U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

SOBRE O USO DO GSI NA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VARIABILIDADE DO MACIÇO NO DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS

PEDRO ALEXANDRE DOS SANTOS MAIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

Professor Doutor Paulo Miguel Cunha Matos Lopes Pinto

JUNHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos Meus Pais

"Todos tentam realizar algo grandioso,

sem repararem que a vida se compõe de coisas pequenas"

Frank Clark

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor António Campos e Matos pela ajuda e orientação que deu no decorrer deste trabalho, disponibilizando todo o seu conhecimento e meios à disposição.

Aos meus pais por todo o apoio, carinho, dedicação e acompanhamento que me dão ao longo destes anos.

Ao Prof. Doutor Paulo Pinto pela ajuda e disponibilidade no apoio à realização deste trabalho.

À empresa GEG por permitir utilizar as suas instalações para trabalho e por todo o material de apoio cedido.

Ao Engenheiro Mário Durão, da empresa GEG, pelo apoio, disponibilidade e pelo material e experiência profissional que me partilhou.

Aos amigos que sempre estiveram e estão comigo, incluindo aqueles que apoiaram no trabalho.

Aos colegas de curso pelo companheirismo, ajuda e amizade ao longo destes anos.

RESUMO

Com este trabalho pretende-se analisar o efeito da variabilidade do maciço rochoso para o dimensionamento de túneis, utilizando o parâmetro GSI.

Faz-se uma descrição das classificações de maciços rochosos que actualmente são mais utilizadas e melhor implementadas nos dias de hoje, assim como uma referência a algumas dificuldades inerentes ao processo de escavação de maciços rochosos.

Para o estudo do GSI, é estudada uma obra concreta, o Túnel de Gondomar, já em fase de exploração à data de realização deste trabalho. Dessa forma, existem registos de valores durante a fase de escavação e existem os elementos de previsão. Esses elementos foram cedidos para a realização deste estudo.

É efectuado um estudo e tratamento estatístico dos valores de GSI de previsão e de medição em obra, calculando os coeficientes de variação inerentes e analisando as diferenças encontradas no maciço rochoso ao longo da extensão do túnel.

Com esta análise e comparação, avalia-se a confiança e a influência que o parâmetro GSI teve na obra e as suas possíveis consequências, uma vez que deste parâmetro derivam os valores de estimativa dos parâmetros de resistência do maciço rochoso, utilizados no projecto de dimensionamento estrutural do túnel.

PALAVRAS-CHAVE: GSI, túnel, subterrânea, maciço rochoso, escavação.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the rock mass variability's effect on the tunnels design by using the GSI parameter.

We present a description of today more often used and better implemented rock mass classifications, as well as a reference to some inherent difficulties in the process of rock mass excavation.

In order to study the GSI, we studied the concrete work of the *"Túnel de Gondomar"*, already in operation as we present this work. Thus, there are records of values during the excavation and there are forecast elements. Those elements were provided for this study.

We present a study and statistical treatment of the prediction and measurements of GSI values on-site, calculating the inherent variation coefficients and analyzing the differences found in the rock mass along the tunnel's length.

This analysis and comparison allow us to evaluate the trust and influence that the GSI parameter had this work, as well as its possible consequences, since from this parameter derive values to estimate the rock mass's strength parameters, used in the design of the tunnel's structural measurement.

KEYWORDS: GSI, underground, rock mass, tunnel, excavation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

2. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 3
2.1. INTRODUÇÃO 3
2.2. CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA DE MACIÇOS ROCHOSOS 3
2.2.1. BREVE REFERÊNCIA À CLASSIFICAÇÃO DE TERZAGHI 4
2.2.2. RQD (*"ROCK QUALITY DESIGNATION"*) 4
2.2.3. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA (BGD – "*BASIC GEOTECHNICAL DESCRIPTION*") 7
2.3. CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA E GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS 8
2.3.1. INTRODUÇÃO 8
2.3.2. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKY – RMR ("*ROCK MASS RATING*") 9
2.3.3. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BARTON – Q (ÍNDICE DE QUALIDADE) 13
2.3.4. CLASSIFICAÇÃO DE HOEK E BROWN – GSI (ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA) 19
2.3.4.1. Critério Generalizado de Rotura de Hoek-Brown 19
2.3.4.2. Classificação GSI 20
2.4. BREVE REFERÊNCIA A INSTABILIDADE E ESCAVAÇÕES EM ROCHAS 23
2.4.1. ESCAVAÇÃO EM ROCHA DURA 23
2.4.2. ESCAVAÇÃO EM ROCHA FRACA 24
2.4.3. INSTABILIDADE CONTROLADA EM TÚNEIS 24
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 25

3. DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA 27
3.1. INTRODUÇÃO 27
3.2. ENQUADRAMENTO GERAL 27
3.2.1. METRO DO PORTO 27
3.2.2. LINHA DE METRO DE GONDOMAR 28

3.2.3. O TÚNEL DE GONDOMAR 30
3.3. OBRA SUBTERRÂNEA – TÚNEL DE GONDOMAR 31
3.3.1. DISPOSIÇÕES BÁSICAS DO PROJECTO 31
3.3.2. CONDIÇÕES GEOLÓGICAS 35
3.3.3. CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS 35
3.3.3.1. Maciço Rochoso Granítico 35
3.3.3.2. Zona de Contacto 36
3.3.3.3. Maciço Rochoso Xistento 36
3.3.4. DEFINIÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS 36
3.3.5. MÉTODO DE CONSTRUÇÃO DO TÚNEL 38

4. PARÂMETROS PREVISTOS E OBTIDOS EM OBRA 41
4.1. INTRODUÇÃO 41
4.2. PARÂMETROS DE PREVISÃO 41
4.2.1. INTRODUÇÃO 41
4.2.2. ENSAIOS REALIZADOS 42
4.2.3. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS GEOTÉCNICOS 43
4.2.4. CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO 43
4.3. VALORES DE GSI PREVISTOS 45
4.4. VALORES DE GSI MEDIDOS 56

5. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS VALORES DE GSI 67
5.1. INTRODUÇÃO 67
5.2. ELEMENTOS COMPARATIVOS 67
5.2.1. COEFICIENTES DE VARIAÇÃO 67
5.2.2. ANÁLISE DOS VALORES DO GSI E SUA VARIABILIDADE 69
5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS 82

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 85

BIBLIOGRAFIA 87

ANEXOS 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Exemplo de Cálculo do RQD 6
Fig. 2 – Classes de Suporte Estimadas para o Sistema de Classificação Q 18
Fig. 3 – Correlação entre RMR e Q 19
Fig. 4 – Caracterização do Maciço Rochoso com Base na Observação – GSI 21
Fig. 5 – Estimativa do Valor do GSI com Base na Descrição Geológica 22
Fig. 6 – Mapa da Linha do Metro de Gondomar 29
Fig. 7 – Estação de Nau Vitória 29
Fig. 8 – Mapa de Localização do Túnel de Gondomar 30
Fig. 9 – Construção de Túnel a Céu Aberto, no Túnel de Gondomar 32
Fig. 10 – Escavação de Túnel Mineiro 32
Fig. 11 – Poço de Ventilação e de Emergência 33
Fig. 12 – Escavação de Poço de Ventilação e de Emergência 33
Fig. 13 – Intersecção com a Estrutura Tipo Caixa (1) 34
Fig. 14 – Intersecção com a Estrutura Tipo Caixa (2) 34
Fig. 15 – Aplicação da Membrana Impermeável 38
Fig. 16 – Estrutura com Suporte Secundário e Aspecto Final 39
Fig. 17 – GSI Previsto na Zona 1 48
Fig. 18 – GSI Previsto na Zona 2 48
Fig. 19 – GSI Previsto na Zona 3 49
Fig. 20 – GSI Previsto na Zona 4 49
Fig. 21 – GSI Previsto na Zona 5 50
Fig. 22 – GSI Previsto na Zona 6 50
Fig. 23 – GSI Previsto na Zona 7 51
Fig. 24 – GSI Previsto na Zona 8 51
Fig. 25 – GSI Previsto na Zona 9 52
Fig. 26 – GSI Previsto na Zona 10 52
Fig. 27 – GSI Previsto na Zona 11 53
Fig. 28 – GSI Previsto na Zona 12 53
Fig. 29 – GSI Previsto na Zona 13 54
Fig. 30 – GSI Previsto na Zona 14 54
Fig. 31 – GSI Previsto na Zona 15 55

Fig. 32 – GSI Previsto na Zona 16 55
Fig. 33 – GSI Medido em Obra na Zona 1 58
Fig. 34 – GSI Medido em Obra na Zona 2 58
Fig. 35 – GSI Medido em Obra na Zona 3 59
Fig. 36 – GSI Medido em Obra na Zona 4 59
Fig. 37 – GSI Medido em Obra na Zona 5, parte a) 60
Fig. 38 – GSI Medido em Obra na Zona 5, parte b) 60
Fig. 39 – GSI Medido em Obra na Zona 6 61
Fig. 40 – GSI Medido em Obra na Zona 7 61
Fig. 41 – GSI Medido em Obra na Zona 8 62
Fig. 42 – GSI Medido em Obra na Zona 9 62
Fig. 43 – GSI Medido em Obra na Zona 10 63
Fig. 44 – GSI Medido em Obra na Zona 11 63
Fig. 45 – GSI Medido em Obra na Zona 12 64
Fig. 46 – GSI Medido em Obra na Zona 13 64
Fig. 47 – GSI Medido em Obra na Zona 14 65
Fig. 48 – GSI Medido em Obra na Zona 15, parte a) 65
Fig. 49 – GSI Medido em Obra na Zona 15, parte b) 66
Fig. 50 – GSI Medido em Obra na Zona 16 66
Fig. 51 – Coeficientes de Variação dos Valores de GSI ao Longo do Túnel, Representação 1 68
Fig. 52 – Coeficientes de Variação dos Valores de GSI ao Longo do Túnel, Representação 2 69
Fig. 53 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 1 70
Fig. 54 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 2 71
Fig. 55 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 3 71
Fig. 56 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 4 72
Fig. 57 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 5 73
Fig. 58 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 6 74
Fig. 59 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 7 75
Fig. 60 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 8 76
Fig. 61 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 9 76
Fig. 62 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 10 77
Fig. 63 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 11 77
Fig. 64 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 12 78

Fig. 65 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 13.....78
Fig. 66 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 14.....80
Fig. 67 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 15.....81
Fig. 68 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 16.....81

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Graus de Alteração de Maciços Rochosos 5
Quadro 2 – Graus de Fracturação de um Maciço Rochoso 5
Quadro 3 – Classificação RQD de Maciços Rochosos 6
Quadro 4 – Classes de Espessura das Camadas 7
Quadro 5 – Classes de Resistência à Compressão Simples 8
Quadro 6 – Classes de Ângulo de Atrito das Fracturas 8
Quadro 7 – Qualidade do Maciço Rochoso 9
Quadro 8 – Resistência à Compressão Uniaxial da Rocha Intacta 10
Quadro 9 – RQD 10
Quadro 10 – Espaçamento das Descontinuidades 11
Quadro 11 – Condição das Descontinuidades – Opção a) 11
Quadro 12 – Condição das Descontinuidades – Opção b) 12
Quadro 13 – Influência da Água 12
Quadro 14 – Orientação das Descontinuidades 12
Quadro 15 – Classificação RMR 13
Quadro 16 – RQD – Designação da Qualidade da Rocha – Q1 14
Quadro 17 – J_n – Índice das Famílias de Diáclases – Q2 14
Quadro 18 – J_r – Índice de Rugosidade das Diáclases – Q3 15
Quadro 19 – J_w – Índice das Condições Hidrogeológicas – Q5 15
Quadro 20 – J_a – Grau de Alteração das Descontinuidades – Q4 16
Quadro 21 – SRF – Factor de Redução de Tensões – Q6 17
Quadro 22 – Índice de Segurança ESR para Obras Subterrâneas (Q) 18
Quadro 23 – Litologia ao Longo do Túnel 35
Quadro 24 – Unidades Geotécnicas e Respectiva Descrição 37
Quadro 25 – Parâmetros Geotécnicos de Projecto 43
Quadro 26 – Classificação Preliminar RMR 44
Quadro 27 – Valores de GSI Estimados 44
Quadro 28 – Classificação do Maciço Rochoso 45
Quadro 29 – Zonamento 46
Quadro 30 – Valores do GSI Previstos 46
Quadro 31 – Valores Medidos em Obra 57

Quadro 32 – Coeficientes de Variação da Obra 68

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a – Constante do Método de Hoek-Brown

BGD – *"Basic Geotecnical Description"*

E – Módulo de Elasticidade

$E_{d,l}$ – Módulo de Elasticidade, determinado em laboratório

$E_{d,m}$ – Módulo de Elasticidade, determinado no local

ESR – "*Excavation Support Ratio"*

GSI – "*Geological Stress Index"*

Já – Grau de Alteração das Descontinuidades

Jn – Índice das Famílias de Diáclases

Jr – Índice de Rugosidade das Diáclases

Jv – Índice Volumétrico

Jw – Índice das Condições Hidrogeológicas

m – Constante de Hoek e Brown para Maciços Rochosos

m_b – Constante de massa de Hoek e Brown para Maciços Rochosos

NATM – Novo Método Austríaco de construção de Túneis

Q – Índice de Qualidade

RMR – *"Rock Mass Rating"*

RQD – *"Rock Quality Designation"*

s – Constante do Método de Hoek-Brown

SRF – Factor de Redução de Tensões

V_p – Ondas Sísmicas Longitudinais

$V_{p,l}$ – Ondas Sísmicas Longitudinais, determinadas em laboratório

$V_{p,m}$ – Ondas Sísmicas Longitudinais, determinadas no local

V_s – Ondas Sísmicas Transversais

σ_1 – Tensão Segundo a Direcção Principal de Tensões

σ'_1 – Tensão Efectiva Máxima de Rotura

σ'_3 – Tensão Efectiva Mínima de Rotura

σ_c – Resistência à Compressão

σ_{ci} – Resistência à Compressão Uniaxial

1
INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos têm vindo a ser elaborados e aperfeiçoados métodos de classificação de maciços rochosos, com vista a caracterizar e definir de forma mais correcta e elaborada os respectivos maciços, para serem utilizados estes elementos na elaboração de diversas obras de engenharia, desde a construção de poços, túneis, cavernas, entre outros elementos de obras subterrâneas, ou até mesmo para obras de fundações de obras de arte de maior porte.

Qualquer obra de arte ou estrutura necessita de estar assente ou fundada sobre elementos resistentes e firmes, que sejam capazes de suportar e estabilizar a estrutura durante toda a sua longevidade. Geralmente, as estruturas são construídas sobre solos ou sobre maciços rochosos. No caso de obras subterrâneas, as construções estão sempre associadas a maciços rochosos.

Para a caracterização de solos, existem classificações e métodos definidos e aceites internacionalmente na comunidade geotécnica, que uniformizam e asseguram o seu uso e a sua eficácia. Existem normas e regras implementadas que estão cientificamente comprovadas e são aceites como seguras e de confiança.

Quando falamos de maciços rochosos, não existe nenhum método ou classificação universalmente implementado e aceite por toda a comunidade, com vista a ser utilizado para todas as obras subterrâneas, pelo que existem vários métodos, cada um com as suas especificações, que são utilizados em função da escolha ou preferência de quem faz o projecto.

No entanto, nos últimos anos, cada vez mais tem vindo a ser implementado e utilizado um método, criado por *Evert Hoek*, com aceitação crescente pela comunidade geotécnica, apesar de ainda não ter sido implementado como o método oficial para a classificação de maciços rochosos para fins de engenharia.

Desta forma, pretende-se com este trabalho avaliar o efeito da variabilidade do uso desta classificação de *Evert Hoek* no dimensionamento de túneis. Uma vez que é a partir da classificação GSI que são estimados outros parâmetros do maciço que são utilizados para o projecto de dimensionamento do túnel, será analisada a variabilidade do GSI ao longo de uma obra, uma vez que existem elementos de previsão do GSI e foram efectuadas medições do GSI ao longo da escavação.

Assim, no Capítulo 2, são apresentadas várias classificações geológicas e geotécnicas de maciços rochosos, mais comummente utilizadas, por vezes em simultâneo, dando maior atenção à classificação de *Hoek*, uma vez que é a base deste trabalho. Também será efectuada uma breve referência à instabilidade e escavação em rochas.

No Capítulo 3 será apresentada a obra que serviu de base a este trabalho, o Túnel de Gondomar, para circulação de veículos do metro ligeiro de superfície do Porto. É efectuado um enquadramento geral da obra e uma caracterização geológica e geotécnica ao longo da extensão do túnel, fazendo referência às disposições básicas do respectivo projecto.

No Capítulo 4 são descritos, sucintamente, os trabalhos que foram realizados para a obtenção dos valores GSI previstos, que são tratados estatisticamente e apresentados. Relativamente aos valores da obra, que foram medidos ao longo da escavação, é apresentada a representação estatística também efectuada para esses elementos.

No Capítulo 5 são apresentados e comparados os valores do GSI previstos e os obtidos em obra, assim como é analisada a sua variabilidade, complementando com o cálculo de coeficientes de variação característicos das análises estatísticas.

Por último, no Capítulo 6, são efectuadas as considerações finais a todo este trabalho e à informação retirada e tratada, expondo as conclusões obtidas após esta comparação de elementos sobre o GSI e são deixadas algumas indicações de trabalhos que poderiam ser realizados neste campo, para aperfeiçoar e estimular o aumento do uso deste método e deste índice.

2
CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.1. INTRODUÇÃO

O projecto de túneis implica sempre uma escavação mineira, próxima da superfície ou em profundidade. Ao contrário de outras obras ou estruturas de engenharia, como estruturas de betão armado ou estruturas metálicas, não é possível definir com elevada precisão qual o comportamento e resistência dos maciços rochosos enquanto estrutura, uma vez que existe a possibilidade de uma variabilidade imensa e não é possível uma observação plena do respectivo maciço.

No estudo de terrenos para fins de engenharia civil, a classificação dos maciços é um dos aspectos mais importantes, pois é o ponto de partida para o desenvolvimento de qualquer projecto e obra. A classificação visa a consequente definição de parâmetros que caracterizem o respectivo maciço. A sua importância varia consoante o tipo de estrutura a projectar, sejam fundações, túneis, cavernas, minas, entre outras.

No presente trabalho, importa analisar os maciços rochosos para efeitos de escavação de túneis mineiros.

2.2. CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

Na fase inicial de um projecto, quando se pretende fazer o estudo de uma formação rochosa pertinente para uma obra subterrânea de engenharia, é conveniente iniciar por uma classificação geológica, pois permite a obtenção rápida de informação implícita na classificação.

Através da classificação geológica, é possível ter uma noção da possibilidade de ocorrência de fenómenos de dissolução em rochas solúveis, a existência de vazios nos maciços que podem originar subsidência ou colapso da superfície de terrenos ou até mesmo comportamentos hidráulicos associados à permeabilidade nas descontinuidades.

Para estas classificações, existem alguns parâmetros importantes que é necessário quantificar ou qualificar: o estado de alteração do material, o estado de fracturação, a existência ou não de material de enchimento de diáclases e a qualidade do maciço. Em regra, os parâmetros usados na classificação da qualidade dos maciços provêm da informação dos estados de alteração e fracturação. No entanto, é necessário ressalvar que estas informações são um pouco subjectivas, pois dependem da observação do geólogo e podem variar consoante a opinião do observador.

2.2.1. BREVE REFERÊNCIA À CLASSIFICAÇÃO DE *TERZAGHI*

A primeira referência bibliográfica ou publicação que se pode encontrar relativamente à classificação de maciços rochosos para o projecto de estruturas de suporte de túneis remonta a 1946, por *Terzaghi*, em que as cargas das rochas suportadas por elementos metálicos estão na base do método.

Apresenta-se uma descrição detalhada, pelo próprio autor, nas características dos maciços, de comportamento dominante, especialmente em situações onde a acção da gravidade desempenha a acção principal. As definições são claras e precisas e são bons exemplos de informação para a engenharia geológica e para os projectos. [1]

- **Rocha intacta** não contém diáclases nem fendas. Se romper ou quebrar, quebra ao longo de rocha sólida. Ao avaliar danos devido a explosões, lascas ou pedaços podem cair do tecto várias horas ou dias após a explosão. Dificilmente, rocha dura também pode ser encontrada na condição que envolve a espontânea e violenta separação de lajes de rocha das paredes ou tecto;
- **Rocha estratificada** consiste na particularização de estratos de pouca ou nenhuma resistência contra a separação ao longo dos limites entre estratos. Os estratos podem ou não estar ou ser enfraquecidos por diáclases transversais. Neste tipo de rocha, a ocorrência de lascas é frequente;
- **Rocha moderadamente desmanchada ou repartida** contém diáclases e fissuras mas os blocos entre as diáclases estão desenvolvidos juntos ou estão interligados para que as paredes laterais não necessitem de estrutura de suporte. Tanto a ocorrência de lascas como o "*popping*" podem ser encontrados;
- **Rocha em blocos e imperfeita** consiste em rocha quimicamente intacta ou em fragmentos quase quimicamente intactos que são separáveis na totalidade uns dos outros e interligados de forma imperfeita. Nestes casos, as paredes laterais precisam de estrutura de suporte;
- **Rocha britada** mas quimicamente intacta tem aspectos de elementos de brita. Se a maioria dos fragmentos são pequenos como grãos de areia e a cimentação já ocorreu, as rochas esmagadas abaixo do nível freático exibem propriedades de areia aquífera;
- **Rocha esmagada** avança lentamente para o túnel sem a percepção de aumento de volume. Um pré-requisito para este tipo de rocha é uma elevada percentagem de partículas microscópicas de mica e argila com fraca capacidade de expansão;
- **Rocha expansiva** avança para o túnel principalmente com grande expansão. A expansibilidade está limitada às rochas que contêm argila fortemente expansível.

2.2.2. RQD ("*ROCK QUALITY DESIGNATION*")

Como referido anteriormente, as características que definem a qualidade dos maciços rochosos são a consequência do estado de alteração e fracturação dos maciços.

O estado de alteração baseia-se na observação de amostras do maciço e divide-se, geralmente, em graus de alteração, de forma a pormenorizar a informação observada. O Quadro 1 apresenta a divisão, classificação e características dos graus de alteração dos maciços. [14]

Quadro 1 – Graus de Alteração de Maciços Rochosos

Classificação	Descrição	Características
W1	São	Sem quaisquer sinais de alteração
W2	Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W3	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W4	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
W5	Decomposto (saibro)	O maciço apresenta-se completamente friável com comportamento de solo

Ao realizarem-se sondagens com recuperação contínua de amostra é frequentemente medida a percentagem de recuperação resultante das operações de furação. Trata-se de um indicador em que se divide a soma dos comprimentos de todos os tarolos obtidos pelo comprimento do trecho furado, multiplicado por cem. Embora não exista nenhuma tabela que faça alguma classificação baseada neste indicador, sabe-se que para percentagens superiores a 80% o maciço é pouco alterado, logo de boa qualidade, e para percentagens inferiores a 50% o maciço é muito alterado, logo de fraca qualidade.

De forma semelhante ao estado de alteração do maciço, o estado de fracturação de um maciço rochoso, que avalia o espaçamento entre diáclases, é dividido em graus de classificação, como apresentado no Quadro 2. [14]

Quadro 2 - Graus de Fracturação de um Maciço Rochoso

Classificação	Intervalo entre Fracturas (cm)	Descrição
F1	> 200	Muito afastadas
F2	60 – 200	Afastadas
F3	20 – 60	Medianamente afastadas
F4	6 – 20	Próximas
F5	< 6	Muito próximas

Baseado nestes dois estados, alteração e fracturação, em 1967, *Deere* criou um índice para estimar uma quantificação da qualidade dos maciços rochosos, a partir das sondagens com recuperação contínua de amostra.

O RQD, *"Rock Quality Designation"*, é a percentagem de material intacto com mais de 10 centímetros de comprimento no total da amostra. A sua determinação deve ser feita em sondagens com diâmetro superior a 55 milímetros e realizadas com amostradores de parede dupla ou tripla.

No Quadro 3 são apresentados os valores e respectiva qualidade, classificação RQD. Na Fig.1 está um exemplo de cálculo do RQD, em que existe uma amostra com 2 metros de comprimento e algumas fracturas e é demonstrado como se efectua o cálculo. [14]

Quadro 3 - Classificação RQD de Maciços Rochosos

RQD (%)	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

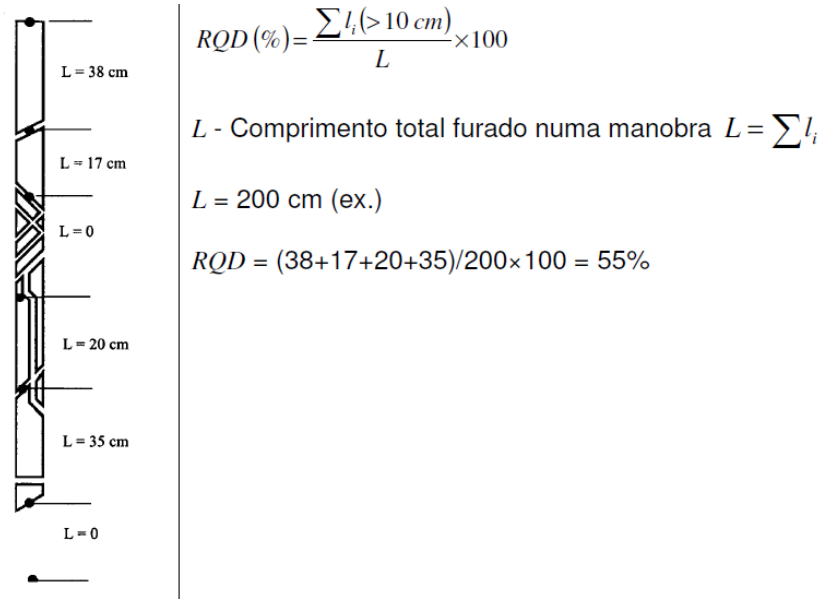


Fig. 1 - Exemplo de Cálculo do RQD

Em 1982, *Palmström* sugeriu que, quando não há possibilidade de recolha de amostras por sondagens mas existam descontinuidades visíveis no maciço ou em escavações, o RQD poderia ser estimado através do índice volumétrico, J_v, que é o somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento, recorrendo à relação evidenciada na expressão (1).

$$RQD = 115 - 3.3 * J_V \quad (1)$$

O RQD é um parâmetro para representar a qualidade do maciço rochoso no próprio local. Ao realizarem-se sondagens, pode frequentemente ocorrer fracturação de material devido ao processo de sondagem ou devido à descompressão do material ao ser retirado do maciço. É, por isso, importante distinguir quais seriam as fracturas já existentes no maciço e quais as que decorreram da extracção do material, para não influenciar positiva ou negativamente o resultado.

De forma semelhante, aquando da observação directa de maciços para determinar o J_v é necessário desprezar fracturas que possam ter ocorrido pelo uso de explosivos.

Não pode também ser deixado de reafirmar que o RQD é útil mas limitado, pelo que não será suficiente para uma boa classificação dos maciços rochosos.

2.2.3. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA (BGD – "*BASIC GEOTECHNICAL DESCRIPTION*")

A Descrição Geotécnica Básica é um sistema classificativo criado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas que visa estruturar a informação para fins de engenharia civil.

Este sistema foi elaborado tendo como finalidade criar um código de linguagem não ambíguo em que diferentes observadores classifiquem os maciços da mesma forma, contém informação quantitativa que permite resolver problemas práticos e é baseada em medições simples e não apenas em observações gerais.

Neste sentido, além dos aspectos já referidos, relativos à alteração e a fracturação dos maciços rochosos, este método acrescenta alguns parâmetros como caracterização geológica, a espessura de camadas, o espaçamento entre fracturas, a compressão simples da rocha e o ângulo de atrito das descontinuidades.

Para a aplicação deste método é necessário efectuar um zonamento do maciço que é analisado, para que dentro de cada zona definida haja alguma uniformidade nas propriedades do maciço.

No sentido de uniformizar estas classificações, nos Quadros 4 a 6, apresentam-se classificações através das classes de espessura das camadas, as classes de resistência à compressão simples e as classes de ângulo de atrito. [14]

Quadro 4 - Classes de Espessura das Camadas

Classificação	Espessura (cm)	Descrição
L1	> 200	Muito espessas
L2	60 – 200	Espessas
L3	20 – 60	Espessura mediana
L4	6 – 20	Delgadas
L5	< 6	Muito delgadas

Quadro 5 - Classes de Resistência à Compressão Simples

Classificação	Resistência à Compressão (MPa)	Descrição
S1	> 200	Muito elevada
S2	60 – 200	Elevada
S3	20 – 60	Média
S4	6 – 20	Baixa
S5	< 6	Muito baixa

Quadro 6 - Classes de Ângulo de Atrito das Fracturas

Classificação	Ângulo de Atrito (º)	Descrição
A1	> 45	Muito elevado
A2	35 – 45	Elevado
A3	25 – 35	Médio
A4	15 – 25	Baixo
A5	< 15	Muito baixo

Quando estamos perante rochas claramente anisotrópicas devemos registar os valores médios das resistências nas diversas direcções e também a direcção para a qual o valor das resistências é inferior.

Na descrição geotécnica básica, existe um zonamento em que cada zona é classificada de acordo com os Quadros 1, 2, 4, 5 e 6.

2.3. CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA E GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.3.1. INTRODUÇÃO

Os critérios apresentados anteriormente utilizam elementos de análises químicas, micropetrográficas e observação macroscópica de amostras. As classificações que serão apresentadas seguidamente destinam-se a fins de engenharia, onde ensaios físicos para a caracterização dos maciços têm maior importância. [14]

Apesar de ainda não haver nenhum sistema de classificação implementado para toda a comunidade técnica, uma vez que não há consenso generalizado nos métodos, alguns critérios de classificação são muito comuns e baseiam-se no módulo de elasticidade (E), velocidades de propagação de ondas sísmicas (V_p e V_s) e resistência à compressão simples (σ_c).

Relativamente às velocidades de propagação de ondas sísmicas, a fracturação ou descontinuidades nos terrenos afectam as velocidades de propagação nos ensaios realizados no próprio local. A avaliação da qualidade com base na velocidade das ondas não deixa distinguir se estamos perante um maciço fraco ou um maciço mais resistente mas com diversas fissuras ou descontinuidades. No entanto, existe um critério caracterizado pelo quociente das velocidades de propagação das ondas medidas no terreno e no

laboratório. Em condições ideais, o quociente é unitário. Quanto menor o quociente, maior será a presença de descontinuidades, pois estas provocam atraso na propagação das ondas longitudinais.

No Quadro 7 apresenta-se uma classificação da qualidade do maciço rochoso tendo como referência o quociente das ondas sísmicas ou o quociente dos módulos de elasticidade obtidos no local e em laboratório. É ainda apresentada uma correlação com o valor do RQD.

Quadro 7 - Qualidade do Maciço Rochoso

Qualidade do Maciço Rochoso	$V_{p,m}$ / $V_{p,l}$	$E_{d,m}$ / $E_{d,l}$	RQD (%)
Muito fraca	< 0,4	< 0,2	0 – 25
Fraca	0,4 – 0,6	02, - 0,4	25 – 50
Razoável	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6	50 – 75
Boa	0,8 – 0,9	0,6 – 0,8	75 – 90
Excelente	0,9 – 1,0	0,8 – 1,0	90 - 100

Ainda quanto à qualidade do maciço baseada na propagação de ondas sísmicas, esta também pode ser avaliada pelo amortecimento do sinal aquando do ensaio no local. Se o amortecimento for demorado, o maciço é geralmente de fraca qualidade. Por oposição, em amortecimento rápido o maciço classifica-se como sendo de boa qualidade.

Alguns autores têm tentado implementar sistemas de classificação de maciços rochosos para caracterizar maciços para obras especialmente subterrâneas. Dessa forma, apresentar-se-ão três sistemas de classificação intensamente implementados e utilizados actualmente.

2.3.2. Sistema de Classificação de Bieniawsky – RMR ("*Rock Mass Rating*")

Em 1976, baseando-se em dados recolhidos ao longo da sua experiencia em obras subterrâneas, *Bieniawsky* publicou a sua classificação de maciços rochosos, actualmente muito utilizada e divulgada, tendo vindo a ser aperfeiçoada à medida que aumenta o número de obras e casos práticos realizados. [1] [14]

Esta classificação baseia-se na atribuição de diferentes pesos aos parâmetros que o autor entendeu serem mais importantes e significativos no comportamento dos maciços. O índice RMR, é o somatório dos diversos pesos atribuídos aos respectivos parâmetros.

Existem seis parâmetros considerados:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD ("*Rock Quality Designation*");
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condição das descontinuidades;
- Influência da água;
- Orientação das descontinuidades.

Para utilizar esta classificação também é necessário efectuar um zonamento prévio em várias regiões estruturais para serem classificadas separadamente. C«ada zona tem particularidades diferentes das vizinhas, daí o zonamento.

Nos Quadros 8 a 14 são apresentadas as diversas características e pesos a utilizar nos seis parâmetros da respectiva classificação.

O Quadro 15 apresenta a classificação do maciço rochoso com base no RMR, dadas estimativas quanto à coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso e ainda indicações dos períodos de tempo em que deverão ser colocados os suportes de sustentação da escavação sob o risco de ocorrer a rotura da abertura.

Quadro 8 - Resistência à Compressão Uniaxial da Rocha Intacta

Carga Pontual (MPa)	Compressão uniaxial (MPa)	Peso
Ver compressão uniaxial	< 1	0
Ver compressão uniaxial	1 – 5	1
Ver compressão uniaxial	5 – 25	2
1 – 2	25 – 50	4
2 – 4	50 – 100	7
4 – 10	100 – 250	12
> 10	> 250	15

Quadro 9 - RQD

RQD (%)	Peso
< 25	3
25 – 50	8
50 – 75	13
75 – 90	17
90 - 100	20

Quadro 10 - Espaçamento das Descontinuidades

Espaçamento	Peso
< 60 mm	5
60 – 200 mm	8
200 – 600 mm	10
0,6 – 2,0 m	15
> 2,0 m	20

Quadro 11 - Condição das Descontinuidades – Opção a)

Comprimento da descontinuidade (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
Peso	6	4	2	1	0
Separação / abertura (mm)	Nenhuma	< 0,1	0,1 – 1,0	1,0 – 5,0	> 5,0
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de Alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Quadro 12 - Condição das Descontinuidades – Opção b)

Condição	Peso
Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm	0
Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1 – 5 mm	10
Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	20
Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	25
Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	30

Quadro 13 - Influência da Água

Caudal por 10 m de comprimento de túnel	Relação pressão da água versus tensão principal máxima	Condições gerais	Peso
> 125 l/min	> 0,5	Entrada de água	0
25 – 125 l/min	0,2 – 0,5	Escorrimentos	4
10 – 25 l/min	0,1 – 0,2	Húmido	7
< 10 l/min	< 0,1	Água intersticial	10
nenhum	0	Completamente seco	15

Quadro 14 - Orientação das Descontinuidades

Elementos de apoio à determinação de pesos						
Direcção perpendicular ao eixo do túnel				Direcção paralela ao eixo do túnel		Inclinação
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação				
Inclinação		Inclinação		Inclinação	Inclinação	
45 – 90º	20 – 45º	45 – 90º	20 – 45º	45 – 90º	20 – 45º	0 – 20º
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

Orientação das descontinuidades	Peso		
	Túneis e minas	Fundações	Taludes
Muito favorável	0	0	0
Favorável	- 2	- 2	- 5
Razoável	- 5	- 7	- 25
Desfavorável	- 10	- 15	- 50
Muito desfavorável	- 12	- 25	- 60

Quadro 15 - Classificação RMR

Peso Total	Classe	Descrição	Tempo médio para aguentar sem suporte	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (º)
100 - 81	I	Maciço rochoso muito bom	20 anos para 15 m de vão	> 400	> 45
80 – 61	II	Maciço rochoso bom	1 ano para 10 m de vão	300 – 400	35 – 45
60 – 41	III	Maciço rochoso razoável	1 semana para 5m de vão	200 – 300	25 – 35
40 – 21	IV	Maciço rochoso fraco	10 horas para 2,5 m de vão	100 – 200	15 – 25
< 21	V	Maciço rochoso muito fraco	30 min para 1 m de vão	< 100	< 15

2.3.3. Sistema de classificação de Barton – Q (Índice de Qualidade)

Em 1974, baseado num grande número de escavações subterrâneas observadas, *Barton*, *Lien* e *Lund* apresentaram uma proposta de uma classificação de maciços rochosos que define um índice de qualidade, *Q*, baseado em seis elementos relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos. Este sistema ficou conhecido como a Classificação de Barton. [1] [14]

O índice Q é determinado pela expressão (2) e apresenta uma variação entre 10^{-3} e 10^{3}. O significado dos parâmetros envolvidos na expressão de Barton é apresentado nos Quadros 16 a 21.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \qquad (2)$$

Os três quocientes que constituem a expressão (2) correspondem igualmente a três aspectos do maciço rochoso, que passamos a evidenciar:

- O factor *SRF* caracteriza a tensão no maciço rochoso em profundidade ou as tensões originadas pela expansibilidade em formações incompetentes de comportamento plástico. A sua análise é feita a partir da ocorrência de zonas de deslizamento, de alteração localizada ou pela evidência de libertação de tensões. Por sua vez, J_w é a medida da pressão de água que contraria o efeito na resistência ao escorregamento das descontinuidades. Este quociente representa o estado de tensão no maciço rochoso;
- O quociente J_r/J_a descreve as descontinuidades e o seu enchimento segundo a rugosidade e o grau de alteração. É um quociente crescente com o aumento da rugosidade e decrescente com o grau de alteração das paredes em contacto directo, situações em correspondência com o aumento da resistência ao corte. Também diminui quando as descontinuidades estão preenchidas com argila ou abertas;
- O primeiro quociente, RQD/J_n caracteriza a estrutura do maciço e define a medida do bloco unitário. Este valor pode variar entre 0,5 e 200 e dá uma ideia geral do tamanho dos blocos.

Quadro 16 – RQD - Designação da Qualidade da Rocha – Q1

Descrição		RQD	Notas
A	Muito mau	0 – 25	Quando RQD for < 10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q
B	Mau	25 – 50	
C	Médio	50 – 75	
D	Bom	75 – 90	Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90)
E	Muito bom	90 - 100	

Quadro 17 – J_n - Índice das Famílias de Diáclases – Q2

Descrição		J_n	Notas
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades	0,5 – 1,0	Nas intersecções utilizar 3 x J_n
B	Uma família de descontinuidades	2	
C	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D	Duas famílias de descontinuidades	4	
E	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F	Três famílias de descontinuidades	9	Nas embocaduras utilizar 2 x J_n
G	Três famílias de descontinuidades esparsas	12	
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fracturados	15	
I	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

Quadro 18 - J_r - Índice de Rugosidade das Diáclases – Q3

Descrição		J_r	Notas
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades b) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento			1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão. 2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3 m. 3. J_r igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direcção de menor resistência.
A	Juntas descontínuas	4	
B	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento			
H	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	
I	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contacto entre as paredes	1,0	

Quadro 19 – J_w - Índice das Condições Hidrogeológicas – Q5

Descrição		J_w	Pressão da água (MPa)	Notas
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, < 5 l/min localmente	1,0	< 0,1	Os factores nos casos C e F são estimados para condições naturais; o parâmetro Jw deverá ser aumentado caso sejam efectuadas drenagens Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1 – 0,25	
C	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25 – 1	
D	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25 – 1	
E	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	> 1	
F	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1 – 0,05	> 1	

Quadro 20 - J_a - Grau de Alteração das Descontinuidades – Q4

Descrição		J_a	ϕ (º)
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis	0,75	---
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25 – 35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25 – 30
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20 – 25
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, outras, e pequenas quantidades de argilas expansivas	4,0	8 – 16
b) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rocha desintegradas	4,0	25 – 30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6,0	16 – 24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8,0	12 – 16
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite; o valor de Ja depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água	8 – 12	6 – 12
c) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8 – 12	6 - 24
K	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fracção de argila	5,0	---
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10, 13, 13 – 20	6 - 24

Quadro 21 – SRF – Factor de Redução de Tensões – Q6

Descrição		SRF	Notas	
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas			1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem 2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa, em maciços muito pouco fracturados e sem argila.	
A	Zonas de fraqueza frequente, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso durante a abertura destas	10,0		
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0		
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5		
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0		
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5		
G	Juntas abertas, rocha muito fracturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0		
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			σ_c / σ_1	σ_t / σ_1
H	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	> 200	> 13
I	Tensões médias	1,0	200 – 10	13 – 0,66
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5 – 2,0	10 – 5	0,66 – 0,33
K	Explosões moderadas das rochas (rocha maciça)	5 – 10	5 – 2,5	0,33 – 0,16
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10 – 20	< 2,5	< 0,16
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M	Pressão moderada da rocha esmagada	5 – 10		
N	Pressão elevada da rocha esmagada	10 – 20		
d) Rochas expansivas: actividade química expansiva devida à presença de água				
O	Pressão de expansão moderada	5 – 10		
P	Pressão de expansão elevada	10 – 15		

A partir da classificação Q, existem sugestões para o tipo de estruturas de suporte necessárias à estabilização dos maciços rochosos envolvidos nas obras subterrâneas. Na Fig. 2 apresenta-se um gráfico que estima o tipo de suporte necessário, função do quociente entre o vão, diâmetro ou altura de escavação e um índice de segurança definido em função do tipo de obra, ESR ("*Excavation Support Ratio*"), cujas características de apresentam no Quadro 22.

Apresenta-se, também, na Fig. 3, uma correlação entre os índices Q e RMR, em que a melhor aproximação é dada pela expressão (3).

$$RMR = 9 * \ln(Q) + 44 \quad (3)$$

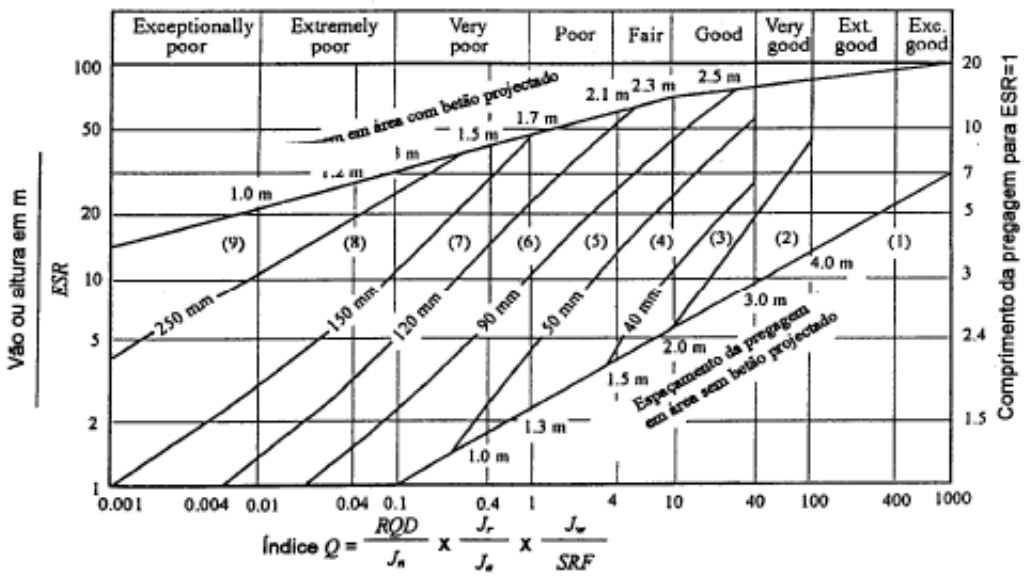


Fig. 2 - Classes de Suporte Estimadas para o Sistema de Classificação Q

Quadro 22 - Índice de Segurança ESR para Obras Subterrâneas (Q)

Classe	Tipo de escavação	ESR
A	Cavidades minerais temporárias	3 – 5
B	Poços verticais de secção circular Poços verticais de secção quadrada ou rectangular	2,5 2,0
C	Cavidades minerais definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos (excepto túneis sob pressão), túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades	1,6
D	Cavernas de armazenagem, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodo-ferroviários, chaminés de equilíbrio, túneis de acesso	1,3
E	Centrais subterrâneas, túneis rodo-ferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções	1,0
F	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos-de-ferro, fábricas	0,8

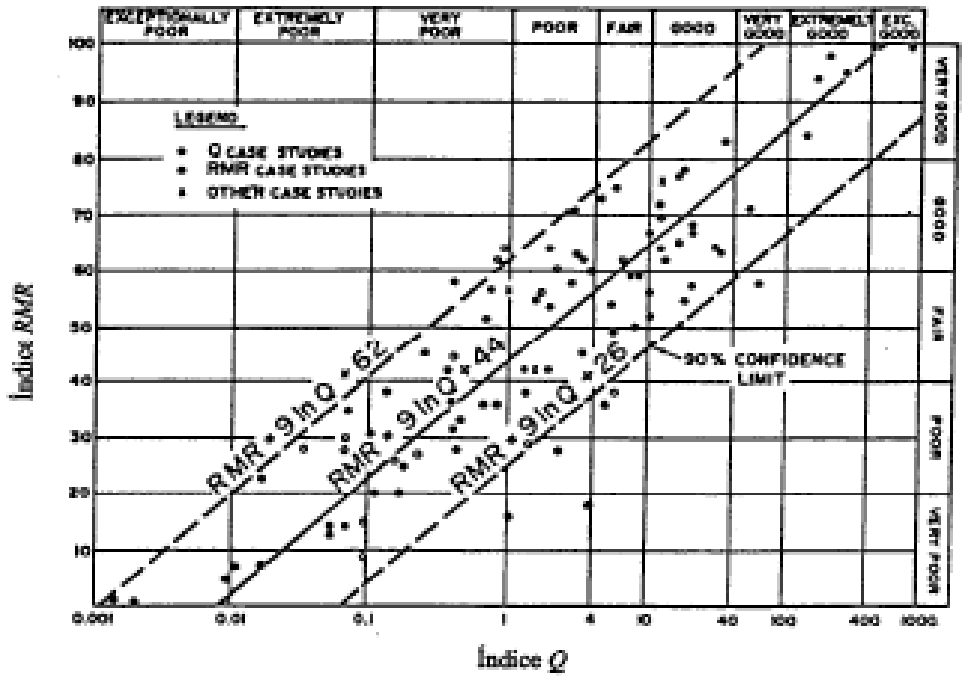


Fig. 3 – Correlação entre RMR e Q

2.3.4. Classificação de Hoek e Brown – GSI (Índice de Resistência Geológica)

No âmbito de obras subterrâneas, escavações, fundações ou até mesmo encostas ou taludes em maciços rochosos, é necessário ter estimativas de confiança quanto às características de deformação e resistência dos respectivos maciços.

Neste sentido, para apresentar a classificação de Hoek e Brown é necessário fazer uma primeira referência ao critério de rotura por eles criado anos antes da sua própria classificação de maciços. A classificação destes autores interfere e é utilizada no respectivo critério de rotura.

2.3.4.1. Critério Generalizado de Rotura de Hoek-Brown

O critério de rotura generalizada para maciços rochosos com diáclases, definido por Hoek e Brown, é dado pela expressão (4), em que encontramos os seguintes parâmetros: [1] [3]

- σ'_1 e σ'_3 são as tensões efectivas de rotura, máximas e mínimas, respectivamente;
- m_b é o valor da constante m de Hoek e Brown para maciços rochosos;
- s e a são constantes que dependem das características do maciço rochoso;
- σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} * \left(m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \qquad (4)$$

Para que este critério seja utilizado para estimar a resistência e a deformabilidade de maciços rochosos, é necessário estimar ou determinar três características:

- A resistência à compressão uniaxial, σ_{ci}, através de ensaios de laboratório;
- O valor da constante m_i a utilizar, também através de ensaio laboratorial;
- O valor do Índice de Resistência Geológica, GSI.

2.3.4.2. Classificação GSI

Em 1995, Hoek introduziu o Índice de Resistência Geológica que é um sistema para estimar a resistência de um maciço rochoso, sujeito a diferentes condições geológicas.

A resistência de um maciço rochoso depende das propriedades de blocos ou de pedaços de rocha intacta e da facilidade que têm para deslizar ou rodar quando são sujeitos a diferentes condições de pressão ou tensão. A facilidade de deslizamento ou rotação depende das formas geométricas das partes de rocha intacta e das condições das superfícies que separam estas mesmas partes. As rochas com superfícies de descontinuidades limpas e em bruto permitem uma rocha muito mais forte do que aquelas que têm partículas arredondadas pelo desgaste e que contêm o material que as constitui alterado.

O sistema introduzido por Hoek é apresentado nas Figuras 4 e 5. Pela experiência registada por Hoek ao longo dos anos, os elementos da Fig.4 demonstram-se suficientes para fazer o registo de observação em campo, uma vez que a letra que define cada tipo de categoria de maciço rochoso pode ser introduzida no campo de registos. Posteriormente, estes registos são usados para, através da Fig.5, estimar o valor do GSI.

O GSI é um parâmetro estimado e não exacto ou preciso. Dessa forma, as características do maciço rochoso podem ser calculadas pelos parâmetros e expressões (5) a (9). Se o valor do GSI for superior a 25, ou seja, se o maciço rochoso for de mediana a boa qualidade, é aplicado o critério original de Hoek-Brown com as expressões (6) e (7). Se o valor do GSI for inferior a 25, portanto rocha de fraca qualidade, é aplicado o critério modificado com as expressões (8) e (9).

$$m_b = m_i * e^{(\frac{GSI-100}{28})} \qquad (5)$$

$$s = e^{(\frac{GSI-100}{9})} \qquad (6)$$

$$a = 0{,}5 \qquad (7)$$

$$s = 0 \qquad (8)$$

$$a = 0{,}65 - \frac{GSI}{200} \qquad (9)$$

ROCK MASS CHARACTERISTICS FOR STRENGTH ESTIMATES

Based upon the appearance of the rock, choose the category that you think gives the best description of the 'average' undisturbed in situ conditions. Note that exposed rock faces that have been created by blasting may give a misleading impression of the quality of the underlying rock. Some adjustment for blast damage may be necessary and examination of diamond drill core or of faces created by pre-split or smooth blasting may be helpful in making these adjustments. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration.

SURFACE CONDITIONS

DECREASING SURFACE QUALITY ⇨

DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ⇩

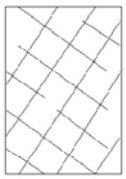
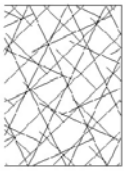
STRUCTURE	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
 BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	**B/VG**	**B/G**	**B/F**	**B/P**	**B/VP**
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	**VB/VG**	**VB/G**	**VB/F**	**VB/P**	**VB/VP**
BLOCKY/DISTURBED- folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	**BD/VG**	**BD/G**	**BD/F**	**BD/P**	**BD/VP**
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture or angular and rounded rock pieces	**D/VG**	**D/G**	**D/F**	**D/P**	**D/VP**

Fig. 4 – Caracterização do Maciço Rochoso com Base na Observação – GSI

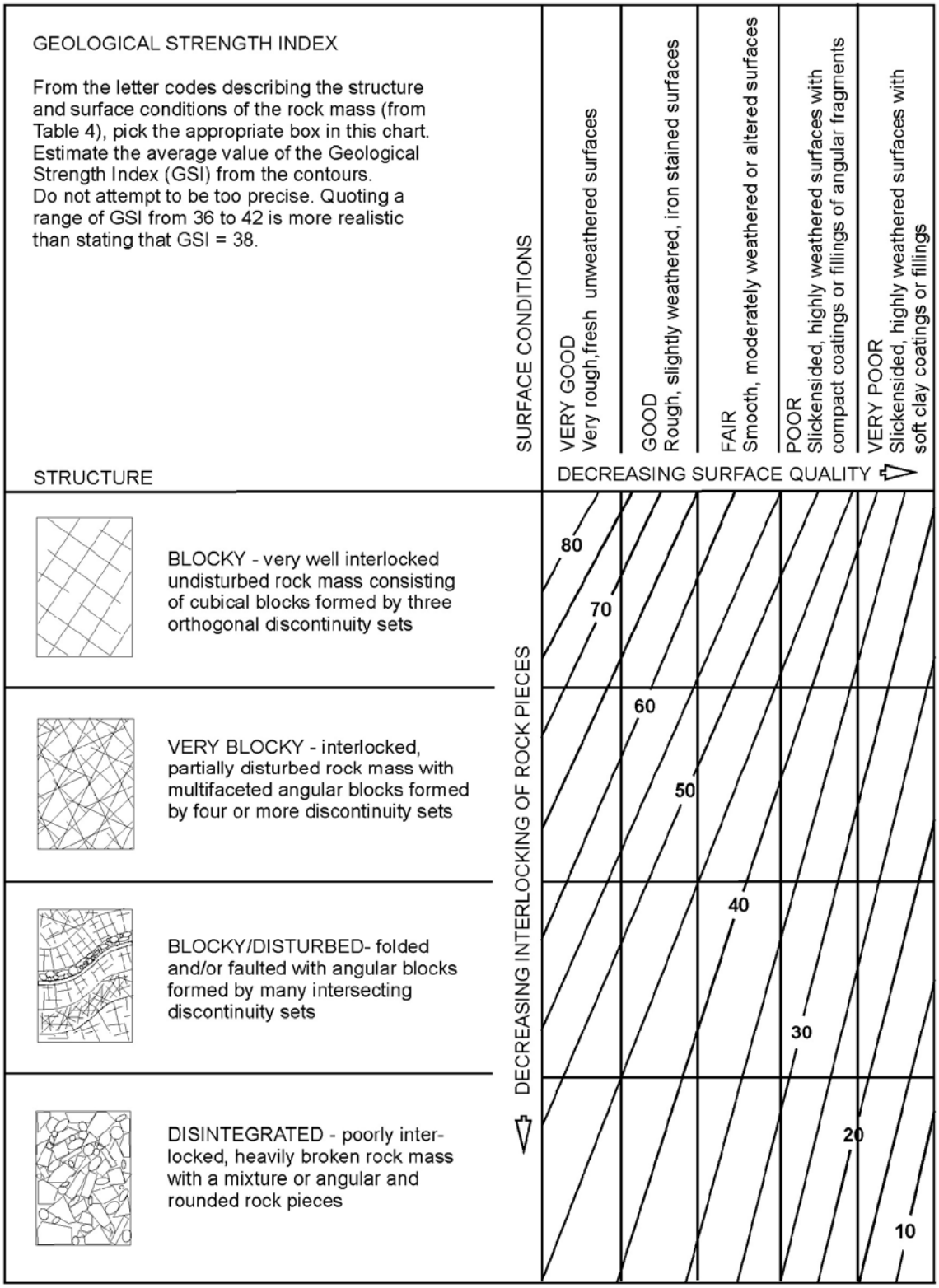


Fig. 5 – Estimativa do Valor do GSI com Base na Descrição Geológica

O valor do GSI igual a 25 foi escolhido empiricamente para ser o elemento de transição entre os critérios original e modificado. Nos maciços de melhor qualidade, GSI superior a 25, o valor do GSI pode ser estimado directamente da classificação de Bieniawski, RMR, feita em 1976. No entanto, para maciços rochosos de fraca qualidade o valor de RMR é difícil de determinar e o balanço entre as classificações já não dá uma estimativa fiável para o GSI. Assim, não deve ser usado o valor de RMR, de 1976, no cálculo do valor estimado do GSI para maciços de fraca qualidade.

A classificação de Bieniawski, de 1989, também pode ser usada na estimativa do GSI, no entanto é necessário fazer um ajuste para uma estimativa mais fiável. Esse ajuste é dado pela expressão (10).

$$GSI = RMR_{89'} - 5 \qquad (10)$$

Ao fazermos uma análise ou determinação do valor do GSI no terreno, uma das principais dificuldades é fazer uma correcta avaliação quando temos danos causados por explosivos. É necessário saber se os danos ou falhas que se visualizam fazem parte da estrutura natural do maciço ou se foram causados pelos explosivos, uma vez que a diferença entre estas superfícies é considerável. Sempre que possível, devemos utilizar uma superfície que tenha sido escavada ou decapada de forma controlada em vez de uma superfície obtida com recurso a explosivos, uma vez que o objectivo principal é determinar as características do maciço rochoso inalterado.

Considerando o cenário em que todas as superfícies visíveis foram afectadas pelo uso de explosivos, deve haver o cuidado de tentar compensar os valores do GSI, que serão inferiores ao que realmente existia. Este valor de GSI pode, frequentemente, ser cerca de 10 pontos inferior comparativamente com o valor do GSI inalterado.

Desta forma, se estivermos perante superfícies bastante danificadas pelos explosivos, podemos fazer uma compensação considerando a linha acima na tabela de estimativa usada para o cálculo do GSI (Fig.5). De igual forma, se tivermos uma superfície danificada pelo uso de explosivos exposta durante vários anos, devemos também fazer um ajuste, na mesma tabela, considerando a coluna imediatamente à esquerda daquela que estamos a ver na observação em campo. Esta correcção será para ter uma ideia mais aproximada do tipo de maciço que tínhamos antes das explosões.

Quando queremos fazer uma estimativa do valor do GSI, nem sempre temos a possibilidade de analisar as superfícies para fazer essa determinação. Antes da realização das obras subterrâneas, são sempre efectuadas sondagens com recolha de amostra. No entanto, para maciços de qualidade mediana a boa, GSI superior a 25, é conveniente fazer a determinação do GSI de forma indirecta, recorrendo a uma classificação em termos de RMR e depois fazendo a conversão para GSI, pois dará resultados mais precisos. No entanto, como para maciços de fraca qualidade é difícil fazer uma classificação RMR, então é utilizada a observação do material recolhido e classificado directamente em termos de GSI.

2.4. Breve Referência a Instabilidade e Escavações em Rochas

2.4.1. Escavação em Rocha Dura

As escavações em rocha dura estão geralmente associadas a escavações em rochas de muito boa qualidade ou a escavações em profundidade, onde ainda não aconteceu grande alteração dos maciços. Nas escavações de túneis ou na execução de fundações em rochas de boa qualidade, as roturas

ocorrem, tendencionalmente, por causa da existência de descontinuidades, tais como diáclases, planos de corte ou cisalhamento ou planos de estratificação. Quando estes elementos estruturais se intersectam podem libertar-se ou criar-se blocos ou elementos rochosos que, devido a estas falhas ou planos de falhas, podem cair do tecto do túnel ou deslizar das próprias paredes da escavação.

Nos casos em que a deformação ou a libertação de elementos rochosos são causados por deslizamentos ao longo de superfícies de descontinuidades individuais ou ao longo de intersecções de superfícies de deslizamentos raramente temos um problema de rotura da rocha intacta. No entanto, a separação de planos ou a rotação de blocos e cunhas já desempenham um papel importante no que diz respeito ao processo de deformação e de rotura. [1]

Assim sendo, neste tipo de escavações, a análise de estabilidade depende essencialmente de uma correcta interpretação das condições geológicas das rochas, através do estudo de blocos e de superfícies de deslizamento que podem ocorrer com a realização da escavação. É importante garantir que nesta análise sejam identificados e localizados estes elementos, blocos e potenciais superfícies de deslizamento.

2.4.2. Escavação em Rocha Fraca

Ao contrário das falhas estruturais em rocha dura, que são controladas, existem diversas escavações em rochas fracas, resultantes de uma intensa rotura de material ou devido a material de fraca resistência. Alguns exemplos comuns deste tipo de rochas serão os xistos, as argilas, os siltes, os filitos ou os tufos, em que baixas pressões ou tensões são suficientes para originar grandes deformações ou roturas ao redor da escavação. [1]

Este tipo de roturas, nas escavações em rocha fraca, torna difícil fazer-se um estudo analítico da situação e não há métodos ou modelos de análise ou de cálculo dos factores de segurança que possam definir limites aceitáveis no processo de rotura. Como tal, a avaliação e a decisão, na adequação do tipo de estrutura de suporte a construir, terá que ser baseado na análise de diversos factores, como a magnitude e distribuição das deformações na rocha e as tensões a incidir nos elementos de suporte, tais como cabos pré-esforçados, armaduras, betão projectado e betão armado. [9] [10]

2.4.3. Instabilidade Controlada em Túneis

Em túneis escavados superficialmente ou a pouca profundidade, as roturas mais frequentes são originadas por elementos de rocha em cunha que caem do tecto ou que deslizam das paredes laterais. Estas cunhas acontecem devido à intersecção de planos de descontinuidades ou a superfícies de deslizamento que separam o maciço em elementos discretos mais interligados. Quando uma superfície livre é criada pela escavação (parede ou tecto), a contenção do maciço que a circundava desaparece. Alguns destes elementos podem cair ou soltar-se das paredes. [1]

A execução de estruturas de suporte para a contenção destes elementos torna-se necessária, senão a estabilidade do túnel atrás da frente de escavação e das paredes laterais pode detiorar-se rapidamente. Cada elemento passível de cair ou de soltar-se causa a redução da contenção natural e da interligação de todo o maciço que, por sua vez, permite a outros elementos de rocha também caírem ou soltarem-se. Este processo de detioração ou rotura continuará até que o efeito de arco estabilize a escavação ou até que a rotura seja completa.

De forma a prevenir esta situação, são recomendados alguns passos importantes:

i. Determinar o pendor da linha de maior declive (*dip*) e o respectivo azimute (*dip direction*) dos planos de descontinuidade;

ii. Identificar potenciais elementos de cunha que possam cair ou deslizar do tecto ou paredes;

iii. Calcular o Factor de Segurança associado a estes elementos;

iv. Calcular a quantidade de reforço que é necessário impor para tornar o factor de segurança aceitável.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estes elementos e classificações apresentados são a base e o ponto de partida para qualquer obra subterrânea de engenharia. Apesar de não existir uma classificação definida ou implementada universalmente, existem algumas classificações reconhecidas e que podem ser utilizadas e aplicadas e, preferencialmente, interligadas entre si.

Uma obra subterrânea é um acto de engenharia complexo, que envolve grandes riscos e onde é necessário uma segurança e um factor de segurança aceitáveis para a execução da mesma, pois além de pôr em causa o maciço e as estruturas que estejam acima da escavação, envolve meios humanos e mecânicos na execução da obra que também é necessário garantir a sua segurança. Não é só garantir a segurança da obra em fase de exploração, por muitos anos, mas em toda a sua longevidade, desde a primeira rocha escavada até à última passagem que alguém faz na respectiva obra de arte.

Existe também sempre um risco financeiro inerente a cada obra, em que não interessa sobredimensionar todas as obras, exorbitando os custos da mesma, nem subdimensionar para diminuir os respectivos custos. É necessário um ponto intermédio em que, para além do bom senso do projectista e dos construtores, as características geológicas e geotécnicas do maciço sejam o ponto de partida para um bom dimensionamento garantindo todos os factores o melhor possível. É também por esse mesmo motivo que estas classificações apresentadas são e devem continuar a ser utilizadas e cada vez mais aperfeiçoadas e ajustadas, para garantir um melhor enquadramento em termos de projecto, segurança, riscos e custos.

3

DESCRIÇÃO GERAL DA OBRA E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA

3.1. INTRODUÇÃO

Este trabalho incide sobre a obra do Túnel de Metro de Gondomar e pretende-se, neste ponto, fazer um enquadramento geral da obra e do âmbito da mesma.

A obra é localizada no Distrito do Porto e parte integrante do Metro do Porto.

Serão apresentadas as disposições básicas do projecto e método de construção, e serão definidas as condições geológicas e geotécnicas do local onde se insere a obra.

3.2. ENQUADRAMENTO GERAL

3.2.1. METRO DO PORTO

O Metro do Porto, meio de transporte público da Área Metropolitana do Porto, visa prestar serviço a mais de um milhão de habitantes nesta área e contribuir para a melhoria da qualidade de vida e do ambiente da região.

A frota de veículos inicialmente prevista, em número de 72, era composta por veículos modernos, confortáveis e seguros, não poluentes uma vez que se deslocam a electricidade, com ar condicionado e sistema de som. Actualmente, mantendo as condições características dos veículos, já foi ampliada para mais e melhores veículos, que permitem uma maior comodidade em viagens de longo percurso.

Na sua primeira fase, a rede do metro conta com uma extensão de cerca de 70 quilómetros, dos quais 50,4 km são reabilitação de estruturas já existentes (antigas linhas de combóio que faziam o percurso Porto – Póvoa de Varzim e Porto – Trofa). Os restantes 18,8 km são estruturas novas, sendo cerca de 7 km em túnel e o restante à superfície.

Antes da realização da extensão para Gondomar, a rede do Metro do Porto contava já com cinco linhas em serviço:

- Linha A: Estádio do Dragão até ao Senhor de Matosinhos;
- Linha B: Estádio do Dragão até à Póvoa de Varzim;
- Linha C: Campanhã até ao ISMAI (Instituto Superior da Maia);
- Linha D: Hospital de São João até D. João II (Vila Nova de Gaia);

- Linha E: Estádio do Dragão até ao Aeroporto.

O uso do metro como meio de transporte também é uma forma de promover benefícios ambientais importantes, porque inclui redução de circulação automóvel, melhora a qualidade ambiental e também a qualidade de vida nos espaços urbanos envolventes.

Alguns benefícios do sistema de Metro podem ser enumerados:

- Viagens mais rápidas, confortáveis e seguras;
- Condições mais favoráveis de circulação de tráfego nas zonas abrangidas;
- Sistema mais silencioso e menos poluente, o que reduz o ruído e os poluentes atmosféricos e hídricos através da redução de tráfego rodoviário;
- Diminuição do desgaste das infra-estruturas urbanas e suburbanas, como os arruamentos, estacionamentos e outros;
- Contribuição para o melhoramento da oferta de transportes e permite a requalificação urbana dos espaços, de forma indirecta, pois assegura uma melhor acessibilidade, podendo ser procurados para funções mais qualificadas.

Existem no entanto algumas incidências negativas, como a existência de algum ruído em fase de exploração, ou incidências ambientais em fase de construção, no entanto, esta última será sempre por intervalos de tempo restritos.

A expansão da rede a este (e outros) concelho(s) é do interesse geral da população e das entidades locais, pois existe uma ocupação residencial nestes concelhos originando movimentos diários para o centro do Porto, devido a emprego, educação ou saúde. Desta forma, torna-se mais cómodo e rápido este tipo de ligações.

3.2.2. Linha do Metro de Gondomar

A construção da Linha de Metro para Gondomar visa ligar o concelho de Gondomar a toda a Área Metropolitana do Porto. Esta linha abrange as freguesias de Rio Tinto, Baguim do Monte, Fânzeres e Gondomar, no concelho de Gondomar, e Campanhã, no concelho do Porto.

O seu traçado, visível na Fig. 6, inicia no Estádio do Dragão e segue até Contumil, contornando o Parque de Material Ferroviário de Contumil. Inicia-se um túnel, por cerca de 970 metros, que passa sob as Linhas do Minho e de Leixões e a Estrada da Circunvalação e por baixo do Centro Comercial Parque Nascente. Volta à superfície após a superfície comercial e desenvolve o seu trajecto para Norte até à zona de Paço. A partir daí, desenvolve-se para sul, até Gondomar. [6] [7] [8]

Esta extensão, já construída, conta actualmente com mais dez estações: Contumil, Nasoni, Nau Vitória, Levada, Rio Tinto, Campainha, Baguim, Carreira, Venda Nova e Fânzeres, contabilizando uma extensão de 6,56 km.

Podemos ver, na Fig. 7, a Estação de Nau Vitória, com o início do Túnel de Gondomar, objecto do estudo deste trabalho, já após estar construído e em exploração.

Fig. 6 – Mapa da Linha do Metro de Gondomar

Fig. 7 – Estação de Nau Vitória

3.2.3. O Túnel de Gondomar

O Túnel de Gondomar, Fig. 8, entre São João de Deus e o Parque Nascente trata-se de um túnel mineiro, sendo maioritariamente construído com recurso a explosivos e ao Novo Método Austríaco de construção de Túneis (NATM).

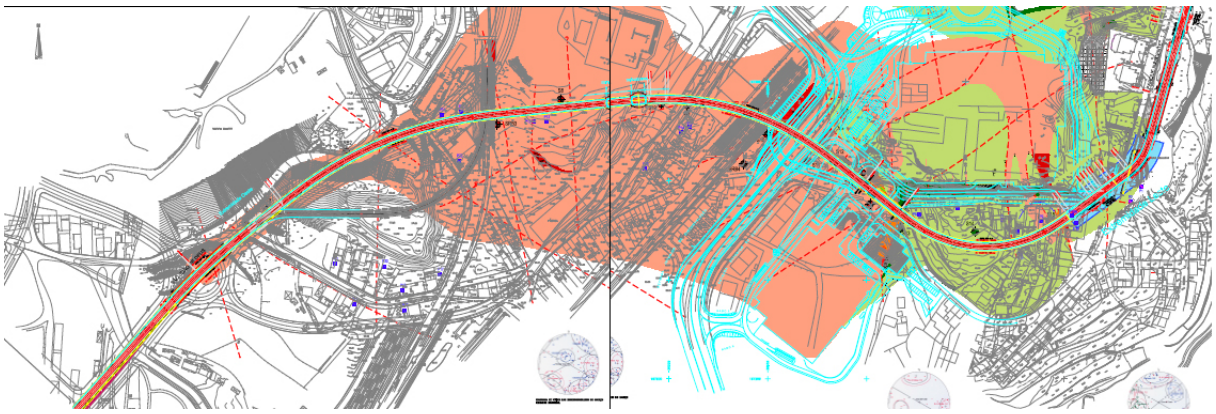


Fig. 8 – Mapa de Localização do Túnel de Gondomar

Apresentam-se as principais características da construção, de Oeste para Este: [6]

- Um portal final Oeste adjacente à estação São João de Deus, ao km 27+018;
- Uma primeira secção de túnel, com cerca de 352 metros se comprimento, construída a céu aberto, até ao km 26+959, onde fica o portal mineiro do túnel; nesta secção também fica a estrutura para a futura ligação ferroviária a Leixões;
- Um poço de ventilação e saída de emergência, ao km 26+600, com 29 metros de profundidade; também servirá de apoio à construção do túnel, sendo um acesso suplementar para a escavação do mesmo;
- Segue-se um troço de 243 metros de túnel mineiro, até ao km 26+351, onde faz ligação a uma estrutura tipo caixa previamente construída, aquando da construção da superfície comercial Parque Nascente. Esta ligação é feita através da demolição parcial da parede de estacas e o solo interior da caixa é escavado a partir do próprio túnel;
- Depois desta estrutura, uma extensão de 184,67 metros até ao km 26+117, onde se localiza o portal do túnel mineiro;
- O portal final localiza-se ao km 26+038 e o túnel entre portais é construído a céu aberto;
- A construção dos túneis a céu aberto é feita antes de iniciar a escavação mineira.

Este túnel é totalmente impermeável e monitorizado para registar movimentos da estrutura, características do subsolo e adequação do método adoptado.

3.3. OBRA SUBTERRÂNEA – TÚNEL DE GONDOMAR

3.3.1. DISPOSIÇÕES BÁSICAS DO PROJECTO

Neste ponto, além das disposições já apresentadas no Ponto 3.2.3. serão apresentadas as estruturas que fizeram parte dos trabalhos a executar, tanto no túnel mineiro como fora do âmbito do túnel mineiro. [6] [7] [8]

As estruturas que fazem parte do túnel mineiro são:

- Um túnel a céu aberto entre São João de Deus e o portal mineiro de Oeste, com um comprimento de 59 metros, incluindo a estrutura para a ligação à Linha de Leixões. Podemos ver na Fig. 9, um exemplo da construção de túnel a céu aberto nesta obra;
- Um túnel mineiro entre o portal e a intersecção com o poço de acesso, com um comprimento de 352,65 metros. Na Fig. 10, temos uma frente de escavação de túnel mineiro;
- Estrutura interior do poço de acesso, ventilação e saída de emergência com uma profundidade de 29 metros (Figs. 11 e 12);
- Um túnel mineiro do poço até à estrutura tipo caixa já existente, com extensão de 243,51 metros;
- Construção da intersecção e estrutura sob o centro comercial, onde se localiza a estrutura tipo caixa (Figs. 13 e 14);
- Um túnel mineiro até ao portal mineiro Este, com comprimento de 184,67 metros.

Não fazendo parte das estruturas do túnel mineiro e sendo efectuadas antes da realização deste, temos as seguintes estruturas:

- Construção do túnel a céu aberto entre São João de Deus e o portal mineiro Oeste;
- Escavação do poço de acesso;
- Túnel a céu aberto e muro de suporte entre o portal mineiro de Este e a estação junto ao Parque Nascente.

Fig. 9 – Construção de Túnel a Céu Aberto, no Túnel de Gondomar

Fig. 10 – Escavação de Túnel Mineiro

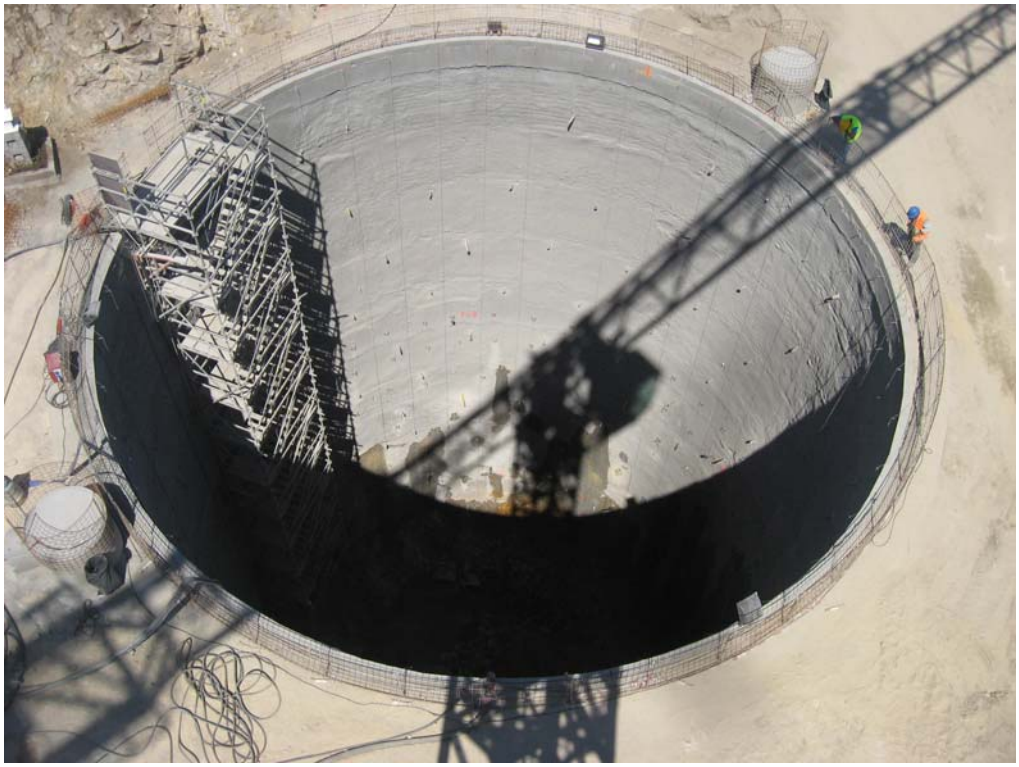


Fig. 11 – Poço de Ventilação e de Emergência

Fig. 12 – Escavação do Poço de Ventilação e de Emergência

Fig. 13 – Intersecção com a Estrutura Tipo Caixa (1)

Fig. 14 – Intersecção com a Estrutura Tipo Caixa (2)

3.3.2. Condições Geológicas

A morfologia original da zona onde está inserido o projecto foi bastante alterada com as construções efectuadas para a linha ferroviária do Minho, diversas zonas industriais, com o centro comercial Parque Nascente e com construções ao longo da Estrada da Circunvalação. Diversos movimentos de terra, com implantação de materiais de aterro, conseguem atingir 10 metros de altura em algumas zonas.

O túnel de Gondomar passa em três baixas topográficas distintas. O percurso desde o Bairro de S. João de Deus e Gondomar atravessa o granito do Porto, com vários estados de alteração, entre o km 27+081 e o km 26+311, onde se dá a intersecção entre granitos e rochas metamórficas do "Complexo Xisto-Grauváquico". Frequentemente, são observados diques pegmatíticos e aplíticos, bem como diques graníticos, dentro das rochas metamórficas, entre os km 26+321 e 25+981.

Apresenta-se em Anexo o Perfil Longitudinal da obra.

3.3.3. Condições Geotécnicas

O alinhamento da obra atravessa três domínios litológicos distintos, evidenciados no Quadro 23, que se descrevem sucintamente nos subpontos seguintes. [6] [7] [8]

Quadro 23 – Litologia ao Longo do Túnel

Domínio	Quilómetro	Litologia
I	27+081 a 26+381	Maciço Rochoso Granítico
II	26+381 a 26+281	Zona de Contacto
III	26+281 a 25+981	Maciço Rochoso Xistento

3.3.3.1. Maciço Rochoso Granítico

O maciço rochoso granítico caracteriza-se por ter uma aparência maciça em algumas diáclases quando não perturbado. A deformação tectónica origina, geralmente, processos de esmagamento provocando intensa fracturação do maciço. Encontramos, portanto, um maciço W4 e W5.

A rocha intacta tem aspecto homogéneo e isotrópico. É, desta forma, previsto encontrar um granito entre o são e o medianamente alterado, resistente a muito resistente. Os granitos são geralmente susceptíveis a meteorização e desintegram-se tornando-se materiais fracos com comportamento de solo de homogeneidade razoável.

A presença de materiais argilosos com características plásticas é abundante ao longo das zonas de corte. Isto faz com que as propriedades de resistência baixem de forma significativa.

Frequentemente, são observados diques pragmatíticos de grão grosseiro, orientando-se paralelamente à principal família de diáclases e de cisalhamento.

A secção de túnel a céu aberto de Oeste, o portal Oeste e o poço de acesso encontra-se dentro deste domínio de maciço rochoso granítico.

3.3.3.2. Zona de Contacto

A zona de contacto entre o maciço de granito e o maciço xistento esteve sujeito a diversas fases de deformação. O local mais afectado intersecta o alinhamento ao km 26+311, a Este da estrutura tipo caixa.

A zona central caracteriza-se por uma fenda perfeita de caixa de falha e argila plástica, ao longo de uma espessura entre 5 e 10 metros, na base da escavação para a estrutura tipo caixa. Esta zona parece estar confinada por planos de falha principais.

Adjacentemente à zona central, os xistos apresentam-se bastante cisalhados, no entanto, o maciço encontra-se com boa coesão quando a orientação da xistosidade é favorável aos taludes de escavação.

Os granitos junto a esta zona estão sempre decompostos. A zona mais afectada pelo cisalhamento estende-se mais para o interior dos granitos do que dos xistos.

Esta zona de contacto intersecta o túnel sensivelmente no seu alinhamento central.

3.3.3.3. Maciço Rochoso Xistento

Este maciço é abundantemente dominado por espaçamentos muito próximos de planos de xistosidade e diáclases subordinadas. Os processos tectónicos provocam padrões complexos de deformação que afectam o maciço. Assim, o cisalhamento ocorre ao longo das estruturas existentes como se de planos de xistosidade se tratassem. O maciço rochoso é intersectado por muitas zonas de cisalhamento, no entanto, é muito mais intenso junto à zona de contacto.

Quanto ao maciço metamórfico, a rocha intacta é anisotrópica e a sua resistência pode variar com a direcção de anisotropia e com a composição mineralógica, sendo substancialmente menor do que a resistência do granito. Encontram-se também materiais com características altamente plásticas.

Nesta zona, está o portal Este do túnel e a respectiva secção de túnel a céu aberto.

3.3.4. Definição das Unidades Geotécnicas

Neste ponto, definem-se as unidades geotécnicas que representam os vários tipos de comportamento do maciço rochoso. São apresentadas no Quadro 24 as características principais das unidades geotécnicas presentes no túnel de Gondomar. [6] [7] [8]

Quadro 24 – Unidades Geotécnicas e Respectiva Descrição

Unidades Geotécnicas	Litologia	Descrição
A	Aterro, solos de origem desconhecida	Desperdícios de solos graníticos, de depósitos de vertente, parcialmente resíduos domésticos.
G1 (a & b)	Granito, em geral W1 a W3	Maciço rochoso pouco a medianamente fracturado (F1 a F3). Rocha intacta de resistência média a muito resistente. Ocorrência local de granito decomposto W5 ao longo de raras e restritas zonas fracturadas (G1-b)
G2	Granito, em geral W3 e W4	Maciço rochoso medianamente a muito fracturado (F3 a F5). Rocha intacta de resistência muito fraca a média. Ocorrência de granito muito a medianamente alterado em associação com granito decomposto W5, localmente caulinizado. Normalmente associado a zonas de cisalhamento.
G3	Granito, em geral W5	Maciço rochoso decomposto (com comportamento de solo). Rocha intacta de resistência muito fraca a fraca. Ocorrência de domínios de granito medianamente alterados dentro de uma matriz W5, fortemente caulinizada. Normalmente relacionada com a meteorização de superfície ou zonas de cisalhamento.
X1 (a & b)	Xistos, em geral W1 a W3	Maciço rochoso medianamente a muito fracturado (F3 a F5). Rocha intacta de resistência fraca a média. Levemente cisalhado (X1-a).
X2	Xistos, em geral W3 e W4	Maciço rochoso muito fracturado (F4 a F5). Rocha intacta de resistência muito fraca a fraca. Moderadamente cisalhado por toda a parte do maciço rochoso. Ocorrência local de materiais do tipo argila de caixa de falha ao longo de planos de cisalhamento.
X3	Xistos, em geral W4 e W5	Maciço rochoso muito fracturado a decomposto (com comportamento de solo). Rocha intacta de resistência muito fraca. Muito cisalhado por toda a parte do maciço rochoso. Ocorrência local de materiais do tipo argila de caixa de falha ao longo de planos de cisalhamento.

3.3.5. Método de Construção do Túnel

O túnel foi construído segundo o Novo Método Austríaco de construção de Túneis, NATM.

Apresenta-se uma breve descrição das etapas de construção:

- Escavação mecânica com recurso a explosivos;
- Colocação de suporte primário em betão projectado e pregagens;
- Colocação do sistema de impermeabilização;
- Construção do suporte secundário, em betão moldado.

Imediatamente após a escavação é colocado o suporte primário. Este consiste na projecção de betão e aplicação de pregagens, podendo ser complementado com estruturas metálicas.

Neste suporte primário, foram definidas seis classes de suporte, como consta do perfil longitudinal da obra, baseado nas unidades geotécnicas anteriormente definidas.

O túnel executado é completamente impermeável. Consegue-se através da instalação de um geotêxtil, feltro e de uma membrana impermeável. O primeiro é fixado ao betão projectado, enquanto o segundo é fixado por meios especiais, soldando a membrana a discos instalados quando se instala o feltro. A camada de feltro serve apenas para proteger a membrana impermeável de possíveis interacções ou danos.

O suporte secundário é o último elemento a ser construído. É dimensionado para a pressão total da água de acordo com o nível freático. A sua armadura deve ser autoportante, pois não são permitidas furações da membrana impermeável, senão deixaria de fazer efeito. Para o betão moldado deve ser utilizada uma cofragem metálica de aço, que lhe confere um bom acabamento da superfície visível.

Nas Figs. 15 e 16, podemos ver a fase de obra de colocação da membrana impermeável, e o aspecto final da estrutura de suporte, após a aplicação do suporte secundário sobre a membrana impermeável.

Fig. 15 – Aplicação da Membrana Impermeável

Fig. 16 – Estrutura com Suporte Secundário e Aspecto Final

4

PARÂMETROS PREVISTOS E OBTIDOS EM OBRA

4.1. INTRODUÇÃO

Os dados obtidos para elaboração do projecto de estruturas do Túnel de Gondomar basearam-se em dados já existentes, em trabalho de campo, quer de observação como de realização de sondagens e em ensaios laboratoriais.

Neste capítulo, antes de incidir sobre o âmbito deste trabalho, que é a apresentação dos valores do GSI em fases de previsão e de obra, será feita uma referência geral aos trabalhos de campo e de laboratório que permitiram estimar os parâmetros geotécnicos necessários à realização do projecto, bem como aos valores do GSI.

4.2. PARÂMETROS DE PREVISÃO

4.2.1. INTRODUÇÃO

Os parâmetros de previsão que se apresentarão foram estimados a partir dos trabalhos realizados em laboratório. No entanto, estes trabalhos e ensaios não seriam possíveis sem a realização prévia de ensaios e recolha de amostras em campo.

Todo o trabalho começou com uma análise a elementos já existentes, provenientes de outras obras previamente realizadas e de outras sondagens realizadas também anteriormente. Foi realizado um reconhecimento de campo, através da observação da geologia existente, ao longo dos locais por onde passaria o túnel. Em seguida, foi efectuado também um levantamento dos poços existentes, a fim de medir e acompanhar a evolução do nível freático na zona de implantação da obra.

Seguiram-se as sondagens, ensaios no local em simultâneo com as sondagens e a realização de poços de escavação, que serão descritos no ponto seguinte. Após estes, realizaram-se os ensaios em laboratório para determinação dos parâmetros geotécnicos e características dos materiais.

Na sequência destes trabalhos foi realizado o projecto estrutural do túnel.

4.2.2. Ensaios Realizados

O processo de realização de ensaios foi feito em campo e em laboratório. [6] [7] [8]

Numa primeira fase, no trabalho efectuado em campo, foram realizados vários ensaios SPT ("*Standard Penetration Test*"), num total de 602 valores de ensaios disponíveis, no âmbito do projecto do Metro e do centro comercial Parque Nascente. Os ensaios eram realizados até que fossem necessárias mais de 60 pancadas para penetrar 300 milímetros.

Foram também realizados vários ensaios de permeabilidade, nomeadamente ensaios Lugeon e ensaios LeFranc. Quanto aos ensaios Lugeon, de um total de 13 sondagens foram realizados 34 ensaios em que os resultados revelam uma permeabilidade baixa a muito baixa. Em 10 sondagens, realizaram-se 12 ensaios LeFranc que indicaram permeabilidades típicas moderadas nos granitos.

Além destes, foram instalados e feitas leituras periódicas a piezómetros para avaliar a variabilidade do nível freático ao longo do tempo. Para o projecto do túnel, os valores considerados foram os que se registaram mais elevados.

Foram também efectuados perfis de refracção sísmica, para medição de ondas p e ondas s. A medição das primeiras ondas permitiu obter resultados que puderam ser tratados, no entanto, os dados obtidos para as ondas s não se apresentaram adequados para uma avaliação geotécnica comum.

Relativamente a trabalho de laboratório, existia informação prévia de ensaios sobre amostras de solo realizados aquando da obra do centro comercial Parque Nascente. Neste trabalho já existente, realizaram-se ensaios comuns para solos, que envolveram a determinação de teores em água, determinação de granulometrias, limites de Atterberg e classificações de solo. Foram também realizados ensaios de corte directo, para determinação de ângulos de atrito e coesões, e ensaios triaxiais. Os resultados destes ensaios confirmaram as experiências obtidas em projectos realizados anteriormente em terrenos semelhantes pelo que são considerados representativos para a avaliação dos parâmetros de projecto.

Ainda em laboratório, foram realizados diversos ensaios sobre amostras de rochas em que foram determinados diversos parâmetros, tais como o teor em água, a densidade e porosidade da rocha, a resistência à compressão uniaxial e diametral, propriedades de deformação a partir dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, determinação de energia de fracturação e resistência à carga pontual. Mais uma vez, quanto às propriedades básicas das rochas, os resultados obtidos foram semelhantes a experiências obtidas anteriormente pelo que são considerados representativos para a avaliação dos parâmetros de projecto.

Dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, os resultados indicam uma resistência geralmente baixa ao longo da área em que está definido o projecto, o que se pode dever aos efeitos do contacto metamórfico que aumentam a desintegração e a argilização da rocha. Quanto aos ensaios de carga pontual realizados, também produziram resultados baixos pouco característicos. Como estes ensaios são, geralmente, conhecidos por darem resultados enganadores, devem ser tidos apenas como resultados indicativos.

Quanto à determinação da energia de fracturação, foram realizados poucos ensaios, o que não permitiu a obtenção de uma correlação com segurança. No entanto, o comportamento duro que tem vindo a ser observado em maciços xistentos faz com que a possibilidade de encontrar um comportamento de rocha rija seja tida em consideração na avaliação da escavabilidade do maciço xistento. O granito tem uma abrasividade muito elevada, prevendo-se que a resistência à escavabilidade do granito permita uma furação razoável. Já quanto ao xisto, a elevada anisotropia e o provável comportamento rijo irá afectar desfavoravelmente a resistência à furação do maciço.

4.2.3. Estimativa de Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos foram estimados com base nos resultados dos ensaios laboratoriais e com base no critério de Hoek-Brown, sendo a experiência prévia de projectos na mesma área tida em consideração.

Apresentam-se os respectivos parâmetros, no Quadro 25, de forma sucinta e explícita.

Quadro 25 – Parâmetros Geotécnicos de Projecto

Unidades Geotécnicas	γ (kN/m3)	ϕ' (º)	C' (MPa)	E (MPa)	UCS (MPa)
G1-a	24 – 26	45 – 47	5,0 – 6,5	15000 – 25000	20,0 – 30,0
G1-b	23 – 25	40 – 44	2,0 – 2,5	2000 – 11000	8,0 – 12,0
G2	21 – 23	35 – 38	0,5 – 0,7	500 – 2500	1,8 – 3,0
G3	19 – 21	28 – 35	0,005 – 0,05	20 – 200	0,03 – 0,2
X1-a	24 – 26	29 – 31	0,5 – 0,7	1500 – 2500	1,5 – 2,5
X1-b	23 – 25	24 – 26	0,2 – 0,3	500 – 1000	0,5 – 1,0
X2	22 – 24	19 – 21	0,08 – 0,1	200 – 400	0,1 – 0,3
X3	20 – 22	16 – 18	0,005 – 0,05	20 – 200	0,03 – 0,1

4.2.4. Classificação do Maciço

Depois de feitos todos os ensaios e de estimados os parâmetros geotécnicos, o maciço rochoso onde se insere a obra foi classificado segundo a classificação de Bieniawski, RMR, e de Hoek, GSI.

Relativamente ao RMR, a estimativa de valores restringe-se às classes geotécnicas G1, G2, X1 e X2, pois o comportamento é fortemente dominado pelas descontinuidades. A aplicação da classe X3 é justificada onde as estruturas do maciço estão sobre solo residual. Na classe G3, apresentando materiais com características de solo, a classificação RMR não pode ser determinada pelo que é feita uma classificação qualitativa estimada. No Quadro 26 apresenta-se a classificação preliminar RMR.

Tendo em conta as observações de campo e os dados das sondagens, foi estimado o valor do Índice de Resistência Geológica, que se apresenta no Quadro 27.

No Quadro 28, apresenta-se a classificação do maciço rochoso que foi utilizada nesta obra, RMR e GSI. Os valores do GSI utilizados foram os valores médios das classes. Uma vez que o comportamento do maciço rochoso é diferente nos granitos e nos xistos, é feita esta diferenciação em termos de unidades geotécnicas.

Quadro 26 – Classificação Preliminar RMR

Unidades Geotécnicas	RMR	Classe	
G1-a	73	II	Bom
G1-b	53	III	Razoável
G2	27	IV	Fraco
G3	Estimado	V	Muito fraco
X1-a	54	III	Razoável
X1-b	38	IV	Fraco
X2	21	IV	Fraco
X3	14	V	Muito fraco

Quadro 27 – Valores de GSI Estimados

Unidades Geotécnicas	Estrutura	Condições das superfícies das descontinuidades	GSI
G1-a	Maciça ou levemente fracturada em blocos	Bom a muito bom	60 – 80
G1-b	Fracturada em blocos	Razoável a bom	50 – 70
G2	Muito fracturada em blocos	Fraco a razoável	30 – 50
G3	Desintegrado	Muito fraco	10 – 20
X1-a	Fracturada / perturbada	Razoável	35
X1-b	Fracturada / perturbada	Fraco a razoável	30
X2	Laminada / cisalhada	Fraco	20
X3	Laminada / cisalhada	Muito fraco	10

Quadro 28 – Classificação do Maciço Rochoso

Unidades Geotécnicas	Litologia	RMR	GSI
G1-a	Granito, dominantemente W1, W2	II	70
G1-b	Granito, dominantemente W2, W3	III	60
G2	Granito, dominantemente W3, W4	IV	40
G3	Granito, dominantemente W5	V	10
X1-a	Xisto, dominantemente W1, W2, W3	III	40
X1-b	Xisto, dominantemente W2, W3	IV	30
X2	Xisto, dominantemente W3, W4	IV	20
X3	Xisto, dominantemente W4, W5	IV	10

4.3. VALORES DE GSI PREVISTOS

Os valores do Índice de Resistência Geológica estão definidos por unidades geotécnicas, como apresentado anteriormente. O maciço rochoso ao longo do túnel foi dividido em zonas geológicas, em que as características do maciço são semelhantes ao longo dessa zona. Este zonamento permite definir as características do maciço para as diversas zonas e também o tipo de estrutura de suporte que é necessário construir.

De acordo com o perfil longitudinal do túnel, em anexo, foram identificadas e definidas 16 zonas, apresentadas no Quadro 29. Cada uma destas zonas é constituída pela presença percentual de várias unidades geotécnicas. O valor do GSI geral estimado é uma média ponderada do GSI de cada uma das unidades geotécnicas. No perfil longitudinal também é apresentada uma fiabilidade da previsão, sendo que existem zonas em que a fiabilidade é alta, média, baixa ou um misto destas.

Uma vez que os valores do Índice de Resistência Geológica apresentados são valores estimados, é de esperar que na obra se encontre alguma variação ou flutuação do seu valor. Dessa forma, o valor expectável é definido através de uma distribuição estatística normal. Para uma distribuição normal é necessário um valor médio e um desvio padrão. O valor médio é o estimado, mas como não temos uma lista de valores, não há como calcular o desvio padrão. Dessa forma, através do contacto com alguns engenheiros já com alguma experiência em obras subterrâneas, foi indicado que é expectável uma variação de valores oscilando entre 5 e 10 pontos de GSI, não sendo frequente que seja ultrapassado esse intervalo. Como no perfil existe uma representação de fiabilidade, foi considerada na previsão um desvio padrão de 5 pontos para fiabilidade média-alta, 10 pontos para fiabilidade média-baixa e um desvio padrão de 7,5 pontos quando a fiabilidade pode ser alta-média-baixa.

Nas Figuras 15 a 30 é apresentada uma representação gráfica desta previsão através da respectiva curva estatística de distribuição normal para os valores de GSI presentes no Quadro 30. É de referir que não existem valores do GSI inferiores a zero e por esse motivo as curvas nunca começam abaixo de zero, mesmo que a curva não fique representada na sua totalidade.

Quadro 29 – Zonamento

Zona	km inicial	km final
1	26+117,000	26+130,000
2	26+130,000	26+141,000
3	26+141,000	26+201,000
4	26+201,000	26+261,000
5	26+261,000	26+301,000
6	26+301,000	26+331,000
7	26+331,000	26+401,000
8	26+401,000	26+461,000
9	26+461,000	26+521,000
10	26+521,000	26+591,000
11	26+591,000	26+681,000
12	26+681,000	26+731,000
13	26+731,000	26+821,300
14	26+821,300	26+851,309
15	26+851,309	26+881,300
16	26+881,300	26+959,349

Quadro 30 – Valor do GSI Previstos

Zona	GSI	Desvio Padrão	Zona	GSI	Desvio Padrão
1	16	5	9	21	7,5
2	18,5	10	10	37	7,5
3	16,7	10	11	43,5	7,5
4	27,5	10	12	36,5	7,5
5	20	7,5	13	55	7,5
6	11	5	14	42,5	10
7	11,5	5	15	58	5
8	35	7,5	16	26	10

Nas zonas 1 a 5 estamos perante um maciço xistento. De acordo com a previsão, espera-se encontrar valores médios de GSI entre 17 e 28, o que indica um maciço de qualidade má a muito má. São zonas em que a fiabilidade da previsão estava definida como baixa, pelo que se esperam algumas flutuações no valor de GSI em redor do valor médio. Em geral, Figs. 17 a 21, a distribuição do GSI varia entre 0 e 40 a 50, o que implica uma grande variação na previsão.

Entre as zonas 5 e 7, temos definido a zona de contacto (Figs. 22 a 24). A zona 5 é uma zona comum entre a de contacto e o maciço xistento.

As zonas 6 e 7, Figs. 23 e 24, têm uma distribuição muito semelhante, com valor de GSI médio pelos 12 pontos, tendo uma distribuição entre 0 e 28, aproximadamente. Esta semelhança prevê que as duas zonas sejam constituídas pelos mesmos materiais, com heterogeneidade e características semelhantes do maciço. Prevê-se um maciço de qualidade muito má.

Das zonas 7 a 16, está definido o maciço rochoso granítico (Figs. 24 a 32). A zona 7 é uma zona comum entre a zona de contacto e o maciço granítico.

A zona 8, Fig. 16, apresenta claramente melhores características de maciço rochoso. Até então, tínhamos um valor médio de GSI entre 16 e 20 e passamos a ter cerca de 35, o que indica podermos esperar um maciço com qualidade má a razoável, sendo assim uma zona mais resistente que as anteriores. A previsão de valores para esta zona varia entre os 16 (qualidade muito má) até aos 55 (qualidade razoável ou boa).

À medida que avançamos, constata-se um melhoramento progressivo do maciço, aumentando o valor médio previsto do GSI, sendo a amplitude de valores esperados localizada também em valores mais elevados do que as zonas anteriores. Encontram-se valores médios de GSI entre os 35 e os 60 e espera-se uma grande variabilidade.

Ao chegar ao extremo do túnel, Fig. 32, prevê-se uma diminuição do valor de GSI, com consequente decréscimo nas características resistentes do maciço. Aproximamo-nos da superfície, da extremidade, onde o maciço está sujeito a mais perturbações e alterações, tendo um valor médio de GSI de 25, com variação entre 0 e 55, portanto, prevê-se um maciço de má qualidade.

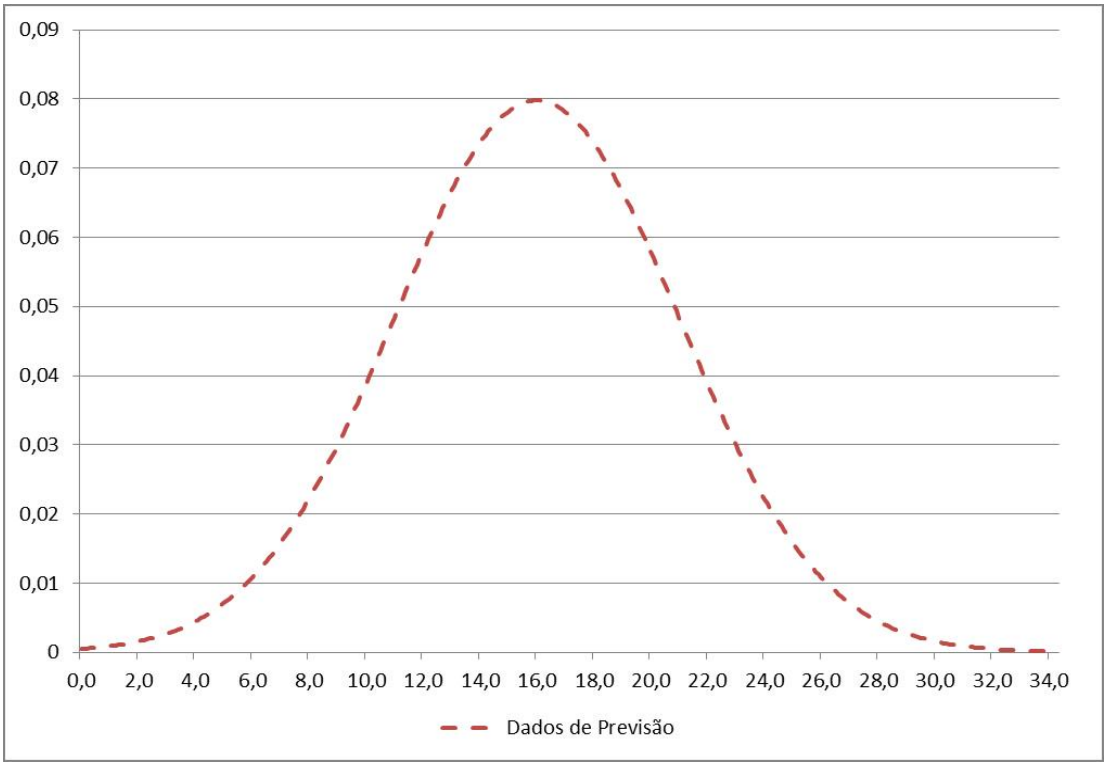


Fig. 17 – GSI Previsto na Zona 1

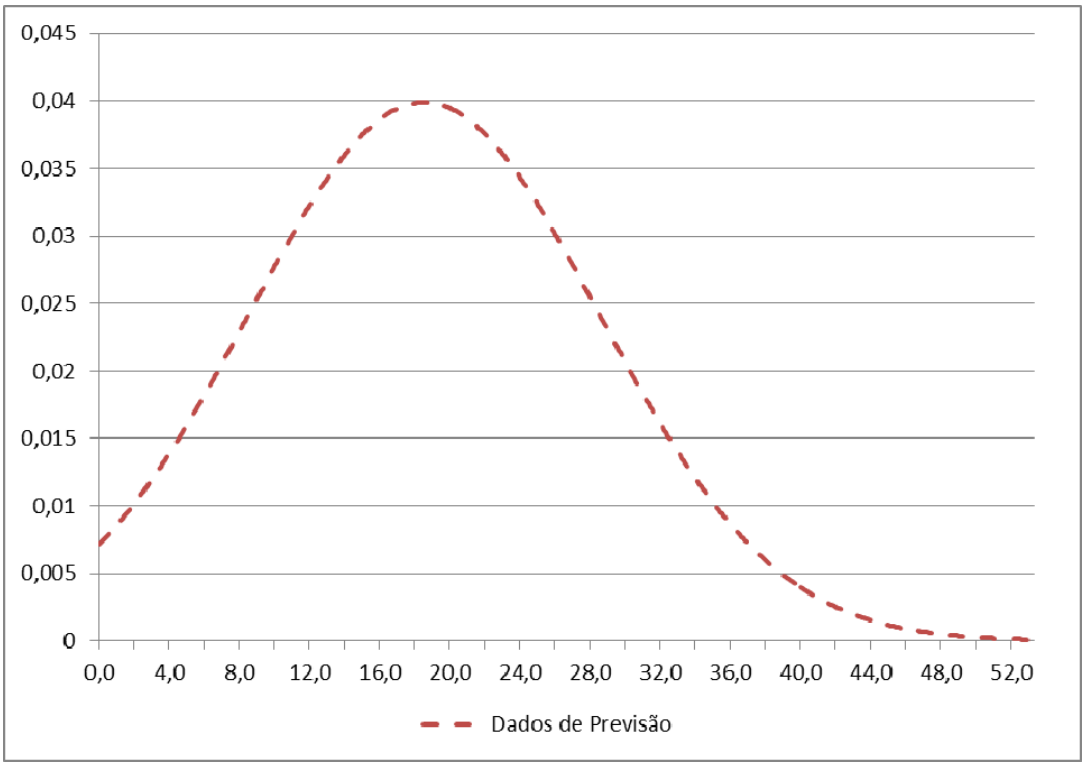


Fig. 18 – GSI Previsto na Zona 2

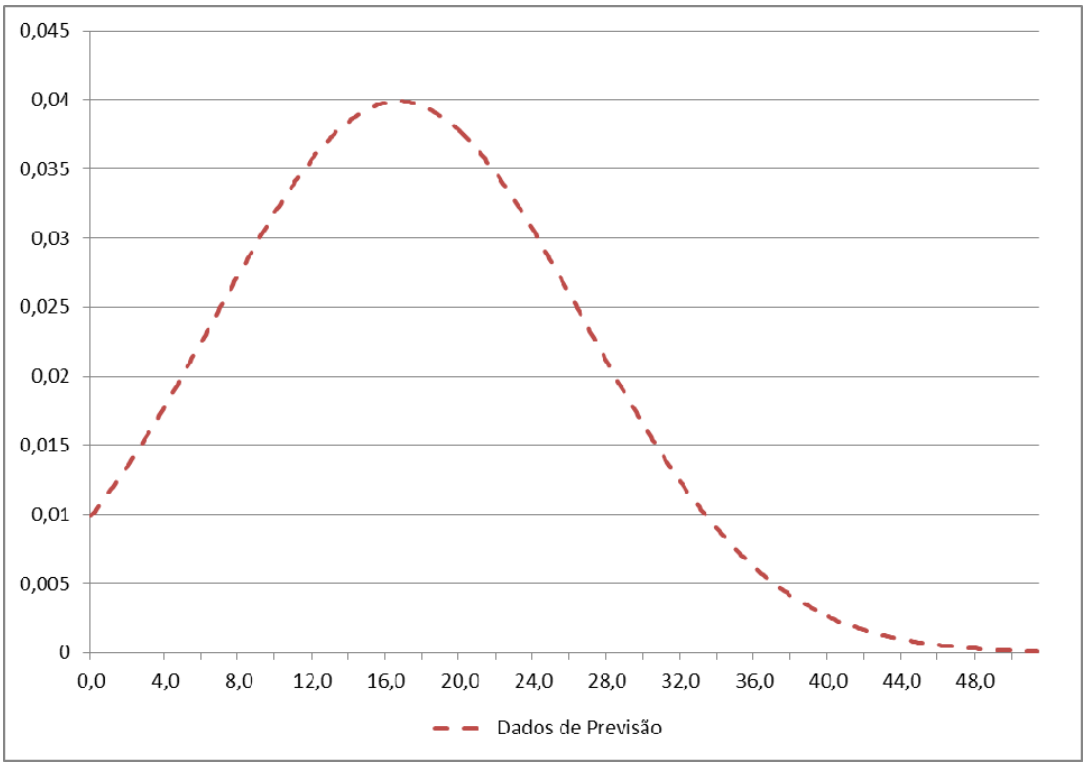


Fig. 19 – GSI Previsto na Zona 3

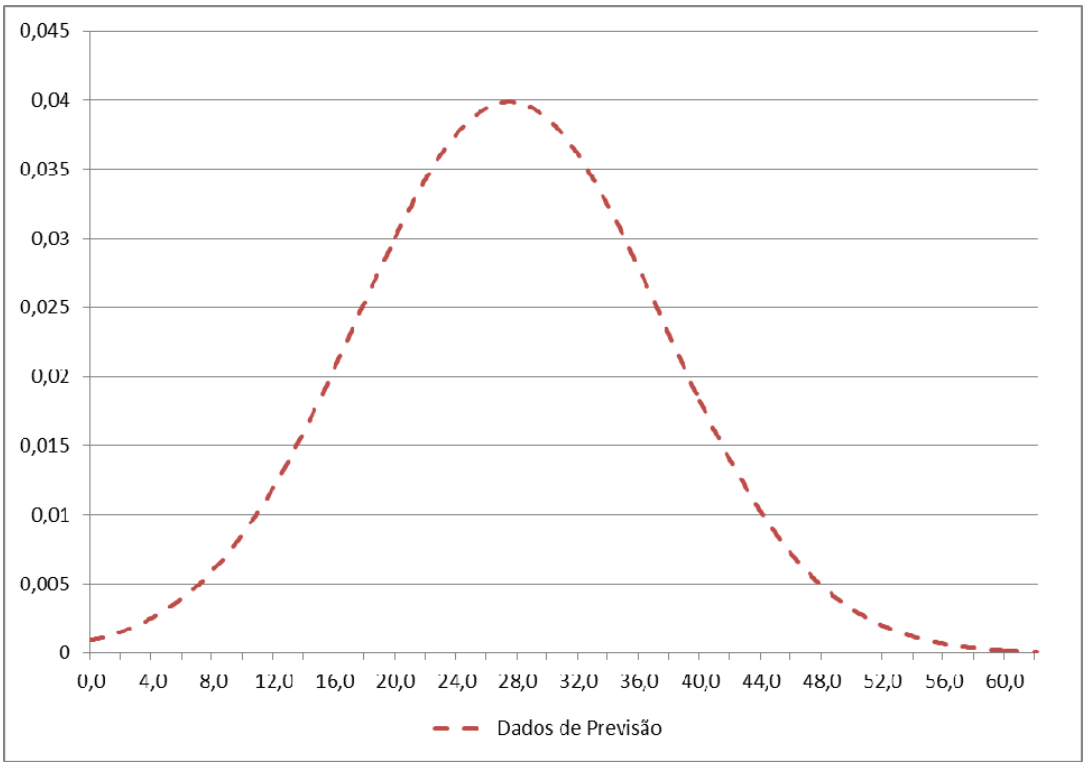


Fig. 20 – GSI Previsto na Zona 4

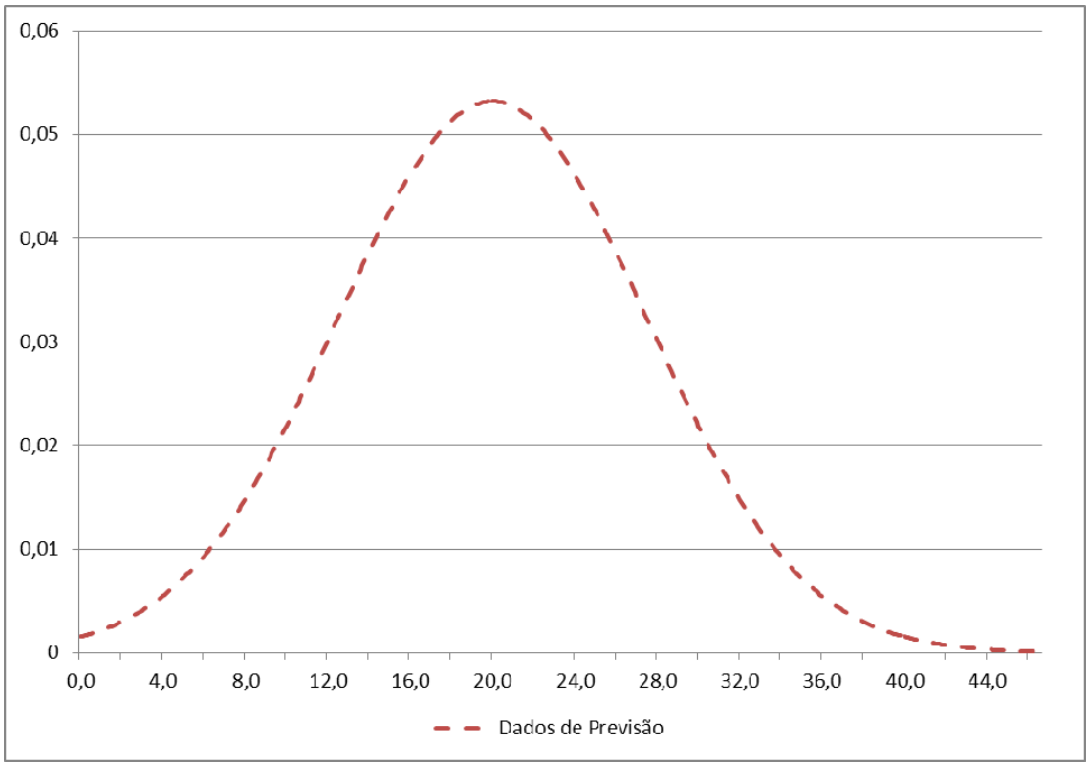


Fig. 21 – GSI Previsto na Zona 5

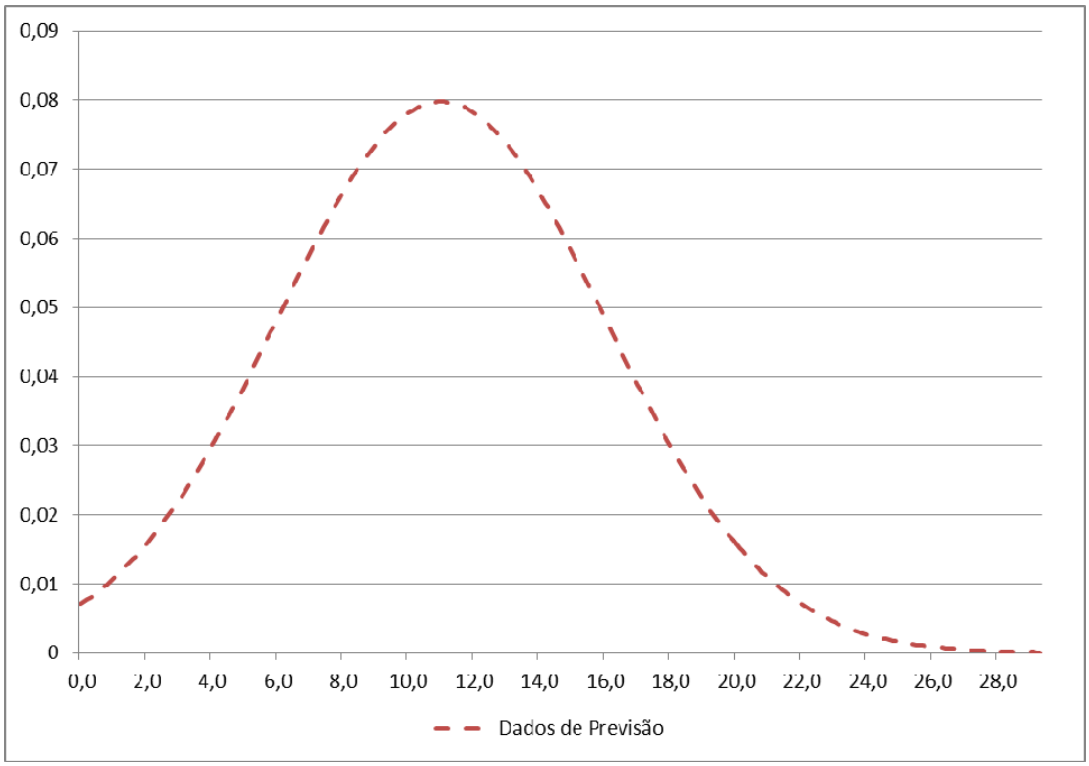


Fig. 22 – GSI Previsto na Zona 6

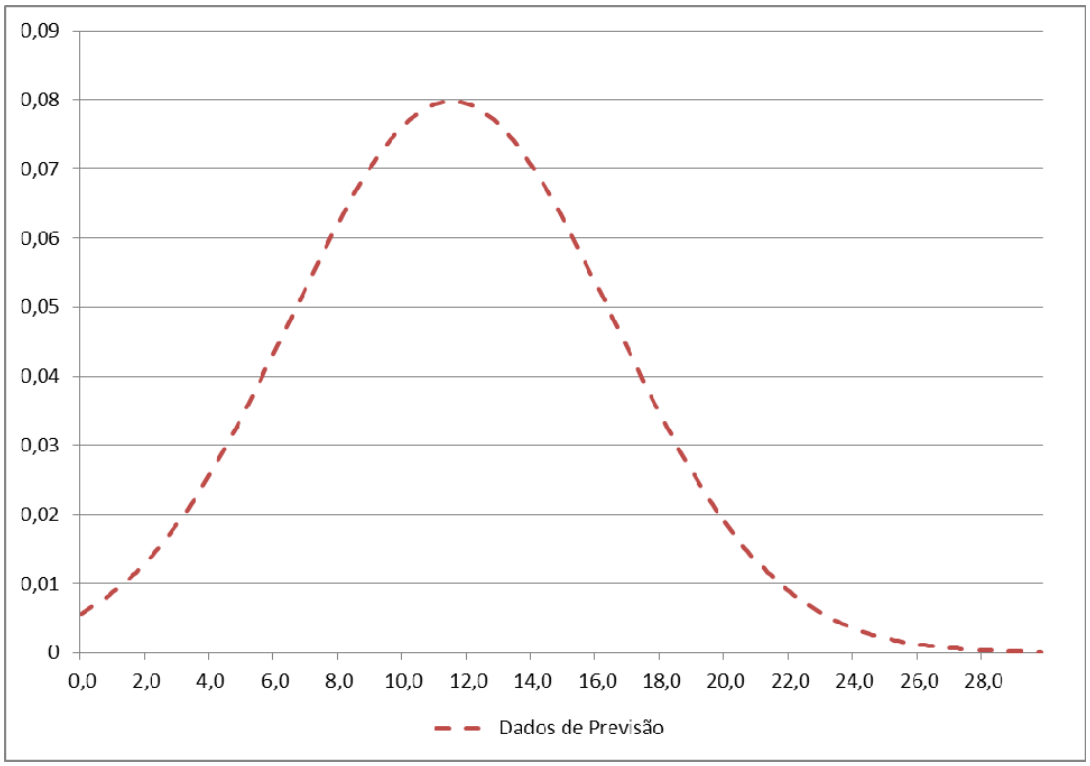


Fig. 23 – GSI Previsto na Zona 7

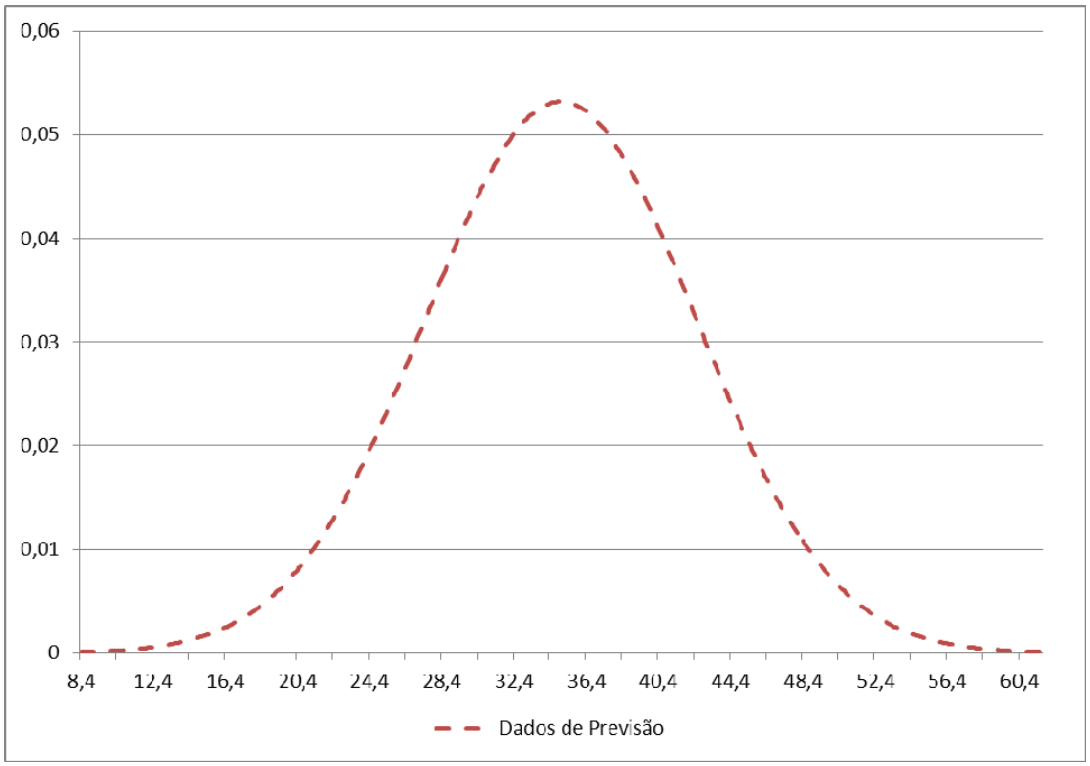


Fig. 24 – GSI Previsto na Zona 8

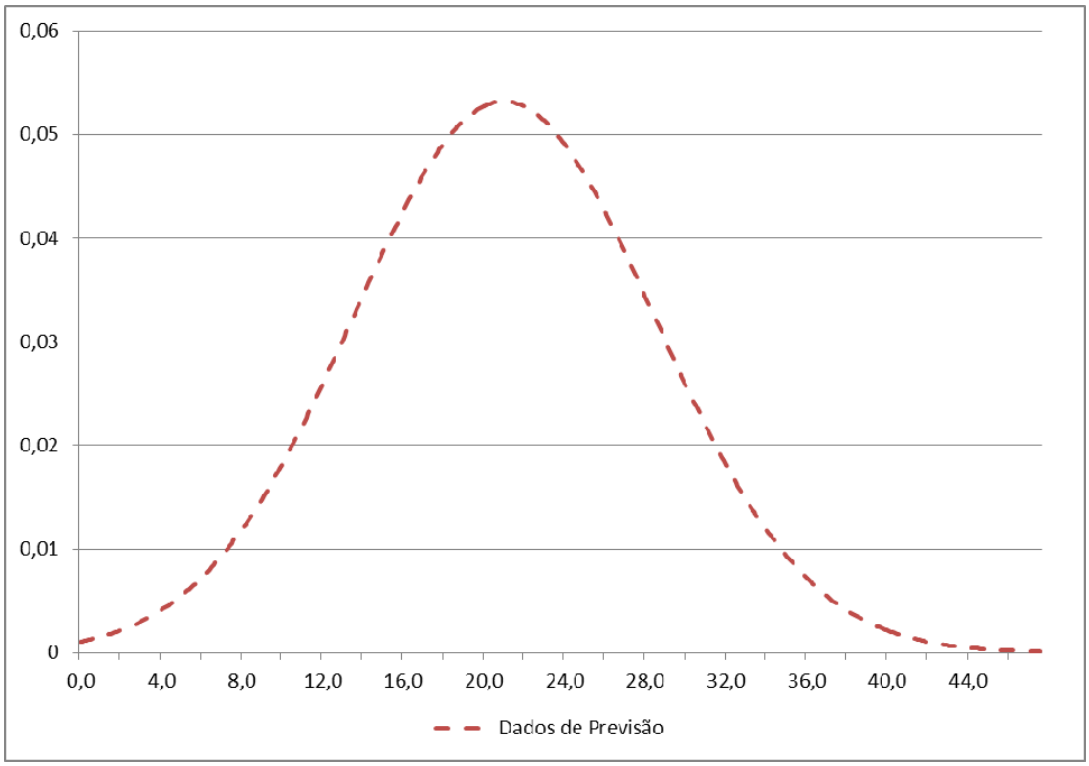


Fig. 25 – GSI Previsto na Zona 9

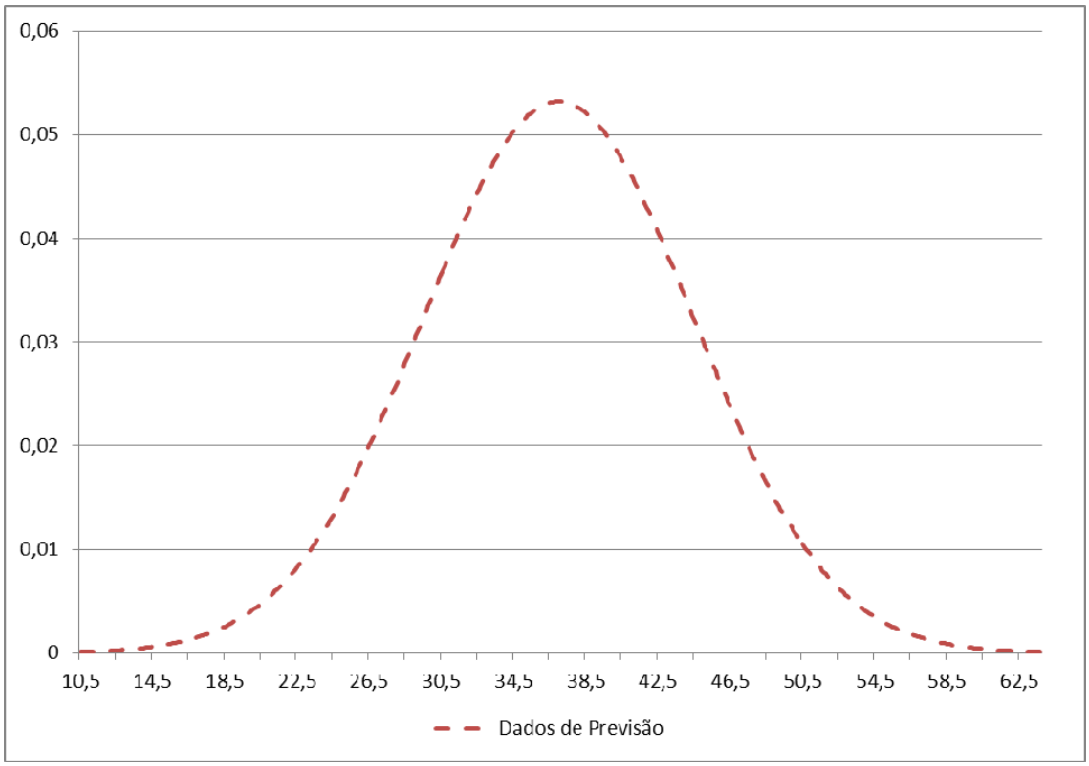


Fig. 26 – GSI Previsto na Zona 10

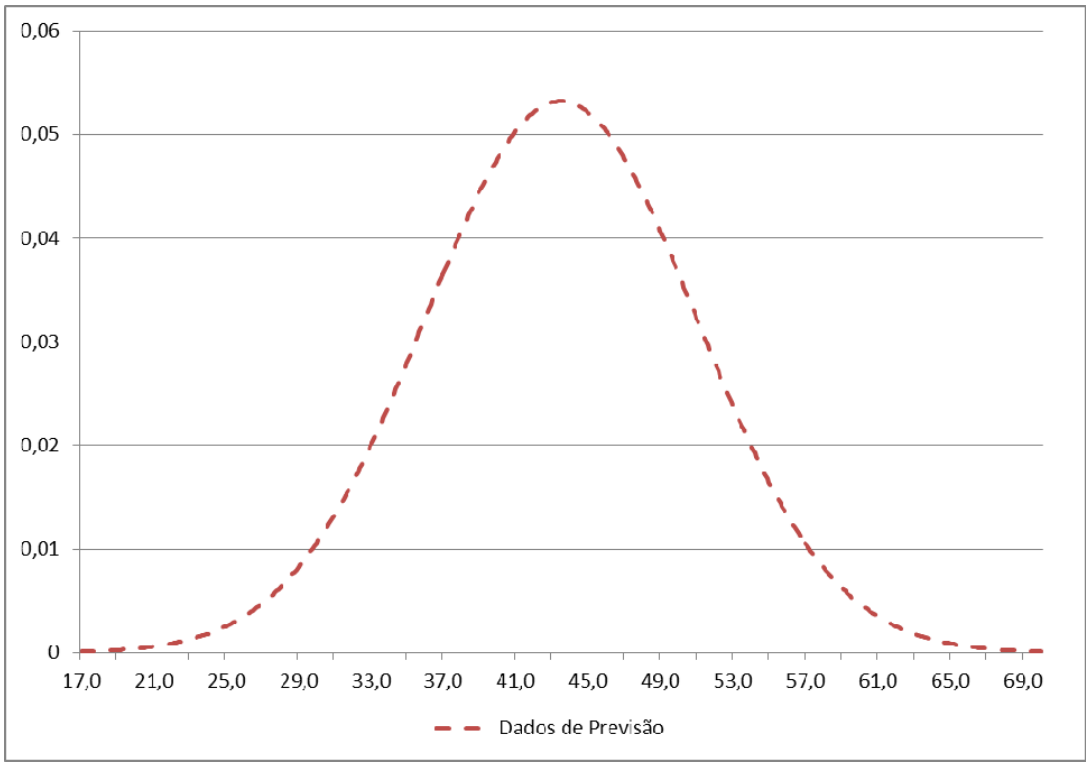


Fig. 27 – GSI Previsto na Zona 11

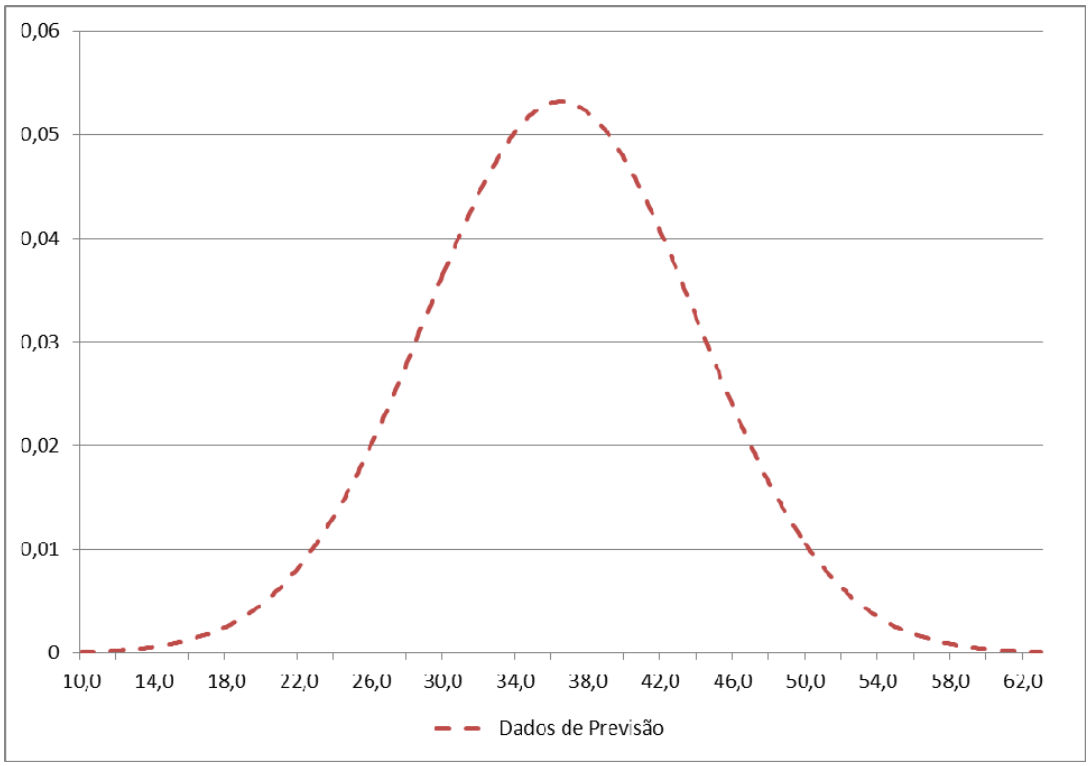


Fig. 28 – GSI Previsto na Zona 12

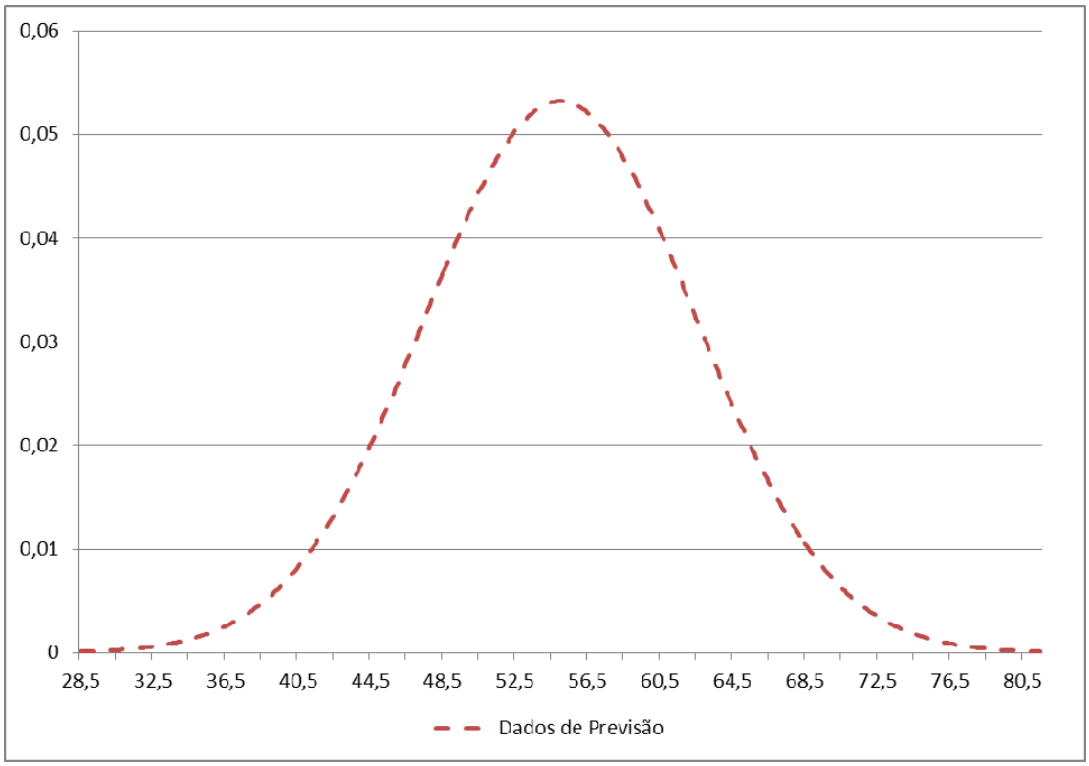


Fig. 29 – GSI Previsto na Zona 13

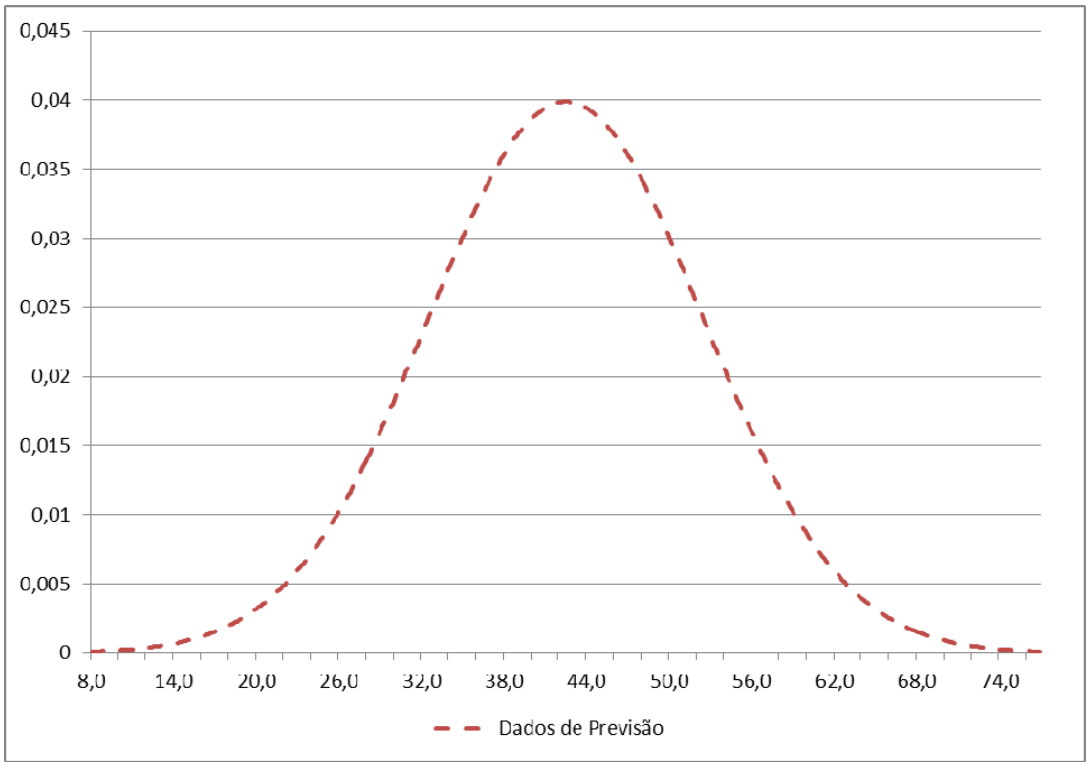


Fig. 30 – GSI Previsto na Zona 14

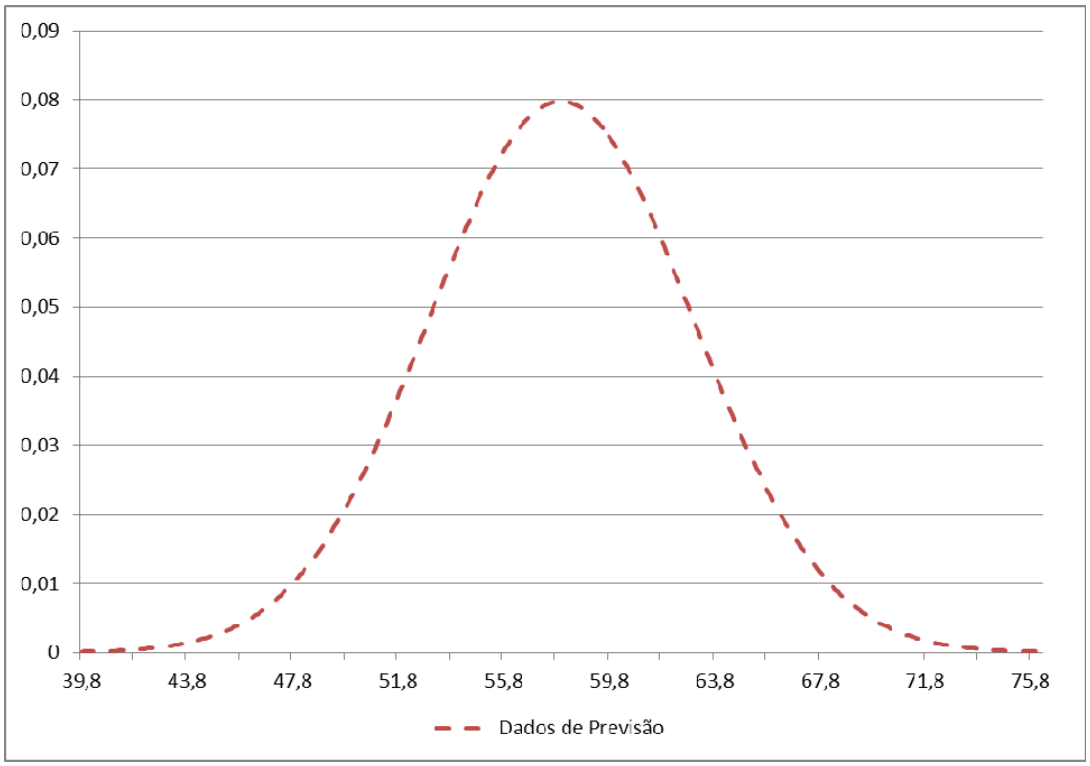


Fig. 31 – GSI Previsto na Zona 15

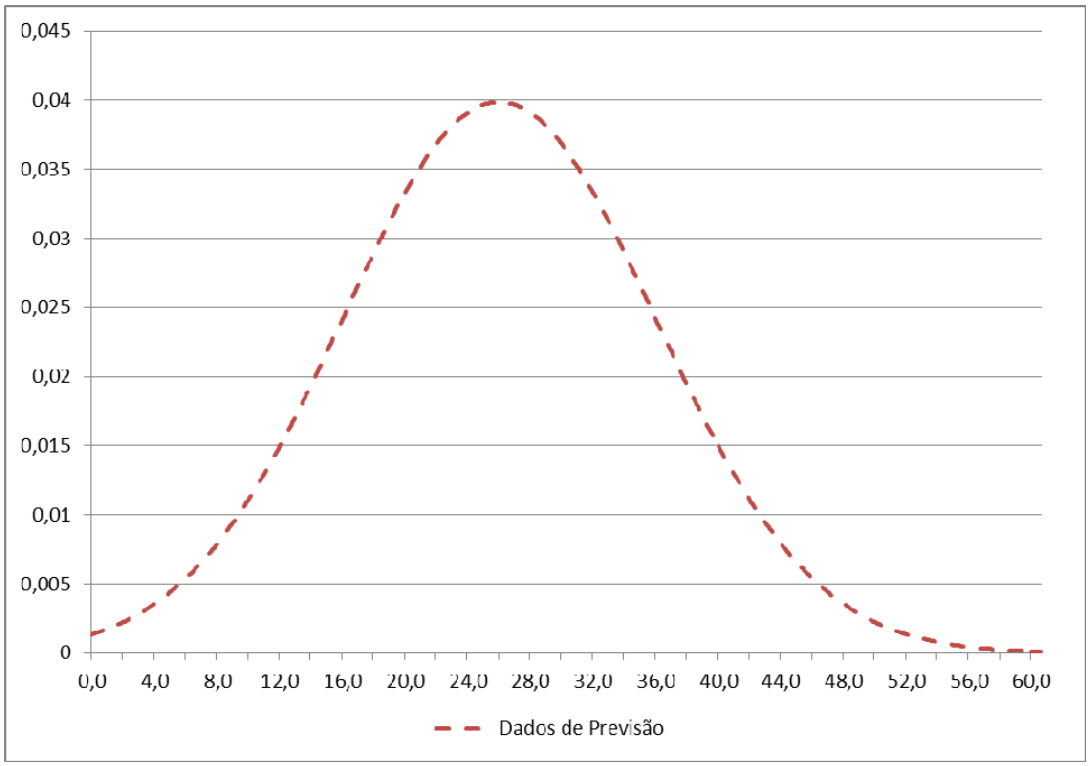


Fig. 32 – GSI Previsto na Zona 16

4.4. VALORES DE GSI MEDIDOS

Durante a realização da obra, foram realizadas medições e observações constantes com registo, para classificar o maciço na frente de escavação. Estas medições e observações permitiram criar folhas de registo de descontinuidades e de todos os elementos necessários a uma classificação RMR. Foi também registada uma classificação GSI.

Estes registos foram efectuados, consoante o local, com espaçamentos de 1 em 1 metros, 2 em 2 metros ou 3 em 3 metros. Todos estes registos foram levantados e utilizados para fazer o tratamento estatístico relativamente aos valores de GSI medidos durante a fase de obra. Este tratamento permitiu, em função das zonas previamente definidas, fazer o cálculo do valor médio de GSI para cada zona e respectivo desvio padrão, que se apresentam no Quadro 31.

Apresenta-se nas Fig. 33 a 50 a representação gráfica da distribuição normal dos valores de GSI medidos durante a obra.

Na zona de maciço xistento, zonas 1 a 5 (Figs. 33 a 38), no decorrer da escavação, determinaram-se valores de GSI médios entre 54 e 70. Encontraram-se, assim, maciços de qualidade razoável a boa.

A variação dos valores em torno da média é reduzida nas zonas 1 e 2. Nas zonas 3 e 4, os valores de GSI permanecem elevados, entre 40 e 85, mantendo a qualidade do maciço de razoável a boa ou até mesmo muito boa.

A zona 5, que separa a zona de maciço xistento da zona de contacto, é uma zona particular que merece uma atenção especial no tratamento dos dados. Nas medições realizadas ao longo da escavação, foi possível verificar e definir com elevada precisão duas subzonas dentro desta zona 5, de características distintas. Claramente, entre o km 26+261 e o km 26+274, encontramos uma primeira zona muito mais resistente, com valores de GSI entre 50 e 80, portanto uma zona de qualidade boa a muito boa (Fig. 39). A segunda zona (Fig. 40), do km 26+274 ao km 26+301 é manifestamente uma zona muito mais fraca, com GSI entre 4 e 20, zona de qualidade muito má. A média do GSI nesta segunda zona ronda os 11 a 14. Estas duas subzonas, claramente distintas, foram definidas no Quadro 31 como zona 5a e zona 5b. É pertinente fazer esta separação uma vez que os valores passam de muito bons a muito fracos de forma bem definida.

Nesta zona de contacto, Figs. 38 a 40, foram encontrados valores de GSI baixos, entre 2 e 30, com média não acima dos 16. É, portanto, uma zona de qualidade muito fraca, com uma variação de valores um pouco dispersos, o que indica que encontramos zona com alguma variação e zona com bastante consistência nas características do maciço. No entanto, como estes valores são semelhantes, temos uma zona de contacto com características muito semelhantes ao longo da sua extensão.

É no maciço rochoso granítico que encontramos a maior heterogeneidade e variabilidade das características do maciço. Entre as zonas 7 e 16 registaram-se valores médios de GSI entre os 18 e os 60, com variação de zero a 72. Ou seja, encontramos maciço de qualidade muito fraca a maciço com qualidade boa.

Entre as zonas 8 e 11, Figs. 41 e 44, à medida que avançamos com a escavação encontram-se melhores condições geológicas e geotécnicas do maciço, aumentando progressivamente o seu índice de resistência geológica. Aumentando os valores médios de 22 para 43, com variações semelhantes nos valores encontrados, fomos passando de um maciço de qualidade fraca para um maciço com qualidade razoável.

Das zonas 12 a 14 (Figs. 45 a 47), acontece o oposto. O valor de GSI vai decaindo, passando de valores entre 40 e 32, nas zonas 12 e 13, respectivamente, com uma concentração elevada de valores

de GSI perto dos valores médios, para o valor de 19 na zona 14 (Fig. 47), também com elevada concentração próxima da média. Passamos de um maciço de qualidade razoável para fraca qualidade.

Ao chegarmos à zona 15, encontramos uma situação semelhante à da zona 5. Da zona 14 até ao início da zona 15, ao km 26+865.600, registamos valores de GSI médios a rondar os 19 pontos, com variação entre 10 e 27 pontos. Claramente, a partir deste mesmo km, passamos para um maciço com características mecânicas francamente melhores e superiores, registando-se valores de GSI entre 41 e 77, com média a rondar os 58 pontos de GSI. Mais uma vez, é pertinente fazer a divisão em duas subzonas (Figs. 48 e 49) pois têm características distintas com influência no desenrolar da obra, já que passamos de um maciço de fraca qualidade para um maciço mais resistente, de qualidade razoável a boa.

A última zona do túnel, zona 16 (Fig. 50), tem um GSI médio ligeiramente inferior, com valores a variar entre os 25 e os 72. Têm assim uma dispersão elevada, variando o maciço entre uma qualidade fraca e uma qualidade boa.

Quadro 31 – Valores Medidos em Obra

Zona	GSI	Desvio Padrão		Zona	GSI	Desvio Padrão
1	57,8	4,5		9	24,7	10,7
2	55,2	3,2		10	38,7	7,9
3	54,2	5,8		11	43,1	8,1
4	66,8	10,8		12	37,4	5,6
5a	70,1	7,7		13	31,3	3,7
5b	13,0	2,3		14	18,4	3,8
6	12,6	2,3		15a	19,3	3,4
7	16,1	5,2		15b	58,2	4,9
8	24	5,0		16	49,7	7,2

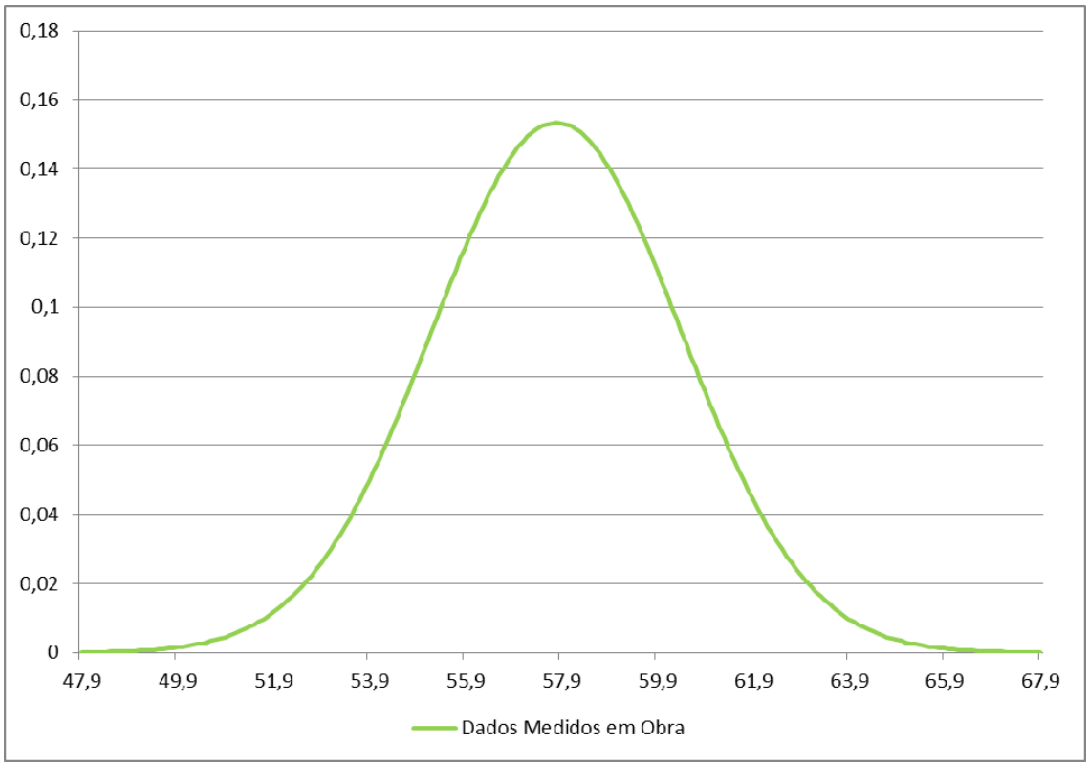


Fig. 33 – GSI Medido em Obra na Zona 1

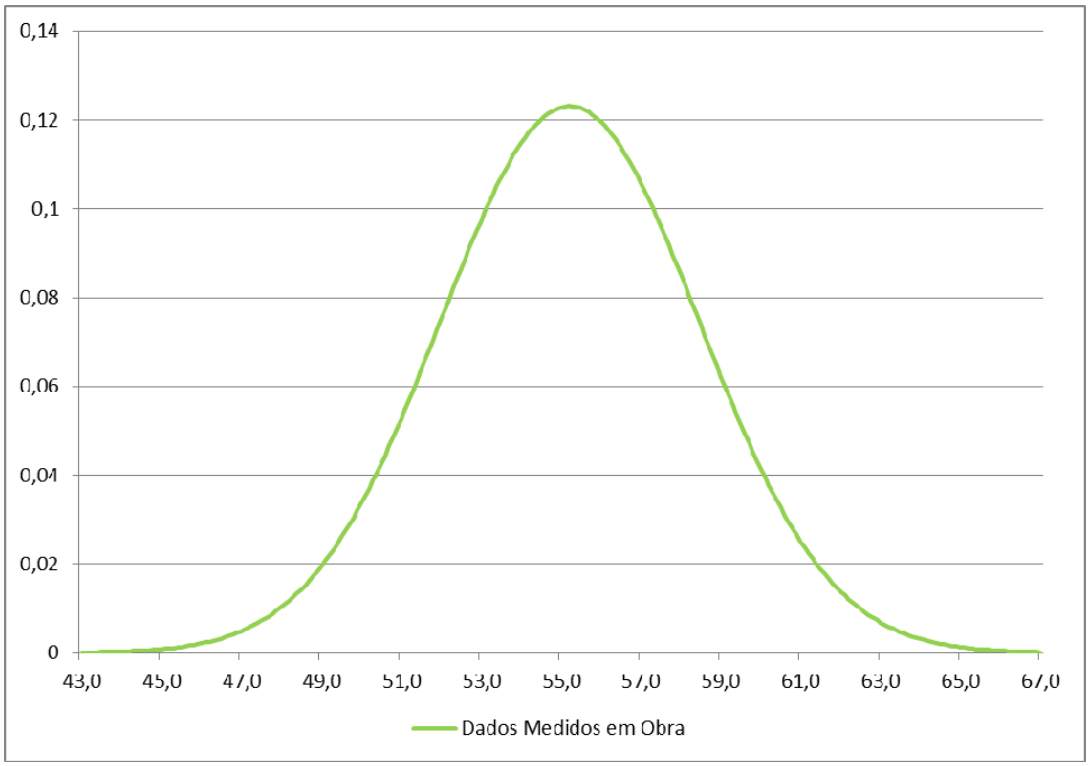


Fig. 34 – GSI Medido em Obra na Zona 2

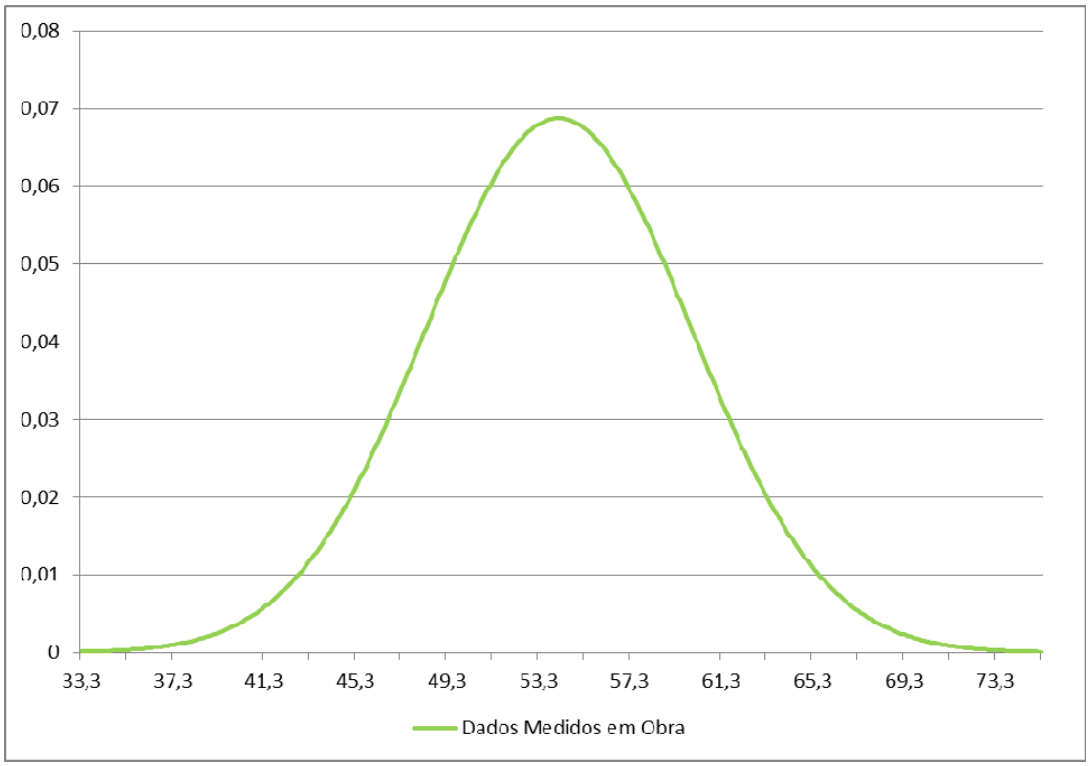


Fig. 35 – GSI Medido em Obra na Zona 3

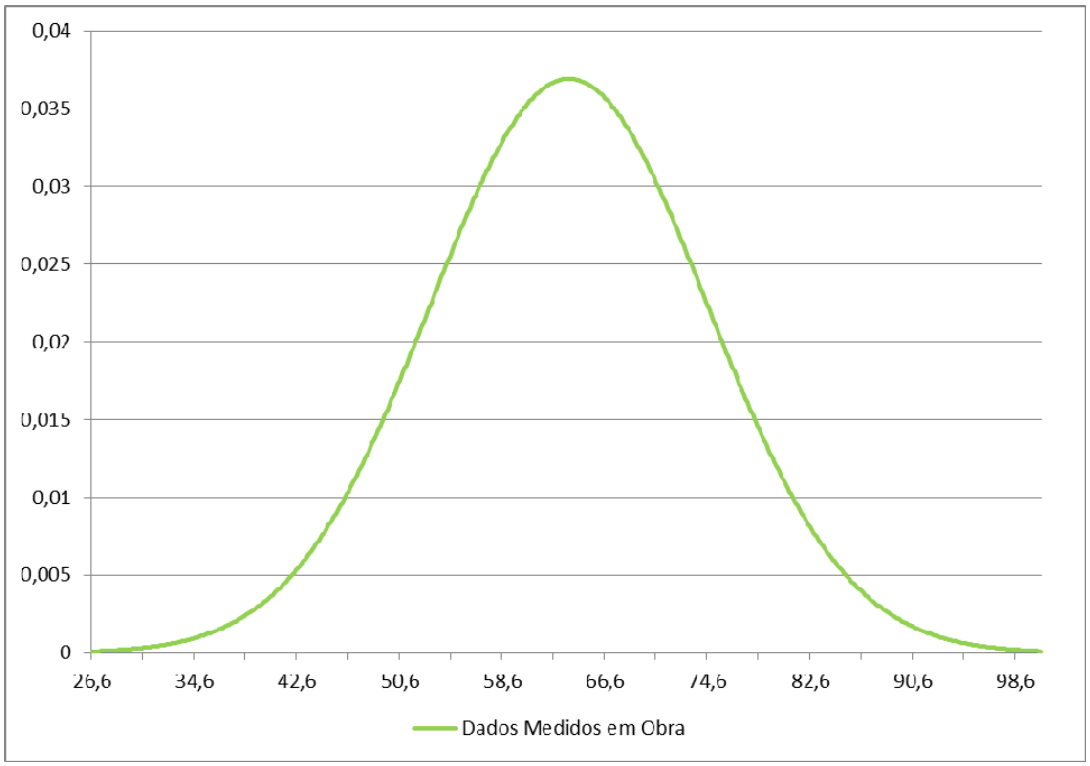


Fig. 36 – GSI Medido em Obra na Zona 4

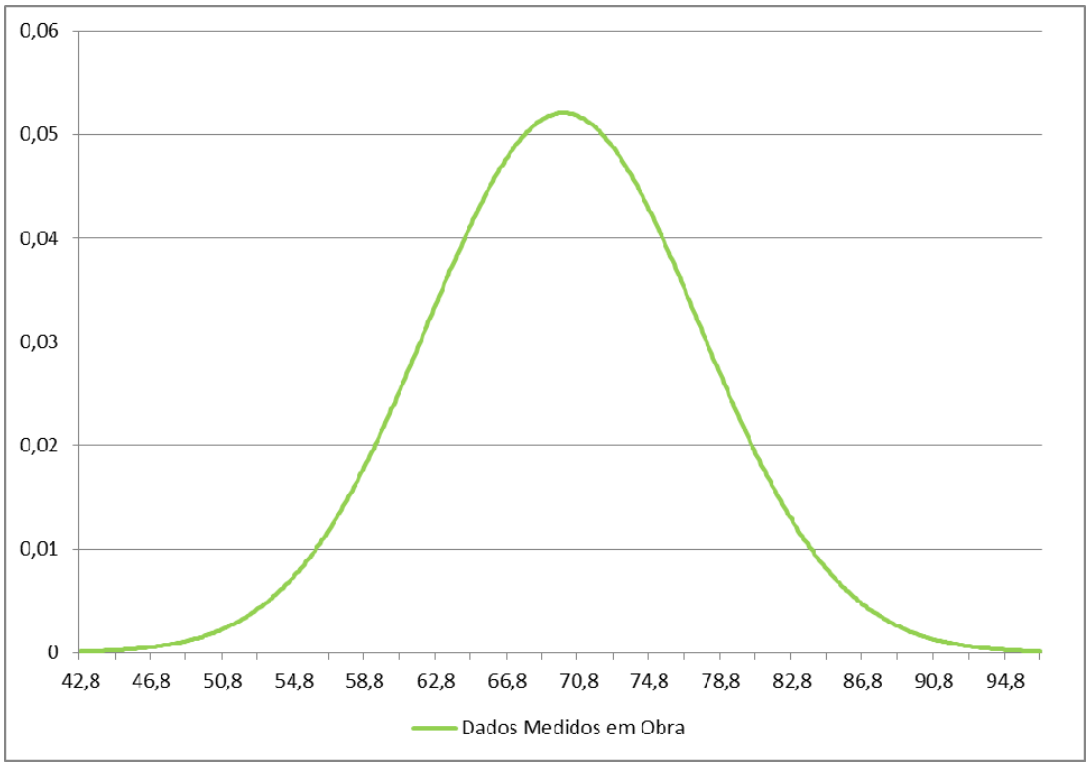


Fig. 37 – GSI Medido em Obra na Zona 5, parte a)

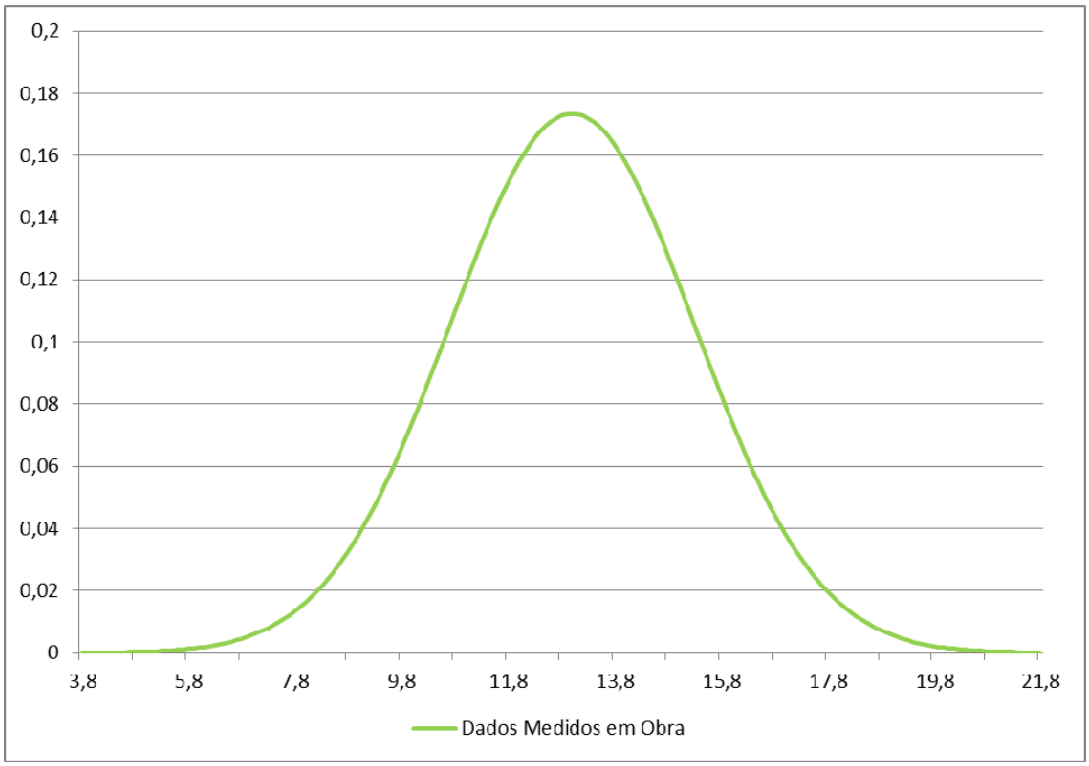


Fig. 38 – GSI Medido em Obra na Zona 5, parte b)

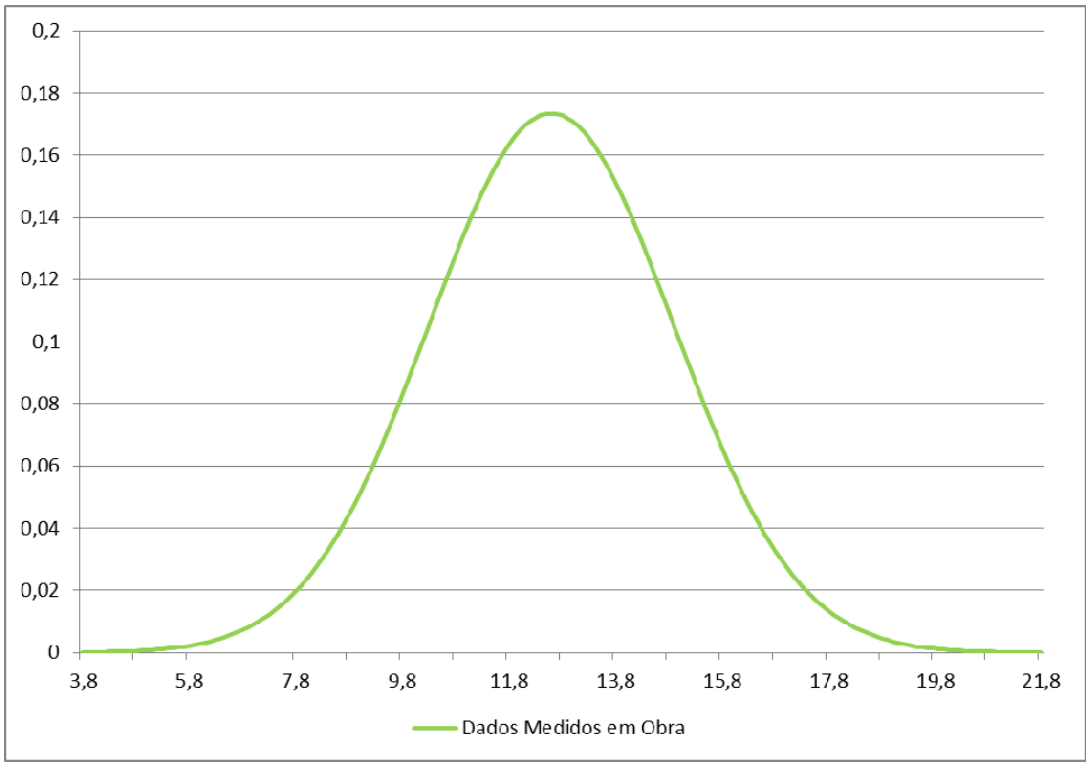


Fig. 39 – GSI Medido em Obra na Zona 6

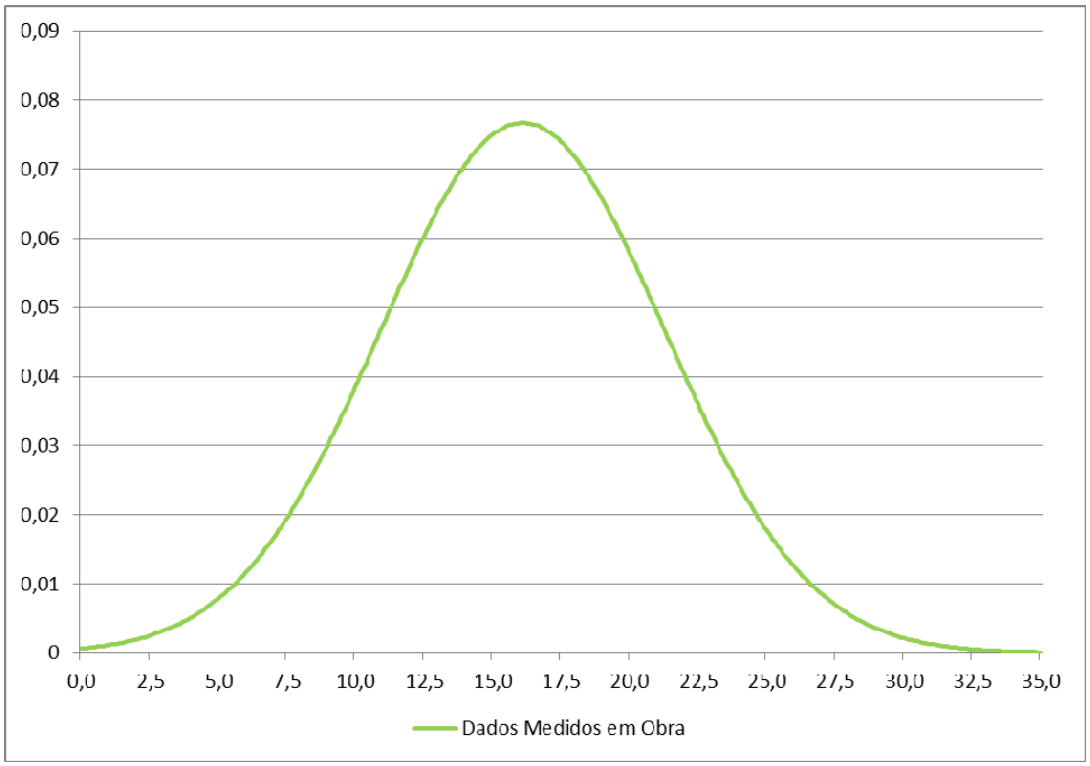


Fig. 40 – GSI Medido em Obra na Zona 7

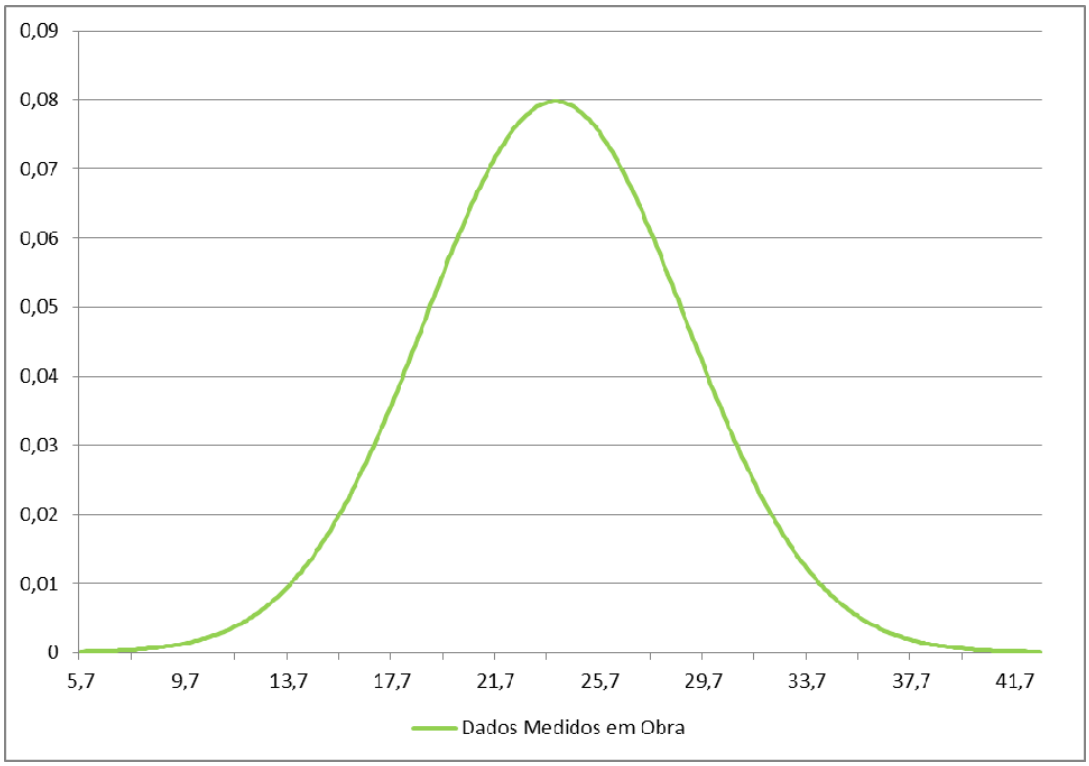


Fig. 41 – GSI Medido em Obra na Zona 8

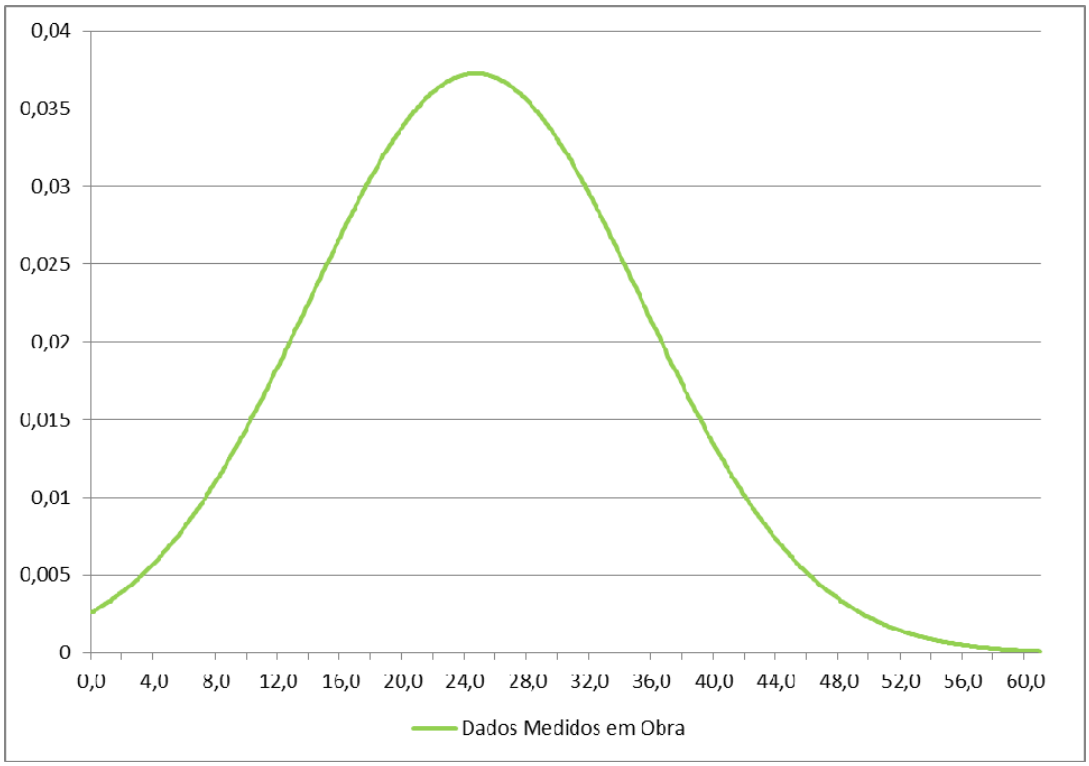


Fig. 42 – GSI Medido em Obra na Zona 9

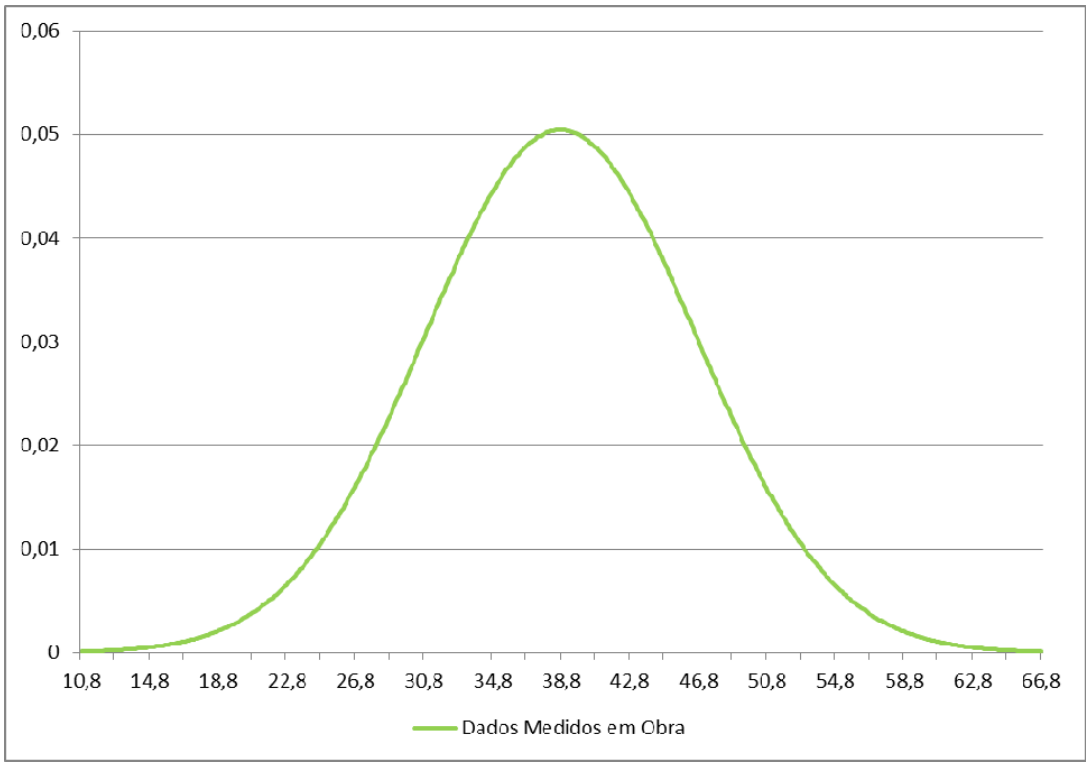


Fig. 43 – GSI Medido em Obra na Zona 10

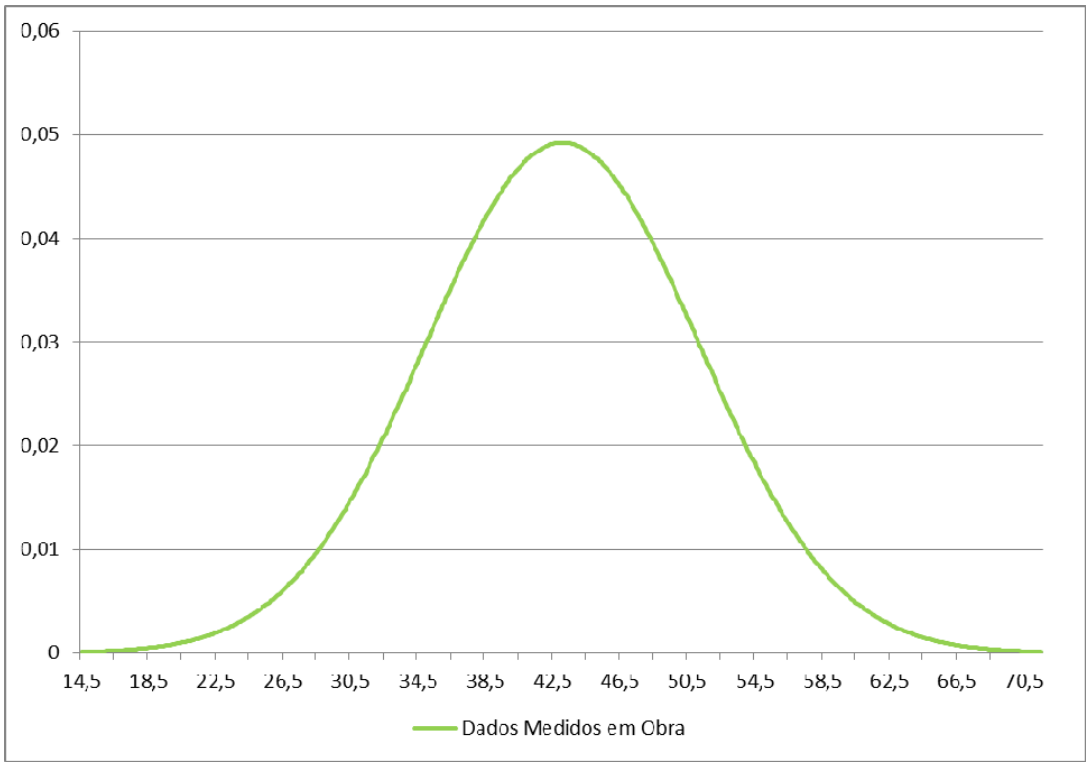


Fig. 44 – GSI Medido em Obra na Zona 11

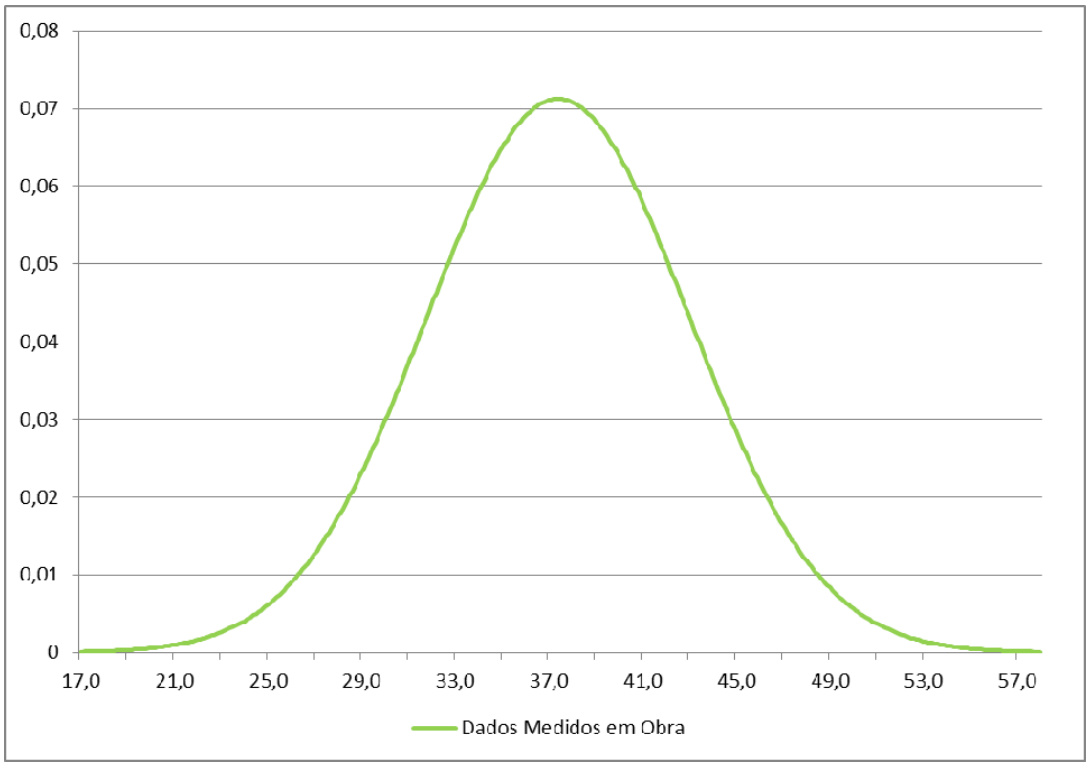


Fig. 45 – GSI Medido em Obra na Zona 12

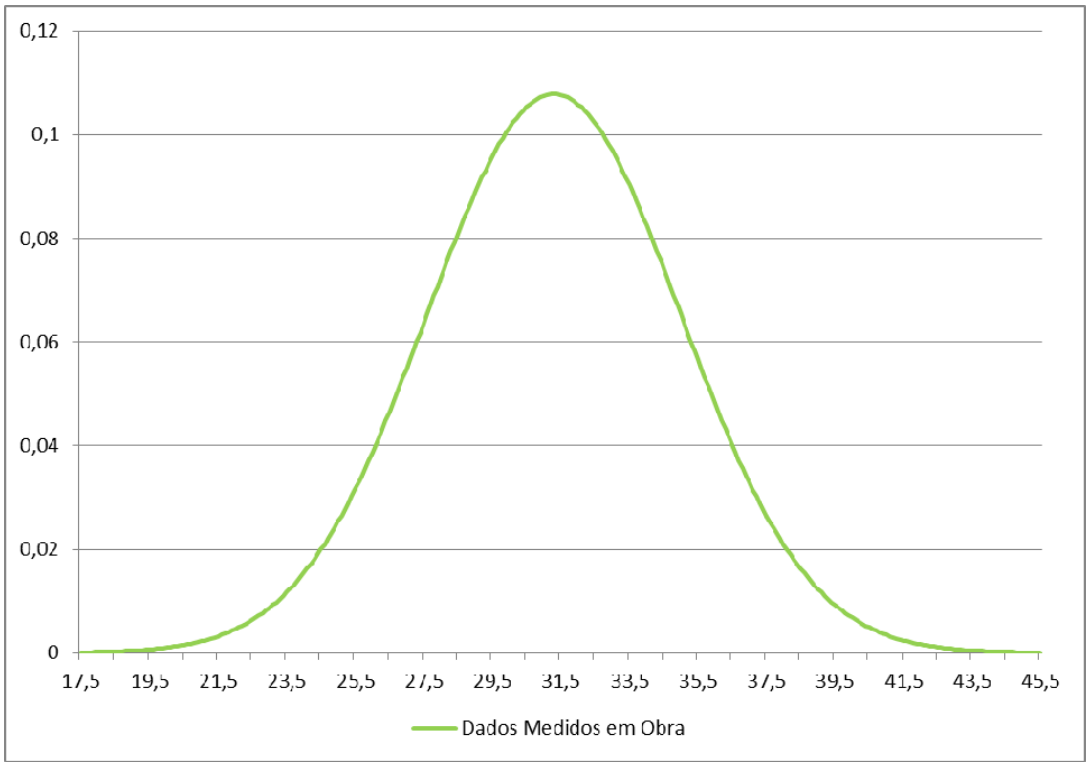


Fig. 46 – GSI Medido em Obra na Zona 13

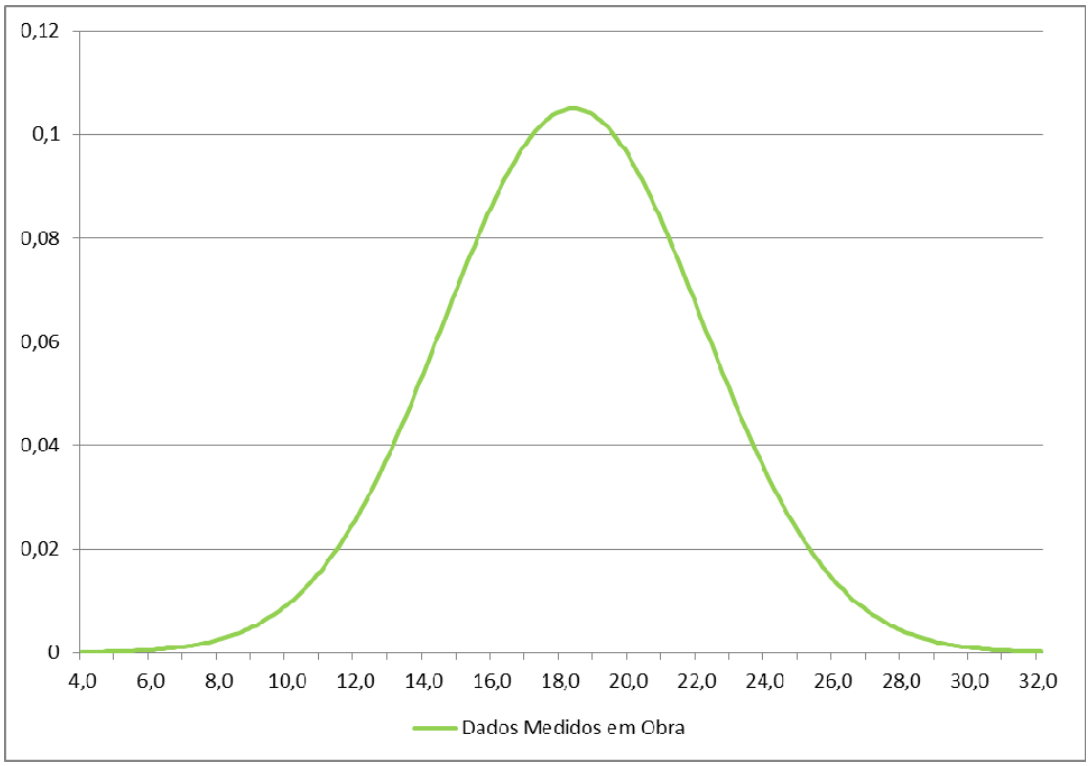


Fig. 47 – GSI Medido em Obra na Zona 14

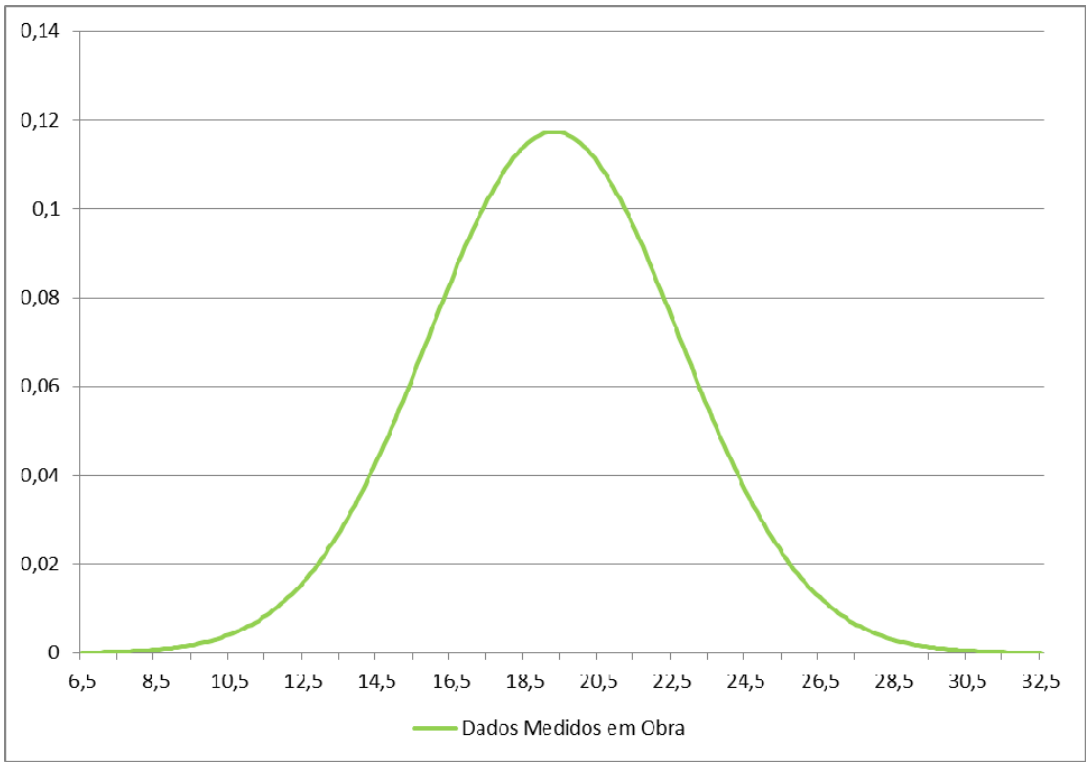


Fig. 48 – GSI Medido em Obra na Zona 15, parte a)

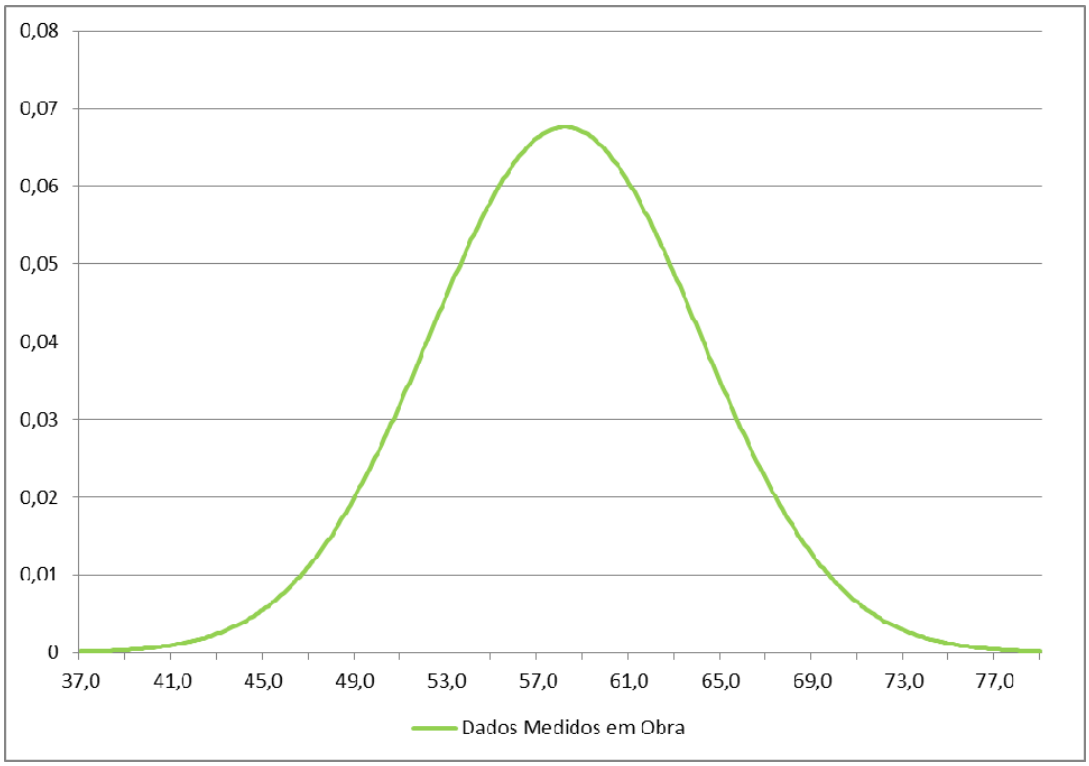


Fig. 49 – GSI Medido em Obra na Zona 15, parte b)

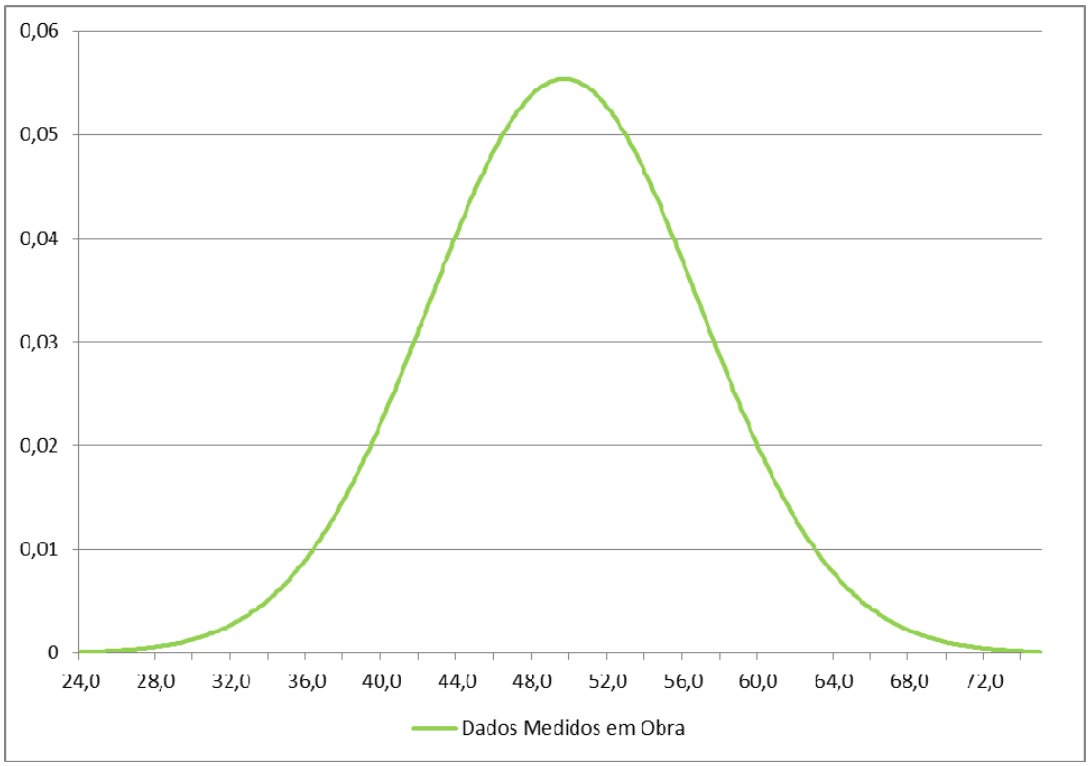


Fig. 50 – GSI Medido em Obra na Zona 16

5
COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS VALORES DE GSI

5.1. INTRODUÇÃO

Nesta fase do trabalho serão analisados e comparados os valores do GSI obtidos em fase de previsão e os valores obtidos durante a obra.

Os dados foram tratados estatisticamente com representação através de curvas de distribuição normal, a partir das quais foram obtidos os coeficientes de variação representativos das respectivas curvas, para cada zona. Estas variações serão também analisadas neste capítulo.

5.2. ELEMENTOS COMPARATIVOS

5.2.1. COEFICIENTES DE VARIAÇÃO

O coeficiente de variação é o quociente do desvio padrão pela média, expressão (11), relativamente à amostragem de dados considerados. Estes são valores representativos da homogeneidade ou heterogeneidade do maciço rochoso ao longo das zonas consideradas, bem como das suas características geológicas, geotécnicas e mecânicas. Quanto maior for o coeficiente de variação, mais heterogéneo é o maciço, sendo as suas características ao longo da zona considerada mais distintas. Por oposição, quanto menor for o coeficiente de variação, mais consistente será o tipo de maciço escavado, mais homogéneo e com as mesmas condições de resistência e geológicas ao longo da respectiva zona.

$$Coef.Var. = \frac{DesvioPadrão}{Média} \qquad (11)$$

Como foi referido em capítulos anteriores, a previsão do GSI foi obtida a partir das sondagens e ensaios realizados e o desvio padrão foi considerado em função da fiabilidade prevista, representada no perfil longitudinal do túnel e também do contacto com a experiência de alguns engenheiros da empresa GEG. Os dados obtidos em obra foram registados ao longo da mesma, pelo que os valores médios e desvio padrão são resultados do tratamento estatístico dos dados recolhidos.

Desta forma, os coeficientes de variação representados, previsão e medição em obra, são fruto do trabalho estimado e do trabalho de registo durante o decorrer da obra.

No Quadro 32 temos os coeficientes de variação obtidos e nas Figs. 51 e 52, apresentam-se duas representações gráficas dos coeficientes de variação e a sua variabilidade ao longo do túnel. Importa neste ponto referir que, até às zonas 6 e 7, temos maciço xistento e a partir dessas zonas maciço granítico. O facto de, no maciço granítico, os coeficientes serem mais aproximados, revela também um maior conhecimento e experiência no que diz respeito a este tipo de maciços, comparativamente com os xistos, nos quais foi feito uma previsão mais reservada pelo lado da segurança.

No ponto 5.2.2, nas Figs. 53 a 68, representa-se a comparação dos valores do GSI previstos com os obtidos, através das curvas de distribuição normal. Nesse mesmo ponto serão comentados os coeficientes de variação das respectivas curvas.

Zona	Coeficiente de Variação Previsto (%)	Coeficiente de Variação Medido (%)		Zona	Coeficiente de Variação Previsto (%)	Coeficiente de Variação Medido (%)
1	31,3	4,5		9	35,7	43,4
2	54,1	5,9		10	20,3	20,4
3	59,9	10,7		11	17,2	18,8
4	36,4	16,2		12	20,5	14,9
5	37,5	10,9 // 17,7		13	13,6	11,8
6	45,5	18,1		14	23,5	20,5
7	43,5	32,2		15	8,6	17,6 // 8,4
8	21,4	20,9		16	38,5	14,5

Quadro 32 – Coeficientes de Variação da Obra

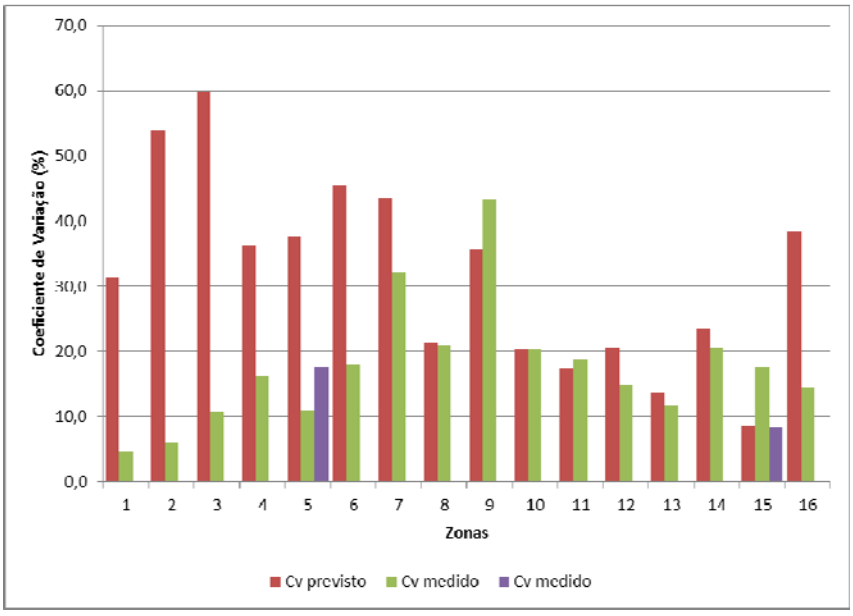


Fig. 51 – Coeficientes de Variação dos Valores de GSI ao Longo do Túnel, Representação 1

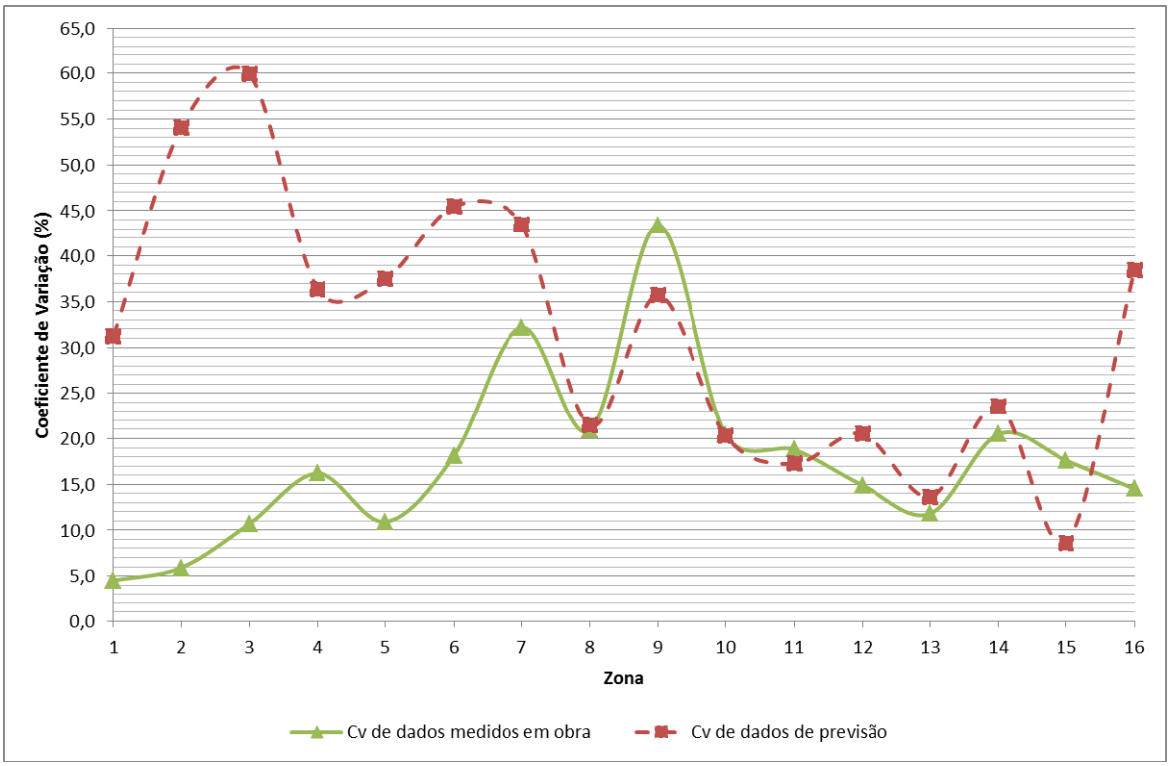


Fig. 52 – Coeficientes de Variação dos Valores de GSI ao Longo do Túnel, Representação 2

5.2.2. Análise dos Valores do GSI e sua Variação

Na Zona 1, Fig. 53, previa-se encontrar um maciço com qualidade fraca ou muito fraca, muito perturbado e fracturado, com bastantes superfícies de descontinuidades, bastante estriado e com superfícies muito afectadas pelo tempo, podendo estar preenchido por fragmentos granulares ou por argila mole. Durante a obra, no entanto, encontraram-se valores na ordem dos 56 a 58 pontos de GSI. Encontrou-se um maciço geralmente de boa qualidade, com algumas superfícies de descontinuidades mas apresentando blocos maciços interligados, com um aspecto bruto ou áspero, em que as superfícies estavam coradas a cor de ferro e pouco alteradas pelo tempo. Ao contrário da previsão, foi determinado um coeficiente de variação de 4,5%, substancialmente inferior ao valor da previsão. Um coeficiente de variação desta ordem indica que os valores encontrados estão praticamente muito próximos do valor médio, não havendo grande variabilidade nas condições do maciço rochoso ao longo desta zona. É, portanto, uma zona em que o maciço é boa qualidade, apresentando características geológicas e geotécnicas bastante homogéneas ao longo desta extensão do túnel.

Na Zona 2, Fig. 54, previa-se um maciço com qualidade entre o muito fraco e o razoável, com muitas descontinuidades e muito fracturado, podendo apresentar-se entre o moderadamente ou muito alterado pelo tempo, com preenchimentos de fragmentos granulares ou argila mole. A generalidade dos valores previstos do GSI rondaria os 8 e os 30 pontos GSI. Esta previsão apresentava uma grande variabilidade, superior a 50%, onde o tipo de maciço a encontrar seria uma grande incógnita pois esta ordem de variabilidade indica uma grande heterogeneidade do maciço, podendo ser encontradas zonas fracas, zonas melhores, em que as maiores dificuldades estariam ao nível da escavação e da colocação de suporte, pois face a fracas condições, é necessário uma colocação de suporte mais rápida e em extensões menores. No entanto, ao realizar a escavação, encontraram-se valores do GSI entre os 50 e os 60. Estes valores indicam um maciço de boa qualidade, com algumas superfícies de descontinuidades mas formado por blocos rochosos, com um aspecto áspero ou bruto e pouco alterado

pelo tempo. Encontrou-se também uma variabilidade na ordem dos 6% o que indica, mais uma vez, uma grande homogeneidade nas características do maciço, sendo este facto uma mais-valia para o decorrer da escavação.

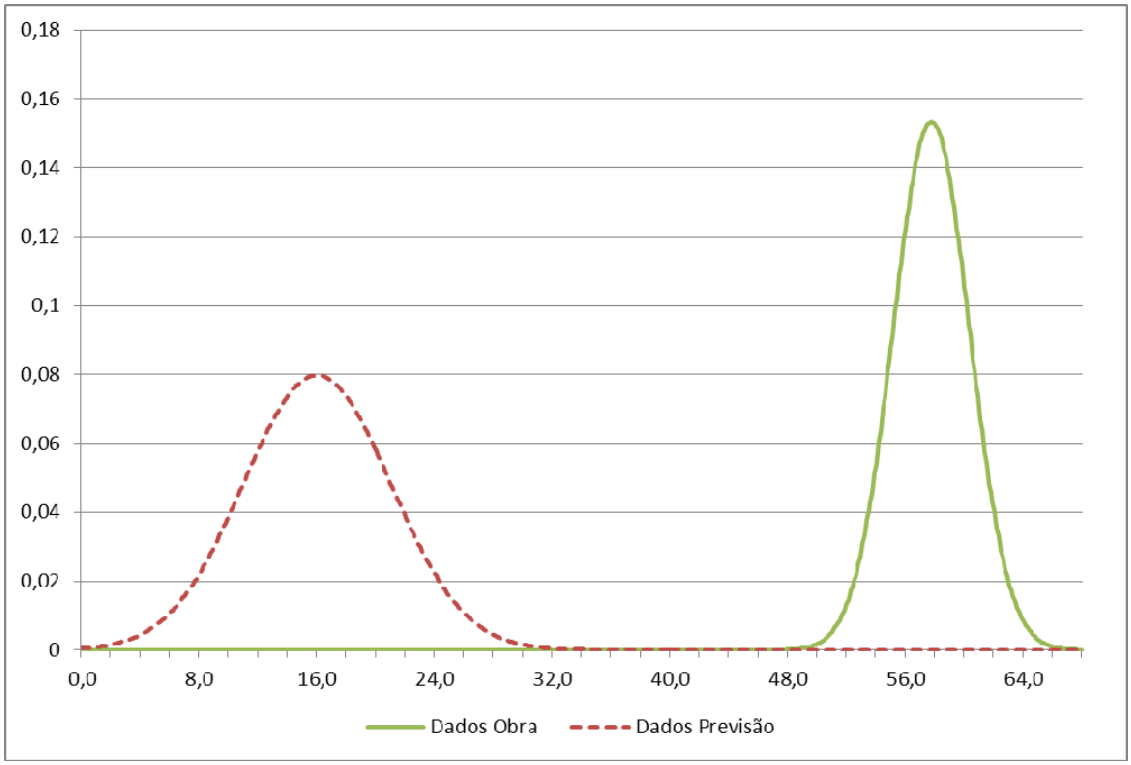


Fig. 53 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 1

Relativamente à zona 3, Fig. 55, encontramos uma ligeira intersecção das curvas, no entanto, ainda com valores bastante diferentes, sendo a previsão na ordem dos 17 pontos GSI e a obra com um valor na ordem dos 54 pontos. A previsão apresentou uma dispersão considerável, na ordem dos 60% (a maior de todas), encontrando em obra uma variabilidade de 11%. Ou seja, previa-se um maciço com muito má qualidade, fortemente partido com uma mistura ou fragmentos de rochas granulares e arredondadas ou até mesmo argila mole, muito afectado pelo tempo. Esta previsão também apresentava uma grande heterogeneidade prevista no maciço. Na realidade, encontramos um GSI superior, com um maciço de boa qualidade, com algumas descontinuidades mas apenas parcialmente perturbado, com aspecto áspero e pouco afectado pelo tempo. O maciço encontrado registou um baixo coeficiente de variação, o que indica uma homogeneidade considerável, significando que a maior parte da escavação nesta zona encontrou um maciço semelhante entre si, apresentando as mesmas dificuldades e facilidades ao longo da escavação.

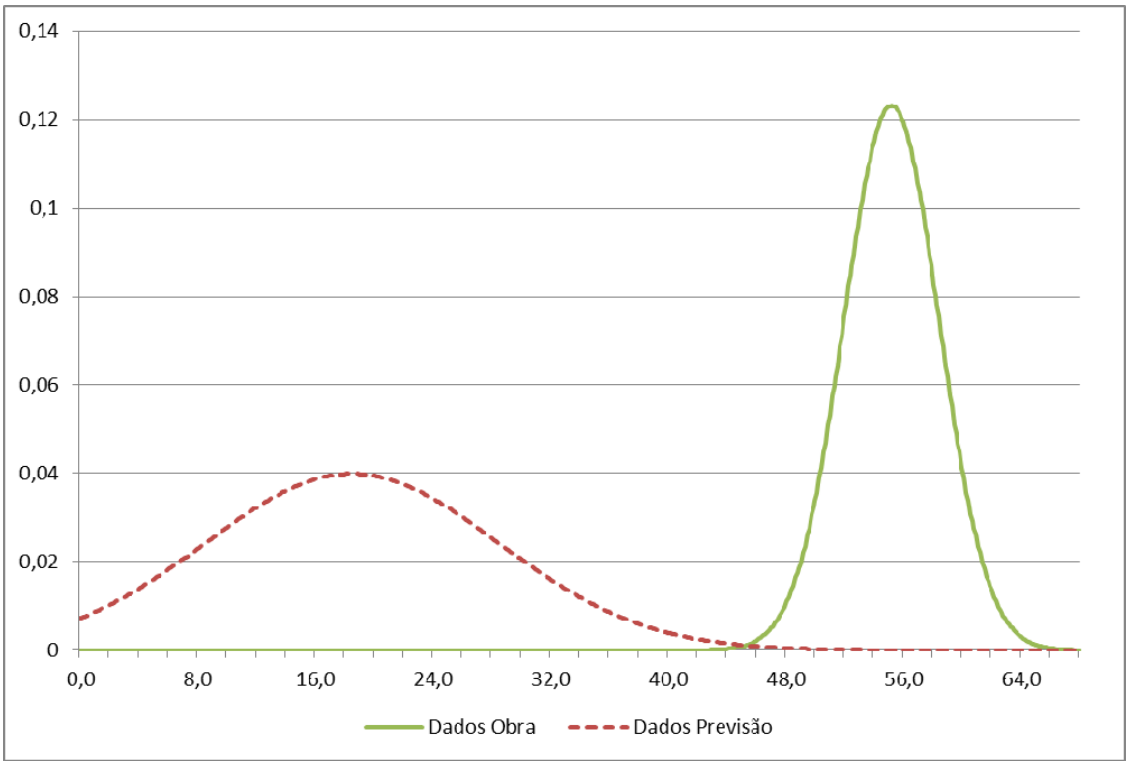


Fig. 54 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 2

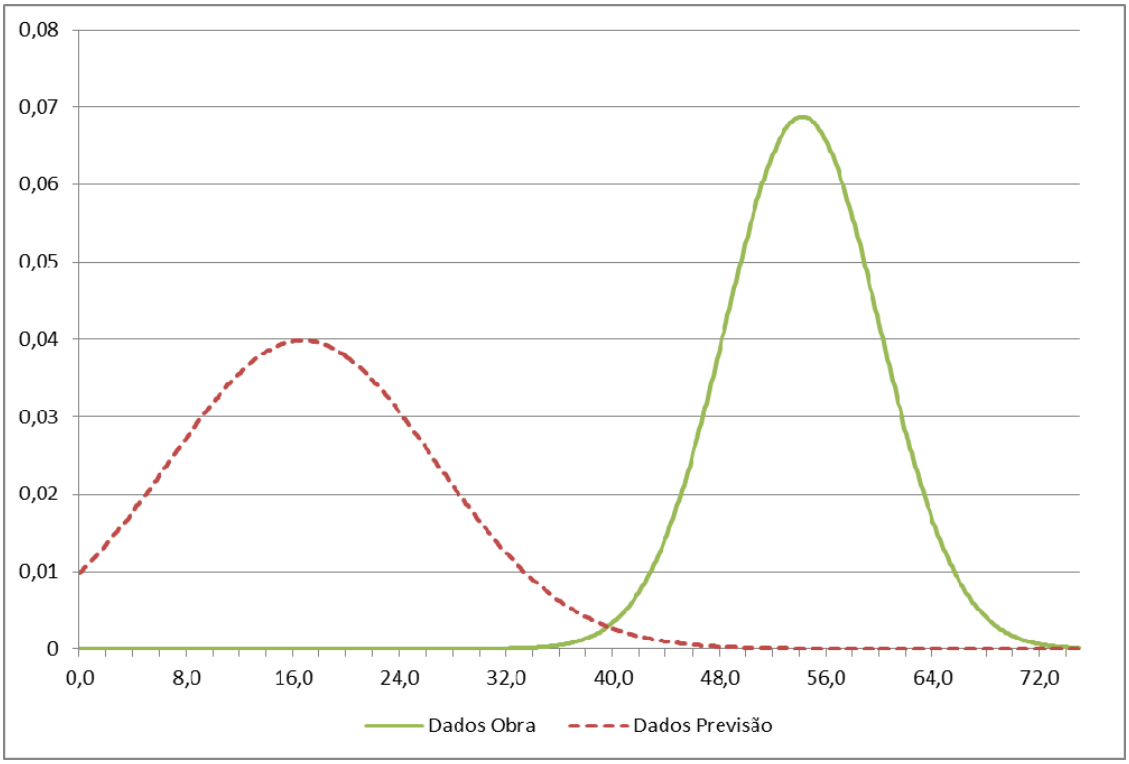


Fig. 55 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 3

Na zona 4, Fig. 56, previa-se um GSI na ordem dos 28, com uma variação de cerca de 36%, maciço de fraca qualidade, podendo atingir uma qualidade muito má ou até mesmo uma razoável, devido à sua variação ainda elevada, apresentando uma heterogeneidade considerável. Esta variação podia ir de valores nulos até aos 48 (qualidade razoável). Em obra, durante a escavação, foram medidos GSI médios na ordem dos 67 pontos, indicando um maciço de qualidade boa a muito boa, com poucas superfícies de descontinuidades, apresentando blocos rochosos cúbicos ou multifacetados angularmente com poucas superfícies de descontinuidades. Este registo apresentou um coeficiente de variação de cerca de 16%, o que indica que a maior parte dos valores encontrados ficaram próximos do valor médio, indicando mais uma vez uma homogeneidade regular no maciço rochoso.

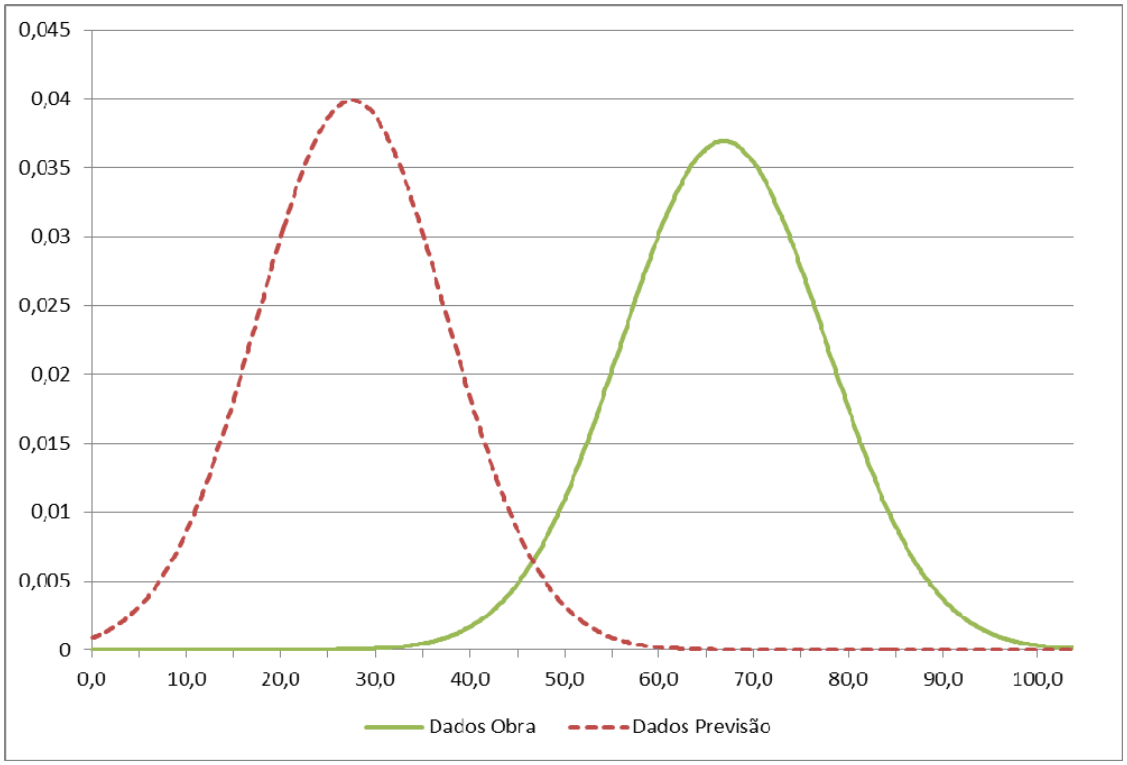


Fig. 56 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 4

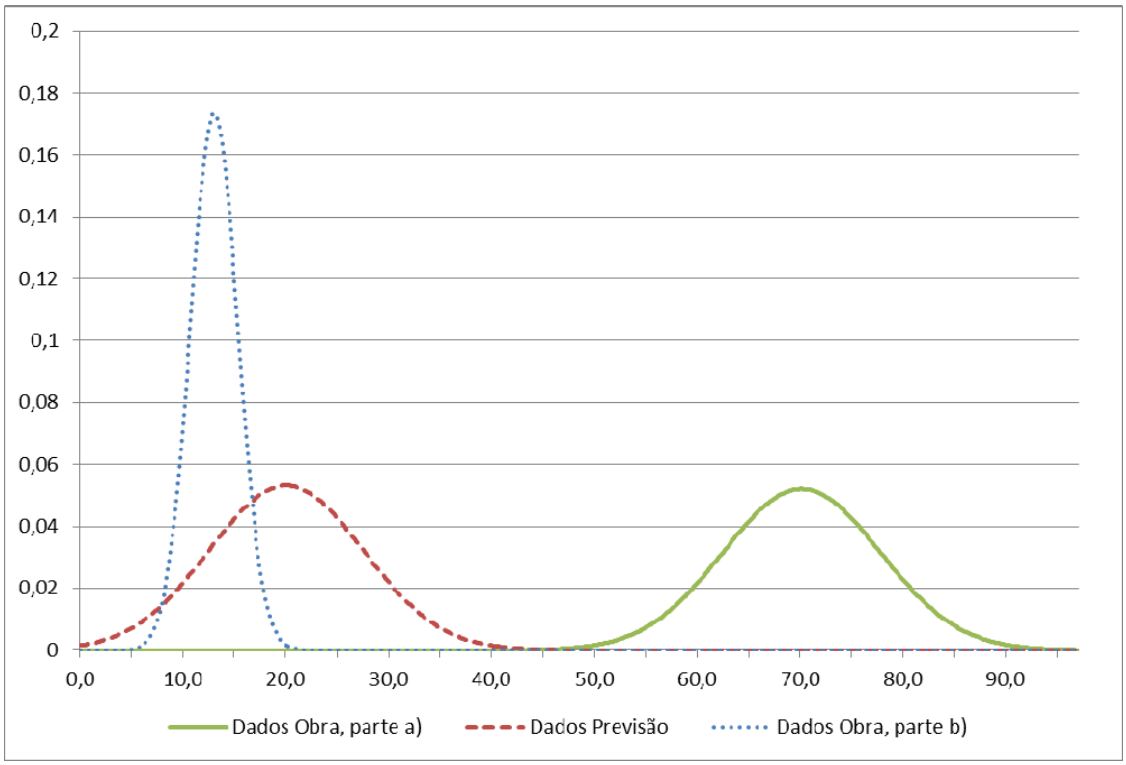


Fig. 57 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 5

Na zona 5, que é uma zona particular como indicado no capítulo anterior, temos três representações na Fig. 57. Em termos de previsão, previa-se um GSI na ordem de 20 pontos, apresentando um maciço de qualidade má a muito má, fortemente partido com mistura de fragmentos granulares e arredondados, com muitas superfícies de intersecção e de descontinuidades, muito afectado pelo tempo e podendo ter preenchimentos de argila mole. Ainda durante a previsão, previa-se uma variabilidade de cerca de 38%, podendo oscilar entre os 0 e os 50 pontos de GSI. Durante a realização da obra, encontramos duas subzonas bem definidas e distintas. Uma com um valor médio do GSI de 70 pontos, indicando um maciço de qualidade muito boa ou boa, apresentando poucas superfícies de descontinuidades, com um maciço intacto e muito bem interligado, formado por blocos cúbicos com poucas descontinuidades, com uma variabilidade na ordem dos 10%, ou seja, é uma parte do maciço bastante homogénea, com características de resistência e geológicas muito semelhantes. A outra zona, apresenta um maciço rochoso com um GSI médio de 13 pontos, sendo um maciço de muito má qualidade, inferior ao previsto, fortemente partido com uma mistura de fragmentos granulares e arredondados. Esta segunda zona apresenta uma variabilidade na ordem dos 18%, sendo relativamente homogénea, com uma variação entre os 50 e os 90 pontos GSI, ou seja, entre uma zona de qualidade boa a muito boa, com poucas descontinuidades e maciço relativamente intacto.

Segue-se a zona 6, Fig. 58, com uma grande variabilidade, superior a 45%, oscilando entre valores do GSI de 0 a 25, com uma média de 11 pontos. A previsão apresenta um maciço de muito má qualidade, bastante partido com misturas de fragmentos granulares e arredondados. Durante a obra, registou-se um GSI médio muito semelhante, na ordem dos 13 pontos, portanto, um maciço de muito má qualidade. Encontrou-se, no entanto, uma variabilidade muito mais reduzida, na ordem dos 18%, indicando uma maior homogeneidade do que a prevista.

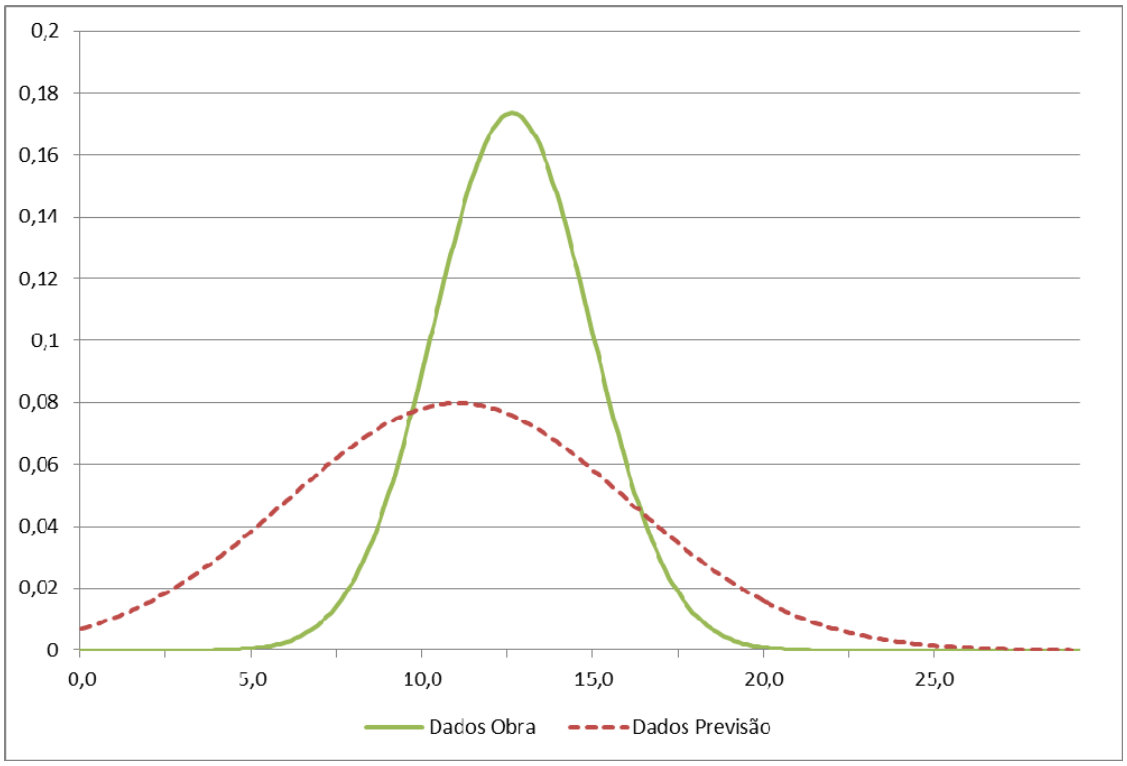


Fig. 58 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 6

Ao chegarmos à zona 7, Fig. 59, encontramos uma previsão semelhante à medição efectuada em obra. Em previsão, foi calculado um GSI médio de 11,5 com uma variabilidade de 43%, apresentando assim uma previsão de um maciço de qualidade muito má, bastante partido e com mistura de fragmentos granulares e arredondados, muito estriados e fortemente afectados pelo tempo, podendo conter argila mole. Durante a obra, foi encontrado um GSI médio de 16 pontos, com um coeficiente de variação de 32%. Ou seja, encontrou-se um maciço semelhante ao previsto, com um maciço pouco mais homogéneo do que o esperado.

Na zona 8, Fig. 60, encontramos a primeira zona onde os valores medidos em obra foram inferiores ao previsto. Tínhamos uma previsão do GSI médio na ordem dos 35 pontos GSI, com um coeficiente de variação de 21%, com valores a oscilar entre os 11 e os 56 pontos. Previa-se um maciço de qualidade má a razoável, apresentando várias superfícies de descontinuidades que formavam vários blocos de rocha, moderadamente alterado e afectado pelo tempo. Em obra, encontramos um coeficiente de variação da mesma ordem de grandeza, mas apresentando um valor médio do GSI de 24, cerca de 10 pontos abaixo do previsto, sendo o maciço de qualidade má a muito má, formado por muitas superfícies de descontinuidades, encontrando muitos fragmentos granulares e arredondados.

Na zona 9, Fig. 61, a previsão não foi muito diferente daquilo que foi encontrado em obra. Foi previsto um valor de GSI de 21 pontos, com uma variação entre zero e 45 pontos, apresentando um coeficiente de variação de 35%. Seria um maciço de qualidade variável entre a muito má e a razoável, prevendo-se assim uma grande heterogeneidade no maciço. Em obra, encontrou-se um GSI médio de 24, dentro do previsto, no entanto a sua variação foi mais ampla do que o esperado. Apresentando um coeficiente de variação de 43%, o maciço mostrou-se mais heterogéneo do que o esperado. Apresentando uma qualidade que variou entre a muito má e a boa, esta é uma das zonas em que é necessário ter bastante cuidado em fase de obra, porque as porções de rocha muito má são óptimas para a escavação dado que esta é feita de forma mais rápida e com menos dificuldade, mas em contrapartida implica maiores

cuidados de segurança e uma aplicação mais rápida e pormenorizada da estrutura de suporte. Nas porções de melhor qualidade, surgem mais dificuldades e mais desperdício de tempo na escavação devido à qualidade do maciço, mas em troca é possível ter mais descanso quanto à celeridade e preocupação com a aplicação do suporte da escavação.

Nas zonas 10 e 11, Figs. 62 e 63, respectivamente, foram encontrados exemplos da extensão mais perfeita em termos de previsão versus realidade. Nas duas zonas, os valores medidos em obra e os valores de previsão praticamente se sobrepuseram, como podemos ver nas figuras que os representam. Na zona 10, previu-se um maciço com uma qualidade média entre a má e a razoável, podendo ter oscilações entre a muito má e a boa, prevendo geralmente um maciço formado por algumas superfícies de descontinuidades, encontrando dobras no maciço ou superfícies com falhas. Previu-se um coeficiente de variabilidade de 20% e foi esse o valor encontrado em fase de escavação. Tal como o previsto, encontrou-se um GSI médio de 37 – 38 pontos, com as características e qualidade esperadas no maciço. Na zona 11, a situação foi em todo semelhante, apenas difere no valor do GSI, que é ligeiramente superior à zona 10, apresentando uma média de 44 pontos, com uma variação de 17 a 18%. Foi uma zona em que a medição em obra esteve de acordo com a previsão. Zona de qualidade entre a má e a boa, apresentando um maciço formado por muitos blocos rochosos, com superfícies multifacetadas angularmente, formados pela intersecção de varias superfícies de descontinuidades.

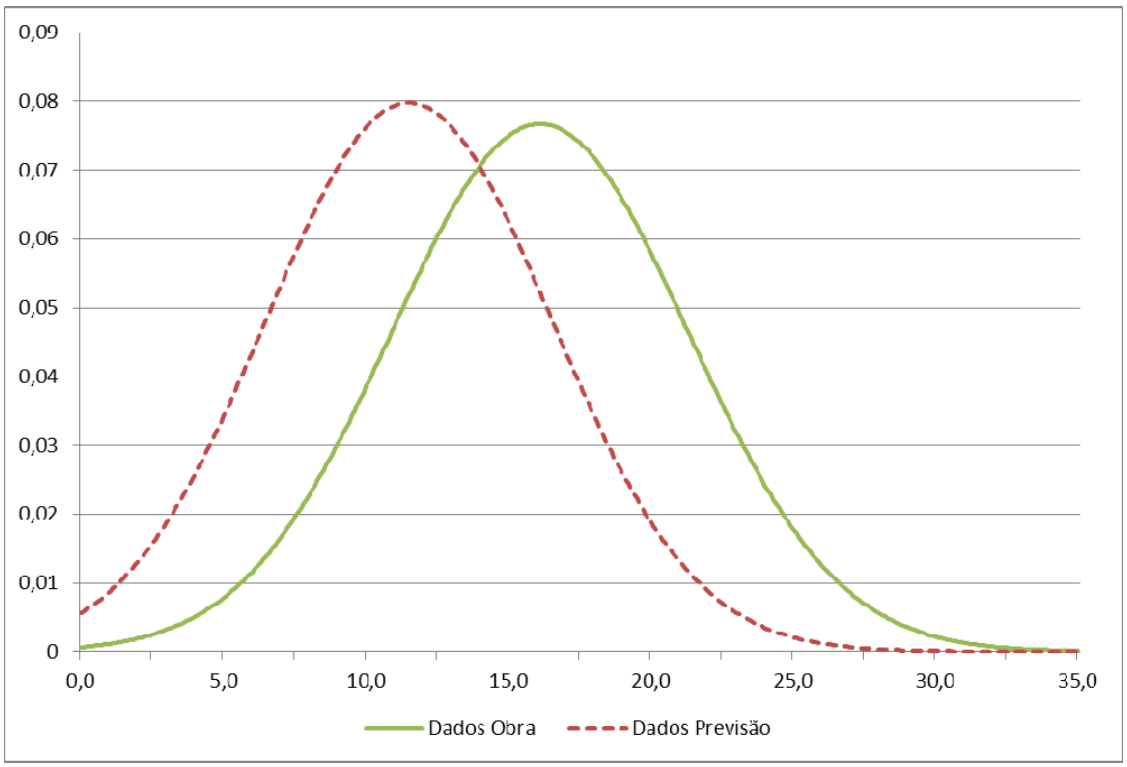


Fig. 59 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 7

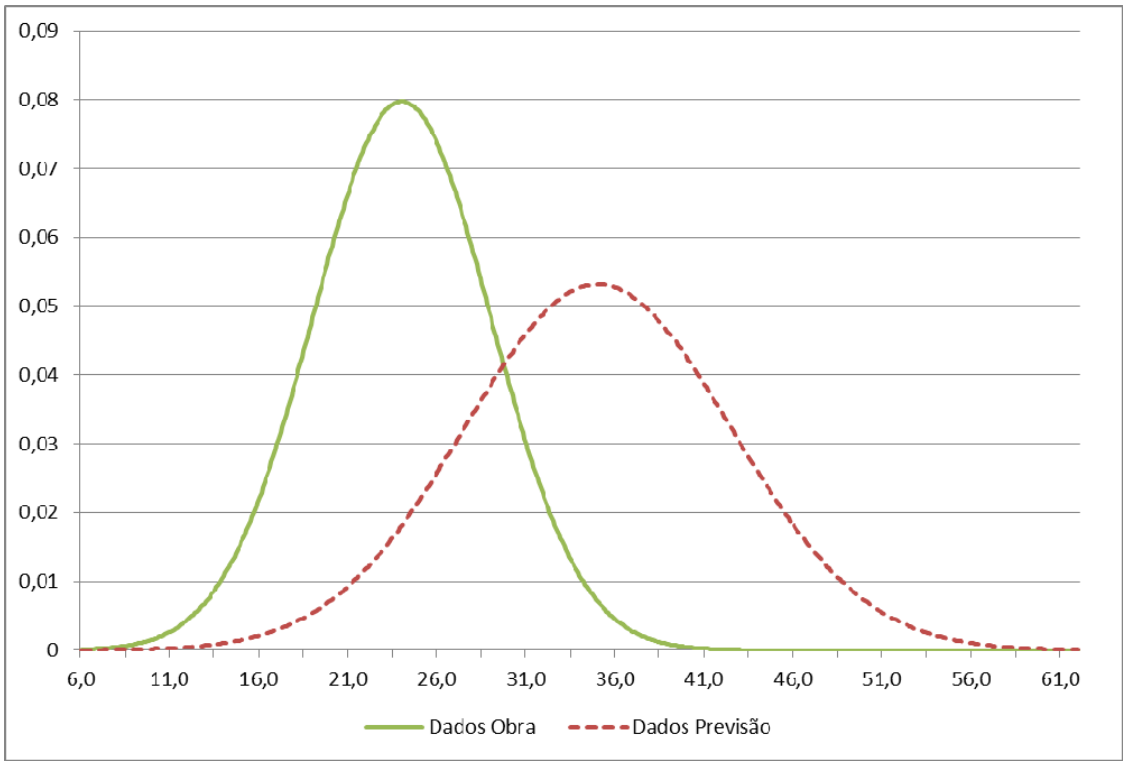


Fig. 60 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 8

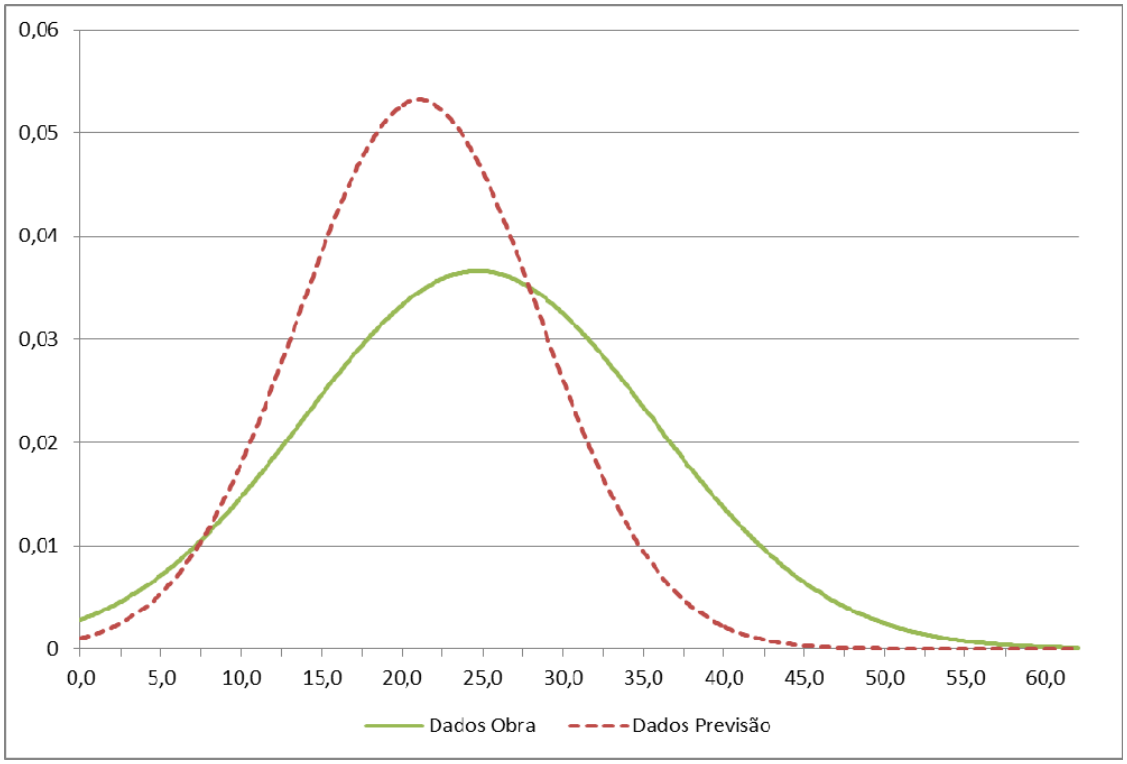


Fig. 61 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 9

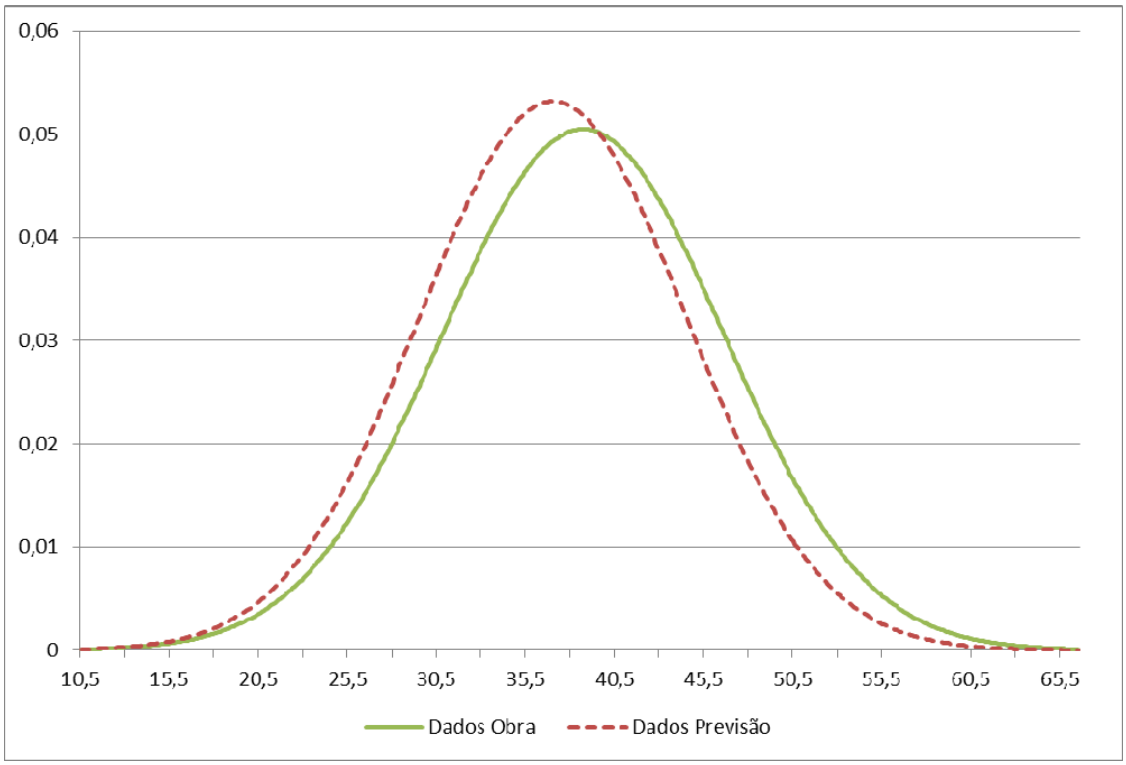


Fig. 62 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 10

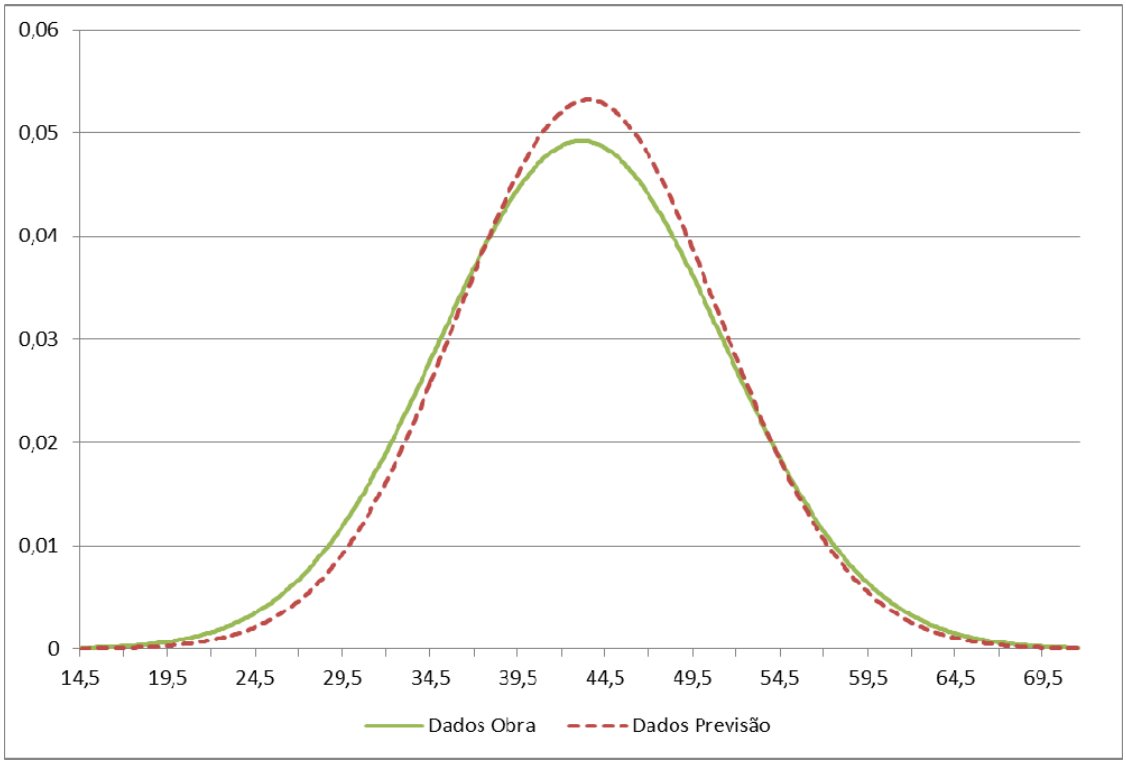


Fig. 63 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 11

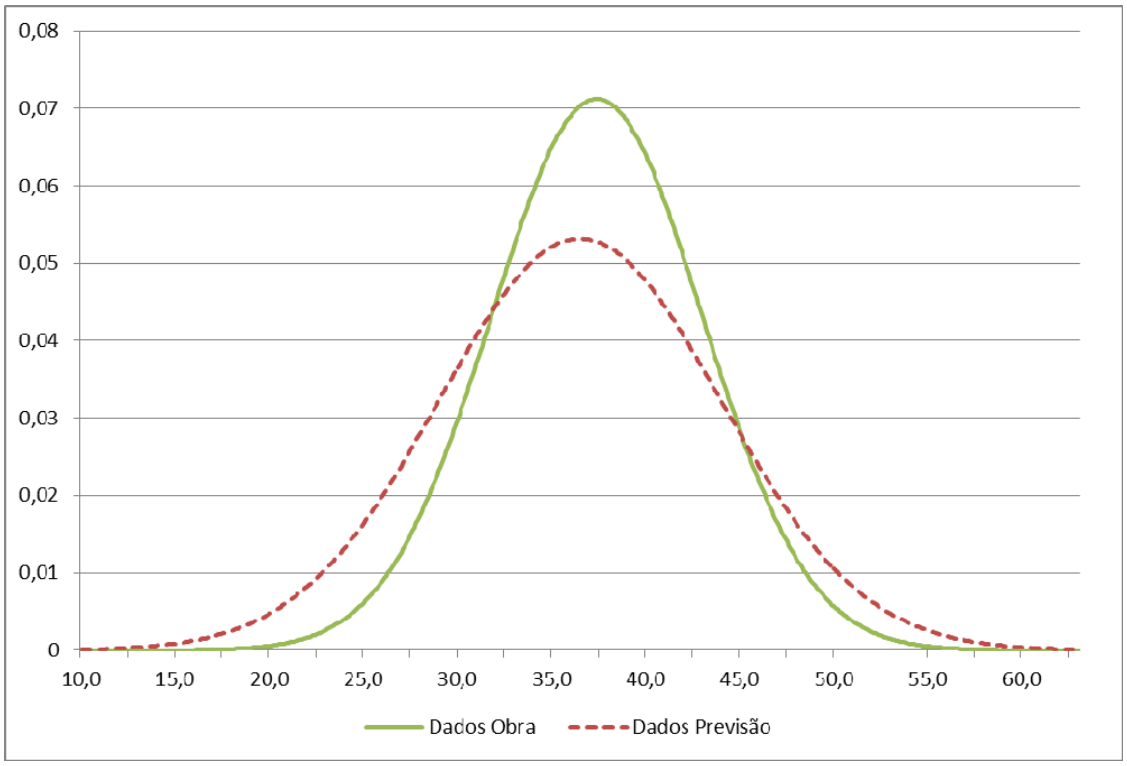


Fig. 64 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 12

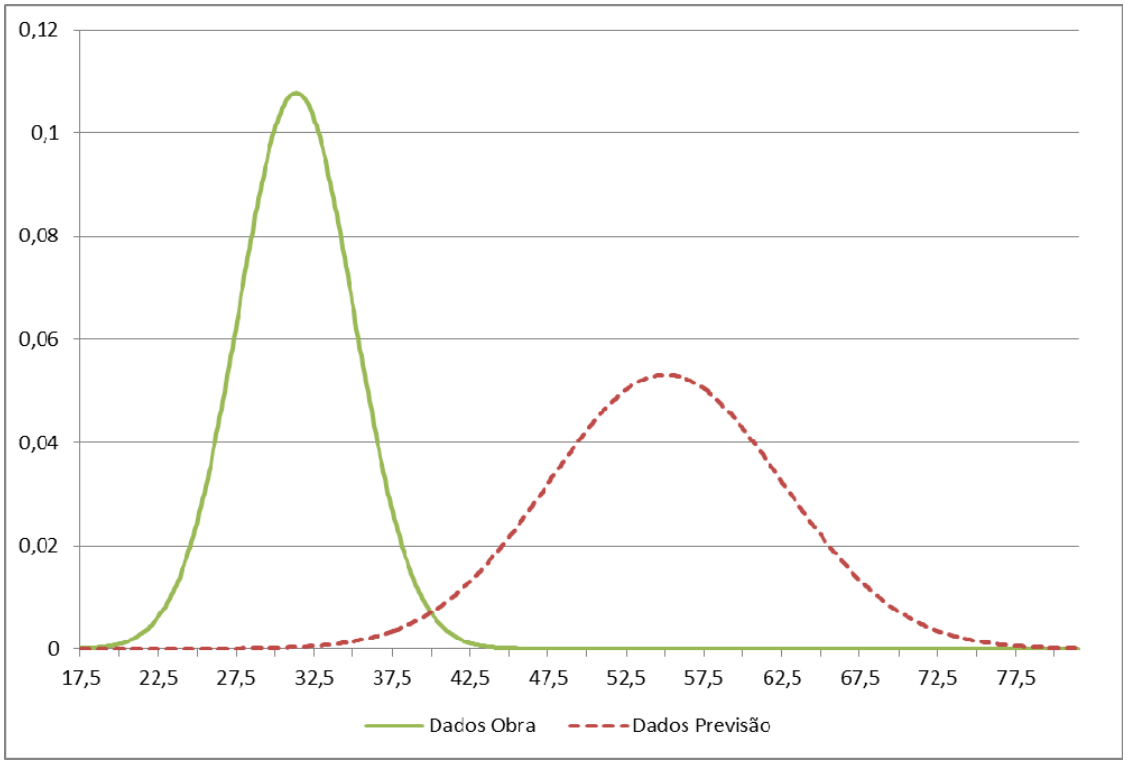


Fig. 65 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 13

Ainda semelhante às duas zonas descritas anteriormente, encontramos a zona 12, Fig. 64. Esta é uma zona em que a previsão apontava para um valor médio do GSI na ordem dos 37 pontos e foi esse o valor encontrado em obra. A diferença que se aponta entre a previsão e o medido em obra será ao nível da sua dispersão ou variabilidade. Previa-se um GSI com uma variabilidade de cerca de 20%, podendo oscilar entre os 15 e os 60 pontos, e encontrou-se um maciço um pouco mais homogéneo, com uma variabilidade de 15%, oscilando entre os 20 e os 55 pontos GSI. Não é uma diferença muito substancial, daí enquadrar na semelhança com as zonas 10 e 11. É um maciço de qualidade má a boa, ligeiramente perturbado, com vários blocos rochosos formados pela intersecção com algumas superfícies de descontinuidades.

Ao analisarmos estas zonas, encontramos nas primeiras zonas uma grande diferença entre o previsto e o encontrado em obra. Do ponto de vista da segurança, a qualidade e características encontradas foram superiores ao previsto o que é sempre um ponto positivo. Em termos de método de escavação ou desmonte da rocha, pode trazer imprevistos pois a sua escavação é mais lenta e com recurso a métodos mais exigentes, mas também traz mais-valias para a contenção das faces de escavação.

No entanto, após as zonas anteriormente descritas, encontramos as zonas 13 e 14, Figs. 65 e 66, respectivamente, em que aconteceu o oposto. O maciço encontrado foi substancialmente inferior em todos os aspectos face ao previsto. Na zona 13, previu-se um maciço de qualidade razoável, formado por algumas superfícies de descontinuidades e por blocos rochosos, com um GSI médio de 55, prevendo-se uma variabilidade na ordem dos 14%. Durante a escavação, foi encontrado um maciço de qualidade inferior, qualidade má, apresentando um GSI médio de 37 pontos com uma variação semelhante à prevista, 12%. É um maciço bastante alterado, mais pobre, mais partido e com mais superfícies de descontinuidades. Na zona 14, esta diferença foi ainda ligeiramente mais acentuada. Previa-se um maciço com GSI de 42,5 pontos e foi encontrado um GSI de menos de metade, 18,4 pontos. Apesar de termos duas situações com um coeficiente de variação semelhantes, entre os 20 e os 23%, a qualidade e características dos mesmos são bastante diferentes. Enquanto a previsão apontava uma qualidade razoável, com um maciço formado pela intersecção de algumas superfícies de descontinuidades, com algumas falhas, apenas moderadamente alterado e afectado pelo tempo, foi encontrado um maciço de qualidade muito má, sendo pobremente interligado e fortemente partido, com pedaços de rochas angulares e arredondadas, apresentando superfícies muito afectadas pelo tempo e com preenchimentos de argila mole.

Estas diferenças trazem contrapartidas para a colocação da estrutura de suporte. São zonas mais fracas, em que a escavação tem que ser mais lenta e a colocação do suporte mais pormenorizada, pois está em risco a segurança.

Tal como indicado anteriormente, a zona 15, Fig. 67, tem a particularidade de ter sido possível identificar duas subzonas bastante distintas e bem definidas. Dessa forma, ao apresentar a comparação entre o previsto e o encontrado, apresentam-se essas duas subdivisões. Em fase de previsão, estimou-se um maciço com GSI médio de 58 pontos, com um coeficiente de variação na ordem dos 8%, ou seja, previa-se um maciço consideravelmente homogéneo. Seria um maciço de boa qualidade, com muitos blocos mas formado por apenas algumas superfícies de descontinuidades, com um aspecto bruto e áspero, em que as suas superfícies estariam coradas com cor a ferro e o maciço pouco afectado pelo tempo. Ao realizar a escavação, encontramos uma primeira subzona substancialmente mais fraca, com um GSI médio de 19 pontos e com uma variabilidade na ordem dos 18%, o que indicou alguma heterogeneidade na subzona. Encontrou-se um maciço de qualidade muito má, muito partido e com muitas superfícies de descontinuidades, formado também por muitos pedaços de rocha angular ou arredondada, muito afectado pelo tempo e com preenchimentos de argila mole. Em seguida, encontramos a segunda subzona, com características iguais ao previsto, ou seja, mesmo valor do GSI,

mesmo coeficiente de variação, mesma qualidade e características geotécnicas e geológicas. Nesta segunda subzona, a previsão que tinha sido efectuada pode ser considerada praticamente perfeita.

Por último, temos a zona 16, Fig. 68, em que se repete o mesmo tipo de previsão e medição encontrado nas primeiras zonas descritas. Encontramos uma zona com a medição em obra superior ao previsto, indicando uma melhor qualidade e consistência, com um muito menor coeficiente de variação, indicando uma maior homogeneidade do maciço. Previu-se uma zona com um GSI médio de 26 pontos, sendo um maciço de má qualidade, com várias superfícies de descontinuidades e com bastantes fragmentos angulares, muito afectado pelo tempo e com as superfícies muito estriadas. A previsão indicou uma heterogeneidade considerável, quase nos 40%. Na obra, encontramos um maciço de qualidade razoável a boa, com um GSI médio de 50, apresentando uma variabilidade muito mais reduzida, na ordem dos 15%. Mostrou ser um maciço com muitos blocos multifacetados angularmente, formados pela intersecção de algumas superfícies de descontinuidades, com aspecto entre o áspero e o liso, moderadamente alterado e afectado pelo tempo.

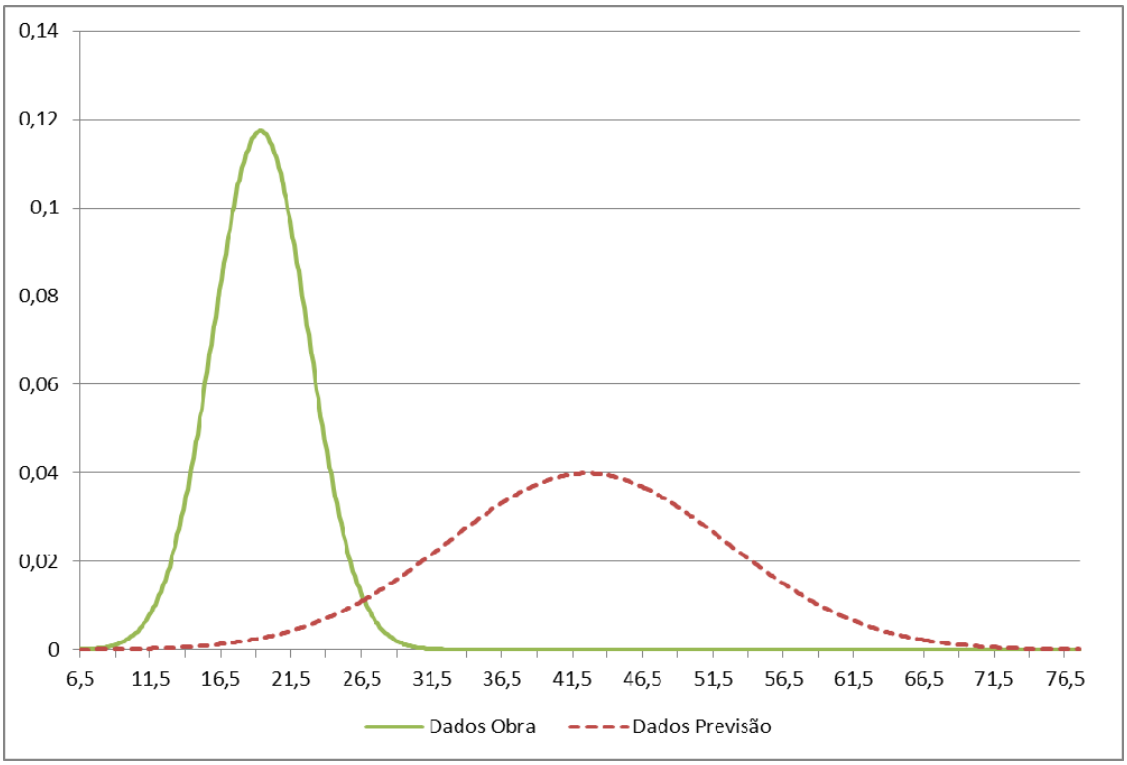


Fig. 66 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 14

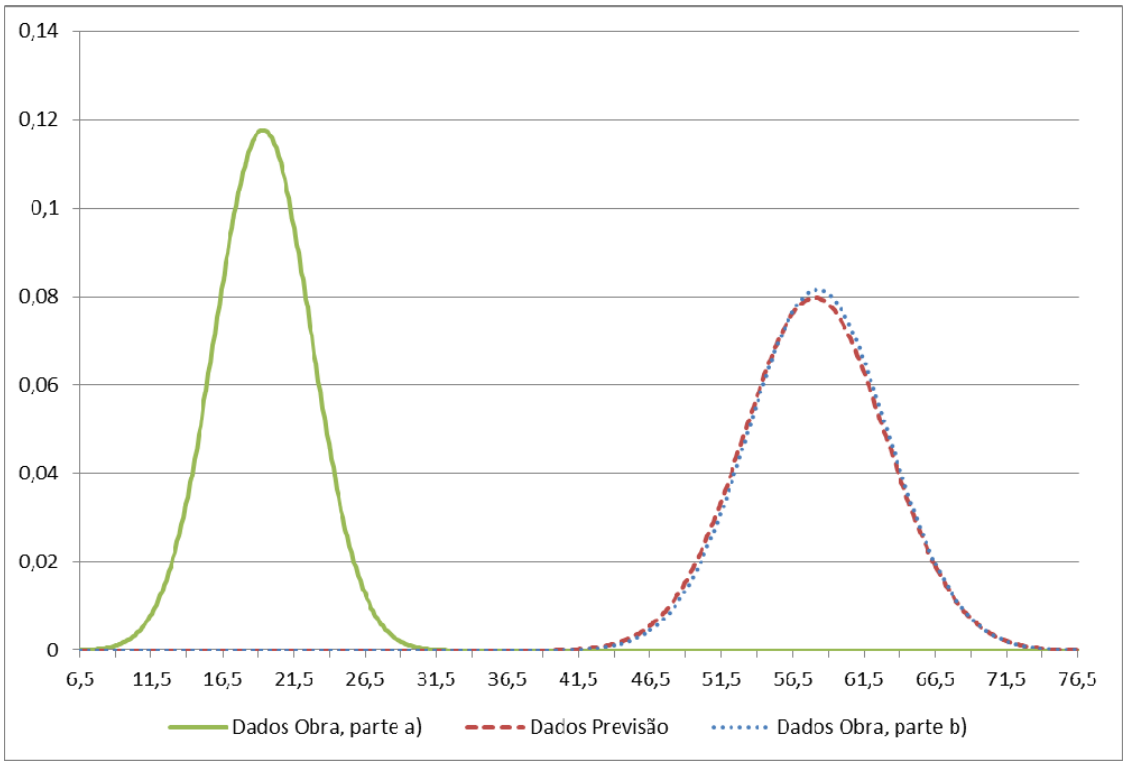


Fig. 67 –GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 15

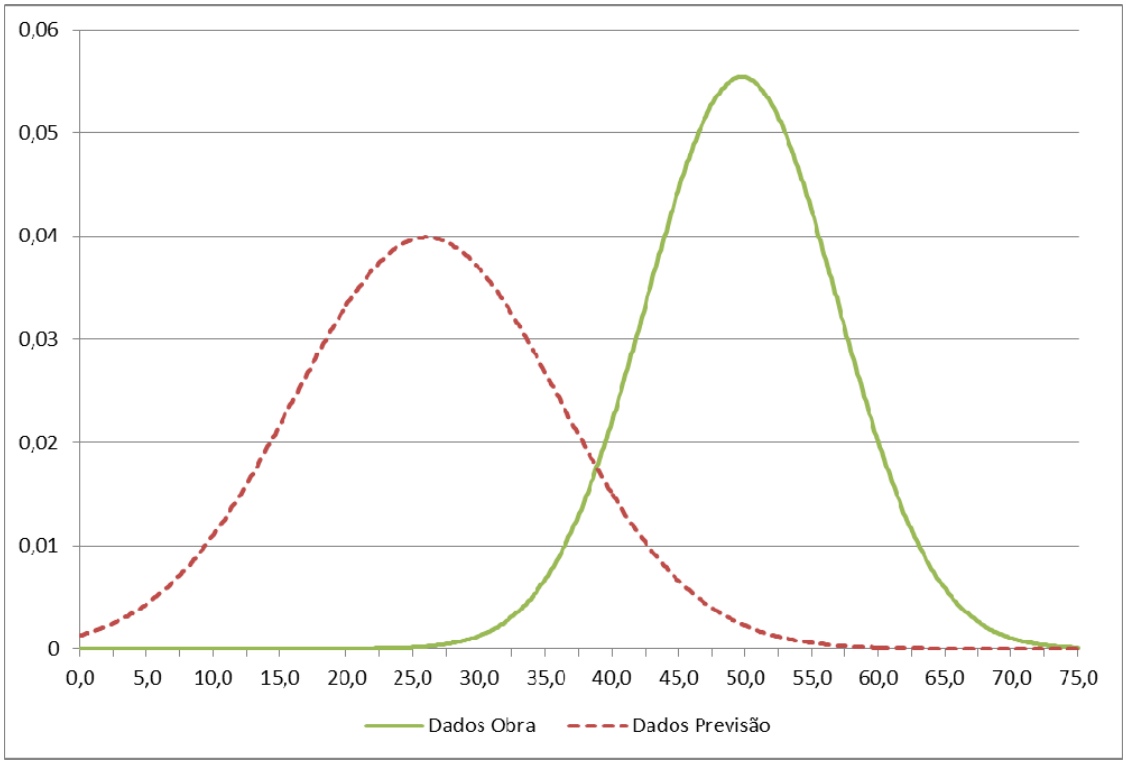


Fig. 68 – GSI Previsto e GSI Medido em Obra na Zona 16

5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisarmos a variabilidade geral dos valores do GSI previsto e do encontrado, ao longo da obra, verificamos que os valores de previsão apresentavam quase sempre uma variabilidade superior ou muito superior em relação à encontrada.

Entre a zona 1 e a zona 7, km 26+117 a km 26+401, em que temos um maciço xistento, a variabilidade prevista foi muito substancial, acima dos 30%, tendo numa zona ultrapassado os 60%, o que indica que prevíamos um maciço bastante heterogéneo, onde encontraríamos características de resistência e qualidade muito variadas. Na realidade encontrámos um maciço com uma variabilidade geralmente abaixo dos 15%, conferindo-lhe uma homogeneidade mais consistente e estável, óptima em termos de trabalhos de obra. Estávamos neste ponto na zona de maciço rochoso xistento e na zona de contacto.

Ao avançar para a zona de maciço rochoso granítico, foi onde as previsões e as medições se aproximaram mais, apresentando variabilidades muito semelhantes, entre o km 26+401 e o km 26+851, em que a variabilidade rondou os 20%, indicando uma pequena homogeneidade. Foi também nas zonas compreendidas entre estes quilómetros, zonas 7 a 14, que encontramos aumentos de variabilidade em obra face ao previsto. Ao chegar à extremidade do túnel, repetiu-se a situação da outra extremidade, em que a variabilidade prevista era alta mas foi registada uma variabilidade bastante inferior.

Estas variabilidades que foram calculadas ao longo deste estudo estatístico, apesar de estarmos a traduzir para números ou percentagens o que aconteceu ao longo da obra, desde a previsão à concepção, servem para analisarmos de que forma poderemos utilizar este método e de que forma pode ser credível. Uma vez que os maciços e as suas condições e características são sempre incógnitas que vamos descobrindo, numa primeira fase através de trabalhos de recolha de informação e realização de ensaios e sondagens, é na fase de obra / escavação que realmente se tem contacto com as verdadeiras características e condições dos mesmos, pois em previsão não temos como visualizar todo o universo rochoso que vai ser objecto do projecto.

Os valores do GSI são obtidos e determinados da forma que já foi descrita neste trabalho, no entanto, é a partir desse valor que, em conjunto com os ensaios realizados em laboratório, são determinados os parâmetros e elementos que servem de base ao projecto estrutural do túnel. Quanto maior for a variabilidade do valor Índice de Resistência Geológica, maior cuidado ou precaução é necessário ter no projecto estrutural, pois apesar de termos um valor médio de previsão, que indica determinadas características, uma variabilidade alta indica que tanto podemos encontrar essas características como outras melhores ou piores.

Desta forma, qualquer projecto de obra subterrânea não pode ser encarado como um projecto fixo que tem que ser cumprido escrupulosamente, mas sim como um projecto em constante actualização e adaptação, muito devido a esta variabilidade e à incógnita que são os maciços rochosos em toda a sua extensão.

Nesta obra, e de acordo com os dados analisados e aqui expostos, este facto não pôde ser excepção, tanto porque encontramos zonas com valores do GSI bastante distintos, positiva ou negativamente, bem como variabilidades ligeiramente distintas. Prevermos variabilidades altas e encontrarmos variabilidades substancialmente mais reduzidas é um ponto bastante positivo para a realização da obra, que permite resultados e trabalhos mais vantajosos, constantes e eficazes. Um GSI muito elevado indica características boas para o maciço, tanto em termos de resistência como de consistência, sendo portanto um maciço de melhor contenção, onde não será necessário uma maior urgência na colocação de suporte estrutural primário e, também, não será necessário um suporte definitivo ou secundário tão

forte ou resistente, uma vez que o maciço desempenhará essas mesmas funções. No entanto, traz outras dificuldades à obra, como ser mais difícil a escavação ou o desmonte de rocha, uma vez que é mais dura e resistente, sendo frequentemente utilizado o recurso a explosivos, tal como aconteceu na estudada.

Por outro lado, com valores do GSI baixos, o maciço é mais fraco e degradado, sendo a sua escavação mais fácil e mais rápida, mas sendo necessária um maior faseamento de colocação de suporte primário para estabilização da escavação, bem como a colocação de um suporte definitivo ou secundário mais resistente, capaz de contrabalançar as deficiências do maciço, comparativamente ao maciço de elevado GSI.

Perante estas situações, não importa só analisar em termos de trabalhabilidade, resistência e segurança, mas também as implicações a nível financeiro e custos de obra que tal diversidade e variabilidade podem trazer. Como em qualquer obra, é sempre efectuado um estudo económico a partir da previsão, indicando os custos faseados da obra e, em função da natureza do maciço e das condições que lhe são previstas, é efectuado um orçamento de obra. Sendo este tipo de obras de natureza pública, um bom projecto e uma boa realização de obra são aqueles que não trazem derrapagens financeiras e emque os gastos necessários estejam de acordo com o estudo económico.

Um maciço rochoso de óptima qualidade traz vantagens a nível de estrutura de suporte, pois não é necessário uma estrutura muito resistente dado que o maciço também desempenha esse papel. Este é um ponto em que o investimento no suporte é menor mas, em contrapartida, os meios para a escavação e desmonte têm que ser de melhor qualidade, com instrumentos mais fortes ou com explosivos e dispêndio de mais tempo. Obviamente que este factor também traz custos, tanto em equipamento como no tempo. Por oposição, maciços fracos escavam-se melhor, com instrumentos mais simples e em menos tempo, o que é mais rentável, mas necessita de estrutura de suporte muito mais resistente, o que implica maiores custos na estrutura.

Como para esta definição inicial de custo de obra e orçamento os dados que estão disponíveis são os que saíram da previsão, é de todo importante que o que seja encontrado não traga grandes diferenças, daí a variabilidade prevista ser geralmente superior, por razões óbvias de segurança, tanto segurança humana como financeira.

Ao longo desta obra, tal como já foi indicado, encontramos coeficientes de variação, em quase toda a sua extensão, iguais ou bem mais reduzidos do que os previstos. Em termos de execução de obra e de projecto, a variabilidade ser semelhante ou mesmo mais reduzida é óptimo, pois não somos surpreendidos por situações que não esperávamos e temos uma maior homogeneidade no maciço. Esta indica-nos que o material que vai ser escavado tem características semelhantes, então, encontramos sempre a mesma dureza ou dificuldade, mas também a mesma capacidade de resistência do maciço. Quanto maior a homogeneidade, menor será a amplitude de trabalhos e características de estruturas a construir, será um trabalho mais semelhante e menos diversificado estruturalmente, permitindo contenção de custos e de meios.

Em termos de diferença dos valores do GSI encontrados face aos previstos encontramos apenas 3 a 4 zonas em que estava previsto um GSI mais elevado e foi encontrado um maciço mais fraco. Nas restantes 13 zonas, a previsão foi semelhante ou inferior ao encontrado, o que também é um factor positivo, uma vez que todas as previsões são efectuadas sempre pelo lado da segurança. Também neste aspecto, os elementos de cálculo do GSI para previsão são elementos a ter em conta, face aos bons resultados obtidos em obra.

6
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que este trabalho incidiu sobre o estudo estatístico do valor do Índice de Resistência Geológica, baseado numa obra realizada, para efeitos de análise de variabilidade do uso deste parâmetro no dimensionamento de túneis, pudemos nos capítulos anteriores verificar de que forma é estimado este índice, como é calculado em obra e de que forma se manifestou no Túnel de Gondomar, que foi a obra analisada.

Este trabalho permitiu aprofundar os conhecimentos em termos de elementos de classificação de maciços rochosos, através de vários métodos, que podem ser distintos ou semelhantes, podendo ser interligados entre si ou aplicados em conjunto. De facto, para uma melhor elaboração do projecto, actualmente, são utilizados vários métodos em simultâneo, para uma maior segurança face à incerteza que são os maciços rochosos. Através do melhor conhecimento do GSI e do método que lhe está subjacente, apesar de não ser o âmbito deste estudo analisar o método de dimensionamento de túneis de Hoek-Brown, mas sim analisar a variabilidade do GSI numa obra, foi possível verificar de que forma, numa obra, estes valores variam e trazem implicações.

Não podendo tirar da amostragem de apenas uma obra uma conclusão universal, é possível concluir que, em geral, os valores do GSI que são estimados para previsão, a partir dos quadros, métodos e regras que lhe estão associadas, conduzem a resultados eficazes na realização de obras subterrâneas. Neste túnel com um quilómetro, divido em 16 zonas geotécnicas, encontraram-se valores do GSI iguais ou superiores ao previsto, salvo 3 zonas. O facto de encontrar condições e características melhores do que as esperadas, contribui positivamente para uma melhor realização da obra, uma melhor garantia de segurança, e uma mais fácil adaptação de meios, projecto e custos.

Em função dos estudos que foram efectuados antes de obra, foi previsto uma determinada variabilidade do GSI, que conduziu ao projecto inicial. Ao chegar a obra obtivemos maioritariamente variabilidades menores, salvo algumas zonas em que foi praticamente semelhante. Nos casos em que os valores foram semelhantes, não houve surpresas pois esteve tudo dentro do previsto. Nos casos em que foram encontrados valores bem menores, em cerca de metade da extensão do túnel, estivemos perante maciços mais homogéneos, o que permite uma maior tranquilidade de trabalhos, no que respeita a escavação e estabilização das superfícies, de execução do projecto e uma estabilidade de custos, uma vez que estes são semelhantes aos esperados.

Assim, nesta obra, podemos dizer que todo o trabalho desenvolvido em fase de previsão e o trabalho que foi realizado face às características encontradas em obra foi manifestamente positivo, pois encontraram-se geralmente valores do GSI superiores e variabilidades menores que as previstas. Estes factores contribuem de forma favorável, tanto financeiramente, como em termos de projecto de execução.

A previsão mostra-se ligeiramente abrangente e alargada, deixando alguma margem para a incógnita que são os maciços rochosos, mas durante a obra, a previsão passa a tomar valores mais concretos, com intervalos mais estreitos e mais precisos, favoráveis.

De acordo com as informações obtidas, esta foi uma obra que correu bem, tanto do ponto de vista de trabalhos, execução, projecto, segurança e acidentes, como do ponto de vista económico-financeiro, pois as previsões e o que foi encontrado estiveram quase sempre a caminhar a par, salvo uma ou outra excepção que, onde correu mais desfavoravelmente foi compensado pelas zonas que correram de forma mais favorável.

Quanto a elementos de classificação de maciços rochosos e ao método de Hoek-Brown e GSI, seria de todo interessante fazer estes estudos e tratamentos de dados, ao longo de todos os projectos de obras subterrâneas, desde a concepção até ao início da exploração.

É através da documentação e tratamento de todas estas as informações que podem ser aperfeiçoados e implementados os métodos que, até então, não são reconhecidos como universais pela comunidade geotécnica.

Apesar das obras subterrâneas não serem em número tão elevado como as construções de casas ou obras de arte, deveriam ser melhor aproveitadas para estas investigações.

BIBLIOGRAFIA

[1] Hoek, E.; *Practical Rock Engineering*; Rocsciense; Toronto; 2007.

[2] Hoek, E.; Kaiser, P.K.; Bawden, W.F.; *Support of Underground Excavations in Hard Rock*; A. A. Balkema; Rotterdam; 1995.

[3] Hoek, E.; Brown, E.T.; *Practical Estimates of Rock Mass Strength*; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; vol.34, no.8, pp 1165-1186; 1995.

[4] Hoek, E.; *Reliability of Hoek-Brown Estimates of Rock Mass Properties and Their Impact on Design*; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; vol.35, no.1, pp 63-98; 1998.

[5] Hoek, E.; Palmieri, A.; *Geotechnical Risks on Large Civil Engineering Projects;* Keynote address for theme I – International Association of Engineering Geologists Congress; 21a 25 Setembro 1998; Vancover.

[6] Metro do Porto; GEG; Geo Consult; *Memória Descritiva e Justificativa;* 2006.

[7] Metro do Porto; *Linha Campanhã – Gondomar, Túnel entre as Estações de São João de Deus e Parque Nascente, Túnel Mineiro, Extremidades Leste e Oeste e Poço de Acesso, Ventilação e Saída de Emergência, Projecto de Execução, Relatório Geológico-Geotécnico, Volume I;* Porto; Março de 2003.

[8] Metro do Porto; *Linha Campanhã – Gondomar, Túnel entre as Estações de São João de Deus e Parque Nascente, Túnel Mineiro, Extremidades Leste e Oeste e Poço de Acesso, Ventilação e Saída de Emergência, Projecto de Execução, Relatório Geológico-Geotécnico, Volume II;* Porto; Março de 2003.

[9] Hoek, E.; *Tunnel Support in Weak Rock;* Keynote Adress, Symposium of Sedimentary Rock Engineering; Taipei, Taiwan; 20-22 de Novembro de 1998;

[10] Hoek, E.; *Support for very weak rock associated with faults and shear zones;* Distinguished lecture for the opening of the International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining; Kalgoorlie, Australia; 14-19 de Março de 1999.

[11] Hoek, E.; *Putting Numbers to Geology – an Engineer's Viewpoint;* The Second Glossop Lecture – Q. J. Engrg. Geol, 32, 1-19; 1999.

[12] Coba, Consultores de Engenharia e Ambiente; *Estudo de Impacte Ambiental – Estudo Prévio*; 2003; http://www2.apambiente.pt/IPAMB_DPP/docs/RNT960.pdf; Consultado a 1 de Maio de 2011.

[13] Coba, Consultores de Engenharia e Ambiente; *Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução – Projecto de Execução;* 2007; http://aiacirca.apambiente.pt/Public/irc/aia/aiapublico/library?l=/recape237_prolongamento/sumario_executivopdf/_PT_1.0_&a=d; Consultado a 5 de Maio de 2011.

[14] Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia; *Classificação de Maciços Rochosos;* FEUP, 2011.

[15] Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia; *Propriedades Índice e Classificação das Rochas;* FEUP, 2011.

[16] Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia; *Descontinuidades;* FEUP, 2011.

[17] Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia; *Propriedades dos Minerais e Rochas;* FEUP, 2011.

[18] Metro do Porto; *Desenvolvimento do Sistema de Metro Ligeiro do Porto;* 2008; http://www.google.pt/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.metrodoporto.pt%2FDownload.aspx%3Ffile%3DjnY2JIorH8t9um32RHbGC9M3jkyqcRbKtrETC2nm2bzSFDaQRAq09EcgH53QxpSpy8ooys5NQ%2BGfRNVl9rMB0Q%3D%3D%26name%3D2%25C2%25AA%2520e%25203%25C2%25AA%2520fases%2520da%2520rede%2520do%2520Metro%2520do%2520Porto&rct=j&q=desenvolvimento%20do%20sistema%20de%20metro%20do%20ligeiro%20do%20porto&ei=Yt0ITobQNYqXhQeK5J3XDQ&usg=AFQjCNGPbGDnhvq5YWptwkKHdavHwh2l7w&cad=rja; Consultado a 1 de Maio de 2011.

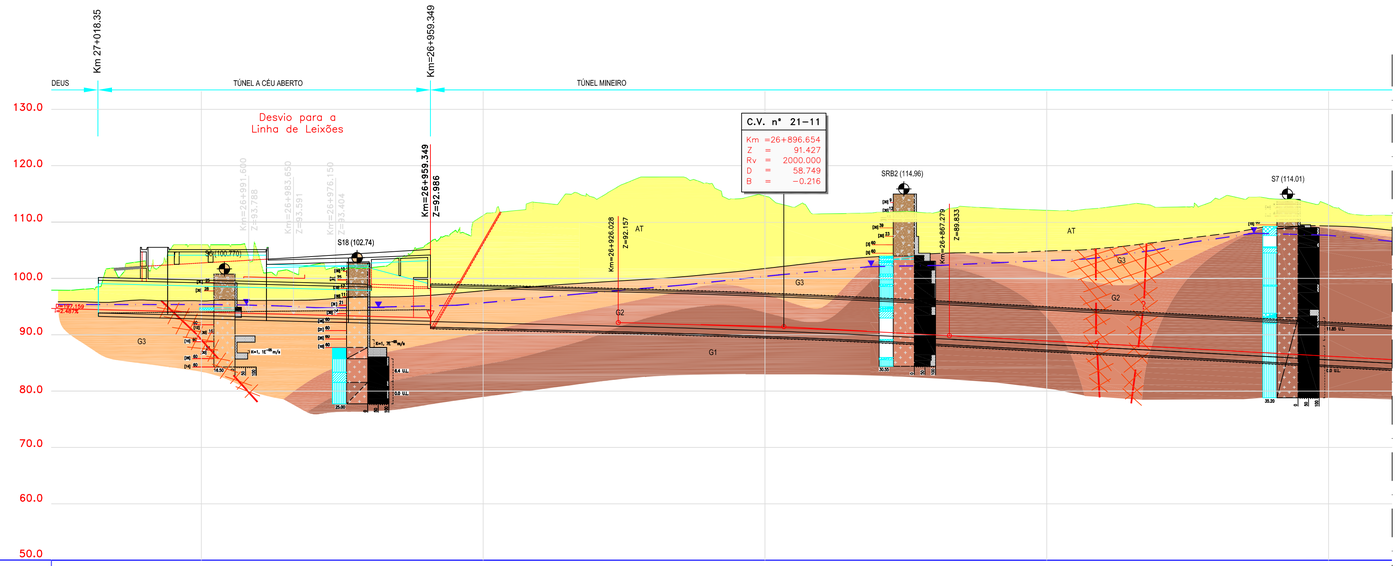
[19] Metro do Porto; www.metrodoporto.pt; Consultado a 2 de Maio de 2011.

[20] Hoek's Corner; http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner; Consultado a 3 de Maio de 2011.

ANEXOS

PERFIL LONGITUDINAL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Esc.: 1/500



QUILOMETRAGEM			27+000						26+950						26+900						26+850					26+800
COTAS DA RASANTE			94.495	94.246	93.997	93.748	93.500	93.251	93.002	92.754	92.505	92.256	91.998	91.694	91.341	90.937	90.483	91.601	91.853	89.979	89.438	88.896	88.354	87.811	87.269	86.726	86.184	85.641
COTAS DO TERRENO			98.637	103.593	106.466	109.657	107.928	102.089	106.577	111.600	113.230	116.691	118.176	116.801	113.546	111.462	111.601	111.853	112.512	112.204	112.097	112.753	114.606	114.229	112.627	110.882
1	LITOLOGIA		ATERRO + GRANITO DO PORTO										GRANITO DO PORTO													
2	DESCONTINUIDADES		26+311																							
			27+018.35				26+959.349								26+881.3					26+851.309				26+821.3		
3	CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS	3.1 MODO DE ROTURA DOMINANTE 3.1.1 *	Raramente				Subordinado											Dominante			Dominante					
		3.1.2 VER NOTA	Dominante				Dominante ("piping" em G2, G3)											Raramente (localmente "piping" em G1b)			Frequentemente ("piping" em G2)					
		3.1.3	–				–											–			–					
		3.2 POTENCIAL DE DEFORMAÇÃO	Baixo a moderado				Moderado a elevado (na coroa do túnel)											Baixo			Baixo a moderado					
4	CONDIÇÕES HIDROGELÓGICAS	4.1 COLUNA DE ÁGUA	2m a 4m acima da base de escavação				2m a 5m acima da coroa do túnel											5m a 10m acima da coroa do túnel								8m a 15m acima d
		4.2 INFLUXO DE ÁGUA ESPERADO (POR 100 m)	Geralmente < 1 l/s				Geralmente < 5 l/s, raramente 20 l/s																			Ge
		4.3 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS	Localmente aumento do influxo nas zonas de diques pegmatíticos, mas de curta duração.				Influxos de água de curta duração provenientes das diaclases abertas, de diques pegmatíticos ou de interfaces entre materiais c de solo (granito W5) e maciço rochoso fracturado, que podem atingir os 10 l/s a 20 l/s.													Pressão da água elevada associada provavelmente a zona de falha.					
5	UNIDADES GEOTÉCNICAS		A+G3: 100%				G1b: 5% G2: 45% G3: 50%											G1a: 20% G1b: 60% G2: 20%			G1b: 20% G2: 75% G3: 5%					G1a: 15% G1b: 60%
6	OBSERVAÇÕES		Falha interpretada com base nas fotografias aéreas e nas sondagens																		Falhas interpretadas com base nas fotografias aéreas					
7	PERFIS DE REFRACÇÃO SÍSMICA						L1								L1A											
8	FIABILIDADE DA PREVISÃO	ALTA																								
		MÉDIA																								
		BAIXA																								
9	SUPORTES TIPO TÚNEL MINEIRO						ST6 100%											ST1 20%, ST2 60% , ST3 20%			ST2 20% , ST3 80%					ST1
10	MEDIDAS AUXILIARES						REBAIXAMENTO SISTEMÁTICO DO NÍVEL FREÁTICO COM PERFURAÇÕES ADEQUADAS DESDE O TÚNEL								26+881.305					26+851.305				26+821.305		
11	REVESTIMENTO INTERNO TIPO TÚNEL MINEIRO								REV. INTERNO TIPO 2																	

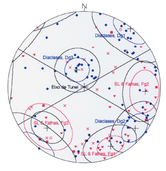


DIAGRAMA DE PÓLOS DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO GRANÍTICO.

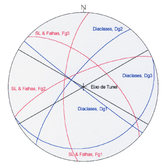


DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS PLANOS DE DESCONTINUIDADES NO MACIÇO ROCHOSO GRANÍTICO.

REVISÃO:	DATA:	TIPO:	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES:
03	29/09/06		EMISSÃO COM BASE NA REVISÃO DO METRO DO PORTO
02	23/12/05		
01	07/03/03		

CLIENTE: Metro do Porto

AUTORIA: GEG Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda. RUA DA ALEGRIA 1100, P - 4000-038 PORTO • PORTUGAL Telef. 351 22 5073540 • Fax 351 22 5073549 • geg@netcp.pt

GEOCONSULT Consulting Engineers
A-5071 Wals/Salzburg, Austria, Hoelzlstrasse 563

PROJECTO: METRO DO PORTO. LINHA PG.
TÚNEL ENTRE SÃO JOÃO DE DEUS E PARQUE NASCENTE

Projecto: LK0a Troço/Lote: Área: Tipo Doc.: Emissão: Número de Ordem: Revisão:
M|2|P|G|2|1|_|0|7|G|G|D|S|G|E|G|0|0|0|0|3|0|3

FOLHA N.º: 01

TÍTULO DO DESENHO: PERFIL LONGITUDINAL (TÚNEL)

CÓDIGO INTERNO: 381.1

DEPARTAMENTO	DATA	RESPONSÁVEL	RÚBRICA
Coordenação	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Projecto	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Desenho	29/09/2006	P. ROJO	
Aprovação			

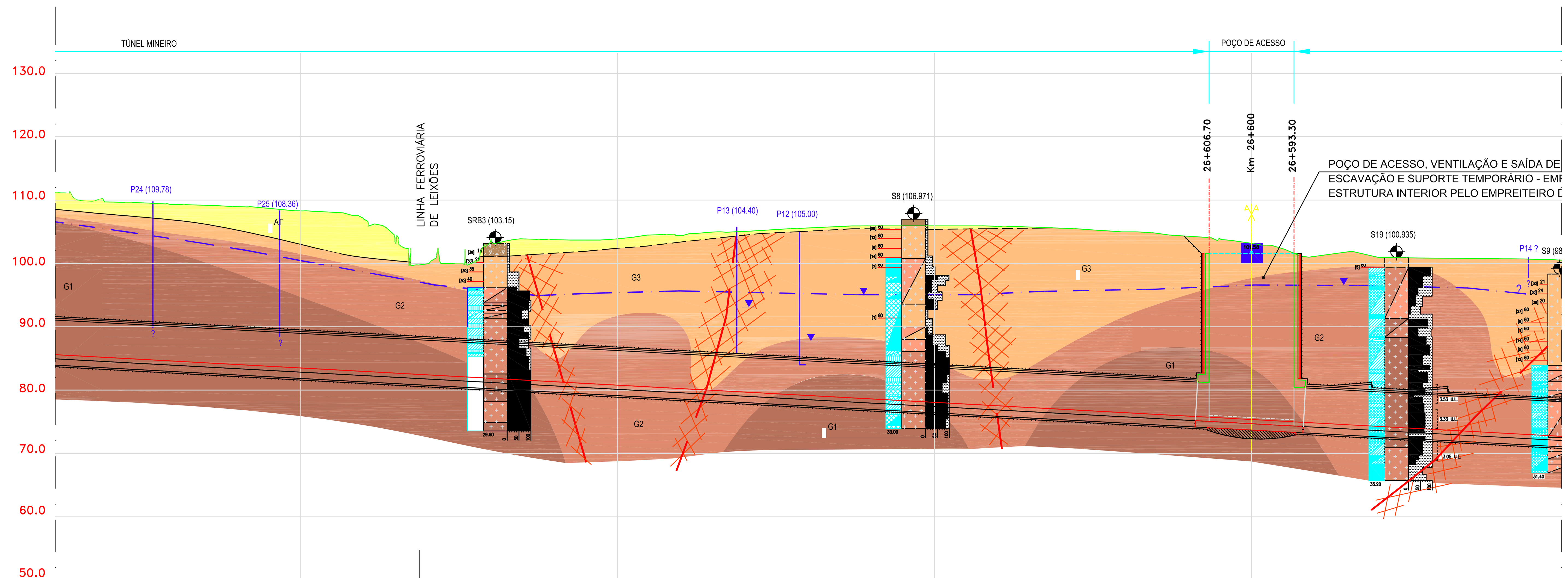
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL
DISCIPLINA: GEOLOGIA
ESCALAS: 1:500
DATA: 29/09/2006

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS DE AUTOR PELA LEGISLAÇÃO EM VIGOR - Dec. Lei nº 63/85 de 14/3 e Lei nº 114/91de 3 de Setembro

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

PERFIL LONGITUDINAL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Esc.: 1/500



QUILOMETRAGEM				26+750					26+700					26+650					26+600				26+
COTAS DA RASANTE	85.099	84.556	84.014	83.471	82.929	82.386	81.844	81.301	80.759	80.217	79.674	79.132	78.589	78.047	77.504	76.962	76.419	75.877	75.334	74.792	74.249	73.707	73.165
COTAS DO TERRENO	109.780	109.192	108.801	108.255	105.936	100.407	103.317	103.709	104.007	104.655	105.127	105.697	105.949	105.971	105.852	105.546	104.891	104.210	103.006	101.869	100.919	100.792	100.631

1 LITOLOGIA: GRANITO DO PORTO

2 DESCONTINUIDADES

26+311

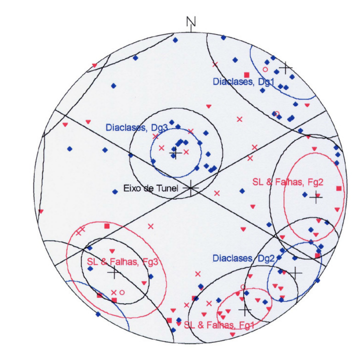


DIAGRAMA DE PÓLOS DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO GRANÍTICO.

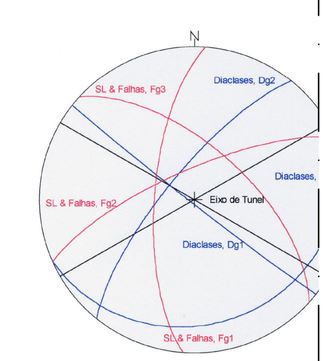


DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIP PLANOS DE DESCONTINUIDADES NO MACI ROCHOSO GRANÍTICO.

			26+731	26+681	26+591	
3 CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS	3.1 MODO DE ROTURA DOMINANTE	3.1.1 (* VER NOTA)	Dominante	Frequentemente	Dominante	Frequentemente
		3.1.2	Raramente (localmente "piping" em G1b)	Frequentemente ("piping" em G2, G3)	Frequentemente ("piping" em G2)	Frequentemente ("piping"
		3.1.3	–	–	–	–
	3.2 POTENCIAL DE DEFORMAÇÃO		Baixo	Baixo a moderado, elevado onde aparecer granito W5 na coroa do túnel.		Baixo a moderado
4 CONDIÇÕES HIDROGELÓGICAS	4.1 COLUNA DE ÁGUA		a coroa do túnel	8m a 10m acima da coroa do túnel	10m a 17m acima da coroa do túnel	13m a 17m acima da cor
	4.2 INFLUXO DE ÁGUA ESPERADO (POR 100 m)		ralmente < 10 l/s, raramente 20 l/s		Geralmente < 10 l/s, raramente 20 l/s	
	4.3 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS		om comportamento	Pressão da água elevada associada provavelmente com zonas de falha	Influxos de água local provenientes das diaclases abertas, de diques pegmatíticos ou de interfaces entre materiais com comportamento de solo, (granito W5) e maciço rochoso fracturado, que podem atingir os 10 l/s a 20 l/s.	
5 UNIDADES GEOTÉCNICAS			G2: 20% G3: 5%	G1b: 5% G2: 80% G3: 15%	G1a: 5% G1b: 25% G2: 60% G3: 10%	G2: 90% G
6 OBSERVAÇÕES			Passagem por baixo da linha ferroviária de Leixões	Passagem por baixo da linha ferroviária de Leixões; Falhas interpretadas com base nas fotografias aéreas e perfis sísmicos.		Falha interpretada com base nas sondagens
7 PERFIS DE REFRACÇÃO SÍSMICA				L2	L3	L3A
8 FIABILIDADE DA PREVISÃO	ALTA / MÉDIA / BAIXA				26+591	
9 SUPORTES TIPO TÚNEL MINEIRO			15%, ST2 65%, ST3 15%, ST5 5%	ST3 80%, ST5 20%	ST2 25%, ST3 60%, ST5 15% / POÇO	ST3 90%, ST5 10%
10 MEDIDAS AUXILIARES			26+731,305	26+681,305 REBAIXAMENTO LOCALIZADO DO NÍVEL FREÁTICO COM PERFURAÇÕES ADEQUADAS DESDE O TÚNEL		
11 REVESTIMENTO INTERNO TIPO TÚNEL MINEIRO			26+721	REVESTIMENTO INTERNO TIPO 1	26+631 REV. INT. TIPO 2 / POÇO	REV. INT. TIPO 2

REVISÃO:	DATA:	TIPO:	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES:
03	29/09/06		EMISSÃO COM BASE NA REVISÃO DO METRO DO PORTO
02	23/12/05		
01	07/03/03		

CLIENTE: Metro do Porto

AUTORIA: GEG Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda. RUA DA ALEGRIA 1930, 1º - SALA 4 4200-024 • PORTO • PORTUGAL Telef. 351 22 5573240 • Fax 351 22 5573249 • geg@geg.pt

GEOCONSULT Consulting Engineers A-5071 Wals/Salzburg, Austria, Hoelzlstrasse 563

PROJECTO: METRO DO PORTO. LINHA PG. TÚNEL ENTRE SÃO JOÃO DE DEUS E PARQUE NASCENTE

M2PG21.07GGDSGEG0000303 — FOLHA N.º: 02

TÍTULO DO DESENHO: PERFIL LONGITUDINAL (TÚNEL)

CÓDIGO INTERNO: 381.1

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL — DISCIPLINA: GEOLOGIA — ESCALAS: 1/500 — DATA: 29/09/2006

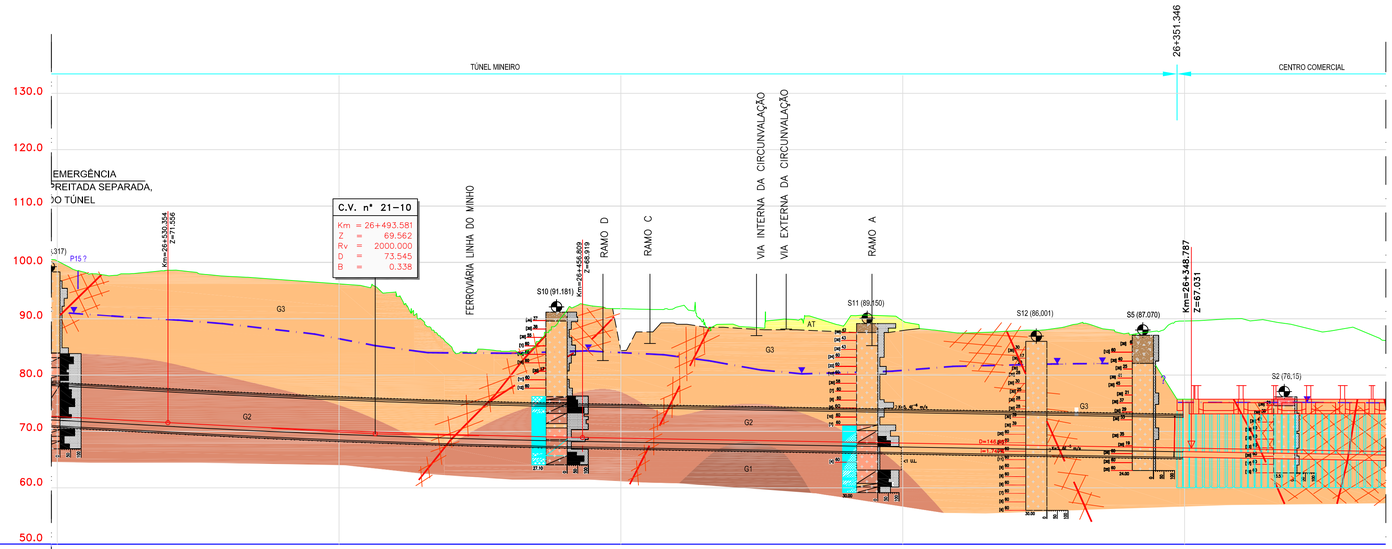
DEPARTAMENTO	DATA	RESPONSÁVEL	RÚBRICA
Coordenação	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Projecto	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Desenho	29/09/2006	P. ROJO	
Aprovação			

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS DE AUTOR PELA LEGISLAÇÃO EM VIGOR - Dec. Lei nº 63/85 de 14/3 e Lei nº 114/91de 3 de Setembro

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

PERFIL LONGITUDINAL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Esc.: 1/500



QUILOMETRAGEM	550					26+500						26+450						26+400						26+350				
COTAS DA RASANTE	72.622	72.080	71.537	71.021	70.556	70.140	69.774	69.459	69.193	68.977	68.800	68.625	68.450	68.276	68.101	67.926	67.752	67.577	67.402	67.227	67.053	66.878	66.703	66.528				
COTAS DO TERRENO	99.809	97.941	98.597	97.359	96.140	94.902	93.325	83.564	84.756	92.063	91.515	92.351	89.299	90.585	90.589	89.005	87.483	87.657	89.146	87.124	89.574	89.702	87.901	87.115				
1 LITOLOGIA	GRANITO DO PORTO																							GRANITO ZONA DE CONT				
2 DESCONTINUIDADES	26+311																											
3 CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS — 3.1 MODO DE ROTURA DOMINANTE (3.1.1 / 3.1.2 / 3.1.3)	* VER NOTA																											
	em G2)					Subordinado						Frequentemente												Raramente				
						Dominante ("piping" em G2, G3)						Dominante ("piping" em G2, G3)												Dominante				
						–						–												–				
3.2 POTENCIAL DE DEFORMAÇÃO						Moderado a elevado																		Elevado				Muito elev (não considerar caix
4 CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS — 4.1 COLUNA DE ÁGUA	a do túnel					10m a 13m acima da coroa do túnel						7m a 10m acima da coroa do túnel						8m a 10m acima da coroa do túnel										2m acima da coroa do túnel
4.2 INFLUXO DE ÁGUA ESPERADO (POR 100 m)						Geralmente < 10 l/s, localmente > 20 l/s em condições de "mixed face". Pode subir aos 50 l/s em zonas só de maciço rochoso com comportamento de solo granito W5.												Geralmente < 10 l/s a 20 l/s, raramente 50 l/s										Influxo de água reduzido devido à caixa de estacas quantidade de água para valores < 5 l/s.
4.3 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS						Pressão da água mais elevada e condições heterogéneas relacionados provavelmente com zonas de falha.												Influxo de água local a partir dos materiais pegmatíticos grosseiros, que poderão atingir os 25 l/s.										Elevada pressão da água e influxos repentinos poss adjacentes à interface túnel/caixa de estacas.
5 UNIDADES GEOTÉCNICAS	3: 10%					G2: 50%		G3: 50%				G1b: 5%		G2: 75%		G3: 20%		G2: 5%		G3: 95%								G3: 50% X2: 10
6 OBSERVAÇÕES						Falha interpretada com base nas sondagens e nos perfis sísmicos.												Falha interpretada com base nas sondagens e nas fotografias aéreas.										Falhas interpretadas com bas aéreas e dados de campo.
						Passagem por baixo da linha ferroviária do Minho						Passagem por baixo da rampa de acesso ao Parque Nascente.						Rampa de acesso ao centro comercial Parque Nascente a uma distância inferior a um diâmetro do túnel						Passagem por baixo do centro comercial pela caix				
7 PERFIS DE REFRACÇÃO SÍSMICA												L4								L5								
8 FIABILIDADE DA PREVISÃO — ALTA																												
MÉDIA																												
BAIXA																												
9 SUPORTES TIPO TÚNEL MINEIRO												ST6 100%																CAIXA DE ESTACAS INTERSECÇÃO COM O CENTRO COMERCIAL
10 MEDIDAS AUXILIARES												REBAIXAMENTO SISTEMÁTICO DO NÍVEL FREÁTICO COM PERFURAÇÕES ADEQUADAS DESDE O TÚNEL																
11 REVESTIMENTO INTERNO TIPO TÚNEL MINEIRO					26+516							REVESTIMENTO INTERNO TIPO 1												REV. INTERNO TIPO 2				CAIXA DE ESTACAS INTERSECÇÃO COM O CENTRO COMERCIAL

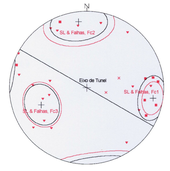


DIAGRAMA DE PÓLOS DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO NA ZONA DE CONTACTO.

DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS PLANOS DE DESCONTINUIDADES NO MACIÇO ROCHOSO NA ZONA DE CONTACTO.

REVISÃO:	DATA:	TIPO:	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES:
03	29/09/06		EMISSÃO COM BASE NA REVISÃO DO METRO DO PORTO
02	23/12/05		
01	07/03/03		DIVERSAS

CLIENTE: Metro do Porto

AUTORIA: GBG Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda. RUA DA ALEGRIA 1005, 1º - SALA 4 4200-024 • PORTO • PORTUGAL Telef. 351 22 3073280 • Fax 351 22 3073284 • info@gbg.pt

GEOCONSULT Consulting Engineers
A-5071 Wals/Salzburg, Austria, Hoefzlstrasse 563

PROJECTO: METRO DO PORTO. LINHA PG.
TÚNEL ENTRE SÃO JOÃO DE DEUS E PARQUE NASCENTE

Projecto	Área	Tipo Doc.	Área	Tipo Doc.	Emissão	Número de Ordem	Revisão
M2	P1	G2	11	01	7G	DS	G1
E1	G0	01	01	01	01	03	03

FOLHA Nº: 01 | 03

TÍTULO DO DESENHO: PERFIL LONGITUDINAL (TÚNEL)

CÓDIGO INTERNO: 381.1

DEPARTAMENTO	DATA	RESPONSÁVEL	RÚBRICA
Coordenação	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Projecto	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Desenho	29/09/2006	P. ROJO	
Aprovação			

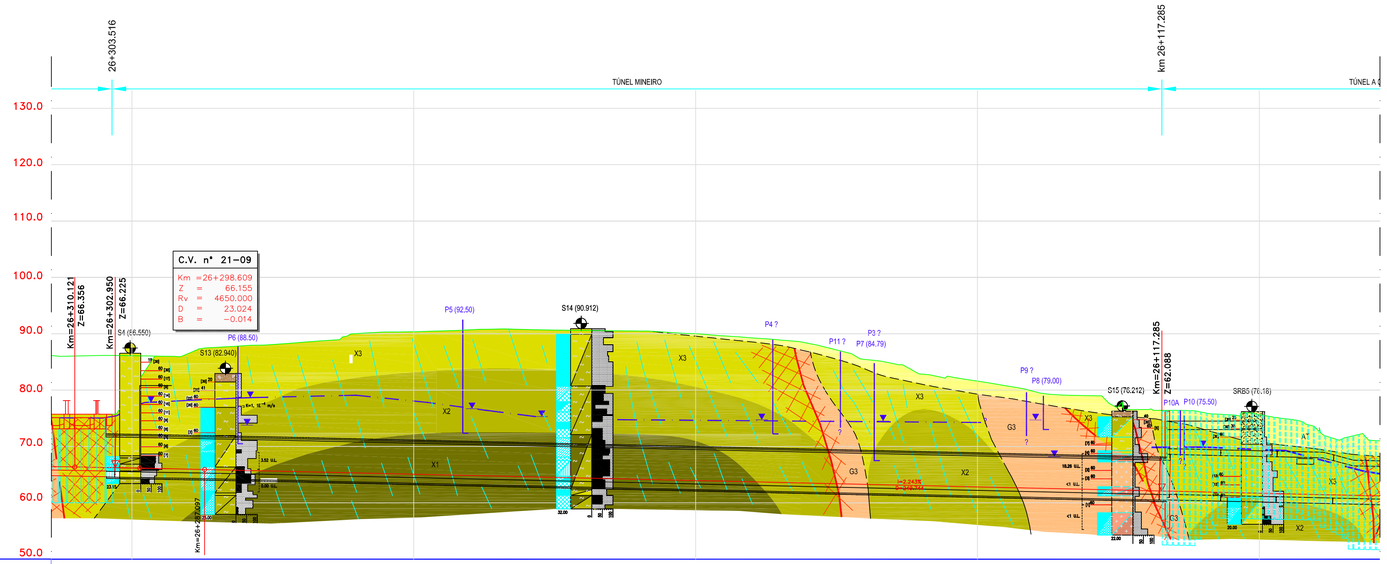
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL
DISCIPLINA: GEOLOGIA
ESCALAS: 1:500
DATA: 29/09/2006

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS DE AUTOR PELA LEGELIAÇÃO EM VIGOR - Dec. Lei nº 63/85 de 14/3 e Lei nº 114/91de 3 de Setembro

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

PERFIL LONGITUDINAL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Esc.: 1/500



QUILOMETRAGEM	26+300					26+250					26+200					26+150					26+100			
COTAS DA RASANTE	66.354	66.168	65.961	65.737	65.513	65.289	65.084	64.840	64.616	64.392	64.167	63.943	63.719	63.495	63.270	63.046	62.822	62.598	62.373	62.149	61.925	61.701	61.476	61.252
COTAS DO TERRENO	86.088	86.248	87.160	87.866	88.267	90.193	90.411	90.864	90.755	90.595	90.488	90.006	89.272	88.061	85.208	82.788	81.412	79.495	79.007	76.439	76.234	75.600	71.766	71.040

1	LITOLOGIA	/XISTO ACTO/FALHA	COMPLEXO XISTO GRAUVÁQUICO CONTACTO METAMORFISADO (MIGMATITOS, MICAXISTOS, XISTOS GNAISSICOS, XISTOS LUZENTOS, INTERSECTADOS POR DIQUES PEGMATÍTICOS E GRANÍTICOS).				CONTACTO METAMORFISADO (MIGMATITOS, MICAXISTOS, XISTO
2	DESCONTINUIDADES	5 5					
			26+301	26+261	26+201	26+141	26+117
3	CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS — 3.1 MODO DE ROTURA DOMINANTE — 3.1.1	*	Subordinado	Dominante	Dominante	Subordinado	–
	3.1.2	VER NOTA	Dominante	Raramente	Raramente (localmente "piping" em G3)	Dominante	Subordinado
	3.1.3		Frequentemente	Frequentemente	Frequentemente	Frequentemente	Dominante
	3.2 POTENCIAL DE DEFORMAÇÃO	do o de estacas)	Elevado a moderado	Moderado a baixo	Moderado a elevado	Elevado	Elevado a moderado
4	CONDIÇÕES HIDROGELÓGICAS — 4.1 COLUNA DE ÁGUA		5m a 8m acima da coroa do túnel			1m a 2m acima da coroa do túnel	6m a 10m acima da base de es
	4.2 INFLUXO DE ÁGUA ESPERADO (POR 100 m)	e redução da	Geralmente < 5 l/s		Geralmente < 5 l/s nos xistos, 10 l/s a 20 l/s nos granitos		
	4.3 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS	íveis em zonas	Influxo de água local ao longo de zonas fracturadas e/ou diques pegmatíticos, podendo atingir 20 l/s.		Elevados e repentinos influxos de água e possível aumento de pressão da água ao longo das interfaces xisto/granito e/ou zonas fracturadas e/ou diques pegmatíticos.		Aumento do influxo de
5	UNIDADES GEOTÉCNICAS	X3: 40%	X1b: 10% X2: 80% X3: 10%	X1a: 10% X1b: 60% X2: 25% X3: 5%	X1b: 5% X2: 60% X3: 10% G2: 5% G3: 20%	X3: 20% G2: 20% G3: 60%	X2: 20% X3: 70% G3:
6	OBSERVAÇÕES	e nas fotografias o de estacas.			Falha interpretada com base nos dados de campo Localização provável de um poço	Falha interpretada com base nos dados de campo e sondagens	Falha interpre aéreas e
7	PERFIS DE REFRACÇÃO SÍSMICA		L6				L7
8	FIABILIDADE DA PREVISÃO — ALTA						
	MÉDIA						
	BAIXA						
9	SUPORTES TIPO TÚNEL MINEIRO		ST5 40%, ST6 60%	ST3 10%, ST4 60%, ST5 30%	ST5 15%, ST6 85%		
10	MEDIDAS AUXILIARES			26+261.305	26+201.305	REBAIXAMENTO SISTEMÁTICO DO NÍVEL FREÁTICO COM PERFURAÇÕES ADEQUADAS DESDE O TÚNEL	
11	REVESTIMENTO INTERNO TIPO TÚNEL MINEIRO		REV. INTERNO TIPO 2	REVESTIMENTO INTERNO TIPO 1	26+181		REV. INTERNO TIPO 2

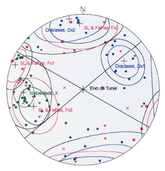


DIAGRAMA DE PÓLOS DAS DESCONTINUIDADES DO MACIÇO ROCHOSO XISTENTO.

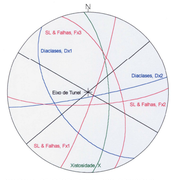


DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS PRINCIPAIS PLANOS DE DESCONTINUIDADES NO MACIÇO ROCHOSO XISTENTO.

REVISÃO:	DATA:	TIPO:	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES:
03	29/09/06		EMISSÃO COM BASE NA REVISÃO DO METRO DO PORTO
02	23/12/05		
01	07/03/03		

CLIENTE: Metro do Porto

AUTORIA: GBG Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda. RUA DA ALEGRIA 1005, 1º - SALA 4 4200-024 • PORTO • PORTUGAL Telef. 351 22 3373280 • Fax 351 22 3373284 • info@gbg.pt

GEOCONSULT Consulting Engineers
A-5071 Wals/Salzburg, Austria, Hoefzlstrasse 563

PROJECTO: METRO DO PORTO. LINHA PG.
TÚNEL ENTRE SÃO JOÃO DE DEUS E PARQUE NASCENTE

Projecto: LAnte | Troço/Lote | Área | Tipo Doc. | Entrada | Número de Ordem | Revisão
M|2|P|G|2|1|1|0|7|G|G|D|S|G|E|G|0|0|0|0|0|3|0|3

FOLHA Nº: 0|4

TÍTULO DO DESENHO: PERFIL LONGITUDINAL (TÚNEL)

CÓDIGO INTERNO: 381.1

DEPARTAMENTO	DATA	RESPONSÁVEL	RÚBRICA
Coordenação	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Projecto	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Desenho	29/09/2006	P. ROJO	
Aprovação			

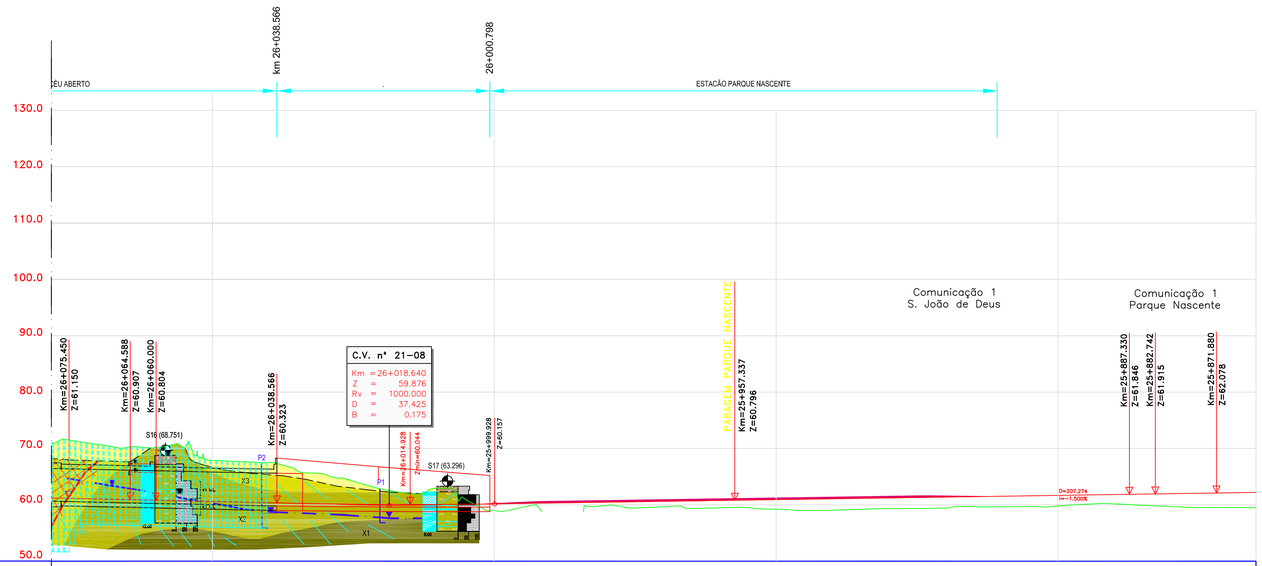
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL
DISCIPLINA: GEOLOGIA
ESCALA(S): 1/500
DATA: 29/09/2006

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS DE AUTOR PELA LEGEBLAÇÃO EM VIGOR - Dec. Lei nº 63/85 de 14/3 e Lei nº 114/91de 3 de Setembro

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

PERFIL LONGITUDINAL GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Esc.: 1/500



QUILOMETRAGEM	26+050 26+000 25+950 25+900
COTAS DA RASANTE	61.028 60.804 60.579 60.355 60.158 60.057 60.056 60.156 60.306 60.456 60.606 60.756 60.906 61.056 61.206 61.356 61.506 61.656 61.806 61.956 62.106
COTAS DO TERRENO	70.432 70.492 67.933 67.206 64.960 62.577 62.551 60.601 60.802 59.976 59.752 59.333 59.118 59.187 59.532 59.792 59.659 59.889 60.142 59.516 59.493
1 LITOLOGIA	ATERRO + COMPLEXO XISTO GRAUVÁQUICO (S GNAISSICOS, XISTOS LUZENTOS, INTERSECTADOS POR DIQUES PEGMATÍTICOS E GRANÍTICOS).
2 DESCONTINUIDADES	
3 CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS — 3.1 MODO DE ROTURA DOMINANTE — 3.1.1 *	26+061 – 26+001 –
3.1.2 VER NOTA	–
3.1.3	Dominante
3.2 POTENCIAL DE DEFORMAÇÃO	Moderado a baixo
4 CONDIÇÕES HIDROGELÓGICAS — 4.1 COLUNA DE ÁGUA	cavação — 0m a 6m acima da base de escavação
4.2 INFLUXO DE ÁGUA ESPERADO (POR 100 m)	Geralmente < 1 l/s
4.3 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS	duração razoável, que poderá ocorrer a partir de zonas fracturadas e de diques graníticos.
5 UNIDADES GEOTÉCNICAS	10% — X1b: 10% X2: 80% X3: 10%
6 OBSERVAÇÕES	tada com base nas fotografias nos dados das sondagens
7 PERFIS DE REFRACÇÃO SÍSMICA	L8
8 FIABILIDADE DA PREVISÃO — ALTA	
MÉDIA	
BAIXA	
9 SUPORTES TIPO TÚNEL MINEIRO	
10 MEDIDAS AUXILIARES	
11 REVESTIMENTO INTERNO TIPO TÚNEL MINEIRO	

REVISÃO:	DATA:	TIPO:	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES:
03	29/09/06		EMISSÃO COM BASE NA REVISÃO DO METRO DO PORTO
02	23/12/05		
01	07/03/03		

CLIENTE: Metro do Porto

AUTORIA: GEG Gabinete de Estruturas e Geotecnia, Lda. Rua Eugénio Ferreira, 77 - SALA 4 4200-425 APORTO-APORTUGAL Telef. 351 22 5573240 • Fax 351 22 5573249 • geg@geg.pt

GEOCONSULT Consulting Engineers
A-5071 Wals/Salzburg, Austria, Hoelzlstrasse 563

PROJECTO: METRO DO PORTO. LINHA PG.
TÚNEL ENTRE SÃO JOÃO DE DEUS E PARQUE NASCENTE

Projecto: M|2 Área: P|G Troço/Lote: 2|1 Fase: 1|0 Tipo Doc.: 7|G Estação: G|D Numero de Ordem: S|0 Revisão: E|0 FOLHA N.º 0|5

TÍTULO DO DESENHO: PERFIL LONGITUDINAL (TÚNEL)

CÓDIGO INTERNO: 381.1

DEPARTAMENTO	DATA	RESPONSÁVEL	RÚBRICA
Coordenação	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Projecto	29/09/2006	CAMPOS E MATOS	
Desenho	29/09/2006	P. ROJO	
Aprovação			

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA CIVIL
DISCIPLINA: GEOLOGIA
ESCALA(S): 1/500
DATA: 29/09/2006

RESERVADOS TODOS OS DIREITOS DE AUTOR PELA LEGISLAÇÃO EM VIGOR - Dec. Lei nº 63/85 de 14/3 e Lei nº 114/91de 3 de Setembro

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR