricas ou analíticas para projetos de túneis, taludes ou fundações em rocha (MARINOS *et al.*, 2007).

A ideia principal é ser uma classificação essencialmente qualitativa, baseada em dados geológicos como litologia, estruturas e condição das faces das descontinuidades, sendo um método simples de aplicar no campo, em afloramentos, escavações em superfície como cortes de estrada, faces de túneis e testemunhos de sondagem (MARINOS *et al.*, 2005).

Pode-se estimar o GSI de três diferentes formas: qualitativa, quantitativa e calculada a partir de outros métodos empíricos de classificação de maciços rochosos, como RMR e Q (HUSSIAN *et al.*, 2020). A seguir serão discutidos aspectos sobre a origem, modificações, aplicações, limitações e quantificação do método.

### 3.2.1. Origem e Modificações

Marinos *et al.* (2007) contam que com o aumento da abertura de túneis décadas atrás, métodos numéricos surgiram para incrementar a análise de problemas de escavação, necessitando de dados confiáveis de tensão e deformação do maciço rochoso. Os autores destacam que, uma vez que é praticamente impossível determinar esses parâmetros por testes *in situ*, com exceção de túneis já construídos, Hoek & Brown, em 1980, desenvolveram o critério de ruptura de Hoek-Brown. Hoek e Brown reconheciam que o método precisava ter relação com observações geológicas que pudessem ser feitas de forma fácil e rápida por geólogos ou engenheiros geólogos, e consideraram desenvolver um sistema de classificação, porém desistiram da ideia e resolveram se ater ao RMR (MARINOS *et al.*, 2005).

Os sistemas Q e RMR são amplamente usados para vários propósitos na mecânica de rochas e considerados a base do desenvolvimento de outras classificações, porém utilizam o RQD como parâmetro de entrada, e este tem valor igual a zero em rochas de baixa resistência, levando a resultados equivocados (HUSSIAN *et al.*, 2020).

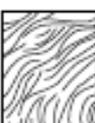
Após anos de uso, chegou-se à conclusão de que era necessário um sistema de classificação baseado em observações geológicas do maciço rochoso, que refletisse no material, suas estruturas e história geológica, bem como fosse desenvolvido para estimar propriedades do maciço ao invés de projetos de reforços e suportes de túneis (MARINOS *et al.*, 2007). Nesse contexto, o GSI começou a ser desenvolvido em Toronto em 1992 por David Wood para classificar maciços fraturados e de baixa resistência (HUSSIAN *et al.*, 2020). O método foi publicado por Hoek em 1994 e por Hoek *et al.* em 1995 (HOEK & BROWN, 2018) e, após diversas modificações, resultou no ábaco atualmente utilizado, feito por Hoek e Marinos em 2000.

O método tem a função de coletar informações de campo e incorporar às equações do critério de ruptura de Hoek-Brown (HOEK & BROWN, 2018), que serão dados de entrada em análises numéricas ou soluções analíticas (MARINOS *et al.*, 2007). Hoek & Brown (2018) afirmam que a classificação foi formulada considerando os dois principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas de um maciço rochoso: a estrutura (*Structural Rating* – SR) e a condição das juntas (*Surface Condition Rating* – SCR).

Em 1998, Hoek *et al.* fizeram uma extensão do ábaco para incluir maciços xistosos de baixa resistência situados em Atenas, resultando na última linha, de rochas foliadas, laminadas ou cisalhadas, porém não associados a condições de superfície boas a muito boas (HUSSIAN *et al.*, 2020). Marinos & Hoek, em 2000 e 2001, trabalhando em túneis em maciços rochosos

fraturados na Grécia, incluíram a categoria de estrutura de rochas intactas ou maciças e, anos mais tarde, Hoek *et al.*, em 2005, incorporaram maciços heterogêneos, de baixa resistência, e com variação litológica ao GSI, desenvolvendo outro ábaco para esse para esses tipos de rochas (HUSSIAN *et al.*, 2020). Os ábacos citados podem ser observados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1: Ábaco original do GSI proposto por Hoek & Marinos (2000).

<p><b>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA PARA ROCHAS FRATURADAS (Hoek e Marinos, 2000)</b>                      Para a litologia, estrutura e condição de superfície das descontinuidades, estime o valor médio do GSI. Não tente ser muito preciso. Cotar um intervalo de 33 a 37 é mais realista do que estabelecer GSI = 35. Note que a tabela não se aplica a rupturas controladas estruturalmente. Onde estruturas planares de baixa resistência estiverem presentes em uma orientação desfavorável em relação à face da escavação, estas dominarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento das superfícies em rochas propensas a se deteriorarem como resultado da umidade será reduzida se tiver presença de água. Quando trabalhar com rochas nas categorias regular a muito pobre, um deslocamento para a direita deve ser feito em condições úmidas. A pressão da água é tratada com uma análise dos esforços efetivos.</p>		CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE				
		MUITO BOA Superfície muito rugosa, não intemperizada, fresca	BOA Superfície rugosemea, levemente intemperizada, com manchas ferruginosas	REGULAR Superfície lisa, moderadamente intemperizada e alterada	POBRE Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada com cobertura compacta ou preenchimento de fragmentos angulares	MUITO POBRE Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada, com cobertura ou preenchimento argiloso
ESTRUTURA		DIMINUI A QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →				
	INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça, in situ, com poucas descontinuidades amplamente espaçadas	90			N/A	N/A
	FRATURADA - Maciço rochoso não perturbado com blocos interconectados e cúbicos, formados por três famílias de descontinuidades	80	70			
	MUITO FRATURADA - Maciço rochoso parcialmente perturbado, com blocos interconectados angulares e multifacetados formados por quatro ou mais famílias de juntas		60	50		
	FRATURADA/PERTURBADA/DEFORMADA - Maciço rochoso dobrado, com blocos angulares formados por várias famílias de descontinuidades que se interceptam. Estratificação ou xistosidade persistentes			40	30	
	DESINTEGRADA - Maciço rochoso pobremente interconectado, altamente fraturado, com fragmentos de rochas angulares e arredondadas				20	
	FOLIADA/CISALHADA - Ausência de blocos devido a pouco espaçamento de xistosidades de baixa resistência ou planos de cisalhamento	N/A	N/A			10

Fonte: adaptado de Hoek *et al.* (2013).

Figura 2: Ábaco do GSI para rochas heterogêneas proposto por Hoek & Marinos (2000).

GSI PARA MACIÇOS ROCHOSOS HETEROGÊNEOS COMO O FLYSCH (Marinos, P. e Hoek, E., 2000) Para a descrição da litologia, estrutura e condições de superfície (particularmente planos de acamamento), escolha a caixa no ábaco. Loque a posição da caixa que corresponde à condição das discontinuidades e estime o valor médio do GSI pelos contornos. Não se preocupe em ser muito preciso. Cotar um intervalo de 33 a 37 é mais realista do que estabelecer GSI = 35. Note que o critério de Hoek-Brown não se aplica a rupturas controladas estruturalmente. Onde estruturas planares contínuas de baixa resistência estiverem presentes em uma orientação desfavorável, estas dominarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência de alguns maciços é reduzida pela presença de água subterrânea e isso permite um pequeno deslocamento para a direita nas colunas de condição regular, pobre e muito pobre. A pressão da água não altera o valor do GSI e é tratada usando uma análise dos esforços efetivos.		CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DAS DISCONTINUIDADES (predominantemente planos de acamamento)		MUITO BOA - Superfície muito rugosa, não intemperizada, fresca		BOA - Superfície rugosemea, levemente intemperizada		REGULAR - Superfície lisa, moderadamente intemperizada e alterada		POBRE - Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada com cobertura compacta ou preenchimento de fragmentos angulares		MUITO POBRE - Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada, com cobertura ou preenchimento argiloso	
<p><b>COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA</b></p> <p><b>A.</b> Acamamento espesso, arenito com descontinuidades. O efeito do revestimento pelítico nos planos de acamamento é minimizado pelo confinamento do maciço rochoso. Em túneis rasos ou taludes, esses acamamentos podem causar instabilidade controlada estruturalmente.</p>				70									
<p><b>B.</b> Arenito com finas intercalações de siltito</p> <p><b>C.</b> Arenito e siltito em proporções similares</p> <p><b>D.</b> Siltito ou folhelho siltoso com camadas de arenito</p> <p><b>E.</b> Siltito pouco resistente ou folhelho argiloso com camadas de arenito</p>				60									
<p>C, D, E e G - pode ser mais ou menos dobrado que a ilustração mas não altera a resistência. Deformação tectônica, falhamento e perda de continuidade movem essas categorias para F e H.</p>				50									
<p><b>F.</b> Deformado tectonicamente, intensamente dobrado/falhado, folhelho argiloso cisalhado ou siltito com camadas areníticas quebradas e deformadas formando uma estrutura quase caótica</p>				40									
<p><b>G.</b> Folhelho siltoso ou argiloso não perturbado com ou sem poucas camadas areníticas muito finas.</p>				30									
<p><b>H.</b> Folhelho siltoso ou argiloso tectonicamente deformado formando uma estrutura caótica com porções de argila. Camadas finas de arenito são transformadas em pequenos pedaços de rocha.</p>				20									
<p><b>H.</b> Folhelho siltoso ou argiloso tectonicamente deformado formando uma estrutura caótica com porções de argila. Camadas finas de arenito são transformadas em pequenos pedaços de rocha.</p>				10									

→ : significa deformação após perturbação tectônica

Fonte: adaptado de Hoek *et al.* (2013).

### 3.2.2. Aplicação e Limitações do GSI

O propósito original do GSI era providenciar um guia para a estimativa inicial das propriedades do maciço rochoso. Sempre se assumiu que o usuário aperfeiçoaria essas estimativas com investigações *in situ* mais detalhadas, análises numéricas e retroanálises do comportamento de túneis e taludes para validar ou modificar esses resultados iniciais (HOEK & BROWN, 2018).

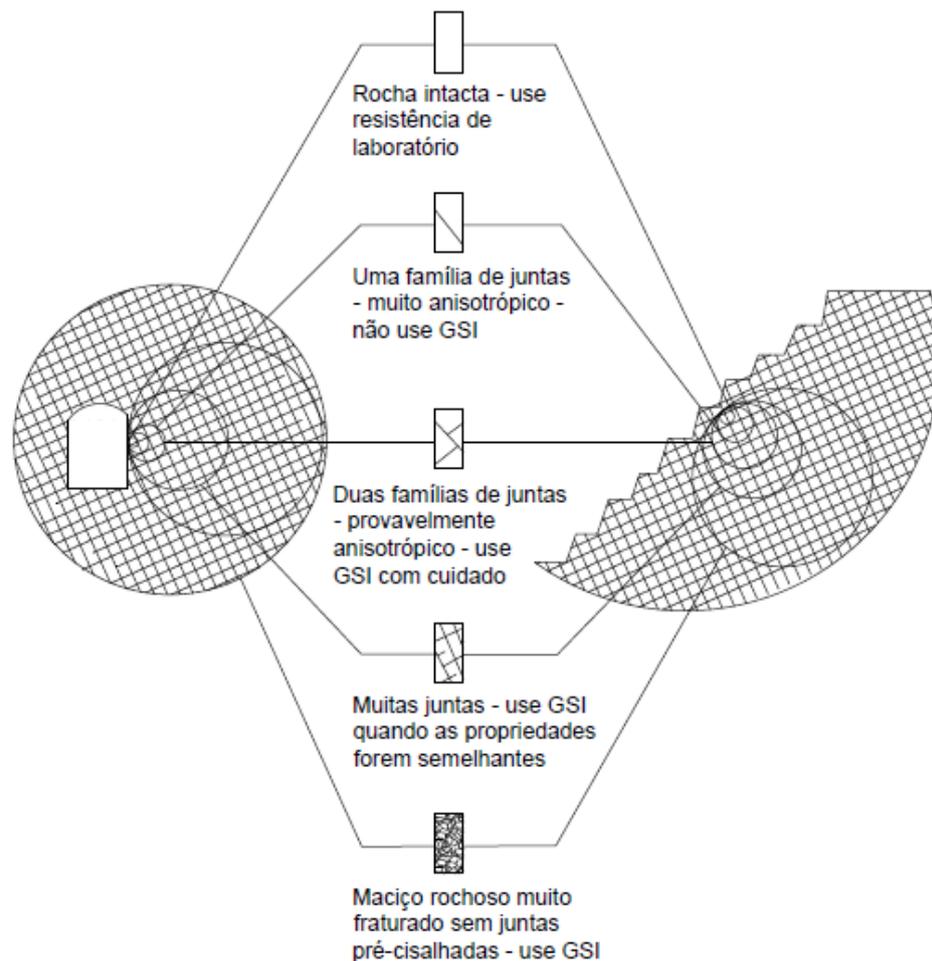
Marinos *et al.* (2005) ressaltam que a classificação GSI baseia-se no princípio de que o maciço rochoso tem descontinuidades orientadas de forma que não há uma direção preferencial que compromete sua estabilidade, assumindo um comportamento homogêneo e isotrópico, da mesma forma que o critério de ruptura de Hoek-Brown. Assim, o sistema não deve ser utilizado em situações onde há uma orientação predominante ou existem instabilidades gravitacionais que dependem de estruturas (HUSSIAN *et al.*, 2020). Apesar disso, os autores assumem que em situações onde há uma única descontinuidade bem definida, como uma falha ou zona de cisalhamento, é possível aplicar o GSI ignorando essa estrutura, mas deve-se utilizar os outros parâmetros do critério de Hoek-Brown relativos à essa descontinuidade (MARINOS *et al.*, 2007).

O GSI não é aplicável em rochas resistentes com poucas descontinuidades, cujo espaçamento tenha dimensão similar ao túnel ou talude, uma vez que nessas situações a estabilidade será controlada pela interseção das descontinuidades com a face livre da escavação (MARINOS *et al.*, 2005). A Figura 3 mostra que a relação do tamanho dos blocos com o tamanho da estrutura é um importante fator a ser considerado na decisão de se usar o GSI (HOEK & BROWN, 2018).

O método também não se aplica em maciços a grandes profundidades (superiores a 1000 metros), pois comporta-se como rocha intacta uma vez que as descontinuidades são comprimidas pelo peso da coluna de rocha acima delas, atingindo valores de GSI em torno de 100 (MARINOS *et al.*, 2007).

Em casos de descontinuidades com preenchimentos, o GSI pode ser aplicado, porém quando espessos (mais que alguns centímetros) ou em zonas de cisalhamento com material argiloso, recomenda-se o uso do ábaco do GSI para maciços heterogêneos (MARINOS *et al.*, 2005). Os autores recomendam que quando o maciço se encontrar tão intemperizado a ponto de não se reconhecer mais suas estruturas, deve ser avaliado como solo e, dessa forma, não é possível aplicar o GSI.

Figura 3: Aplicação do GSI segundo diferentes escalas de projeto.



Fonte: adaptado de Hoek & Brown (2018).

Sabe-se que há diversas correlações do valor do GSI baseado em outros métodos de classificação geomecânica como RMR e Q. Apesar de ter boa aplicação em maciços de boa qualidade, não deve ser feita em maciços de menor resistência ( $GSI < 35$ ) ou heterogêneos (MARINOS *et al.*, 2007).

### 3.2.3. Propostas de Quantificação do GSI

O ponto inicial de cada programa de investigação de um local é um bom modelo geológico, feito por geólogos que tenham familiaridade com a geologia regional da área e experiência trabalhando com esse tipo de rocha (HOEK & BROWN, 2018). O GSI funciona bem para aplicação por engenheiros geólogos experientes, porém sabe-se que pode ser desconfortável para engenheiros por utilizar parâmetros qualitativos, que dificultam na precisão

do valor obtido (MARINOS *et al.*, 2007). Marinós *et al.* (2005) alertam que a ideia de quantificar é interessante, porém deve ser utilizada com cuidado para que não se perca a lógica geológica do GSI. De qualquer forma, autores afirmam que a precisão não é significativa, sendo o GSI melhor descrito por um intervalo de valores, como 33-37, ao invés de sua média, que seria 35.

O grau de certeza do valor do GSI depende da expertise do coletor dos dados, o que permite que diferentes pessoas obtenham resultados distintos. Por isso, era necessário superar essas dificuldades de estimativa, o que fez com que, em 1999, Sonmez & Ulusay criassem a primeira forma de quantificar o GSI, que incluía apenas as quatro categorias iniciais das classes de estruturas (HUSSIAN *et al.*, 2020). Os autores afirmam que o método proposto utiliza a quantidade de juntas por unidade de volume ( $J_v$ ) e condições de superfície baseadas em grau de intemperismo, rugosidade e preenchimento das descontinuidades, aplicados em algumas equações que fornecem os valores a serem colocados no ábaco.

Em 2004, Cai *et al.* introduziram o volume do bloco ( $V_b$ ) e a condição da junta ( $J_c$ ) no sistema de quantificação do GSI, permitindo a avaliação de rochas intactas e maciças (linha superior das características estruturais do maciço no ábaco), além de reduzir a dependência da experiência de campo e manter a simplicidade do ábaco original do GSI (HUSSIAN *et al.*, 2020).

Hoek *et al.*, em 2013, inseriram as escalas A e B nos eixos x e y do ábaco, respectivamente. A escala A, que representa a condição da superfície (SCR), admite valores de 0 a 45 divididos em 5 intervalos, seguindo a classificação original, como mostra a Tabela 1. Da mesma forma, a escala B representa a estrutural (SR) da rocha, e varia entre 0 e 50, dividida em 5 intervalos (HUSSIAN *et al.*, 2020), como apresentado pela Tabela 2. Esse ábaco pode ser conferido na Figura 4. A última linha do ábaco foi removida pois não se aplica às condições de homogeneidade e isotropia, porém, para determinação do GSI desse tipo de maciços rochosos, é possível usar o ábaco específico para rochas heterogêneas (HOEK *et al.*, 2013).

Em cada interseção das escalas A e B, o valor do GSI pode ser estimado pelas linhas do ábaco ou pela soma dos valores atribuídos nas escalas (HOEK *et al.*, 2013). A Figura 5 mostra pontos plotados com a relação entre as duas formas de determinação do GSI, e a tendência linear dos resultados, com pouca variação. Os autores explicam que essa pequena variação ocorre porque as linhas do GSI foram desenhadas a mão originalmente, fazendo com que não sejam paralelas ou igualmente espaçadas, porém é possível fazer essa correção, na qual elimina-se o erro sem alterar a função do ábaco original (HOEK *et al.*, 2013).

Tabela 1: Descrição e intervalo de valores utilizado no SCR com base no ábaco de Hoek &amp; Marinos (2000).

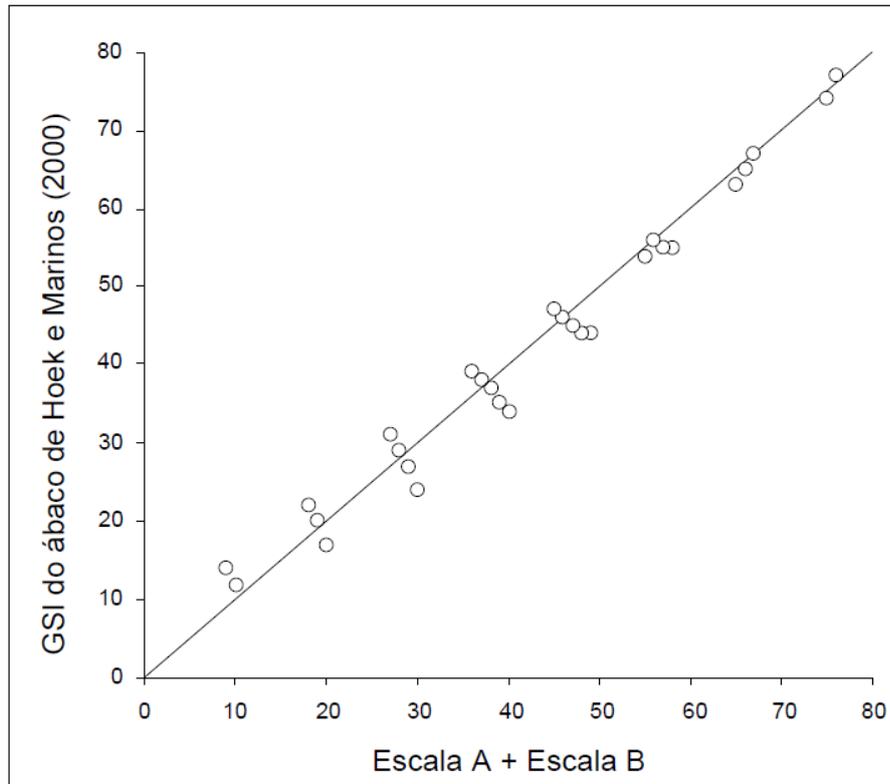
<b>Surface Condition Rating (SCR)</b>	<b>Descrição</b>	<b>Intervalos</b>
Muito Boa	Superfície muito rugosa, não intemperizada, fresca	36 - 45
Boa	Superfície rugosa, levemente intemperizada, com manchas ferruginosas	27 - 36
Regular	Superfície lisa, moderadamente intemperizada e alterada	15 - 27
Pobre	Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada com cobertura compacta ou preenchimento de fragmentos angulares	9 - 15
Muito Pobre	Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada, com cobertura ou preenchimento argiloso	0 - 9

Tabela 2: Descrição e intervalo de valores utilizado no SR com base no ábaco de Hoek &amp; Marinos (2000).

<b>Structure Rating (SR)</b>	<b>Descrição</b>	<b>Intervalos</b>
Intacta ou Maciça	Rocha intacta ou maciça, in situ, com poucas descontinuidades amplamente espaçadas	40 - 50
Fraturada	Maciço rochoso não perturbado com blocos interconectados e cúbicos, formados por três famílias de descontinuidades	30 - 40
Muito Fraturada	Maciço rochoso parcialmente perturbado, com blocos interconectados angulares e multifacetados formados por quatro ou mais famílias de juntas	20 - 30
Fraturada Perturbada Deformada	Maciço rochoso dobrado, com blocos angulares formados por várias famílias de descontinuidades que se interceptam. Estratificação ou xistosidade persistentes.	10 - 20
Desintegrada	Maciço rochoso pobremente interconectado, altamente fraturado, com fragmentos de rochas angulares e arredondadas	0 - 10



Figura 5: Gráfico com a relação dos valores de GSI obtidos pelo ábaco e pelo somatório das escalas A e B.



Fonte: adaptado de Hoek *et al.* (2013).

Para facilitar a quantificação, os autores definiram a escala A sendo 1,5 vezes o *Joint Condition Rating* (JCond<sub>89</sub>) de Bieniawski (1989) e a escala B como o RQD de Deere (1967) dividido por 2, sendo o GSI a soma dos dois resultados (HUSSIAN *et al.*, 2020). Até o momento da escrita do artigo, os resultados disponíveis se mostraram satisfatórios, porém os autores afirmam que, com o uso dessa quantificação, é possível que alguns ajustes sejam feitos nas posições das duas escalas para que fiquem mais próximos aos resultados vindos de dados qualitativos (HOEK *et al.*, 2013).

Hussian *et al.* (2020) afirmam que a versão quantitativa do GSI é aplicável em situações em que a frequência e orientação das descontinuidades é medida facilmente, e não é efetiva em maciços perturbados tectonicamente, onde o arranjo estrutural foi destruído, sendo que nesses casos recomenda-se o uso da versão qualitativa do método. A adição de escalas quantitativas ao ábaco do GSI não deve limitar o uso da forma como foi concebido, ou seja, baseada em observações visuais de campo, de forma qualitativa (HOEK *et al.*, 2013).

### 3.3.CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK-BROWN

O GSI é um sistema de classificação de maciços rochosos criado para associar o critério de ruptura de Hoek-Brown, desenvolvido por Hoek & Brown em 1980, a observações geológicas de campo. Esses métodos tiveram boa aceitação como ferramentas para estimar características de resistência e deformação de maciços fraturados (HOEK & BROWN, 2018).

Hussian et al. (2020) contam que o critério de Hoek-Brown trata-se de uma proposta de um critério de ruptura não-linear para estimar a resistência da rocha intacta baseado em uma ampla variedade de testes triaxiais em amostras de rocha intacta. Os autores afirmam que o critério é atualizado frequentemente, de acordo com a experiência ganha em seu uso, além de identificarem certas limitações. Dessa forma, em 2002, Hoek & Brown desenvolveram um critério de ruptura generalizado para estimar a resistência de maciços rochosos fraturados, expresso pela equação 1.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são a maior e a menor tensão principal, respectivamente;

$\sigma_{ci}$  é a resistência à compressão uniaxial; e

$m_b$ ,  $s$  e  $a$  são as constantes do material do maciço rochoso.

A aplicação do GSI é feita nessas constantes do material, na qual o valor do GSI é parâmetro de entrada, como mostram as equações 2, 3 e 4.

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (2)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

Onde:

$m_i$  é uma constante da rocha intacta; e

$D$  é um fator que depende do grau de perturbação ao qual o maciço rochoso é exposto devido ao dano do desmonte por explosivos e ao relaxamento das tensões.

### 3.4. PROGRAMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A geotecnia permite uma gama de aplicações de ferramentas de modelagem (MARCELINO & MANSO, 2009). Em formações geológicas complexas, a caracterização e modelagem geotécnica são necessárias para avaliar a natureza, geometria e resistência das descontinuidades (GEOSTRU, 2020). Dessa forma, é possível encontrar *softwares* para as mais diversas funções, tanto pagos quanto livres.

O interesse em ferramentas de *Software Livre* é uma realidade global, mesmo nas engenharias, uma vez que possibilita soluções de alta qualidade, permite a inovação, desenvolvimento e competitividade da comunidade científica, e alimenta uma rede de compartilhamento de informações e conhecimento, sem a dependência de disponibilidade financeira para comprar a licença de determinado programa (MARCELINO & MANSO, 2009).

Muitos cientistas se empenham para desenvolver programas livres. Na área da classificação de maciços rochosos, pode-se listar o *ClassMass*, desenvolvido para classificar segundo o sistema Q, MRMR (*Mining Rock Mass Rating*) e o GSI, a partir de equações empíricas (DELIORMANLI & ONARGAN, 2003). Já Onsel *et al.* (2011) criaram um *software* que permite fazer uma análise completa acerca de testemunhos de sondagem, utilizando o método RQD, e gerando diversos gráficos de distribuição dos blocos e da qualidade do maciço ao longo das amostras.

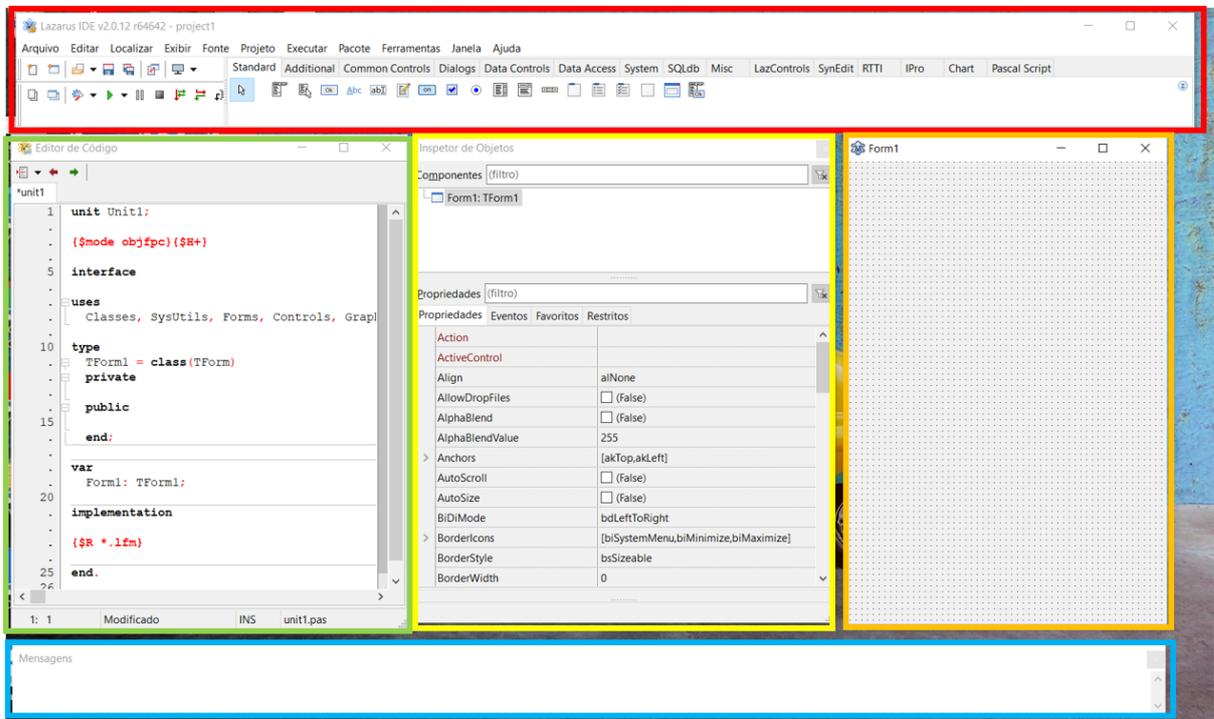
Dentre os programas que requerem a compra das licenças, podemos citar:

- *Rock Mechanics*: desenvolvido pela GeoStru, classifica os maciços segundo diversos métodos, dentre eles o Q e RMR (GEOSTRU, 2020);
- *ClassRock*: criado pela GEO&SOFT INTERNATIONAL, classifica maciços rochosos nos sistemas Q e RMR (GEOTECHPEDIA, s.d.).

### 3.5. O LAZARUS

O programa *Lazarus* é um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment – IDE*) compatível com Delphi/Pascal, que permite a criação de aplicativos a partir de uma variedade de componentes prontas para uso e um formulário gráfico para facilitar o desenho de interfaces. É um *software* gratuito, com download disponível no site para qualquer usuário. O Projeto Lazarus foi criado em 1999 por Cliff Baeseman, Shane Miller e Michael Hess, e seu desenvolvimento continuou com Marc Weustink e Mattias Gartner (LAZARUS-IDE, c1993-2022). A interface do *Lazarus* pode ser observada na Figura 6.

Figura 6: Interface do programa *Lazarus*. Em vermelho, encontra-se o menu do *software*; em verde, o editor de códigos e, em amarelo, o inspetor de objetos. O formulário, onde se faz a interface gráfica, consta no retângulo laranja, e as mensagens estão no polígono azul



Um IDE é um *software* criado para auxiliar programadores, uma vez que já se encontram funções para o desenvolvimento de programas e alguns recursos que reduzem erros nos códigos (PSAFE, 2014).

A linguagem de programação utilizada no Lazarus é o Pascal. O Pascal foi criado entre 1968 e 1970 por Nicklaus Wirth na Universidade Técnica de Zurique, na Suíça, com o objetivo de desenvolver uma linguagem de alto nível para ensinar programação estruturada (RODRIGUES, 2007). De acordo com o autor, os programas em Pascal são compostos por cabeçalho, onde se faz sua identificação, área de declarações, em que se valida o uso de identificadores que não são pré-definidos, e corpo, na qual se escreve efetivamente o programa e pode ser dividido em blocos.

## 4. METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho contou com diversas etapas. Inicialmente, foi realizada a revisão bibliográfica acerca do sistema GSI, juntamente com o aprendizado do *software Lazarus* e da linguagem de programação Pascal. Esse aprendizado foi feito de forma prática, acompanhando o desenvolvimento de outro aplicativo, e continuou até a finalização deste estudo.

Após as etapas iniciais, iniciou-se, no *Lazarus*, o desenvolvimento do *GSI Plotter*, aplicativo computacional que plota e classifica maciços rochosos segundo o método GSI. Para demonstrar a utilização do programa, foram aplicados dados reais, levantados em uma mineração na região metropolitana de Curitiba, na qual os resultados são discutidos no próximo capítulo.

### 4.1. DESENVOLVIMENTO DO *GSI PLOTTER*

O aplicativo *GSI Plotter* é composto por três abas, sendo uma o programa principal e as restantes itens secundários. Para isso, é necessário o desenvolvimento da interface gráfica em três formulários no *Lazarus*, que contam com códigos e propriedades distintas, porém que conversam entre si.

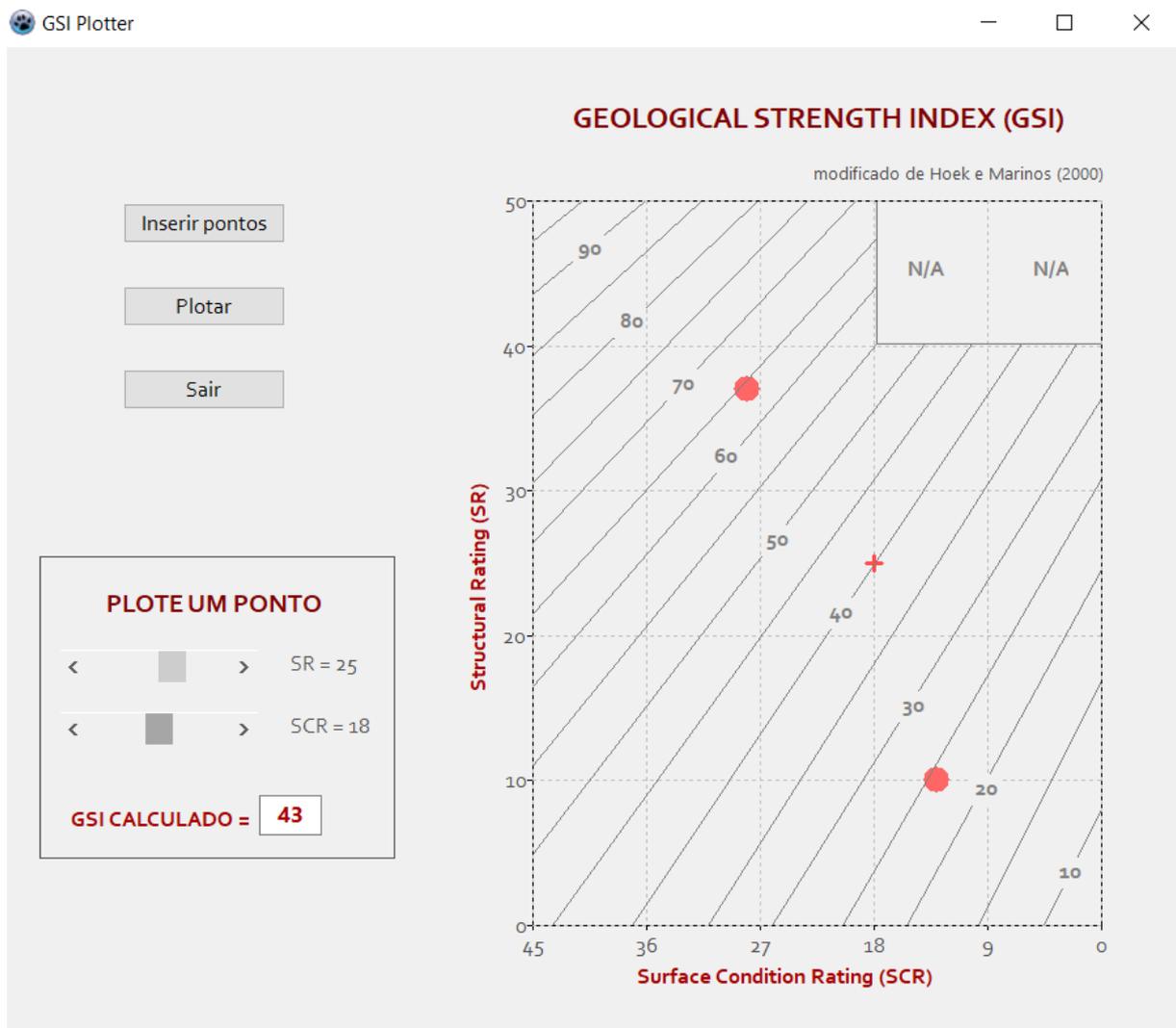
Na aba principal foram criados os seguintes itens:

- Botão “Inserir pontos”: botão no qual abre outra aba com uma planilha preparada para a inserção dos dados de SR e SCR, com a possibilidade de salvar o arquivo ou abrir um preexistente, além de orientações sobre a caracterização;
- Botão “Plotar”: botão que lê os dados inseridos pelo usuário e os plota na forma de círculos no ábaco;
- Botão “Sair”: botão que encerra a execução do aplicativo;
- Área “Plote um ponto”: retângulo composto por duas barras de rolagem na qual é possível variar a localização de um ponto em formato de cruz no ábaco, a partir dos eixos x (SCR) e y (SR). Nesse local, também consta a informação denominada “GSI calculado”, em que aparece o valor do GSI a partir da soma do SCR e SR, conforme apresentado por Hoek *et al.* (2013);
- Ábaco modificado do GSI: ábaco em que é possível plotar os pontos a partir dos dados de entrada, em que o SCR corresponde ao eixo x e o SR ao eixo y. Nesse ábaco estão

reproduzidas as linhas originais do GSI, com seus respectivos valores para possibilitar a sua classificação. Abrange todos os campos originalmente criados do SCR, com valores variando de 45 a 0 e intervalos de 9 pontos, e os cinco primeiros do SR, que varia de 0 a 50 com intervalos de 10. O campo de rochas laminadas foi excluído por possuir um ábaco a parte, bem como por não se aplicar na escala A e B desenvolvida pela quantificação de Hoek *et al.* (2013). Na linha do SR que corresponde a rochas maciças ou com poucas juntas, foram adicionados os campos de “(N/A)”, que são as situações de SCR boa e muito boa e que não são aplicáveis no GSI.

A aba principal pode ser observada na Figura 7.

Figura 7: Aba principal do *GSI Plotter*.



O desenho do ábaco foi feito de forma a manter as características originais das linhas dos valores de GSI, como constam no ábaco 2000 de Hoek & Marinos (2000). Para isso, o ábaco original foi inserido como imagem no *software Autocad* e determinados pontos nos extremos de cada linha, tanto de valores de GSI como de N/A. Com o uso de polilinhas, foram anotadas as posições de x e y de cada ponto, na qual a origem corresponde ao início do ábaco. Esse procedimento está ilustrado na Figura 8 e os valores obtidos encontram-se na Tabela 3.

Figura 8: Imagem do *Autocad* com o ábaco original do GSI inserido. Os círculos vermelhos correspondem aos pontos que formam as linhas de valores de GSI; os azuis correspondem aos extremos das linhas de N/A e, o ponto verde, simboliza a origem. As linhas de cor magenta foram utilizadas para definir a posição dos pontos a partir dos seus comprimentos, como consta grifado em amarelo no lado esquerdo da ilustração.

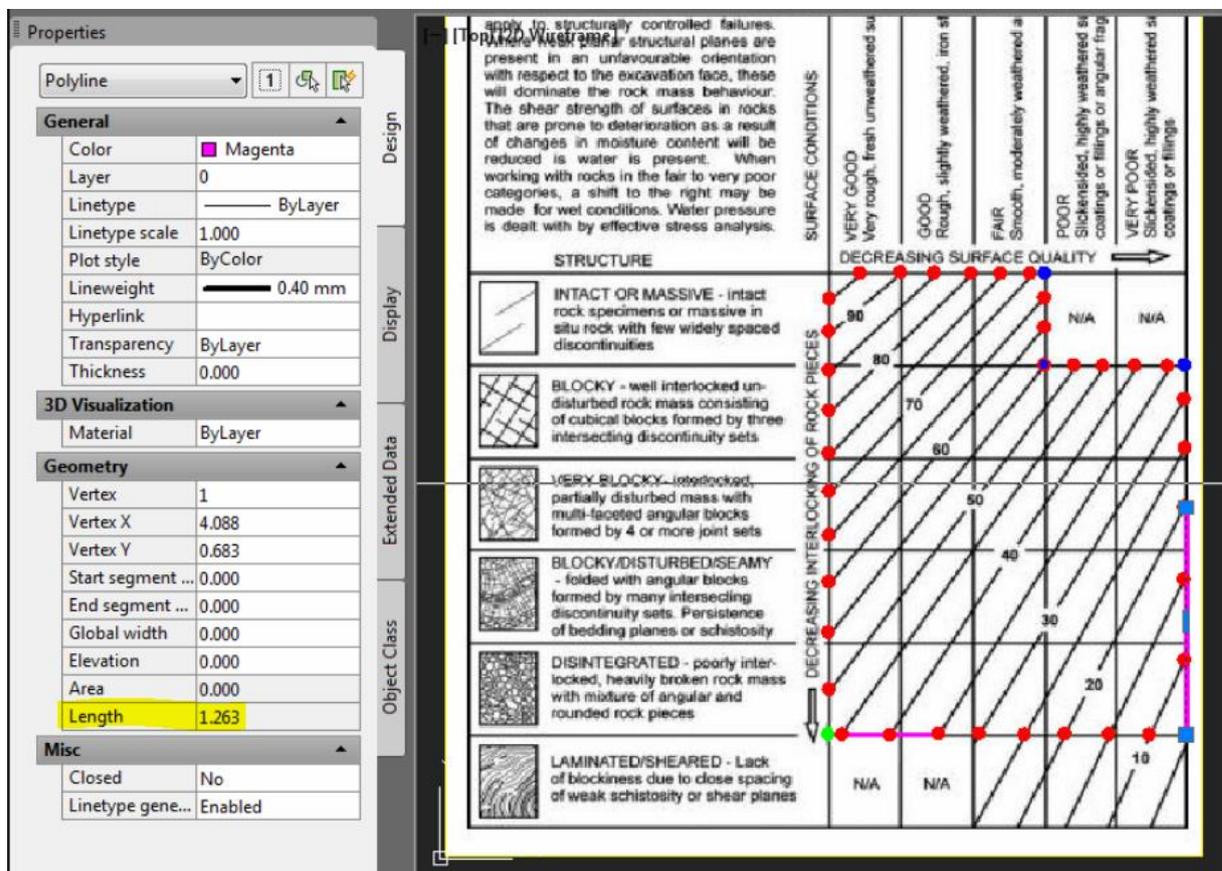


Tabela 3: Tabela com os pontos medidos no *Autocad* e os valores obtidos, bem como as posições que representam os extremos das linhas desenhadas no ábaco no *Lazarus*.

PONTO	X	Y	LINHA	X - CÓDIGO	Y - CÓDIGO
1	1,0710	0,0000	25	24,5045	0,0000
2	1,2930	0,0000	20	29,5838	0,0000
3	1,5420	0,0000	15	35,2810	0,0000
4	1,7700	0,0000	10	40,4976	0,0000
7	1,9670	0,4170	10	45,0050	8,1148
8	1,9670	0,8710	15	45,0050	16,9497
9	1,9670	1,2610	20	45,0050	24,5391
10	1,9670	1,5850	25	45,0050	30,8441
11	1,9670	1,8710	30	45,0050	36,4097
12	1,8790	2,0610	35	42,9915	40,1071
13	1,6920	2,0610	40	38,7130	40,1071
14	1,5170	2,0610	45	34,7090	40,1071
15	1,3550	2,0610	50	31,0024	40,1071
16	1,1880	2,0610	55	27,1814	40,1071
17	1,1880	2,2660	60	27,1814	44,0964
18	1,1880	2,4340	65	27,1814	47,3656
19	1,1160	2,5700	70	25,5341	50,0122
20	0,9480	2,5700	75	21,6902	50,0122
21	0,7780	2,5700	80	17,8006	50,0122
22	0,5820	2,5700	85	13,3162	50,0122
23	0,3910	2,5700	90	8,9461	50,0122
24	0,1730	2,5700	95	3,9582	50,0122
25	0,0000	2,4260	95	0,0000	47,2100
26	0,0000	2,2380	90	0,0000	43,5515
27	0,0000	2,0210	85	0,0000	39,3287
28	0,0000	1,8090	80	0,0000	35,2031
29	0,0000	1,5680	75	0,0000	30,5133
30	0,0000	1,3590	70	0,0000	26,4461
31	0,0000	1,1070	65	0,0000	21,5422
32	0,0000	0,8470	60	0,0000	16,4826
33	0,0000	0,5670	55	0,0000	11,0338
34	0,0000	0,2520	50	0,0000	4,9039
35	0,0680	0,0000	45	1,5558	0,0000
36	0,3430	0,0000	40	7,8478	0,0000
37	0,6040	0,0000	35	13,8195	0,0000
38	0,8270	0,0000	30	18,9218	0,0000
NA 1	1,1880	2,5700	-	27,1814	50,0122
NA 2	1,1880	2,0610	-	27,1814	40,1071
NA 3	1,9670	2,0610	-	45,0050	40,1071
NA 4	0,0000	0,5110	-	0,0000	9,9441

Após, para adequar as posições de x e y aos valores das escalas A e B, foram calculados fatores de correção (Equações 5 e 6) que, multiplicados aos comprimentos obtidos no *Autocad*, resultaram na posição ideal de cada ponto, conforme mostrou a Tabela 3. Posteriormente, esses pontos foram inseridos no código do programa na forma de linhas, que resultaram nos desenhos que aparecem no ábaco após pressionar o botão “Plotar”.

$$\text{Fator de correção A} = \frac{45}{X_{\max}} = \frac{45}{1,967} = 22,88 \quad (5)$$

$$\text{Fator de correção B} = \frac{50}{Y_{\max}} = \frac{50}{2,5700} = 19,46 \quad (6)$$

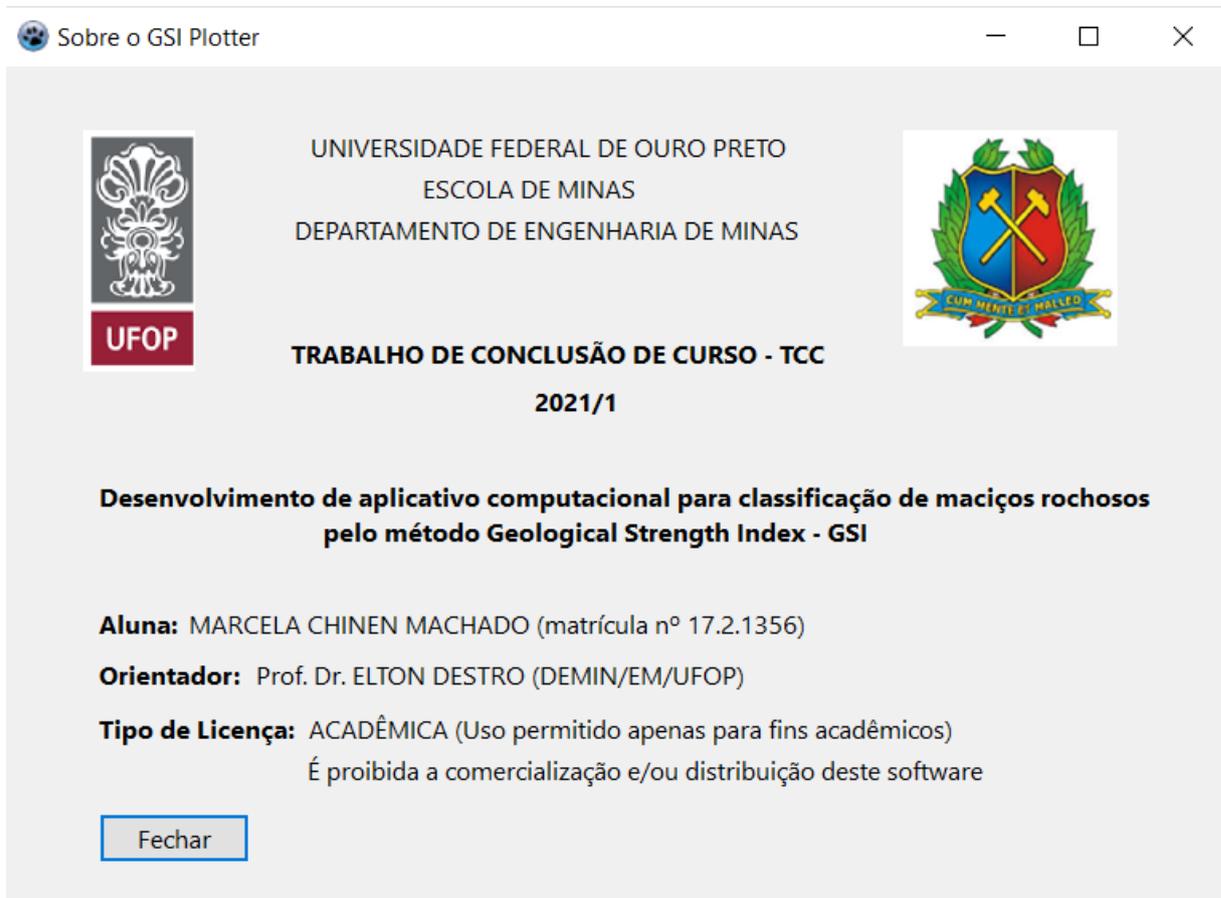
Na aba “Inserir pontos” foi programada uma planilha (Figura 9), em que é possível inserir dados de no máximo 20 pontos distintos para análise, conforme os valores de SCR e SR de cada um. Também constam duas tabelas com as informações necessárias para fazer essa caracterização, com a descrição de cada classe e o intervalo de valores que se deve adotar, conforme pôde ser observado nas Tabelas 1 e 2 no capítulo da revisão bibliográfica. Esses valores foram baseados nas escalas A e B desenvolvido por Hoek *et al.* (2013).

Figura 9: Imagem da planilha da aba “Inserir Pontos” na qual é possível adicionar os dados de caracterização dos maciços rochosos.

	SCR	SR
1		
2		
3		
4		
5		

Além disso, o código e a interface foram criados de forma a colocar um menu com várias opções ao usuário. No item “Arquivo” constam os submenus “Sobre” e “Sair”. O “Sobre” fornece informações acerca do desenvolvimento do aplicativo, e compõe a terceira aba (Figura 10). Já o “Sair” tem a função de fechar essa aba e retornar à página principal do programa.

Figura 10: Aba "Sobre o aplicativo".



No item “Dados” constam as opções “Novo”, “Abrir” e “Salvar”. Em “Novo”, foi programada a abertura de uma planilha nova, que limpa os dados adicionados anteriormente. Em “Abrir” é possível abrir um arquivo em formato *.txt* na qual entra-se com os dados diretamente na planilha, sem ser necessário digitar um por um no programa. Em “Salvar”, a programação foi feita de forma que se permita salvar na extensão *.txt* a planilha com os dados adicionados manualmente.

#### 4.2. VALIDAÇÃO DO APLICATIVO

Para validar o aplicativo, foram introduzidos dados acerca do mapeamento da Mina Capiru, que se localiza no município de Rio Branco do Sul, no Paraná. Esse empreendimento minerário extrai mármore dolomítico para uso industrial, agrícola e para construção civil. No entorno do mármore da frente de lavra, há ocorrência de filito e quartzito, além de diques de diabásio que cortam todos os litotipos.

O mapeamento foi realizado nos anos de 2016 e 2017 para a pesquisa de mestrado da autora em conjunto com a empresa Mineral Geologia, na qual os bancos 1 e 2 da mina tiveram seus taludes e descontinuidades caracterizados a partir de parâmetros geotécnicos. Após, foram definidas 13 unidades geotécnicas, sendo as de número 1 a 11 no mármore, e 12 e 13 em diques de diabásio, e as informações levantadas encontram-se na Tabela 4. Esses dados foram inseridos no *GSI Plotter* para classificar os maciços segundo o GSI.

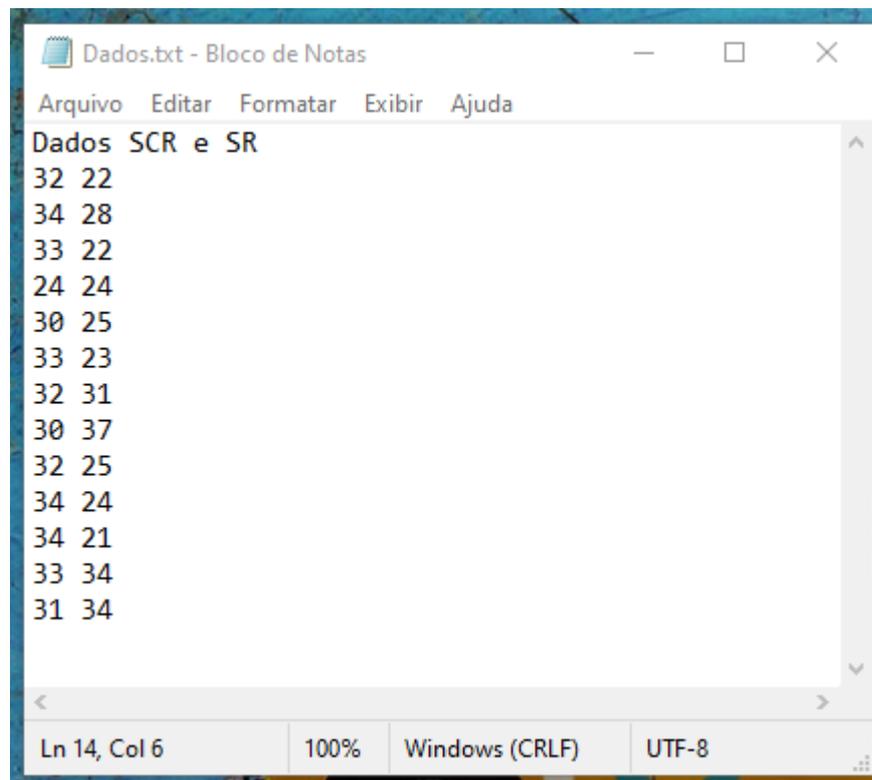
Tabela 4: Caracterização das unidades geotécnicas segundo SCR e SR.

<b>Unidade Geotécnica</b>	<b>Litotipo</b>	<b>SCR</b>	<b>SR</b>
1	Mármore	32	22
2	Mármore	34	28
3	Mármore	33	22
4	Mármore	24	24
5	Mármore	30	25
6	Mármore	33	23
7	Mármore	32	31
8	Mármore	30	37
9	Mármore	32	25
10	Mármore	34	24
11	Mármore	34	21
12	Diabásio	33	34
13	Diabásio	31	34

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do desenvolvimento do aplicativo, foi possível inserir os dados da Mina Capiru e validar o programa. Os valores de SCR e SR de cada unidade geotécnica foram adicionados à planilha da aba “Inserir Pontos”, salvos no computador e, posteriormente, abertos no programa. A Figura 11 mostra como ficou o arquivo de texto salvo.

Figura 11: Arquivo de texto criado a partir do aplicativo.



Os pontos inseridos no programa foram plotados no ábaco do GSI na aba principal, como mostra a Figura 12. De acordo com os resultados plotados, percebe-se uma concentração de unidades geotécnicas com valores de GSI em torno de 55. Apesar de mais espaçados no ábaco, há outra concentração com resultados variando entre 60 e 70. Além disso, nota-se uma unidade geotécnica com índice de qualidade menor, com  $GSI = 46$ , devido à pior condição de superfície do que as demais.

A espacialização dos resultados no ábaco permite a visualização de qual fator interfere mais na qualidade do maciço. Isso não é possível quando o GSI é calculado, uma vez que apenas a soma de SCR e SR é fornecida, fazendo com que seja necessário analisar os dados de entrada.



Tabela 5: Valores de GSI obtidos do ábaco e da soma de SCR e SR para as unidades geotécnicas da Mina Capiru.

Unidade Geotécnica	GSI Ábaco	GSI Calculado
1	52	54
2	61	62
3	54	55
4	46	48
5	53	55
6	54	56
7	62	63
8	66	67
9	55	57
10	56	58
11	54	55
12	66	67
13	64	65

Figura 13: Gráfico com os valores de GSI obtidos de diferentes formas, no qual é possível observar a pouca variação entre os resultados.



Observando os resultados, percebe-se que a diferença entre eles é muito pequena e, do ponto de vista da precisão apresentada pelos autores, é insignificante, uma vez que os valores variaram no máximo em 2 pontos. Dessa forma, pode-se afirmar que a falta de paralelismo e equidistância das linhas do ábaco não influencia nos resultados obtidos nesse trabalho.

O uso das escalas A e B de Hoek *et al.* (2013) para a entrada de dados no GSI se mostra de fácil aplicação, e permite a tradução dos parâmetros qualitativos em números, o que facilita a organização e comparação dos dados. Porém é fortemente subjetiva, uma vez que a atribuição

dos valores de SCR e SR depende da interpretação do usuário acerca das feições estruturais das condições de superfície das descontinuidades. Dessa forma, o aplicativo se mostra uma boa opção para os profissionais que pretendem aplicar o GSI utilizando números apenas para facilitar a plotagem dos pontos no ábaco.

Comparando com os dados de campo, percebe-se que os resultados condizem com a realidade, uma vez que as unidades compostas por diabásio tem valores de GSI mais altos, já que são, em geral, menos estruturadas e a rocha é mais resistente ao intemperismo do que o mármore. Além disso, a unidade geotécnica com menor valor de GSI é justamente ao lado de onde o dique atua como uma barreira hidráulica do aquífero livre, fazendo com que mais água se acumule ali, sendo comum presenciar gotejamento nas fraturas. A presença de água acelera o intemperismo do maciço principalmente no mármore, fazendo com que o SCR tenha valor menor do que em locais onde não há percolação constante.

Como foi abordado no capítulo da revisão bibliográfica, programas de classificação de maciços rochosos não são comuns e muitos deles são pagos, o que os torna inacessíveis para uma parcela dos profissionais da geologia e engenharia geotécnica. Mesmo considerando os *softwares* livres, não foram encontrados programas que classifiquem segundo o GSI diretamente, apenas a partir de equações empíricas cujos dados de entrada são os resultados de outros métodos, como o Q e RMR. Sabe-se que esse tipo de uso do GSI é limitado pois depende das situações em que as outras classificações sejam aplicáveis. Com isso, percebe-se que a criação de um aplicativo que classifique diretamente segundo o GSI vem a contribuir com a comunidade científica, principalmente se for distribuído de forma livre para o uso responsável de profissionais da geotecnia.

## 6. CONCLUSÕES

Com o entendimento do sistema GSI, as razões de sua origem e as modificações ao longo dos anos, é possível perceber que se trata de uma classificação com objetivo de auxiliar na aplicação do critério de ruptura Hoek-Brown, diferentemente dos métodos RMR e Q, que tem a intenção de sugerir projetos de suporte para túneis. O uso do GSI é simples e facilita a caracterização do maciço rochoso utilizando observações visuais de campo. Ao mesmo tempo, há diversas propostas de quantificação para profissionais ou situações em que não se tenha tanta confiança no uso da avaliação qualitativa. Ainda assim, é um método com várias limitações, não podendo ser aplicado em qualquer maciço rochoso. Isso demanda do usuário o bom conhecimento do GSI e do maciço em que se está trabalhando para que não seja feita uma análise equivocada da sua qualidade.

A partir do conhecimento dessa classificação, foi possível desenvolver um aplicativo de forma que permite plotar dados de caracterização geotécnica do maciço e obter resultados em uma interface gráfica. O programa é fácil de ser utilizado e intuitivo, o que faz com que não seja necessário um treinamento para seu uso. Permite a avaliação de vários pontos ao mesmo tempo, e dá liberdade ao usuário de usá-lo da forma que preferir, bem como lançar um ponto por barras de rolagem em tempo real. Vale ressaltar que o aplicativo é extremamente dependente da interpretação do usuário para que o resultado seja confiável.

Com a validação do aplicativo no uso dos dados levantados na Mina Capiru, em Rio Branco do Sul, percebe-se que a falta de paralelismo das linhas do ábaco original do GSI, neste trabalho, não influenciou de forma prática no resultado e, também, que os resultados obtidos traduzem bem a realidade das unidades geotécnicas avaliadas.

Dessa forma, considera-se que o programa traz de forma simples e acessível a aplicação do método para os profissionais da área de geotecnia. É importante levar em consideração o fato de que são poucos os *softwares* de classificação de maciços rochosos disponíveis no mundo, e mais escassos ainda os livres, fazendo com que o programa desenvolvido seja inovador.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de um sistema tão complexo como o GSI permite que muitas dúvidas surjam em relação à sua aplicação, bem como às diversas propostas de quantificação. Além disso, a relação íntima com o critério de ruptura de Hoek-Brown permite uma avaliação mais completa de todo o processo de classificação do maciço rochoso.

Assim, considera-se importante o aprofundamento do estudo do método em algumas questões pouco explicadas, como as áreas “N/A” do ábaco, que foram pouco abordadas neste trabalho. Seria interessante entender melhor os detalhes que fizeram limitar a aplicação daquelas classes de SR, bem como analisar o contexto dos estudos que as fizeram ser inseridas.

Outro ponto que levanta questionamentos é acerca das diversas propostas de quantificação. Seria de grande valia analisar os detalhes de cada uma, aplicá-las em maciços diferentes e comparar seus resultados, analisando quais métodos produzem resultados mais assertivos em cada caso.

Em relação à metodologia aplicada, seria interessante desenvolver uma análise estatística de forma a verificar a variação dos resultados a partir do ábaco original do GSI e da soma do SCR e SR. Dessa forma seria possível conferir se a pequena variação dos valores de GSI obtidos nesse trabalho se aplica em qualquer situação, o que permitiria o uso dos resultados do GSI calculado sem a necessidade confirmação pelo ábaco.

Do ponto de vista do aplicativo criado, é recomendável que se continue o seu desenvolvimento, tanto de forma a abranger outras classificações de maciços rochosos, como o RMR, SMR, Q e *Q-Slope*, quanto se projetar a interface gráfica do ábaco do GSI para maciços heterogêneos, ampliando sua utilização pelo usuário.

Por fim, as comparações realizadas nesse trabalho e as conclusões obtidas poderiam ser validadas pela continuidade do processo, ao aplicar os valores de GSI na estimativa das propriedades dos maciços utilizadas no critério de ruptura de Hoek-Brown. Dessa forma, seria possível avaliar diretamente a influência do ábaco original e do GSI calculado nas constantes de Hoek-Brown.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTODESK. Autocad 2018 (Release 22.0). Mar 2017.

BAR, N.; BARTON, N. The Q-Slope method for rock slope engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, Austria, Ed. Springer, 2017.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech, v. 5, n. 4, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., v. 15, n. 12, p. 335-343, 1973.

DELIORMANLI, A. H.; ONARGAN, T. Rock Mass Classification Using a Computer Program – ClassMass. 18<sup>th</sup> International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET, Antalya, Turkey, 2003.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Curitiba: Editora UFPR, 2ed, 2009, 604p.

HOEK, E.; BROWN, E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1-19, 2018.

HOEK, E.; CARTER, T. G.; DIEDERICHS, M. S. Quantification of the Geological Strength Index chart. American Rock Mechanics Association – ARMA, 47<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 2013.

HUSSIAN, S.; MOHAMMAD, N.; REHMAN, Z. U.; KHAN, N. M.; SHAHZADA, K.; ALI, S.; TAHIR, M.; RAZA, S.; SHERIN, S. Review of the Geological Strength Index (GSI) as an empirical classification and rock mass property estimation tool: origination, modifications, applications and limitations. Advances in Civil Engineering, Hindawi, 18p., 2020.

LAZARUS-IDE. Copyright 1993-2022. Disponível em: <https://www.lazarus-ide.org/index.php>. Acesso em: 09 jan 2022.

LAZARUS-IDE. Versão 2.0.12. Disponível em: <https://www.lazarus-ide.org/index.php?page=downloads>. Acesso em: 14 out 2021.

MARCELINO, J.; MANSO, J. Code-Aster: reflexões sobre a utilização de *software* livre em engenharia. 2009.

MARINOS, P.; MARINOS, V.; HOEK, E. The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses. 2007.

MARINOS, P.; MARINOS, V.; HOEK, E. The Geological Strength Index: applications and limitations. Eng. Geol. Environ. v. 64, p. 55-65, 2005.

O que é e pra que serve IDE? PSAFE, 2014. Disponível em: <https://www.psafe.com/blog/o-que-serve-ide/>. Acesso em 09 jan 2022.

ONSEL, I. E.; OZTURK, C. A.; OZKAN, M.; NASUF, S. E. Software for RQD and Rock Mass Evaluation. American Rock Mechanics Association – ARMA, 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA, 2011.

Rock Masses and Software. GEOSTRU, 2020. Disponível em: <https://www.geostru.eu/blog/2020/02/28/rock-masses-and-software-2/?lang=en>. Acesso em: 08 dez 2021.

RODRIGUES, S. Apostila de Técnicas de Programação e Linguagem Pascal. COS-UFRJ, 63p., 2007. Disponível em: <https://www.cos.ufrj.br/~sergio/ApostilaPascal.pdf>. Acesso em: 09 jan 2022.

ROMANA, M.; TOMÁS, R.; SERÓN, J. B. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. ISRM Congress 015 Proceedings – International Symposium of Rock Mechanics, Quebec, Canada, May 10 to 13, 2015, 10p.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (editores). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 211-226.

Software tagged with rock mass classification system. GEOTECHPEDIA, s.d.. Disponível em: <https://geotechpedia.com/Software/Tag/1744/rock-mass-classification-system>. Acesso em: 08 dez 2021.