



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Resistência ao corte de superfícies rochosas: estudo experimental em amostras da pedra de Joane (Famalicão) e da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)

Rúben Azevedo Meireles



2019

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Resistência ao corte de superfícies rochosas: estudo experimental em amostras da pedra de Joane (Famalicão) e da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)

Shear strength of rock surfaces: experimental study on samples of the Joane's quarry (Famalicão) and S. Cristóvão slope (Cinfães)

Rúben Azevedo Meireles

1110595

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e do Engenheiro Especialista José Filinto Castro Trigo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil do ISEP*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria José Coxito Afonso

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes

Professora Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Mestre Especialista José Filinto Castro Trigo

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Rúben Azevedo Meireles**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 6 de Novembro de 2019 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **17 (dezassete) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

*Dedico esta dissertação a meus Avós,
Pais e Irmã...*

Agradecimentos

Antes do início desta dissertação, gostaria de lançar palavras de agradecimento a várias pessoas que direta ou indiretamente estiveram presentes durante estes anos de percurso académico e que de alguma forma contribuíram para o êxito final do mesmo, e que a realização deste projeto fosse possível. Desta forma, agradeço particularmente:

Ao meu orientador Professor Helder I. Chaminé (DEG e LABCARGA|ISEP), pelo apoio, ajuda, dedicação, rigor na discussão e na revisão minuciosa da dissertação, por todo o acompanhamento prestado nestes últimos longos meses e por todo os conhecimentos que me transmitiu ao longo da licenciatura e do mestrado;

Ao meu coorientador Professor Eng.º José Filinto Trigo (DEC) por toda ajuda quer a nível técnico, quer a nível técnico-científico nomeadamente na fase experimental da dissertação e por todo o apoio, ajuda na revisão do documento e ensinamentos prestados e na conceção e construção do protótipo;

À Doutora Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP) pela gentileza e colaboração prestada durante as saídas de campo para recolha de amostras de Joane e transporte para o corte das mesmas;

Ao Sr. Carlos Ferreira (LGMC|ISEP) pela disponibilidade e auxílio no transporte das amostras para serragem e a sua posterior recolha. À Eng.ª Isilda Costa (LGMG|ISEP) pela disponibilidade técnica prestada.

À amiga e colega Engenheira Ana Mendes (SECIL Britas) pela disponibilidade e ajuda na recolha das amostras na pedreira de Joane e pela disponibilização dos respetivos dados geológico-geotécnicos de campo.

À amiga e colega Engenheira Sara Duarte (Elevo Agregados) pela disponibilização dos dados geológico-geotécnicos da escarpa de S. Cristóvão.

À colega Catarina Margaride pela entreeajuda prestada na realização dos vários ensaios e medições relativas à parte experimental desta dissertação, bem como discussões e partilha bibliográfica.

À Cooperativa dos Pedreiros, em especial ao Engenheiro Floriano Santos, pela amabilidade e disponibilidade na serragem das amostras em estudo.

Um agradecimento especial ao Departamento de Geociências (DG) da Universidade de Aveiro, em particular do Professor Jorge Medina e da Engenheira Denise Terroso, pela gentil cedência do equipamento 'Tilt Test' do Laboratório de Geotecnia do DG|UA.

Gratos ao Professor Eng.º Duarte Barroso Lopes (DEC) pelo apoio na execução da escala de ângulos do protótipo.

Aos centros de prestação de serviços especializados do ISEP (Laboratório de Materiais de Construção – LGMC e Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada – LABCARGA) pela disponibilização cuidada dos respetivos laboratórios e equipamentos, fulcrais na realização deste trabalho;

Um agradecimento especial a todos os Professores que me acompanharam durante a etapa académica, por todos os mais variados ensinamentos, competência e transmissão ímpar de conhecimentos;

Um agradecimento muito especial a todos os meus colegas que me acompanharam neste percurso e que de uma forma ou de outra me ajudaram na formação académica, emocional e pessoal, particularmente àqueles que se tornaram meus amigos até ao dia de hoje, fazendo do ensino superior uma experiência de aprendizagem e de crescimento também fora das salas de aula e do *campus*.

Um grandíssimo obrigado aos restantes meus amigos e à minha família pelo apoio constante, pela compreensão, pelo companheirismo e por sempre terem acreditado em mim durante este percurso que agora se finaliza.

Por último, o maior dos agradecimentos às pessoas mais importantes da minha vida, os meus Pais e a minha Irmã, sem os quais nada disto seria possível, pelo esforço que fizeram para que este percurso académico fosse uma realidade, por sempre acreditarem nas minhas capacidades, esforço e dedicação, nunca me deixarem cair na inércia e por estarem sempre nos bons e maus momentos deste meu percurso.

A todos, sem exceção, o meu profundo obrigado. Esta dissertação tem um pedaço de todos Vós.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Maciços rochosos, superfícies rochosas, resistência ao corte, tilt test, ângulo de atrito

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo o cálculo de vários parâmetros geomecânicos do material-rocha granito — ângulo de atrito e resistência ao corte — através da aplicação de ensaios de inclinação ou basculamento (*'tilt test'*) em provetes resultantes de amostras recolhidas em frentes da pedreira de Joane (Famalicão) e na escarpa de S. Cristóvão (Cinfães). A primeira parte deste trabalho inclui um enquadramento teórico da temática bem como a exposição do método científico e experimental proposto para a execução dos ensaios e do historial de estudos-chave que antecederam o referido método. De seguida, há um capítulo dedicado à construção de um dos equipamentos utilizados nos referidos ensaios, na circunstância um protótipo de madeira e à apresentação de um segundo equipamento profissional. No capítulo seguinte, é descrito o caso de estudo, com um enquadramento inicial das características das amostras e dos locais da sua recolha, seguido da realização de ensaios complementares — resistência à compressão e determinação do JRC. Seguidamente, faz-se a descrição do corte dos provetes, as dimensões a obter e as características da máquina de corte, bem como a descrição dos ensaios a efetuar, combinações utilizadas e sequência de ensaio. Ainda neste capítulo, encontra-se o tratamento e análise dos resultados obtidos, com análise estatística e conclusões parciais para cada parâmetro calculado. Por fim, são preconizadas as considerações finais dos parâmetros obtidos, bem como a avaliação da fiabilidade dos ensaios e do método experimental.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Rock masses, rock surfaces, shear strength, tilt test, friction angle

Abstract

The purpose of this dissertation is to calculate several geomechanical parameters of the granitic rock material — friction angle and shear strength — by applying tilt tests to samples resulting from sampling collected from the Joane's quarry face (Famalicão) and the S. Cristóvão rock slope (Cinfães). The first part of this work includes a theoretical framework of the subject as well as the exposition of the proposed scientific and experimental method for the execution of the tests and the history of the key studies that preceded that method. Then there is a chapter regarding the construction of one of the machines used in these tests, in this case, a wooden prototype and the presentation of the second professional machine. In the following chapter, the case study is described, with an initial framing of the characteristics of the samples and their collection sites, followed by complementary tests — compressive strength and JRC determination. The following is a description of the cutting of the samples, the dimensions to be obtained and the characteristics of the cutting machine, as well as the description of the tests to be performed, the combinations used and the test sequence. Also, in this chapter, there is the treatment and analysis of the results obtained, with statistical analysis and partial conclusions for each calculated parameter. Finally, there are recommended the final considerations of the obtained parameters, as well as the evaluation of the reliability of the tests and the experimental method.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução Geral	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objetivos e organização da dissertação	3
2. Estado de Arte sobre Resistência ao Corte de Superfícies Rochosas	7
2.1. Considerações iniciais	7
2.2. Geomecânica de maciços rochosos	8
2.2.1. Fatores que influenciam os maciços rochosos	9
2.2.1.1. Matriz rochosa	9
2.2.1.2. Descontinuidades.....	9
2.2.1.3. Estado de tensão.....	11
2.2.1.4. Geofluidos.....	11
2.2.1.5. Tempo geológico.....	11
2.2.2. Descontinuidades e análise geomecânica	12
2.2.2.1. Parâmetros das descontinuidades em estudo.....	12
2.2.3. Propriedades petrofísicas e mecânicas.....	14
2.3. Ângulo de atrito de base – diferentes metodologias para a sua determinação laboratorial	15
2.3.1. Métodos empíricos e analíticos	15
2.3.2. Antecedentes teóricos	16
2.3.3. Método de Stimpson (1981)	17
2.3.4. Método sugerido por Alejano et al. (2018).....	18
2.3.4.1. Equipamento do ensaio	19
2.3.4.2. Provetes: forma e tamanho	20
2.3.4.3. Procedimento	21
3. Descrição do protótipo (ISEP) para a realização do <i>Tilt Test</i>	25
3.1. Generalidades	25
3.2. Projeto do protótipo (ISEP)	25
4. Casos de estudo: taludes da pedreira de Joane e da escarpa de S. Cristóvão	31
4.1. Considerações iniciais	31
4.2. Enquadramento regional	31
4.2.1. Enquadramento geográfico	31
4.2.1.1. Pedreira de Joane (Famalicão).....	31
4.2.1.2. Escarpa de S. Cristóvão (Cinfães).....	33
4.2.2. Enquadramento geológico	34
4.2.2.1. Pedreira de Joane	34
4.2.2.2. Escarpa de S. Cristóvão	36
4.2.3. Enquadramento hidrogeomorfológico	37
4.2.3.1. Pedreira de Joane	37
4.2.3.2. Escarpa de S. Cristóvão	37
4.2.4. Estudo geológico-geotécnico	38
4.2.4.1. Pedreira de Joane	38
4.2.4.2. Escarpa de S. Cristóvão	38
4.2.5. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos.....	38
4.3. Ângulo de atrito natural (α)	41
4.4. <i>Tilt test</i>	44
4.4.1. Dimensões dos provetes.....	44
4.4.2. Corte dos provetes.....	46
4.4.2.1. Características e funcionamento	47
4.4.3. Ensaios	49
4.4.3.1. Combinações.....	51
4.4.3.2. Pormenores.....	53
4.5. Resultados obtidos e tratamento dos dados	55
4.5.1. Ângulo β e ângulo de atrito base (ϕ_b).....	57
4.5.2. Ensaio esclerométrico – Martelo de Schmidt	69
4.5.3. Ângulo de atrito residual (ϕ_r).....	72
4.5.4. JRC (Joint Roughness Coefficient)	75

4.5.5. Resistência ao corte (τ).....	82
4.5.6. Síntese dos parâmetros obtidos.....	84
5. Conclusões.....	87
5.1. Considerações finais.....	87
5.2. Perspetivas futuras.....	90
6. Referências bibliográficas.....	93
7. Anexos.....	100

(página propositadamente em branco)

Índice de figuras

Figura 1 – Organização da dissertação	5
Figura 2 – Esquema da interação dinâmica das disciplinas das geociências da engenharia (adaptado de Griffiths, 2014).	7
Figura 3 – Esquema da interpretação mecânica do material-rocha e maciço rochoso (adaptado de Eberhardt, 1998).	8
Figura 4 – Relação entre as descontinuidades e a dimensão das obras de engenharia (segundo González de Vallejo & Ferrer, 2011).	10
Figura 5 – Influência das descontinuidades na resistência à compressão uniaxial em função da dureza da rocha (adaptado de Chaminé, 2016).	10
Figura 6 – Ensaios de basculamento realizados pelo método original de Stimpson com cilindros (a/b) e discos (c/d); segundo Alejano et al. (2012a).	18
Figura 7 – Tipos de mobilização, características recomendadas e parâmetros obtidos numa máquina de <i>Tilt test</i> . (adaptado de Vídeo ISRM – Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests (ISRM & U.Vigo): https://www.isrm.net/gca/index.php?id=1360	19
Figura 8 – Representação esquemática dos provetes retangulares utilizados no <i>tilt test</i>	20
Figura 9 – Representação esquemática da movimentação dos provetes durante o <i>tilt test</i>	22
Figura 10 – Primeiro esboço do possível protótipo ISEP para a realização do <i>Tilt test</i>	25
Figura 11 – Vistas em alçado do protótipo ISEP construído para a realização do <i>tilt test</i> (software AutoCad).	26
Figura 12 – Vista frontal (figura da esquerda) e traseira (figura da direita) do protótipo ISEP construído para a realização do <i>tilt test</i> (software AutoCad).	26
Figura 13 – Vista em planta do protótipo ISEP construído para a realização do <i>tilt test</i> (software AutoCad).	26
Figura 14 – Fotografias do protótipo ISEP para a realização do <i>tilt test</i> finalizado.	27
Figura 15 – Enquadramento geográfico do centro de exploração da Secil Britas em Joane, Vila Nova de Famalicão. (adaptado de Mendes, 2018).	32
Figura 16 – Talude da pedreira de Joane com queda de blocos (adaptado de Mendes, 2018)	32
Figura 17 – Enquadramento geográfico da escarpa de S. Cristóvão, Cinfães.	33
Figura 18 – Escarpa de S. Cristóvão (adaptado de Duarte, 2017)	34
Figura 19 – Enquadramento geológico regional do centro de exploração de Joane (adaptado e revisto de Montenegro de Andrade et al., 1986).	35
Figura 20 – Enquadramento geológico local do centro de exploração de Joane (geologia adaptada de Montenegro de Andrade et al., 1986).	35
Figura 21 – Enquadramento geológico regional da Escarpa de S. Cristóvão.	36
Figura 22 – Amostras identificadas por código de cor (vermelho, para a escarpa de S. Cristóvão).	41
Figura 23 – Método expedito para a medição do ângulo de atrito natural α	42
Figura 24 – Exemplo de duas amostras sobrepostas, com a marcação visível das faces.	42
Figura 25 – Esquema das dimensões dos provetes (à esquerda faces superior e inferior, à direita faces laterais); unidades em mm.	45
Figura 26 – Amostras escolhidas para o corte e obtenção dos provetes (Na caixa azul, amostras 1 e 2 de Joane, na caixa branca, amostra 1 de S. Cristóvão).	46
Figura 27 – Máquina de corte com disco diamantado, usada para o corte dos provetes (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).	46
Figura 28 – Pormenor do disco diamantado que efetuará o corte dos provetes (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).	47
Figura 29 – Dimensões principais da máquina de corte CB-02 (com escala humana) (adaptado de http://www.construal.pt/pt/produtos/14/cb).	48
Figura 30 – Autómato utilizado para controlar as movimentações dos eixos e especificações de corte (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).	48
Figura 31 – Pormenor dos dentes diamantados componentes do disco de corte (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros).	49
Figura 32 – Provetes junto do resto das amostras nas caixas respetivas (à esquerda (a), pedreira de Joane; à direita (b), escarpa de S. Cristóvão).	49

Figura 33 – Provetes junto das máquinas usadas para os ensaios <i>tilt test</i> (à esquerda (a), protótipo ISEP construído; à direita (b), equipamento da UA).	50
Figura 34 – Provetes da escarpa de S. Cristóvão, devidamente identificados com letra, face e aresta.	51
Figura 35 – Esquema sequencial das diferentes combinações e número de ensaios acumulado.	52
Figura 36 - Esquema do funcionamento dos ensaios nas 16 combinações para cada contacto (p. e. A1/B1).	52
Figura 37 – Exemplo de ensaio <i>tilt test</i> , efetuado no equipamento da UA.	53
Figura 38 – Exemplo de ensaio <i>tilt test</i> , efetuado no protótipo construído.	54
Figura 39 – Pormenor do transferidor acoplado ao equipamento de <i>tilt test</i> da UA para retirar o ângulo β . 54	
Figura 40 – Pormenor da leitura do ângulo β através da utilização de um aristo no protótipo de madeira construído.	55
Figura 41 – Ensaio A1/B1 (W/W e W/X) da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 1), onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.	59
Figura 42 – Ensaio B2/A1 (X/Y) de S. Cristóvão (Máquina 1) onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.	59
Figura 43 – Ensaio B2/A1 (W/X) e A1/B1 (W/X) de S. Cristóvão (Máquina 2) onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.	60
Figura 44 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedreira de Joane, no par (A/B) (Máquina 1).	63
Figura 45 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedreira de Joane, no par (B/A) (Máquina 1).	63
Figura 46 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedreira de Joane, no par (A/B) (Máquina 2).	64
Figura 47 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedreira de Joane, no par (B/A) (Máquina 2).	64
Figura 48 – Provetes A e B da zona de Joane antes (em cima) (a) e depois (em baixo) (b) da realização dos ensaios.	65
Figura 49 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (A/B) (Máquina 1).	66
Figura 50 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (B/A) (Máquina 1).	66
Figura 51 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (A/B) (Máquina 2).	67
Figura 52 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (B/A) (Máquina 2).	67
Figura 53 – Provetes A e B da zona da escarpa de S. Cristóvão antes (em cima) e depois (em baixo) da realização dos ensaios.	68
Figura 54 – Posicionamento do martelo de Schmidt durante o ensaio numa amostra.	69
Figura 55 – Ábaco de Miller, para obter a resistência à compressão uniaxial (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).	70
Figura 56 – Proвете S para a medição da resistência à compressão, para a zona da pedreira de Joane.	73
Figura 57 – Proвете S para a medição da resistência à compressão, para a zona da escarpa de S. Cristóvão.	74
Figura 58 – Perfis tipo para determinar o JRC (Barton & Choubey, 1977)	76
Figura 59 – Esquematização do método expedito para "perfilografar" (Yong et al., 2018).	77
Figura 60 – Dispositivo construído para a realização dos perfis	77
Figura 61 – Ábaco para determinação do JRC através da amplitude do perfil (Barton & Bandis, 1990).	78
Figura 62 – Critério de resistência ao corte (τ) para descontinuidades (adaptado de Patton, 1966).	83
Figura 63 – Escala de ângulos adaptada ao protótipo construído (ISEP).	89

(página propositadamente em branco)

Índice de tabelas

Tabela 1 – Sistematização das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011)	12
Tabela 2 – Principais parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos relativos às descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981; CFCFF, 1996; Hoek, 2007; Ferrer & González de Vallejo, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011)	13
Tabela 3 – Propriedades da matriz rochosa (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	14
Tabela 4 – Quadro síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos cartografados ao longo das “scanlines” realizadas na pedreira de Joane e na escarpa de S. Cristóvão (compilado de Duarte, 2017 e Mendes, 2018).....	39
Tabela 5 – Dimensões principais médias das amostras em bruto e respetivo peso.....	41
Tabela 6 – Quadro síntese com o resultado do ângulo de atrito natural para cada par de amostras ensaiadas.....	43
Tabela 7 – Características da máquina e disco de corte (Construal, 2019).....	47
Tabela 8 – Peso e dimensões dos provetes utilizados para os ensaios.....	50
Tabela 9 – Tabela simplificada para registo manual dos ângulos β (exemplo para a pedreira de Joane - A1/B1).....	55
Tabela 10 – Tabela de resultados de um contacto (Joane - A1/B1) (Máquina 1-Protótipo) com cálculos estatísticos.....	56
Tabela 11 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 1).....	57
Tabela 12 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 2).....	57
Tabela 13 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 1)	58
Tabela 14 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 2)	58
Tabela 15 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 2), com destaque dos valores onde a face A1 intervém no contacto.	60
Tabela 16 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de Joane (Máquina 1).....	62
Tabela 17 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 2).....	62
Tabela 18 – Quadro síntese dos valores obtidos para o ϕ_b	68
Tabela 19 – Classes de resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1981).	70
Tabela 20 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para cada amostra com superfície seca e respetiva classe de resistência.....	71
Tabela 21 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para cada amostra com superfície húmida e respetiva classe de resistência.....	72
Tabela 22 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para as amostras húmidas (parâmetro r) e respetiva classe de resistência.....	73
Tabela 23 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para os provetes S (parâmetro R) e respetiva classe de resistência.....	74
Tabela 24 – Quadro síntese dos valores obtidos para o ϕ_r	75
Tabela 25 – Quadro síntese com os perfis de Barton utilizados para cada face e respetivo valor de JRC.....	77
Tabela 26 – Quadro síntese com valores do comprimento e amplitude do perfil de cada face e respetivo valor de JRC.	78
Tabela 27 – Dimensões das amostras em bruto de onde foi retirado o parâmetro espessura (h).....	80
Tabela 28 – Valores obtidos para o ângulo de atrito natural (α) das amostras em bruto, de onde se retira o parâmetro α	80
Tabela 29 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para as amostras húmidas (de onde foi retirado o parâmetro JCS) e respetiva classe de resistência.....	81
Tabela 30 – Quadro síntese das variáveis calculadas para a fórmula do JRC.....	81
Tabela 31 – Valores obtidos para o JRC analítico, para cada zona e cada máquina.....	81

Tabela 32 – Quadro síntese comparativos dos valores obtidos para o JRC através das três diferentes metodologias.	82
Tabela 33 – Quadro síntese dos valores finais de ângulo de atrito base (ϕ_b) e ângulo de atrito residual (ϕ_r) divididos em contacto, par, zona e máquina	84

(página propositadamente em branco)

Índice de equações

Equação 1 – Resistência ao corte de uma descontinuidade (Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis 1990)	15
Equação 2 – Ângulo de atrito residual (ϕ_r), por Barton & Choubey (1977)	16
Equação 3 – Tensões nas arestas inferiores de um bloco de rocha (máxima) (Muralha, 1995)	16
Equação 4 – Tensões nas arestas inferiores de um bloco de rocha (mínima) (Muralha, 1995)	16
Equação 5 – Dimensão da superfície de menor comprimento do bloco (Alejano et al., 2018):	17
Equação 6 – Tensão máxima no bloco (Alejano et al., 2018)	17
Equação 7 – Ângulo de atrito básico (ϕ_b) para provetes cilíndricos, a partir do β (Stimpson, 1981)	18
Equação 8 – Ângulo de atrito residual (ϕ_r), por Barton & Choubey (1977)	72
Equação 9 – JRC obtido de forma analítica	79
Equação 10 – Resistência ao corte de uma descontinuidade (Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis 1990)	82

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISRM – International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

JCS – Joint Compressive Strength (Resistência à compressão da Superfície da Descontinuidade)

JRC – Joint Roughness Coefficient (Coeficiente de Rugosidade da Descontinuidade)

RQDt – Threshold/Teoretical Rock Quality Designation (Designação do limiar e teórica do Índice da Qualidade da Rocha)

UA – Universidade de Aveiro

ZCI – Zona Centro-Ibérica

(página propositadamente em branco)

Capítulo I.
Introdução Geral

(página propositadamente em branco)

1. Introdução Geral

1.1. Enquadramento

A presente dissertação está inserida na unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” do 2.º ano de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), tendo a seguinte temática: “Resistência ao corte de superfícies rochosas: estudo experimental em amostras da pedra de Joane (Famalicão) e da escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)”.

1.2. Objetivos e organização da dissertação

A proposta desta dissertação consiste no estudo da resistência ao corte do material-rocha de dois maciços graníticos selecionados no Norte de Portugal, um respeitante a talude de pedra e outro a uma escarpa rochosa, com base na determinação do ângulo de atrito base através da realização de *ensaios de basculamento* (ou inclinação) de superfícies de rochas planas (*‘Tilt Test’*), um método laboratorial sugerido por Alejano et al. (2012, 2018) e Muralha et al. (2014), sendo o desenvolvimento da metodologia recorrendo a provetes cilíndricos de Stimpson (1981), além das experiências pioneiras e desenvolvimentos de Barton (1973, 1974, 1976, 1982), Cawsey & Farrar (1976), Barton & Choubey (1977), Cruden et al. (1989) e Hencher & Richards (2015), entre outros.

No presente estudo recorreram-se a amostras das investigações de campo de cariz geológico-geotécnico e geomecânico de Mendes (2018) para Joane (Famalicão) e de Duarte (2017) para S. Cristóvão (Cinfães). De ressaltar que o signatário colaborou, em 2018, nos trabalhos de campo de cartografia geotécnica do maciço de Joane.

Posto isto, os objetivos desta dissertação são no essencial os seguintes:

- Recolha e síntese bibliográfica de estudos prévios (em particular, Ferraz, 2016; Duarte, 2017; Mendes, 2018) dos dados de base geológicos, geotécnicos e geomecânicos dos maciços graníticos da pedra de Joane e da escarpa de S. Cristóvão, para além das cartografias de zonamento geológico-geotécnico e geomecânico dos setores em estudo;
- Recolha, em trabalho de campo, de amostras do material-rocha granítico de Joane para posterior preparação de provetes normalizados;
- Conceção e construção de um protótipo para executar o ensaio de basculamento (*Tilt Test*);
- Aplicação de uma metodologia técnica e científica sobre o ensaio *Til Test* recorrendo aos trabalhos de referência (e.g., Barton & Choubey, 1977; Alejano et al., 2012a,b; Hencher,

2012; Muralha et al., 2014; Barton, 2016; Alejano et al., 2018, entre outros). Obtenção, compilação, tratamento e processamento dos resultados, realizando uma análise estatística e de modelação;

- Síntese e correlação dos resultados obtidos e enquadrar os mesmos no estudo de resistência ao corte e demais parâmetros obtidos para os setores de estudo (e, se possível, correlacionar com o zonamento geotécnico).

Esta dissertação será organizada em 5 grandes capítulos, como se pode ver no seguinte fluxograma (figura 1), no qual é sucintamente descrito o conteúdo dos mesmos.

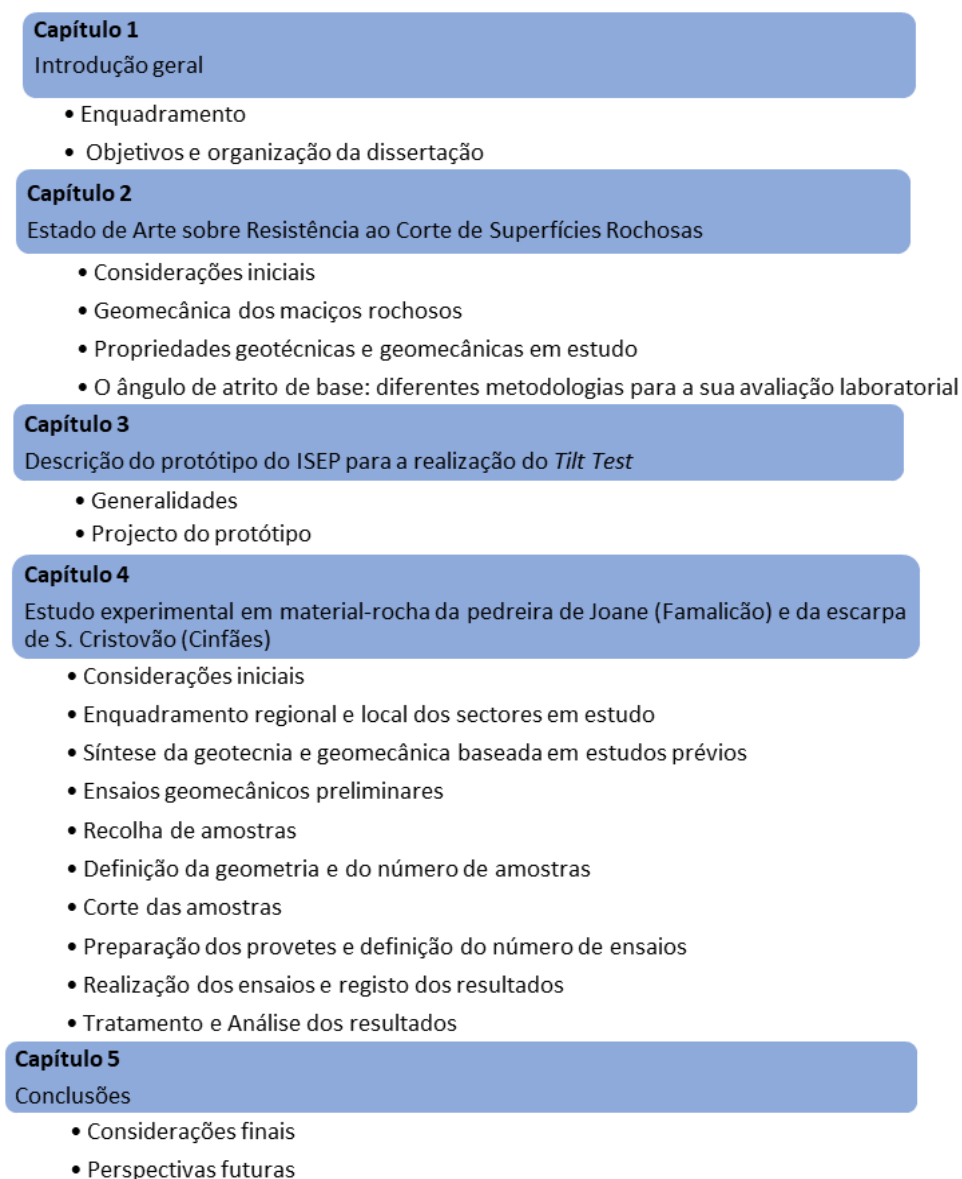


Figura 1 – Organização da dissertação.

Capítulo II.

Estado de Arte sobre Resistência ao Corte de Superfícies Rochosas

(página propositadamente em branco)

2. Estado de Arte sobre Resistência ao Corte de Superfícies Rochosas

2.1. Considerações iniciais

Em geotecnia, pretende-se estudar o comportamento mecânico dos materiais geológicos naturais — rochosos e terrosos — e até geomateriais, para se projetar e dimensionar os mesmos para fins de engenharia (e.g., Price, 2009; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Barton, 2012, 2016; Rocha, 2013; Palmström & Stille, 2014). Alguns desses elementos consistem em material rochoso, que aflora na superfície ou subsuperfície terrestre, constituído por uma ou mais família de rochas, podendo ter uma gênese ígnea, sedimentar ou metamórfica e, por sua vez, por inúmeros minerais consoante o processo geológico e geodinâmico associado (e.g., Dinis da Gama, 1995; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé 2016; Norbury, 2016).

Nas investigações geotécnicas de maciços rochosos para fins de engenharia são necessários estudos de caracterização, projeto e dimensionamento quer para a sua utilização como elemento estrutural, uma vez que nas rochas se apoiam a maior parte das infraestruturas e nelas se realizam escavações para fins de construção civil ou de exploração mineira (Brown, 1991; Rocha, 2013), quer para o seu uso como georrecurso, recorrendo-se ao seu desmonte, fragmentação e processamento (Dinis da Gama, 1995; López Jimeno et al., 1995).

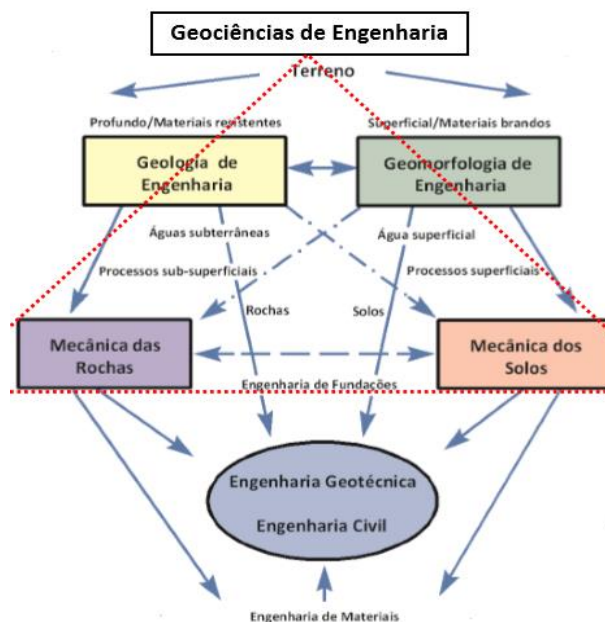


Figura 2 – Esquema da interação dinâmica das disciplinas das geociências da engenharia (adaptado de Griffiths, 2014).

Assim, em engenharia, o estudo dos materiais rochosos é categorizado no âmbito da mecânica das rochas, que consiste, em traços gerais, no estudo teórico-prático das propriedades e

comportamento mecânico dos materiais rochosos e a sua resposta às forças aplicadas em seu redor (Hoek, 2007; Rocha, 2013; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Palmström & Stille, 2014).

A mecânica das rochas possui uma relação estreita com outras disciplinas das geociências da engenharia (como a geologia de engenharia, a hidrogeologia e a cartografia de geologia de engenharia), e da mecânica dos solos, para o estudo das rochas brandas e solos (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Na figura 2 pode-se ver contextualizada a mecânica das rochas na dinâmica das geociências da engenharia.

2.2. Geomecânica de maciços rochosos

Na natureza o material-rocha aflora sob a forma de maciço rochoso (ou afloramento). Este último resulta do conjunto do referido material-rocha (a textura da matriz rochosa, constituída pela trama dos minerais com diferentes graus de granularidade) com as discontinuidades (planos de anisotropia) que o afetam (e.g., Hoek, 2007; Rocha, 2013; Palmström & Stille, 2014; Barton & Quadros, 2015).

Em termos mecânicos, teoricamente, o material-rocha assume-se que seja um meio homogêneo, contínuo e isotrópico. Porém, na realidade, a presença das discontinuidades faz com que os maciços rochosos sejam heterogêneos, descontínuos e anisotrópicos, sendo estas as premissas para considerar as rochas como material de engenharia (Priest, 1993; Eberhardt, 1998). E como referem Barton & Quadros (2015) as anisotropias estão “por todo o lado”. Na figura 3 representam-se esquematicamente esses conceitos.

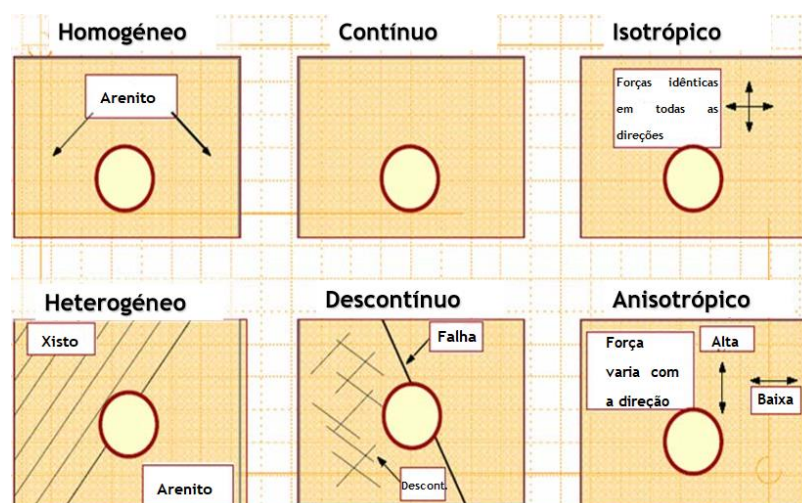


Figura 3 – Esquema da interpretação mecânica do material-rocha e maciço rochoso (adaptado de Eberhardt, 1998).

2.2.1. Fatores que influenciam os maciços rochosos

Os fatores que influenciam os maciços rochosos são os seguintes (e.g., Brown, 1991; Aires-Barros, 1991; Hoek, 2007; Ferrer & González de Vallejo, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Rocha, 2013):

- Matriz rochosa (rocha intacta) – propriedades físicas e geométricas e as características geológicas;
- Descontinuidades (anisotropias) – compartimentação estrutural do maciço;
- Estado de tensão – comportamento reológico dos materiais;
- Geofluidos – permeabilidade e fluxo de água;
- Tempo geológico – evolução temporal dos maciços aos processos geodinâmicos.

Analisando cada um destes fatores em particular, e os parâmetros que estes em particular influenciam:

2.2.1.1. Matriz rochosa

A matriz rochosa possui várias propriedades — composição mineralógica, densidade, petrofábrica, porosidade, permeabilidade, alterabilidade, dureza que influem diretamente na **resistência e deformabilidade**, consequência das condições e dos processos geodinâmicos sofridos pelas rochas ao longo da sua história geológica (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

O comportamento mecânico é, também, função de outros fatores como a hidrogeologia, as condições ambientais (clima e fenômenos meteorológicos) que atuam sobre o meio geológico e originam processos de alteração e meteorização, que modificam as propriedades iniciais do material-rocha.

2.2.1.2. Descontinuidades

As descontinuidades são o fator mais importante e determinante para o estudo do comportamento físico e mecânico dos maciços rochosos. Como se disse anteriormente, estas são responsáveis pela heterogeneidade e anisotropia das rochas (Hoek, 2007; Rocha, 2013).

O estudo das descontinuidades é essencial na mecânica das rochas — os planos de fragilidade (superfícies de fraqueza estrutural) controlam os processos de deformação e rotura nos maciços

rochosos, especialmente na sub-superfície, que é onde se realizam a esmagadora maioria das obras de engenharia, influenciando na sua dimensão e estabilidade (figura 4).

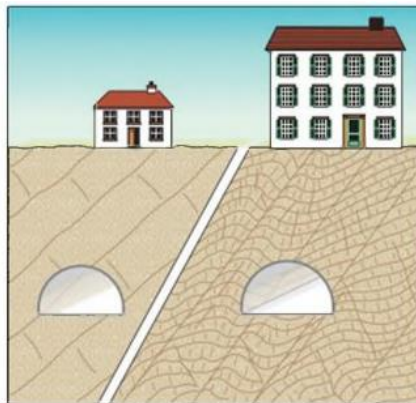


Figura 4 – Relação entre as descontinuidades e a dimensão das obras de engenharia (segundo González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A competência (expressa, vulgarmente, pela sua *dureza*) da rocha está diretamente relacionada com a influência das descontinuidades no comportamento físico-mecânico do maciço rochoso. Ou seja, em maciços rochosos formados por blocos de rochas duras, com elevadas propriedades de resistência, as descontinuidades controlam os processos de quebra e deformação, enquanto que em maciços descontínuos com matriz rochosa mais branda, as diferenças no comportamento não são tão relevantes, nomeadamente no que diz respeito à resistência (figura 5).

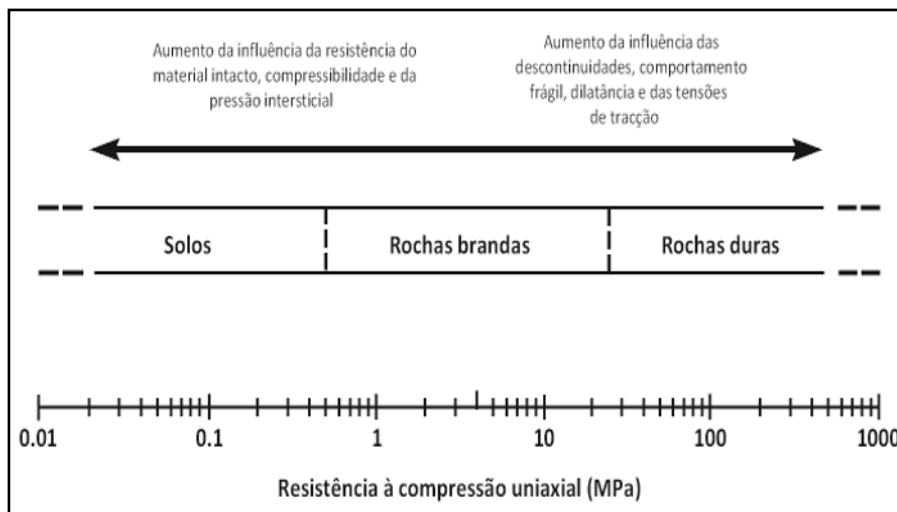


Figura 5 – Influência das descontinuidades na resistência à compressão uniaxial em função da dureza da rocha (adaptado de Chaminé, 2016).

2.2.1.3. Estado de tensão

A construção de obras de engenharia originam uma mudança estado de tensão a que estão submetidos os maciços rochosos inicialmente, num espaço de tempo muito curto relativamente à escala dos processos geológicos, originando interações mútuas entre a libertação ou redistribuição do campo de tensões e as estruturas nos maciços rochosos (Rocha, 2013).

É, portanto, necessário reconhecer-se que já existe na rocha um estado de tensão prévio *in situ* quando se aplica uma carga a um maciço rochoso. No caso de uma escavação subterrânea (mina ou túnel) não existem novas cargas aplicadas, porém as tensões pré-existentes são redistribuídas.

2.2.1.4. Geofluidos

Os geofluidos, água ou voláteis/água, presentes nos maciços rochosos, levam à redução da sua competência, gerando pressões no mesmo (pressão hidrostática), alterando as suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, dificultando as escavações superficiais ou subterrâneas, bem como promovendo a alterabilidade dos maciços (Aires-Barros, 1991). Estes fluidos têm origem geralmente subterrânea, devendo-se estudar o maciço essencialmente ao nível da sua **permeabilidade e fluxo** (CFCCF, 1996; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

2.2.1.5. Tempo geológico

As diferenças brutais entre o tempo geológico (milhões de anos) e o tempo à escala humana (anos/meses) são um aspeto importante a considerar no que diz respeito às consequências que as obras de engenharia têm sobre o comportamento do terreno (Dinis da Gama, 1995; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Como já foi referido, as obras de engenharia “aceleram” determinados processos que de uma forma natural levariam um tempo geológico assinalável (milhares a milhões de anos). Exemplos de situações desta natureza — a meteorização de superfícies rochosas escavadas, a libertação de tensões naturais e abertura de descontinuidades, a modificação de fluxos de água, entre outros, levando, por isso, à diminuição da competência dos maciços em períodos muito curto.

É, por isso, importante levar em conta também este fator temporal, uma vez que as obras de Engenharia são projetadas para uma existência de décadas, e é necessário precaver a diminuição da resistência da rocha ao longo do tempo e aos efeitos, por exemplo, de escorregamentos, de queda de blocos ou de descompressão dos terrenos (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

2.2.2. Descontinuidades e análise geomecânica

Como já se referiu, as descontinuidades são um dos elementos mais importantes para avaliar o comportamento do maciço rochoso. De uma forma global, e de maneira a sistematizar os diferentes tipos de descontinuidades no espectro dos variados materiais rochosos, as descontinuidades podem ser (Ferrer & González de Vallejo, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Rocha, 2013):

- *planares macroscópicas*: fracturas, diaclases (ou juntas), fissuras, falhas, foliação sedimentar e/ou tectónica (e.g., estratificação, laminação; clivagem, xistosidade, foliação gnáissica e milonítica), diques, filões ou contacto geológico;
- *planares microscópicas*: microfissuras, poros, orientação de minerais;
- *lineares*: estrias de falha (“slickensides”), lineação de intersecção, lineação mineral, eixo de dobra.

Na tabela 1 encontra-se uma sistematização das descontinuidades.

Tabela 1 – Sistematização das descontinuidades (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de estratificação	Falhas
	Planos de laminação	Filões
	Planos de xistosidade	Discordâncias
	Diaclases e fissuras	
Lineares	Intersecção de descontinuidades planares	Eixos de dobras
	Lineações	Fibrosidade mineral

2.2.2.1. Parâmetros das descontinuidades em estudo

Nos maciços de rocha dura, num contexto de utilização nas várias obras de engenharia e/ou explorações da rocha como georrecurso, é comum fazer, para análise geotécnica e geomecânica, um levantamento expedito das características das descontinuidades representativas num dado maciço para posteriormente ser analisado em gabinete.

Esse levantamento é executado através da realização da técnica de amostragem linear – “scanline sampling technique” (e.g., Terzaghi, 1965; ISRM, 1981; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé et al., 2013, 2015, 2016; Chaminé, 2016). Em traços gerais, esta técnica consiste na utilização de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço rochoso (em regra, no hasteal direito da galeria), procedendo-se à cartografia sistemática dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos das descontinuidades que a intersejam, de forma a avaliar o grau de

compartimentação e caracterização geomecânica segundo as recomendações propostas, nomeadamente, pela ISRM (1978, 1981), GSE (1995) e CFCFF (1996).

Os vários parâmetros, para além dos intrínsecos das descontinuidades, dividem-se segundo são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Principais parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos relativos às descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981; CFCFF, 1996; Hoek, 2007; Ferrer & González de Vallejo, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Parâmetro	Tipo	Descrição
Geológicos	Litologia	A litologia é a designação petrofísica da formação geológica em questão, em termos de classificação e descrição petrológica.
	Tipo de descontinuidade	As mais frequentes são as diaclases e falhas. As primeiras são os planos mais frequentes nos maciços rochosos e correspondem a superfícies de fracturação ou rotura no maciço ao longo das quais não existe rejeito entre os blocos rochosos. As falhas são descontinuidades singulares que correspondem a planos de rotura ou fracturação com deslocamento relativo entre blocos. Poder-se-á ainda considerar outras descontinuidades tais como, fissuras, foliações tectónicas (clivagem, xistosidade) ou sedimentares (laminações, estratificação) e contactos geológicos.
	Atitude geológica	A atitude geológica engloba a direção e a inclinação de uma descontinuidade. A direção é o ângulo que uma linha horizontal define com o Norte magnético. A inclinação é o ângulo que a reta de maior declive do plano (perpendicular à direção) define com o plano horizontal.
Geotécnicos	Grau de alteração (W)	Desagregação e decomposição da rocha, levadas a cabo por agentes físico-químicos naturais, transformando essa rocha noutro produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente.
	“Fracture intercept” (F) / Espaçamento	O grau de fracturação corresponde à distância média medida entre descontinuidades, independentemente da família, sucessivas segundo a interseção com uma linha de amostragem. O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes que pertençam à mesma família.
	Comprimento/Continuidade (L)	Extensão em área de uma descontinuidade, dando a noção do seu comprimento, sendo a sua medição realizada com recurso a uma fita graduada.
	Rugosidade (R)	A rugosidade representa a aspereza nas superfícies das descontinuidades. Este parâmetro tem influência na resistência ao corte apresentada nas superfícies, isto é, quanto maior a rugosidade, maior será a resistência ao corte.
	Abertura	Medida na perpendicular entre as paredes contíguas de uma descontinuidade e tende a diminuir com a profundidade, até se tornar completamente fechada, dado o seu grau de confinamento.
	Curvatura (C)	Propriedade física das descontinuidades, onde define a curvatura que a descontinuidade realiza ao longo do seu desenvolvimento.
	Terminação (T)	Corresponde à forma como a descontinuidade termina no maciço, se na obscuridade (O), numa outra descontinuidade (D) ou simplesmente na rocha (R).
	Preenchimento	Existência de material entre as paredes das descontinuidades. Esse material pode ser rocha esmagada, quartzo, argila, no seu estado duro ou mole e também um preenchimento silto-arenoso, entre outros.
Percolação de água (Gw)	Está relacionada com o fluxo de água e a humidade livre, visível em descontinuidades individuais ou no maciço rochoso de modo geral	
Geomecânicos	Resistência (S)	O parâmetro da resistência depende da matriz rochosa, do grau de alteração e da existência ou não de preenchimento. A resistência pode ser estimada pela resposta de um toque com o martelo de Schmidt, aplicado diretamente no plano de descontinuidade.

2.2.3. Propriedades petrofísicas e mecânicas

Após o conhecimento geológico e geotécnico, é necessário, então, estudar as propriedades mecânicas dos maciços rochosos direcionados para a sua utilização em engenharia. Para a tal é necessária a determinação de várias propriedades e respetivos parâmetros (tabela 2).

Tabela 3 – Propriedades da matriz rochosa (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Propriedades petrofísicas		
Propriedade	Parâmetro	Método de determinação
Composição mineralógica	-	Descrição macroscópica Difração de raios-X Análises petrográficas Análises geoquímicas
Petrofábrica e textura	-	
Tamanho do grão	-	
Cor	-	
Porosidade	n	Técnicas de laboratório
Peso específico	γ	
Humidade relativa	-	
Permeabilidade	Coeficiente de permeabilidade (k)	Ensaio de permeabilidade
Durabilidade	Índice de alterabilidade	Ensaio de alterabilidade
Alterabilidade		
Propriedades mecânicas		
Propriedade	Parâmetro	Método de determinação
Resistência à compressão simples	σ_c	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de carga pontual (PLT) Martelo de Schmidt
Resistência à tração	σ_t	Ensaio de tração
Velocidade de ondas sísmicas	V_p V_s	Medição de velocidade de ondas elásticas em laboratório
Resistência ao corte	Coesão (c)	Ensaio de compressão triaxial
	Ângulo de atrito (ϕ)	Ensaio de basculamento - <i>Tilt test</i>
Deformabilidade	Módulo de deformabilidade (E, ν)	Ensaio de compressão uniaxial Ensaio de velocidade sónica

A principal propriedade que irá ser explorada nesta dissertação será a resistência ao corte, no entanto, através da realização de ensaios complementares, também haverá lugar a análise da resistência à compressão simples.

2.3. Ângulo de atrito de base – diferentes metodologias para a sua determinação laboratorial

O ângulo de atrito de base desempenha um papel fundamental na determinação da resistência ao corte das descontinuidades presentes em maciços rochosos, sendo utilizado em estudos de estabilidade de taludes projetados ou naturais (e.g., Alejano et al., 2010, 2011, 2012a; Muralha et al. 2014) e escavações subterrâneas (Alejano et al., 2008). É também usado para calcular valores de fator de segurança adequados para obras de Engenharia (ISRM, 2007, 2015). O conceito que deu origem à componente de atrito básico da resistência ao corte está relacionado com o ângulo de repouso observado para corpos sólidos de materiais granulares em superfícies inclinadas (Barton & Choubey, 1977; Stimpson, 1981; Cruden et al., 1989; Barton & Bandis, 1990; Aydan et al., 1992; Hencher & Richards, 2015; Barton, 2016).

O valor do ângulo de atrito de base (ϕ_b) foi estudado para diferentes tipos de rochas, resultando em valores típicos de 25 a 30 graus para rochas sedimentares e de 30 a 35 graus para rochas ígneas e metamórficas. Pode ser calculado em laboratório a partir de *ensaios de basculamento* (ou inclinação) em superfícies planas (Alejano et al., 2012a).

Até ao momento, não existe nenhum método recomendado pela ISRM de forma a estimar com confiabilidade o ângulo de atrito básico (Ulusay & Hudson, 2007), embora na mecânica das rochas foram utilizadas várias técnicas diferentes como métodos sugeridos, como se verá mais à frente (e.g., Barton & Choubey, 1977; Stimpson, 1981; Alejano et al., 2012a,b; Hencher, 2012; Muralha et al. 2014).

2.3.1. Métodos empíricos e analíticos

Nos anos 70 e 90, do século XX, Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis (1990), entre outros, analisaram cuidadosamente o comportamento do pico de tensão das superfícies rugosas sem preenchimento e propuseram uma expressão empírica para descrever esse comportamento:

Equação 1 – Resistência ao corte de uma descontinuidade (Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis 1990).

$$\tau = \sigma_n \times \tan[\phi_r + JRC \times \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n})]$$

Onde:

τ – resistência ao corte da descontinuidade

σ_n – tensão normal aplicada à descontinuidade

JRC – coeficiente de rugosidade da descontinuidade

JCS – resistência à compressão da superfície da descontinuidade

ϕ_r – ângulo de atrito residual

O ângulo de atrito residual, ϕ_r é estimado de acordo com Barton & Choubey (1977) como segue:

Equação 2 – Ângulo de atrito residual (ϕ_r), por Barton & Choubey (1977).

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \times \left(\frac{r}{R}\right)$$

onde r é o número de ressaltos do martelo de Schmidt registado para uma superfície de amostra (húmida), como aqueles normalmente encontrados no campo, e onde R é o número de ressalto do martelo de Schmidt registado para superfícies cortadas (provetes) do mesmo material-rocha. Neste ponto, surgiu, então, a necessidade de determinar um valor para o ângulo de atrito base (ϕ_b).

Para obter, então, esse valor para o ângulo de atrito base, e antes de se efetuarem ensaios mecânicos, é necessário contextualizar, de forma sucinta, em termos teóricos as variáveis envolvidas.

2.3.2. Antecedentes teóricos

Considerando um bloco de rocha com peso W , comprimento l , largura w e altura h , repousando sobre um plano, basculando β graus ao longo da direção do comprimento do bloco, assumindo uma distribuição linear da tensão sobre a superfície de contato, as tensões máximas e mínimas nas arestas inferiores do bloco são definidas (Muralha, 1995; citado por Alejano et al., 2012a) como:

Equação 3 – Tensões nas arestas inferiores de um bloco de rocha (máxima) (Muralha, 1995).

$$\sigma_{max} = \frac{W}{wl} \cos \beta \left(1 + \frac{3h}{l} \tan \beta\right)$$

Equação 4 – Tensões nas arestas inferiores de um bloco de rocha (mínima) (Muralha, 1995).

$$\sigma_{min} = \frac{W}{wl} \cos \beta \left(1 - \frac{3h}{l} \tan \beta\right)$$

Para garantir que essas tensões sejam compressivas (positivas) em toda a superfície, a relação entre o comprimento e altura (l/h) deve ser pelo menos três vezes maior que a tangente do ângulo de inclinação, caso contrário, ocorrerão tensões de tração. Essa relação é facilmente deduzida da equação 4 considerando que σ_{min} deve ser maior que 0. Além disso, no caso de ângulos de inclinação mais altos, uma vez que as descontinuidades não toleram tensão, as tensões compressivas atuariam apenas sobre uma superfície de menor comprimento do bloco dado por (Alejano et al., 2018):

Equação 5 – Dimensão da superfície de menor comprimento do bloco (Alejano et al., 2018).

$$l' = \frac{3}{2}l(1 - \frac{h}{l} \tan \beta)$$

Ainda assumindo uma distribuição de tensão linear no contacto reduzido, a tensão máxima:

Equação 6 – Tensão máxima no bloco (Alejano et al., 2018).

$$\sigma_{max} = \frac{4W \cos \beta}{3w(l' - h \tan \beta)}$$

aumentaria rapidamente até que o deslizamento ocorresse quando a relação l/h atingisse $\tan \beta$, o que é bem conhecido a partir das condições de equilíbrio limite (Sagasetta, 1986; Wyllie & Mah, 2004). Se a mesma análise for realizada para um bloco em forma de disco, com largura h e o diâmetro l , a relação l/h deve ser pelo menos quatro vezes maior que a tangente do ângulo de inclinação para garantir que as tensões sejam positivas (compressivas) (Alejano et al., 2018).

2.3.3. Método de Stimpson (1981)

A partir da necessidade de se estimar valores para o ângulo de atrito de base, Stimpson (1981), utilizou testemunhos de rocha para realizar *ensaios de basculamento* (ou inclinação) com amostras de forma cilíndrica colocadas sobre outras duas dimensões iguais. Existiram também outras propostas depois da sugestão de Stimpson, porém, não fornecem indicações completas para a normalização dos *ensaios de basculamento* (pormenores em Bruce et al., 1989). Observou-se, no entanto, que os valores de ϕ_b obtidos pareciam ser muito altos (não conservativos) em comparação com a generalidade dos valores que se verificavam na literatura.

O método de Stimpson baseou-se no uso de três amostras cilíndricas (como recomendado para ensaios Resistência Compressão Uniaxial (UCS); Ulusay & Hudson, 2007), 54 mm de diâmetro e

com altura pelo menos o dobro do diâmetro. Uma amostra foi colocada sobre as outras duas, de modo que ela tivesse uma geratriz em contacto com cada uma das restantes (figura 6a, 6b). A figura 6 mostra os ensaios de basculamento e disco de inclinação para ardósia e granito, respetivamente.

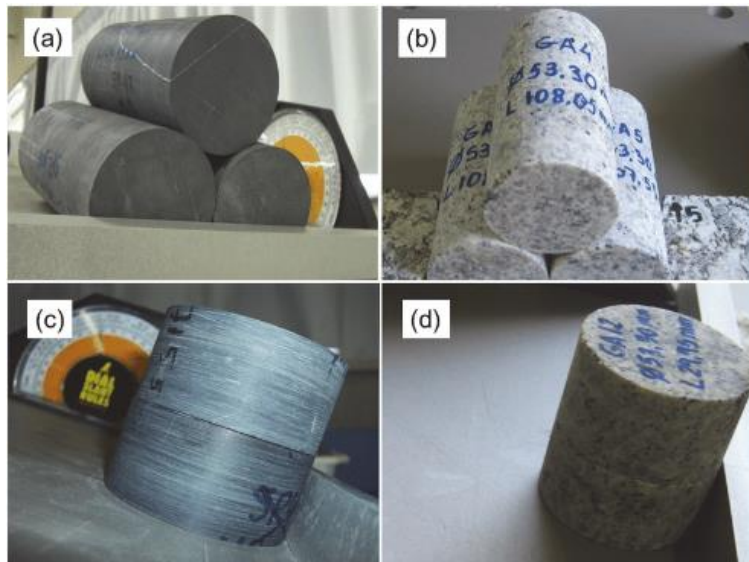


Figura 6 – Ensaios de basculamento realizados pelo método original de Stimpson com cilindros (a/b) e discos (c/d); segundo Alejano et al. (2012a).

Sendo β a inclinação da plataforma no momento do deslizamento, como proposto por Stimpson (1981), o ângulo de atrito básico, para os provetes cilíndricos, viria:

Equação 7 – Ângulo de atrito básico (ϕ_b) para provetes cilíndricos, a partir do β (Stimpson, 1981)

$$\phi_b = \tan^{-1}\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \tan \beta\right)$$

Uma variante deste método consiste em utilizar, desta feita, dois provetes do tipo disco (cortados com uma serra de disco) localizada uma sobre a outra com um contato planar (Fig. 6c, 6d). As amostras utilizadas apresentaram 54 mm de diâmetro e uma altura aproximadamente igual a metade do seu diâmetro. Neste caso, o ângulo de atrito básico é obtido diretamente através do ângulo no qual o deslizamento ocorre (Alejano et al., 2012a).

2.3.4. Método sugerido por Alejano et al. (2018)

Alejano et al. (2018) formularam um método sugerido para a determinação do ângulo de atrito base, baseado no anteriormente referido método de Stimpson (1981), porém utilizando os

seguintes tipos de provetes: tipo placa (e.g., Horn & Deere, 1962; Coulson, 1972; Hencher, 1976; Aydan et al., 1992; Alejano et al. 2012a; Kim et al., 2016); e do testemunho longitudinal do corte (Barton, 1973), cada um dos itens acima com referência a um par de contatos de superfície planares e três testemunhos (e.g., Stimpson, 1981; González et al. 2014; Li et al. 2019) e dois arranjos centrais (e.g., Barton, 2012; Ruiz & Li, 2014). Neste método a velocidade de inclinação da plataforma de ensaio será constante (fig. 7).

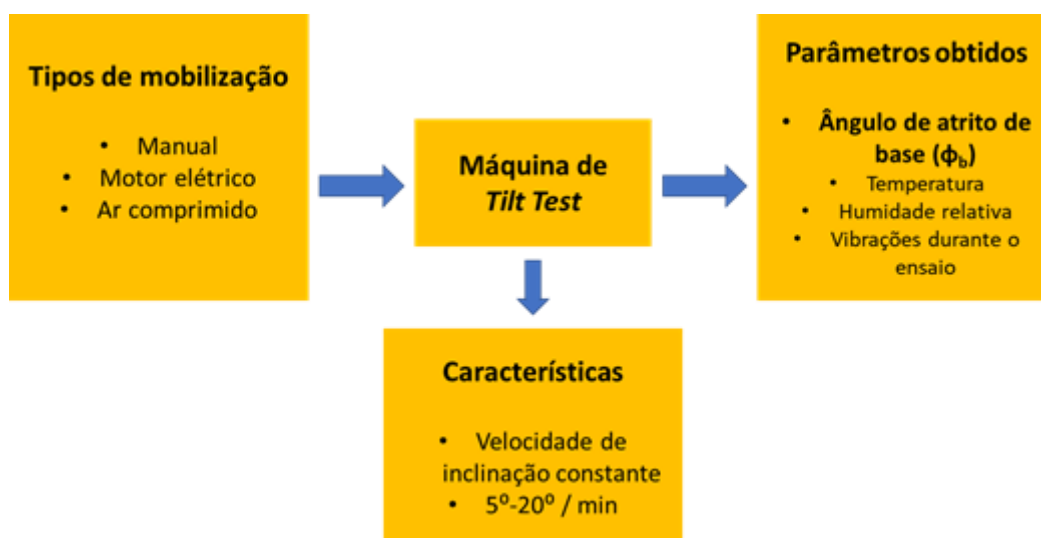


Figura 7 – Tipos de mobilização, características recomendadas e parâmetros obtidos numa máquina de *Tilt test*. (adaptado de Vídeo ISRM – Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests (ISRM & U.Vigo): <https://www.isrm.net/gca/index.php?id=1360>)

2.3.4.1. Equipamento do ensaio

A determinação do ângulo de atrito básico de discontinuidades planas de rochas pode ser realizada por meio de vários aparelhos que diferem em algumas características, mas consistem essencialmente em um plano rígido, que pode ser girado em torno de um eixo (Alejano et al., 2018). Este plano deve ser horizontal no início do movimento de rotação e uma velocidade de inclinação idealmente constante e pré-estabelecida deve ser usada. O equipamento tem de ser capaz de parar o processo de inclinação quando desejado. As principais diferenças entre equipamentos referem-se ao sistema de mobilização (por meio de um motor elétrico, um cilindro de elevação operado por ar comprimido ou um parafuso de acionamento manual ou redutor, entre outras possibilidades). No capítulo seguinte, irá ser descrito um protótipo (ISEP) realizado para realizar o *tilt test*, construído satisfazendo estas premissas.

Com base em estudos anteriores sobre o impacto da velocidade de ensaio em resultados com diferentes tabelas de inclinação, observou-se que, enquanto a taxa de inclinação tem pouco efeito sobre os resultados usando tabelas de inclinação com movimento suave da plataforma

inclinada, pode ter um efeito significativo sobre os resultados quando vibrações ocorrem na plataforma durante o ensaio (e.g., USBR, 2009; Pérez-Rey et al., 2016; Alejano et al., 2017, 2018). Consequentemente, velocidades de inclinação entre 10° e 20° / min são recomendadas para máquinas com movimento suave (onde as acelerações horizontais máximas devido à vibração são menores de 0,01g) e menores taxas de inclinação na faixa de 5°-10° / min são recomendadas para plataformas operadas manualmente onde vibrações maiores (acima de 0,01g) podem ser exceções (Alejano et al., 2017, 2018).

A mesa basculante deve segurar um dispositivo para medir o ângulo de inclinação com uma resolução mínima de $\pm 0,5^\circ$. Recomenda-se ter um dispositivo para registrar acelerações verticais e horizontais, de forma a monitorizar a vibração e a possível influência da mesma nos resultados (Alejano et al., 2018).

2.3.4.2. Provetes: forma e tamanho

Os provetes retangulares são caracterizados por três dimensões (Alejano et al., 2018): comprimento (l), largura (w) e altura (h), conforme apresentado na figura 8. No que diz respeito à amostra de topo, a relação comprimento / altura (l / h) deste tipo de amostras deve ser superior a 4, mas valores superiores a 6 são altamente recomendados e a relação largura/altura (w / h) é sugerido ser superior a 4. As superfícies de contacto ($l \times w$) devem ser maiores que 50 cm² e a largura do provete (w) deve ser maior que 10 vezes o tamanho do grão do material rochoso, com um mínimo de 50 mm (Alejano et al., 2018).

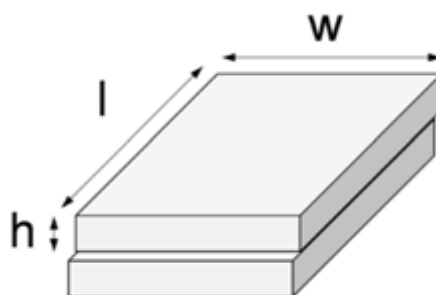


Figura 8 – Representação esquemática dos provetes retangulares utilizados no *tilt test*.

2.3.4.3. Procedimento

Em traços gerais poder-se-á recomendar o seguinte procedimento no *ensaio de basculamento/tilt test* (Alejano et al., 2018):

- A parte inferior do(s) provete(s) deve(m) ser fixado(s) à plataforma basculante e a horizontalidade da superfície ou dos contactos deve ser assegurada por meio de um nível de bolha ou de nível eletrónico;
- Antes de cada repetição do *ensaio de basculamento* (cinco ensaios são recomendados em cada conjunto de superfícies de contacto), a superfície do provete deve ser limpa e o pó de rocha deve ser removido com um pincel macio;
- A parte superior do provete deve ser colocada em cima da (s) outra (s) peça (s) com suas superfícies correspondentes em contato e a posição relativa de todas as peças do provete deve ser verificada, a fim de ser reproduzível em subseqüentes repetições. A direção de deslizamento deve estar ao longo da dimensão máxima do provete (l);
- Registo da vibração da mesa basculante através da utilização de um medidor de vibrações (por exemplo, recorrendo a uma aplicação de *smartphone*);
- Registo do ângulo da mesa basculante no início do movimento deslizante até uma precisão mínima de 0,5°;
- A temperatura (°C) e a humidade relativa do ar (%) devem ser registadas durante as repetições;
- Uma velocidade rotacional fixa constante, seleccionada do intervalo de 5° a 20°/min, é usada para bascular as amostras até que a parte superior da amostra comece a deslizar. Nesse ponto, o processo é interrompido;
- A distância máxima de deslizamento não deve exceder 10% do comprimento máximo da amostra (l), como mostrado na figura 9, visando minimizar o desgaste ou o polimento da superfície de contacto;
- Registrar o ângulo de inclinação β , como a diferença entre o ângulo quando o deslizamento começa e o ângulo na posição horizontal.

Recomenda-se executar cinco repetições em cada superfície de contato e usar a *mediana* para obter o resultado final. Recomenda-se assim o cálculo do estatístico *mediana* em vez da *média*

para evitar erros associados à ocorrência de ensaios descontextualizados. Na figura 9 apresenta-se esquematicamente a movimentação relativa dos provetes.

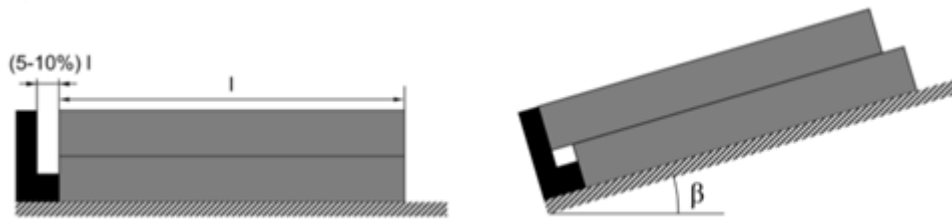


Figura 9 – Representação esquemática da movimentação dos provetes durante o *tilt test*.

Capítulo III.

Descrição do protótipo (ISEP) para a realização do *Tilt Test*

(página propositadamente em branco)

3. Descrição do protótipo (ISEP) para a realização do *Tilt Test*

3.1. Generalidades

Para efetuar o ensaio do *Tilt test*, como foi proposto por Stimpson (1981) e seguindo o método sugerido por Alejano et al. (2012a), foi necessária, então, a construção de um dispositivo capaz de levar a cabo este mesmo ensaio. O objetivo passava por construir um modelo relativamente simples, ergonômico, e que pudesse ser facilmente manipulável pela mão humana, e de forma que não se perdesse rigor na realização dos ensaios. Na figura 10, poder-se-á observar o primeiro esboço do protótipo ISEP. O trabalho de Santana & Lamas (2006) foi também inspirador para levar a cabo esta tarefa de idealização e construção de um dispositivo de *Tilt Test*.

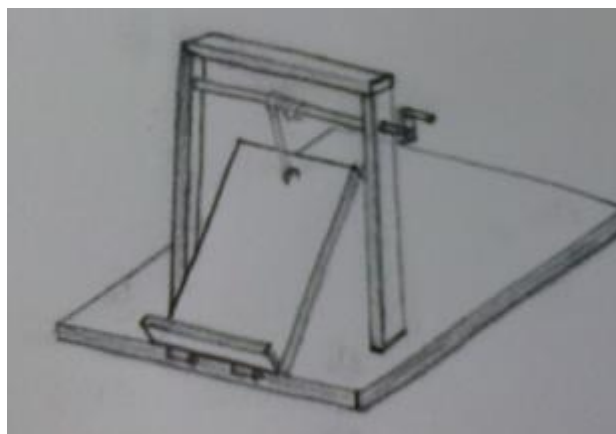


Figura 10 – Primeiro esboço do possível protótipo ISEP para a realização do *Tilt test*.

3.2. Projeto do protótipo (ISEP)

Após um primeiro esboço, foi iniciada a construção do protótipo ISEP, utilizando materiais simples, consistindo no uso de madeira, pregos, parafusos e uma dobradiça metálica. Foi utilizado também um fio de nylon, que servirá para levantar a plataforma que sustenta os provetes. A madeira foi cortada com serrote e levemente lixada.

As figuras 11, 12 e 13 apresentam esquematicamente, em diferentes vistas, o protótipo ISEP finalizado com todas as suas componentes.

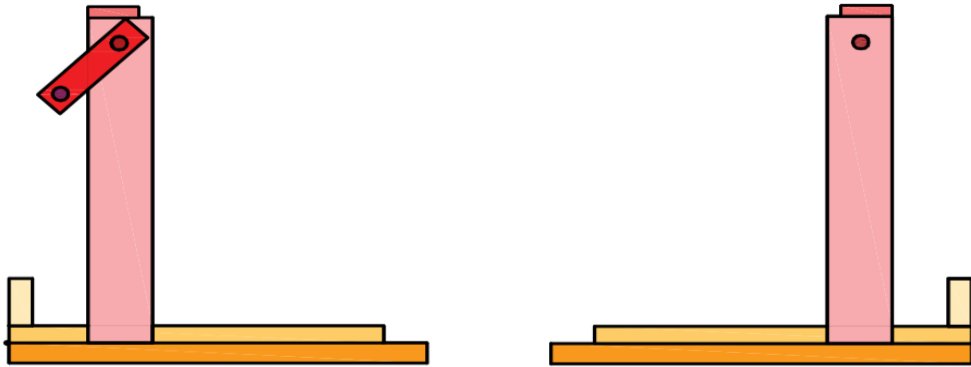


Figura 11 – Vistas em alçado do protótipo ISEP construído para a realização do *tilt test* (software AutoCad).

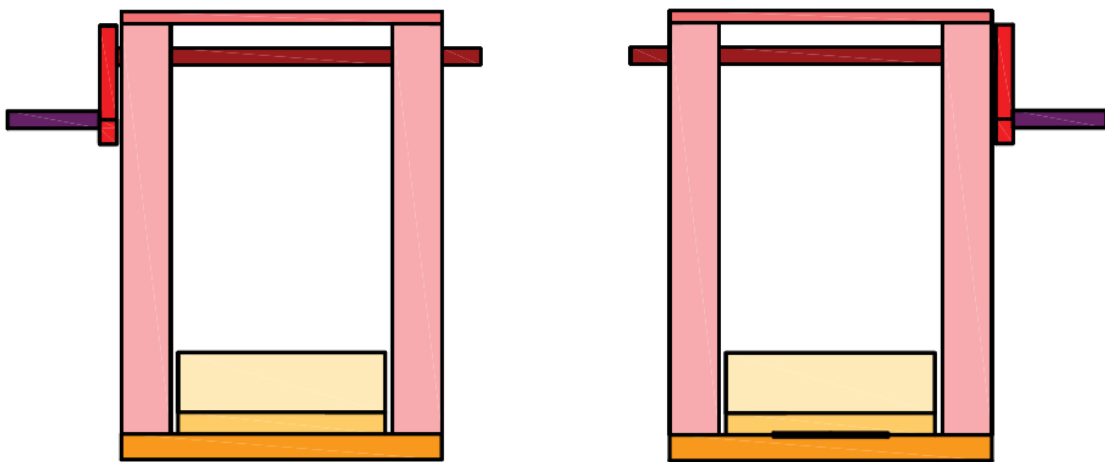


Figura 12 – Vista frontal (figura da esquerda) e traseira (figura da direita) do protótipo ISEP construído para a realização do *tilt test* (software AutoCad).

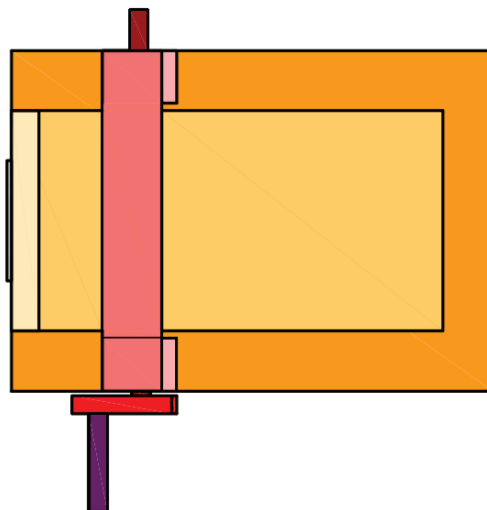


Figura 13 – Vista em planta do protótipo ISEP construído para a realização do *tilt test* (software AutoCad).

No anexo A, encontram-se novamente as peças desenhadas apresentadas acima, com mais pormenor e acompanhadas das medidas de cada secção.

Na figura 14 encontram-se fotografias do protótipo (ISEP) finalizado, onde é possível visualizar a sua composição quase integralmente de madeira, onde os setores são pregados ou aparafusados.



Figura 14 – Fotografias do protótipo ISEP para a realização do *tilt test* finalizado.

(página propositadamente em branco)

Capítulo IV.

Casos de estudo: taludes da pedreira de Joane e da escarpa de S.

Cristóvão

(página propositadamente em branco)

4. Casos de estudo: taludes da pedreira de Joane e da escarpa de S. Cristóvão

4.1. Considerações iniciais

Para os casos de estudo, foi decidido utilizar amostras de material-rocha oriundas de maciços graníticos provenientes de dois locais distintos – taludes da pedreira de Joane, Famalicão (Mendes, 2018) e escarpa de S. Cristóvão, Cinfães (Duarte, 2017). Pretende-se analisar de forma idêntica ambos os conjuntos de amostras, submetendo-os aos mesmos ensaios. Avaliar-se-á também se são idênticas as conclusões obtidas a partir de cada conjunto ou se eventuais diferenças possam estar associadas às diferenças das características identificadas entre os dois conjuntos. Para o efeito retomaram-se as investigações geológicas, geotécnicas e geomecânicas de campo de Duarte (2017) e de Mendes (2018).

4.2. Enquadramento regional

4.2.1. Enquadramento geográfico

4.2.1.1. Pedreira de Joane (Famalicão)

O primeiro conjunto de amostras de material rochoso foi retirado do centro de exploração de rocha, industrial e ornamental, Curviã nº2, que se localiza no distrito de Braga, concelho de Vila Nova de Famalicão, nas freguesias de Portela e de Joane. Este encontra-se circunscrito por Portela (Santa Marinha), a nordeste, por Telhado, a oeste, Airão, a este e sudeste e por Joane, a sul.

As freguesias de Portela e Joane contam com 585 e 8.089 habitantes, respetivamente, albergando uma área de 2,51 km² e 7,25 km². A densidade populacional é de 233,1 hab/km² em Portela e de 1115,7 km² em Joane (INE, 2011).

Na figura 15 encontra-se enquadrado geograficamente o centro de exploração (pedreira), de onde foram recolhidas as amostras para estudo.

Na figura 16 observa-se, em pormenor, alguns dos taludes da pedreira de Joane que foram objeto do presente estudo.

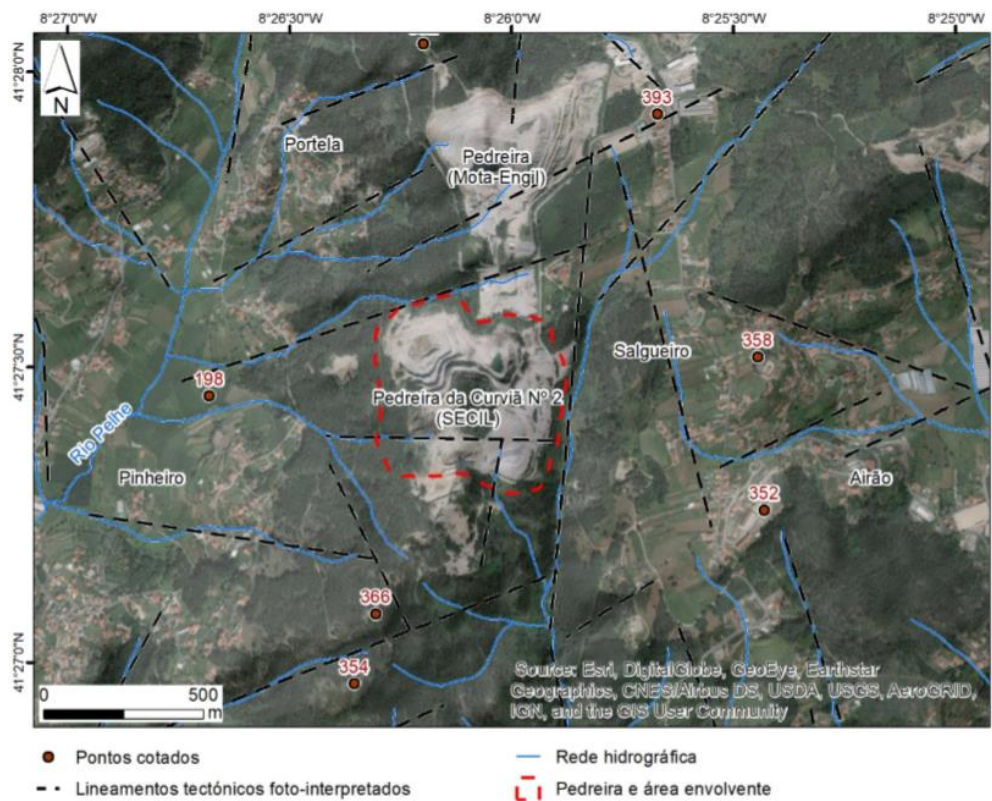


Figura 15 – Enquadramento geográfico do centro de exploração da Secil Britas em Joane, Vila Nova de Famalicão. (adaptado de Mendes, 2018)



Figura 16 – Talude da pedra de Joane com queda de blocos (adaptado de Mendes, 2018)

4.2.1.2. Escarpa de S. Cristóvão (Cinfães)

A escarpa de S. Cristóvão localiza-se no distrito de Viseu, concelho de Cinfães e freguesia de S. Cristóvão de Nogueira (Figura 17). O município é circunscrito a norte por Marco de Canaveses e Baião, a nordeste por Resende, a sul por Castro Daire e Arouca e a Oeste por Castelo de Paiva. A freguesia em questão abrange uma área de 18,2 km², albergando uma população de 1.930 habitantes (INE, 2011), traduzindo-se por uma densidade populacional baixa (ca. 106 hab/km²).

Em termos de altitude, a área em estudo caracteriza-se pela existência de um grande contraste, pois varia entre os 170 m, no lugar de Vila Nova, e os 50 m, na base da escarpa de S. Cristóvão junto à margem do Rio Douro.

Na figura 18 pode-se observar a escarpa de S. Cristóvão em pormenor.

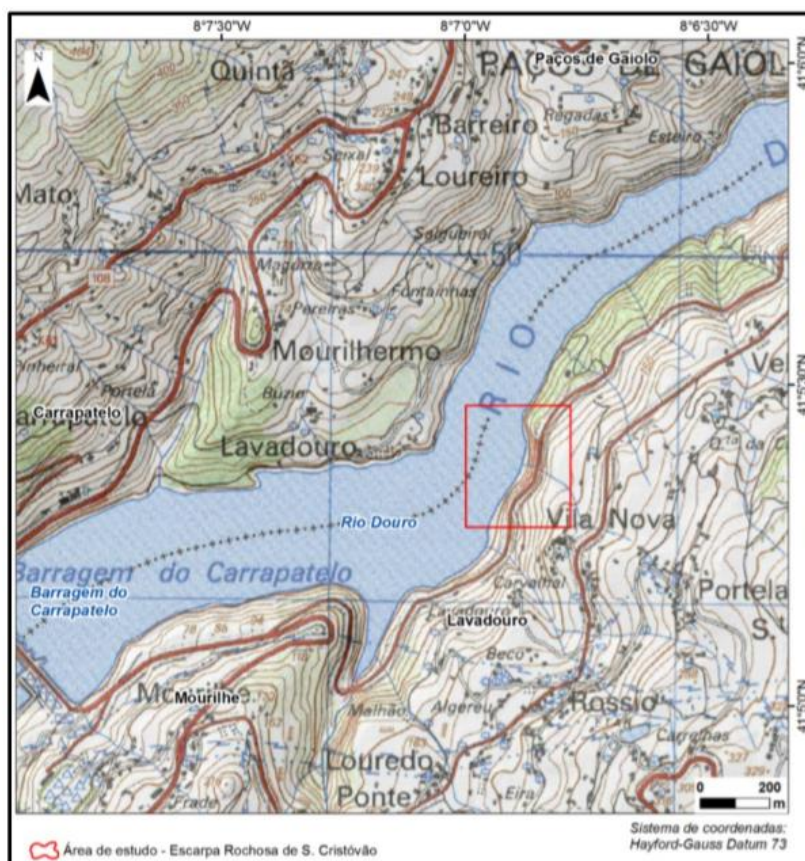


Figura 17 – Enquadramento geográfico da escarpa de S. Cristóvão, Cinfães.



Figura 18 – Escarpa de S. Cristóvão (adaptado de Duarte, 2017)

4.2.2. Enquadramento geológico

4.2.2.1. Pedreira de Joane

A área do centro de exploração Curviã nº2 enquadra-se no extenso granito tardi e pós-tectónico relativo à última fase de deformação Varisca (fase regional F3), intrusivo nos granitos grosseiros e profiróides, verificando-se maior abundância dos granitos de Guimarães e de Santo Tirso, assim como granitos de Burgães, Selho e Arões. Trata-se, portanto, de um granito com tendência monzonítica, por vezes, granodiorítica de grão médio, com tendência profiróide, de duas micas, essencialmente biotítico (Montenegro de Andrade et al., 1986; Pereira, 1992). Este apresenta-se fraturado e ocasionalmente alterado, o que lhe confere uma tonalidade cinza-amarelada.

O granito apresenta uma cor geralmente cinzenta, textura uniforme e diaclasamento relativamente afastado em algumas zonas. As zonas da superfície do maciço apresentam uma tonalidade amarelada que se deve à alteração sofrida, que está também presente em faixas estreitas ao longo de algumas diaclases, onde a rocha com esta tonalidade, amarelada-acastanhada, se circunscreve às zonas de circulação de águas superficiais ou infiltradas. Essa tonalidade está também associada a zonas de esmagamento tectónico (zonas de cisalhamento e caixas de falha), (Mendes, 2018).

No que respeita à granularidade, este maciço apresenta ligeiras variações, nomeadamente o ligeiro aumento do tamanho do grão da matriz rochosa e a tendência profiróide, que se traduz por maior abundância de pequenos cristais feldspáticos maiores que os da matriz, dispersos entre outros de maior tamanho (Mendes, 2018).

Nas figuras 19 e 20 encontram-se os enquadramentos geológicos regional e local, respetivamente, do centro de exploração de Joane.

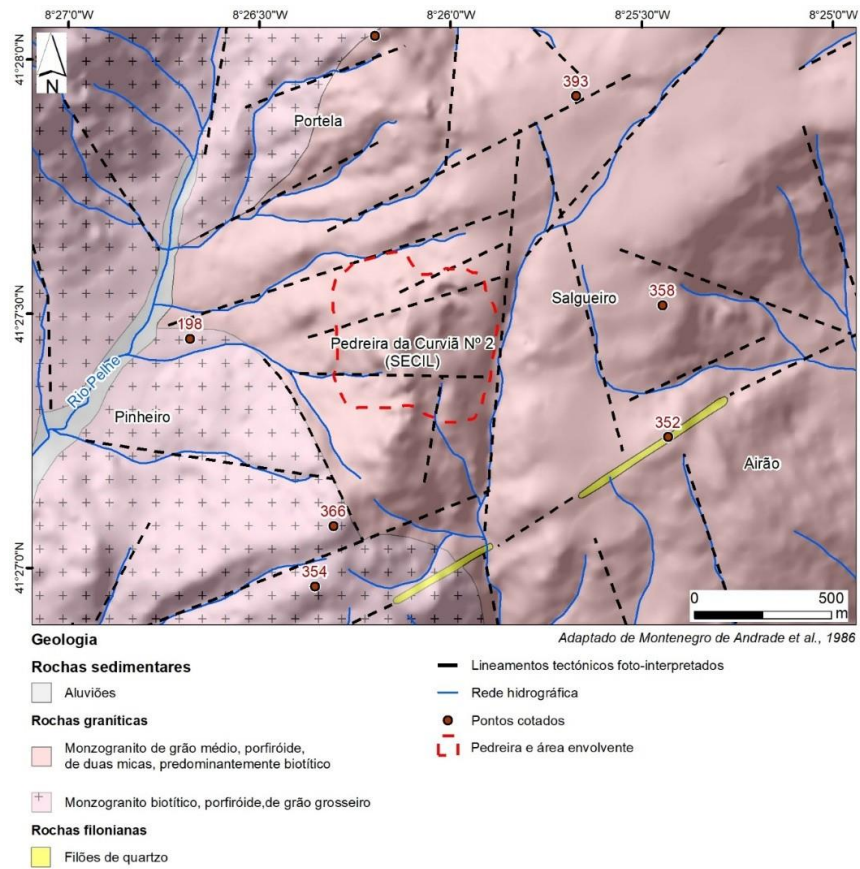


Figura 19 – Enquadramento geológico regional do centro de exploração de Joane (adaptado e revisto de Montenegro de Andrade et al., 1986).

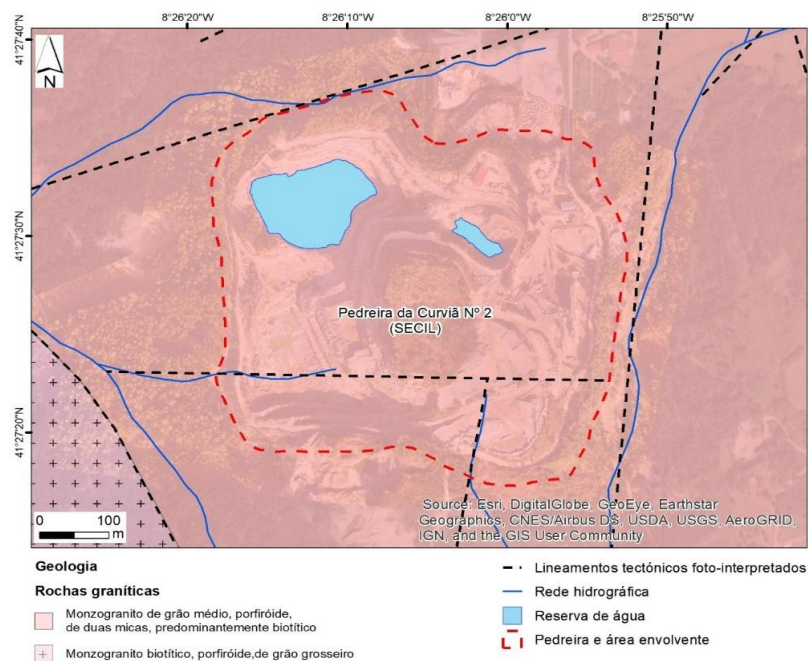


Figura 20 – Enquadramento geológico local do centro de exploração de Joane (geologia adaptada de Montenegro de Andrade et al., 1986).

4.2.2.2. Escarpa de S. Cristóvão

A área de S. Cristóvão enquadra-se numa grande faixa de granitóides Variscos, com orientação geral NW – SE, que se estende desde o Alto Minho até às Beiras (Pereira, 1992). Do ponto de vista geotectónico, a região insere-se na Zona Centro – Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Ribeiro et al., 2007). Em quase toda a área de estudo existe este tipo de rochas, com a exceção de um filão de quartzo que a atravessa na direção NE – SW. Assim, a mancha de rocha que aflora na escarpa de S. Cristóvão é um granito porfiróide de grão grosseiro a médio, predominantemente biotítico, correspondendo a um monzogranito muito rico em feldspato potássico, porfiróide, essencialmente biotítico, contendo raros encraves microgranulares (Teixeira et al., 1968; Duarte, 2017).

Esta unidade geológica é interrompida por um filão de quartzo, que se caracteriza por ter horizontes de alteração em geral muito espessos, que podem atingir por vezes 10 a 20 m, sendo constituídos por materiais arenosos e argilosos resultantes (Teixeira et al., 1968; Teixeira, 1973).

Na figura 21 pode-se ver o enquadramento geológico regional da Escarpa de S. Cristóvão.

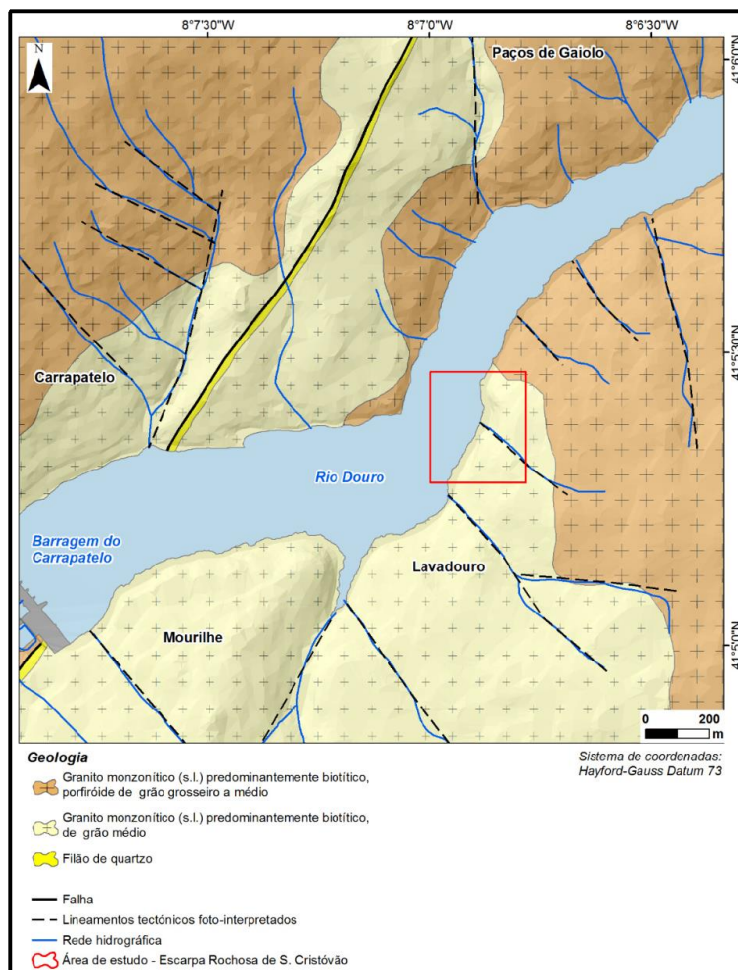


Figura 21 – Enquadramento geológico regional da Escarpa de S. Cristóvão.

4.2.3. Enquadramento hidrogeomorfológico

4.2.3.1. Pedreira de Joane

As desigualdades acentuadas de cota são notáveis devido ao substrato granítico, sendo que no setor norte é perfeitamente visível o vale do Rio Pelhe (afluente do rio Ave), cota mais baixa do concelho, o que torna possível individualizar os vales de alguns dos seus afluentes.

A zona nascente do concelho tem um relevo ondulado, sendo perceptíveis os entalhes da rede hidrográfica com frequentes oscilações de altitude (Mendes, 2018).

Á área de estudo encontra-se inserida na zona norte da bacia hidrográfica do rio Ave, cujo leito corre a sul. O centro de produção, Curviã nº2 encontra-se circunscrito a norte pela bacia hidrográfica do rio Cávado e a Oeste pelo Oceano Atlântico (Mendes, 2018).

As principais linhas de água que passam perto da área de estudo são, a nascente, o rio Pele e a poente, o rio Pelhe, ambos a desaguar a sul.

A permeabilidade dos maciços rochosas presentes na área variam entre média a baixa e a sua produtividade aquífera é considerada algo significativa, com valores entre 1 e 3 L/s.km² (Pedrosa, 1998).

4.2.3.2. Escarpa de S. Cristóvão

A morfologia da área de S. Cristóvão é dominada pela geometria dos lineamentos tectónicos que serão os principais responsáveis pelo arranjo regional do relevo nesta área. Destaca-se um conjunto de estruturas geológicas com direções NE-SW e NW-SE, que parece controlar a instalação e a incisão dos tributários do Douro nesta área, que apresentam vales bastante profundos. Esta disposição evidencia um entalhe quase exclusivo pela rede hidrográfica secundária, a qual corresponde, nalguns casos, a vales de fratura alinhados, típicos do modelado granítico. Tal como noutras regiões graníticas do norte de Portugal, a morfologia da área envolvente apresentada é marcada pela conservação de superfícies de aplanamento, separadas por vertentes abruptas, quer se trate de flancos das elevações quer das vertentes dos vales. Por isso, os cursos de água apresentam um traçado geométrico que resulta da sua adaptação a corredores de esmagamento, materializados por falhas geológicas regionais (Duarte, 2017).

4.2.4. Estudo geológico-geotécnico

4.2.4.1. Pedreira de Joane

O maciço estudado caracteriza-se como monzogranito de grão médio, profiróide, de duas micas, predominantemente biotítico. Este maciço, no geral, apresenta-se são (W_{1-2}) a medianamente alterado (W_3), com cor cinzenta, por vezes com tonalidades amareladas. De uma forma geral, os taludes estudados apresentam uma elevada fraturação, nas quais predominam as diaclases e as falhas. Observou-se fraturação a materializar as descontinuidades, que se encontram medianamente afastadas a próximas, onde predominam as subfaixas horizontais a oblíquas ($<45^\circ$) e subfaixas verticais ($>80^\circ$) (Mendes, 2018).

4.2.4.2. Escarpa de S. Cristóvão

No talude estudado reconheceu-se como unidade litológica o granito monzonítico, predominantemente biotítico, de grão médio (detalhes em Teixeira et al., 1968). Em regra, esta rocha encontra-se pouco a moderadamente alterada (W_{1-2} a W_3), de cor acinzentada, por vezes com tonalidades amareladas. De uma maneira geral, o maciço desta escarpa apresenta um elevado grau de descontinuidades. O conjunto litológico encontra-se muito tectonizado, o que é evidenciado principalmente por uma série de falhas, por vezes com caixas de falha argilosas (“fault gouge”), com uma extensão apreciável, superiores a 50 m. Observou-se, ainda, fraturação a materializar descontinuidades caracterizadas por faixas subhorizontais ($< 25^\circ$) de intensa deformação cisalhante (interpretadas como milonitos) e, por vezes, sub-verticais ($> 80^\circ$) constituindo compartimentos tectónicos (Duarte, 2017).

4.2.5. Síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos

Na tabela 4 encontra-se um quadro-síntese, para ambos os maciços, dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo, recorrendo à técnica de amostragem linear (e.g., Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé et al., 2013, 2015). Para a execução deste estudo seguiu-se as recomendações geotécnicas da ISRM (1978, 1981, 2007, 2015) e da CFCCF (1996), bem como os aspetos de geotecnia de taludes e da geomecânica de maciços rochosos (e.g., Wyllie & Mah, 2004; Alejano et al., 2012a; Wyllie, 2014; Aydin, 2015). Na tabela 4 encontram-se reunidos os dados recolhidos das *scanlines* (Mendes, 2018 e Duarte, 2017).

Tabela 4 – Quadro síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos cartografados ao longo das “scanlines” realizadas na pedra de Joane e na escarpa de S. Cristóvão (compilado de Duarte, 2017 e Mendes, 2018).

Origem do material-rocha		Taludes da pedra de Joane	Escarpa de S. Cristóvão
N.º de descontinuidades		981	138
Parâmetros geológicos	Litologia	Granito predominantemente biotítico, de grão médio	
	Atitude geológica (famílias principais)	N 24°-33° E; 70°-90° SE N 138°-147° E; 65°-80° SW N 70°-79° E; 70°-90° NW	N 110°-140° E; 75°-90° NE N 65°-100° E; 75°-85° SE/NE N 10°-30° E; 65°-85° NW
Parâmetros geotécnicos	Grau de alteração	W₁₋₂ – 74,2% W ₃ – 23,3% W ₄₋₅ – 2,5%	W₁₋₂ – 66,7% W ₃ – 29,7% W ₄₋₅ – 3,6%
	Tipo de descontinuidade	Falha – 12,1% Diaclase – 87,6% Foliação – 0,3%	Falha – 18,1% Diaclase – 81,9% Foliação – 0,0%
	Abertura (mm)	Fechada – 46,6% Aberta – 47,9% Muito aberta – 5,5%	Fechada – 13% Aberta – 45,7% Muito aberta – 41,3%
	Grau de fracturação (F)	F₁₋₂ – 42,6% F ₃ – 29,9% F ₄₋₅ – 27,6%	F₁₋₂ – 81,0% F ₃ – 10,2% F ₄₋₅ – 8,8%
	Continuidade / Comprimento (L) (m)	Muito pouco contínua – 38,6% Pouco contínua – 28,7% Medianamente contínua – 26,5% Contínua – 6,1%	Muito pouco contínua – 2,9% Pouco contínua – 23,9% Medianamente contínua – 68,8% Contínua – 2,9% Muito contínua – 1,4%
	Terminação (T)	Descontinuidade – 68,4% Rocha – 21,5 % Obscura – 10,2%	Descontinuidade – 34,8% Rocha – 0,0 % Obscura – 65,2%
	Curvatura (C)	Plana (C₁₋₂) – 75,9% Curva (C ₃) – 22,0% Muito curva (C ₄₋₅) – 2,0%	Plana (C₁₋₂) – 83,3% Curva (C ₃) – 14,5% Muito curva (C ₄₋₅) – 2,2%
	Rugosidade	Denteada – 13,0% Ondulada – 63,8% Plana – 23,1%	Denteada – 5,8% Ondulada – 76,1% Plana – 18,1%
	Preenchimento	Sem preenchimento – 63,2% Argila mole – 15,1% Argila dura – 8,0% Cataclasito/Milonito – 5,0% Outro – 8,8%	Sem preenchimento – 45,7% Argila mole – 25,8% Argila dura – 5,3% Cataclasito/Milonito – 11,3% Outro – 11,9%
	Presença de água	Seco – 73,9% Húmido – 22,3% Muito húmido – 0,7% Gotejante – 3,1%	Seco – 13,8% Húmido – 60,1% Gotejante – 15,9% Fluxo – 10,1%
Parâmetros geomecânicos	Resistência (R)	103,3 MPa	73,1 MPa
	RQD Teórico (RQDt)	38 %	55 %

Observando os dados representados na tabela 4, as principais diferenças significativas que se encontram nas descontinuidades dos dois maciços são:

- o número de descontinuidades estudadas: no caso da pedra de Joane o número cartografado (981) é bastante superior ao correspondente à escarpa de S. Cristóvão (138);

-
- a abertura: no caso da pedreira de Joane oscila entre aberto e fechado, em partes quase equitativas, enquanto que no caso da escarpa de S. Cristóvão oscila, essencialmente, entre o aberto e muito aberto;
 - o grau de fracturação: ainda que em ambos predomine o grau F_{1-2} (descontinuidades afastadas), no caso da escarpa de S. Cristóvão essa predominância é ainda mais acentuada (81 %);
 - a continuidade: no maciço da pedreira de Joane as descontinuidades são, na sua maioria, muito pouco a pouco contínuas, sendo que no maciço de S. Cristóvão são maioritariamente medianamente contínuas.
 - a terminação: no caso da pedreira de Joane a maioria das descontinuidades termina noutra descontinuidade, ao invés do caso da escarpa de S. Cristóvão, em que a maioria termina de forma obscura.
 - a presença de água: este dado é particularmente relevante, sendo que o maciço de Joane é predominantemente seco (74 %), ao contrário do maciço de S. Cristóvão, que é na sua maioria húmido (60 %).
 - O RQD_t: a avaliação do maciço da pedreira de Joane resultou num RQD_t de 38%, mais baixo do que se obteve na escarpa de S. Cristóvão (55%).

4.3. Ângulo de atrito natural (α)

Para efetuar este ensaio, foram então preparadas 4 amostras de cada um dos locais de recolha (pedreira de Joane e escarpa de S. Cristóvão), devidamente identificados e numerados (figura 22). Estas amostras serão aquelas que darão mais tarde origem aos provetes a utilizar no *tilt test*. No anexo E.1 há fotografias de todas as amostras.

Na tabela 5 encontram-se as dimensões principais das amostras recolhidas para cada zona, bem como o respetivo peso, em kg.



Figura 22 – Amostras identificadas por código de cor (vermelho, para a escarpa de S. Cristóvão).

Tabela 5 – Dimensões principais médias das amostras em bruto e respetivo peso.

Zona	Amostra	Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Massa (kg)
Pedreira de Joane	1	0,290	0,220	0,160	22,300
	2	0,280	0,240	0,130	17,062
	3	0,315	0,250	0,160	23,212
	4	0,350	0,125	0,105	17,810
Escarpa de S. Cristóvão	1	0,670	0,320	0,130	29,240
	2	0,395	0,250	0,052	9,448
	3	0,280	0,200	0,065	5,680
	4	0,280	0,235	0,100	9,694

Para a obtenção do ângulo de atrito natural (α) usaram-se diferentes pares das amostras recolhidas “in situ”, quer para o caso de estudo da Pedreira de Joane quer para o da Escarpa de S. Cristóvão.

O método é bastante simples, consistindo tão somente em colocar duas amostras sobrepostas na horizontal e, seguidamente, inclinar de forma lenta e constante a amostra inferior (base) até que

a amostra superior se desloque, deslizando sobre a primeira. É, então, medido o ângulo que a amostra inferior faz com a superfície horizontal, utilizando um transferidor de grande dimensão conforme se ilustra na figura 23.



Figura 23 – Método expedito para a medição do ângulo de atrito natural α .

Nem todas as amostras possuíam formatos que permitissem a realização de ensaios, de forma correta, considerando todas as suas faces colocadas nas posições superior e inferior relativamente ao plano de deslizamento. Por esse motivo foram realizados 4 ensaios diferentes em cada conjunto de amostras – da pedreira de Joane e da escarpa de S. Cristóvão, perfazendo um total de oito. Com as amostras que já haviam sido numeradas de 1 a 4, foram catalogadas as suas duas faces de maior área como A e B, como se pode verificar na figura 24.



Figura 24 – Exemplo de duas amostras sobrepostas, com a marcação visível das faces.

No anexo B, encontram-se fotografias das montagens respeitantes a cada par de amostras que foi ensaiado. Na tabela 6, estão apresentados os resultados obtidos para o ângulo de atrito natural.

Tabela 6 – Quadro síntese com o resultado do ângulo de atrito natural para cada par de amostras ensaiadas.

Fonte da amostra	Ensaio	Face base/Face deslizante	Ângulo de atrito natural (°)	Face base/Face deslizante	Ângulo de atrito natural (°)	
Pedreira de Joane	1	1A/2A	45	1A'/2A	52	
	2	1A/2B	40	1A'/2B	33	
	3	4A/3A	42	4A'/3A	38	
	4	4B/3A	35	4B'/3A	38	
			MÉDIA	40,50	MÉDIA	39,75
			MEDIANA	40,00	MEDIANA	38,00
			DESVIO-PADRÃO	3,64	DESVIO-PADRÃO	6,26
Escarpa de S. Cristóvão	1	1A/2A	37	1A'/2A	51	
	2	1A/2B	42	1A'/2B	55	
	3	1A/4A	59	1A'/4A	48	
	4	1A/4B	57	1A'/4B	55	
			MÉDIA	53,50	MÉDIA	52,25
			MEDIANA	57,00	MEDIANA	55,00
			DESVIO-PADRÃO	3,77	DESVIO-PADRÃO	2,95

Os valores obtidos para o ângulo de atrito natural, como se pode ver, a resultarem numa amplitude ainda considerável – mínimo de 35 graus e máximo de 59 graus –, explicada pelas variações de forma e rugosidade naturais e também pelos pesos e tamanhos diferentes entre cada amostra.

As médias para a pedreira de Joane situam-se na casa dos 40 graus, embora tenha desvios-padrão maiores, nomeadamente na segunda sequência de faces deslizantes, onde se obteve um valor se 52 graus inserido num conjunto a rondar os 38 graus, originando um desvio padrão grande.

Para a escarpa de S. Cristóvão, as amostras eram mais irregulares na sua morfologia levando inevitavelmente a ângulos maiores (médias entre 52 e 53 graus) do que na pedreira de Joane, com desvios padrões a rondar as 3 unidades.

4.4. Tilt test

4.4.1. Dimensões dos provetes

Antes de enviar as amostras para o corte dos provetes na Cooperativa dos Pedreiros, foi necessário definir a quantidade e as dimensões dos mesmos.

As dimensões consideradas para o corte dos provetes resultaram de um compromisso entre as recomendações apresentadas por Alejano *et al* (2012) e as dimensões das amostras recolhidas nos quatro casos de estudo.

De facto, no artigo de Alejano *et al*, após um conjunto diversificado e numeroso de ensaios, concluem recomendando que, no caso de provetes paralelepípedicos, sejam usadas superfícies com áreas de, pelo menos, **50 cm²** e cumprindo uma **relação entre o comprimento e a altura pelo menos igual a 2**. Sugerem ainda que relações com valores superiores serão ainda mais favoráveis, de modo a que sejam usadas maiores superfícies de deslizamento, assegurando que as tensões de contacto sejam de compressão quando ocorre o deslizamento.

Nesse mesmo artigo Alejano *et al* (2012) propõem que cada ensaio seja repetido 3 vezes e que o valor do ângulo de atrito base seja considerado igual à mediana dos resultados desse conjunto de ensaios. Recomendam ainda que no caso de existir uma diferença superior a 3^o, entre um dos valores e a mediana, seja realizado um quarto ensaio.

No trabalho de Alejano *et al* (2018) voltam a sugerir que sejam usadas superfícies com áreas de, pelo menos, **50 cm²**, mas são mais exigentes na proposta da **relação entre o comprimento e a altura, que deverá cumprir um valor superior ou igual a 4**. Recomendam, no entanto, que seja considerada **uma relação superior a 6**. Sugerem ainda que **a relação entre a largura e a altura seja superior a 4**. Acrescentam a recomendação que **a largura seja superior a 10 vezes o tamanho do grão da rocha**.

As dimensões inicialmente consideradas para os provetes no âmbito destes estudos – **150mm X 150mm X 40mm**, embora cumprissem estas mais recentes recomendações, inviabilizariam, em alguns dos casos de estudo, a materialização do número de provetes necessário para o desenvolvimento da investigação, pelo que se consideraram, em alternativa, as seguintes dimensões – **100mm X 100mm X 40mm**, que cumprem as recomendações expressas em Alejano *et al*, 2012.

Posto isto, foram então, definidos estes parâmetros, para cada zona (pedreira de Joane e escarpa de S. Cristóvão):

- **N.º de provetes:** 2 (+2); 2 provetes para utilizar no *tilt test*, usando as várias combinações de faces e posições relativas, e dois provetes suplementares, em caso de eventual danificação de um dos utilizados inicialmente.
- **Dimensões:** 100 x 100 x 40 mm; forma paralelepipedica, com áreas de contacto quadradas (Figura 25).
- **Amostras usadas:** Para obter os provetes da pedreira de Joane, foram utilizadas as amostras 1 e 2; para os da escarpa de S. Cristóvão, apenas a amostra 1 foi necessária (Figura 26).

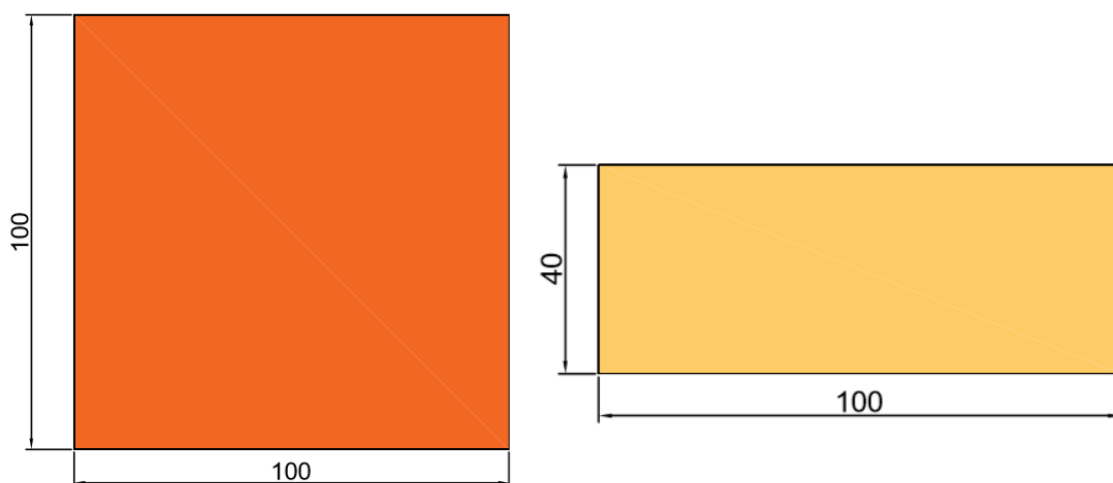


Figura 25 – Esquema das dimensões dos provetes (à esquerda faces superior e inferior, à direita faces laterais); unidades em mm.



Figura 26 – Amostras escolhidas para o corte e obtenção dos provetes (Na caixa azul, amostras 1 e 2 de Joane, na caixa branca, amostra 1 de S. Cristóvão).

4.4.2. Corte dos provetes

As amostras escolhidas para o corte foram encaminhadas para a oficina da Cooperativa dos Pedreiros, em S. Mamede Infesta, local onde foi realizado o referido corte através da utilização de uma máquina de corte. De seguida, serão detalhadas as características da máquina (figura 27) e do disco de corte (figura 28).



Figura 27 – Máquina de corte com disco diamantado, usada para o corte dos provetes (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).



Figura 28 – Pormenor do disco diamantado que efetuará o corte dos provetes (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).

4.4.2.1. Características e funcionamento

Na tabela 7 encontram-se detalhadas as características específicas da máquina e do respetivo disco de corte.

Tabela 7 – Características da máquina e disco de corte (Construal, 2019).

GERAIS	
Marca	Construal
Modelo	CB-02
Marca do motor	WEG
Tipo	Disco diamante
MÁQUINA	
Ano	2005
Peso	6500 kg
Potência elétrica	380 volts
	100 Hz
Potência total	34,8 kW
Eixo Y máximo	3400 mm
Eixo X máximo	4000 mm
Eixo Z máximo	600 mm
Mesa giratória	360°
Dimensões da mesa	3000 x 1800 mm
Usa água	Sim
Consumo de água	50 a 90 L/min
Pressão da água	3 bar
DISCO	
Diâmetro	1300 mm
Largura	5 mm
N.º dentes	92

O disco desloca-se horizontalmente (eixo X) para realizar o corte, acompanhado de jatos de água durante o processo. No eixo Y a barra de suporte do disco desloca-se longitudinalmente para ajustar o local do corte. A mesa pode ser levantada até 600 mm (eixo dos Z). Os motores hidráulicos que movimentam a estrutura e o motor do disco são distintos. Nas seguintes figuras encontra-se um esquema geométrico da máquina (figura 29), e uma imagem explicativa da localização dos referidos eixos.

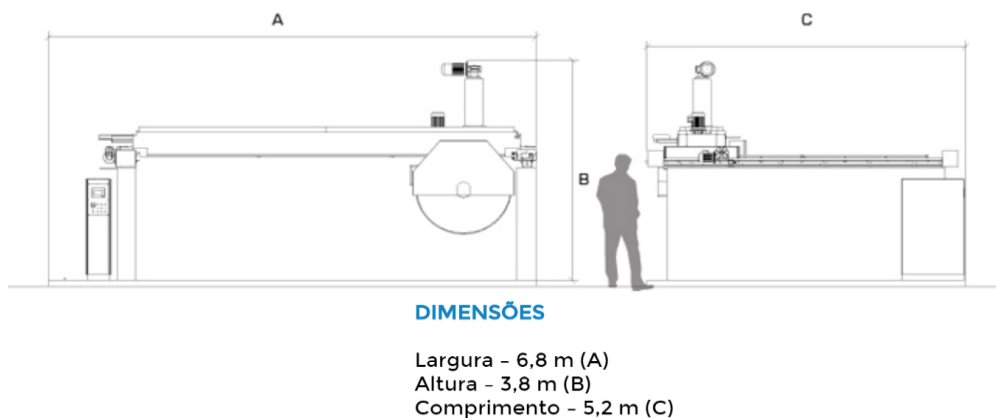


Figura 29 – Dimensões principais da máquina de corte CB-02 (com escala humana)
(adaptado de <http://www.construal.pt/pt/produtos/14/cb>).

Todas as movimentações podem ser controladas por meio de um autómato (figura 30) que possui um sistema de coordenadas (manipulado por um operador) que permite fazer ciclos de cortes específicos e automatizados. A mesa roda 360° e permite fixação manual.



Figura 30 – Autómato utilizado para controlar as movimentações dos eixos e especificações de corte
(fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros, S. Mamede Infesta).

A largura original do disco é de 5 mm. Porém, com o desgaste, no momento do corte media, aproximadamente, 4 mm. Na figura 31 pode-se ver o pormenor dos dentes diamantados do disco.

A penetração máxima de corte não deverá ultrapassar $1/3$ do diâmetro total do disco, ou seja, $2/3$ da metade visível (neste caso, cerca de 433 mm).



Figura 31 – Pormenor dos dentes diamantados componentes do disco de corte (fotografia cedida pela Cooperativa dos Pedreiros).

4.4.3. Ensaios

Após obter os provetes, passou-se para a realização dos ensaios *tilt test*. Estes ensaios foram realizados tanto no protótipo construído como no equipamento gentilmente cedido pelo Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (UA). Nas figuras 32a e 32b podem-se ver os provetes colocados dentro das respetivas caixas, juntamente com os “restos” das amostras originais.



Figura 32 – Provetes junto do resto das amostras nas caixas respetivas (à esquerda (a), pedra de Joane; à direita (b), escarpa de S. Cristóvão).

Nas figuras 33a e 33b podem ver-se os provetes junto dos dois equipamentos de ensaio (protótipo de madeira e equipamento da UA).



Figura 33 – Provete junto das máquinas usadas para os ensaios *tilt test* (à esquerda (a), protótipo ISEP construído; à direita (b), equipamento da UA).

As dimensões dos provetes já estavam definidas, como se referiu anteriormente. Porém, em corte de granito duro é sempre difícil obter precisões ao milímetro, para além de os provetes estarem sujeitos a algum esboroamento das arestas aquando do transporte. Por isso, os quatro provetes utilizados para os ensaios (A e B de cada zona) foram medidos e também pesados (tabela 8). Os valores representados no vértice da face referem-se à medida da aresta correspondente.

Tabela 8 – Peso e dimensões dos provetes utilizados para os ensaios.

Zona	Provete	Peso	Dimensões (mm)
Joane	A	1,032 kg	
	B	1,046 kg	
S. Cristóvão	A	1,060 kg	
	B	1,068 kg	

4.4.3.1. Combinações

Relativamente ao número de ensaios a efetuar, é necessário escarpelizar a forma como os provetes a ensaiar se podem combinar entre si, considerando as diferentes faces e arestas. Foi decidido utilizar a combinação de apenas 2 provetes de cada zona, uma vez que utilizar 3 ou mais implicaria que, por exemplo, quando fosse utilizado o terceiro provete, a combinação deste quer com o primeiro, quer com o segundo, resultaria em ensaios entre um provete já desgastado e outro ainda sem qualquer desgaste, levando a alguma incoerência nos resultados.

Os provetes, sendo paralelepípedicos, permitem a utilização de apenas duas faces como superfícies de ensaio, sendo aquelas que possuem 10x10 mm. Não obstante, cada uma dessas faces é de dimensão quadrada, permitindo a sua rotação 4 possibilidades (4 arestas) em cada face (figura 33).

Portanto, **para cada zona**, há 2 (dois) provetes – **A** e **B**; para cada provete há 2 (faces) – **A1** e **A2**, **B1** e **B2**; para cada face, há quatro arestas – **W**, **X**, **Y** e **Z** – letradas no sentido dos ponteiros do relógio (figura 34).



Figura 34 – Provetes da escarpa de S. Cristóvão, devidamente identificados com letra, face e aresta.

Após todas as combinações com estas premissas, utilizando o provete A como inferior e o B como superior, é necessário inverter as posições dos mesmos, e repetir todas as possibilidades, duplicando os ensaios. Para cada combinação unívoca, fazem-se 3 (três) repetições. No seguinte esquema (figura 35), estão explicados e contabilizados todos ensaios e as respetivas repetições.

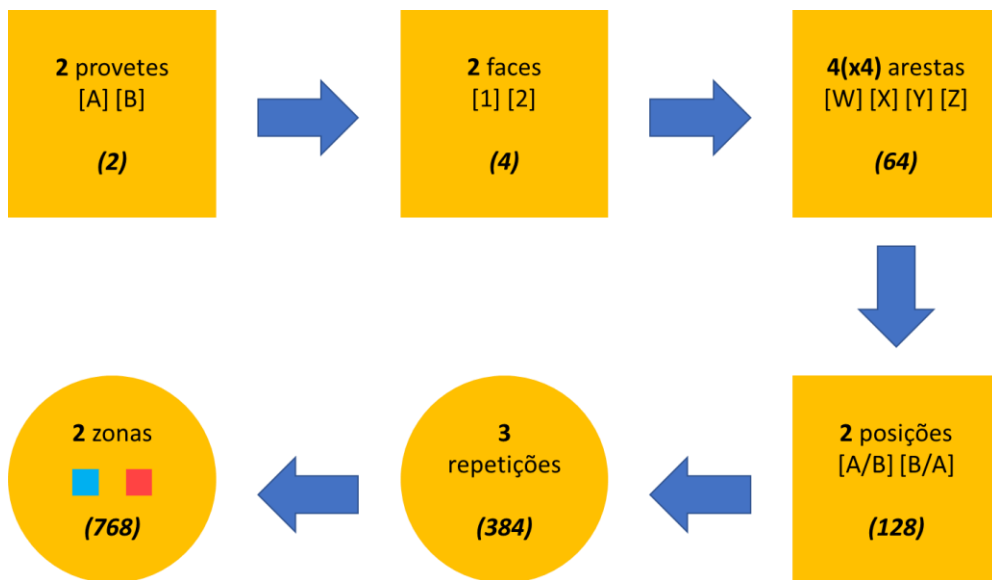


Figura 35 – Esquema sequencial das diferentes combinações e número de ensaios acumulado.

Cada agrupamento de faces dos dois provetes será designado como **contacto**, uma vez que se trata da sobreposição de duas superfícies diferentes de dois provetes diferentes. Há 4 contactos possíveis para cada posição – 1/1; 1/2; 2/1 e 2/2. Cada face tem, como referido, 4 arestas, levando a 16 combinações em cada contacto, desde W/W, W/X, (...), até Z/Z (figura 36).

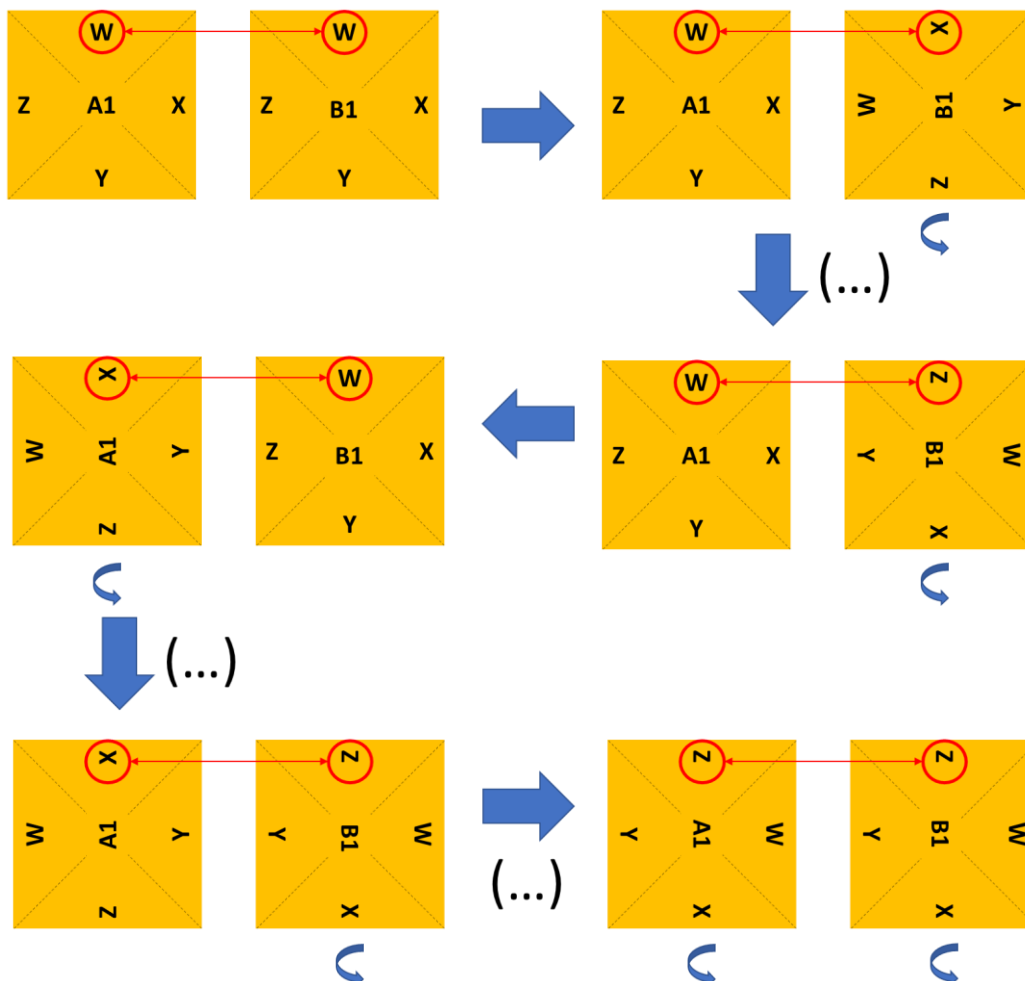


Figura 36 - Esquema do funcionamento dos ensaios nas 16 combinações para cada contacto (p. e. A1/B1).

Durante os ensaios, para manter uma sequência lógica e um desgaste dos provetes uniformemente distribuído no decorrer dos ensaios, far-se-á a rotação dos provetes como descrito no esquema acima (figura 36), começando por rodar o provete superior (neste exemplo, B1) nas quatro posições de W até a Z, depois rodar o provete inferior (A1) uma posição, retornar o superior à posição inicial (W) e repetir as 4 posições respectivas e assim sucessivamente até estarem concluídas as 16 combinações. A designação unívoca do ensaio é determinada pela **sobreposição das letras do quadrante superior da face**, como demonstrado no esquema pelos círculos vermelhos.

4.4.3.2. Pormenores

Como descrito anteriormente, foi necessário realizar um conjunto considerável de ensaios, sendo que às 128 combinações possíveis com 2 provetes, juntaram-se as 3 repetições de cada ensaio, para cada uma das zonas, perfazendo 768 ensaios no total, com cada equipamento. Considerando os dois equipamentos resulta um total de 1536 ensaios.

Os ensaios foram considerados válidos quando o provete superior deslizava na totalidade sobre o provete inferior até se apoiar nos batentes de proteção colocados tanto no protótipo como no equipamento da UA. Na figura 37 pode ver-se um exemplo de ensaio válido efetuado no equipamento da UA, e na figura 38, o mesmo ensaio no protótipo do ISEP.

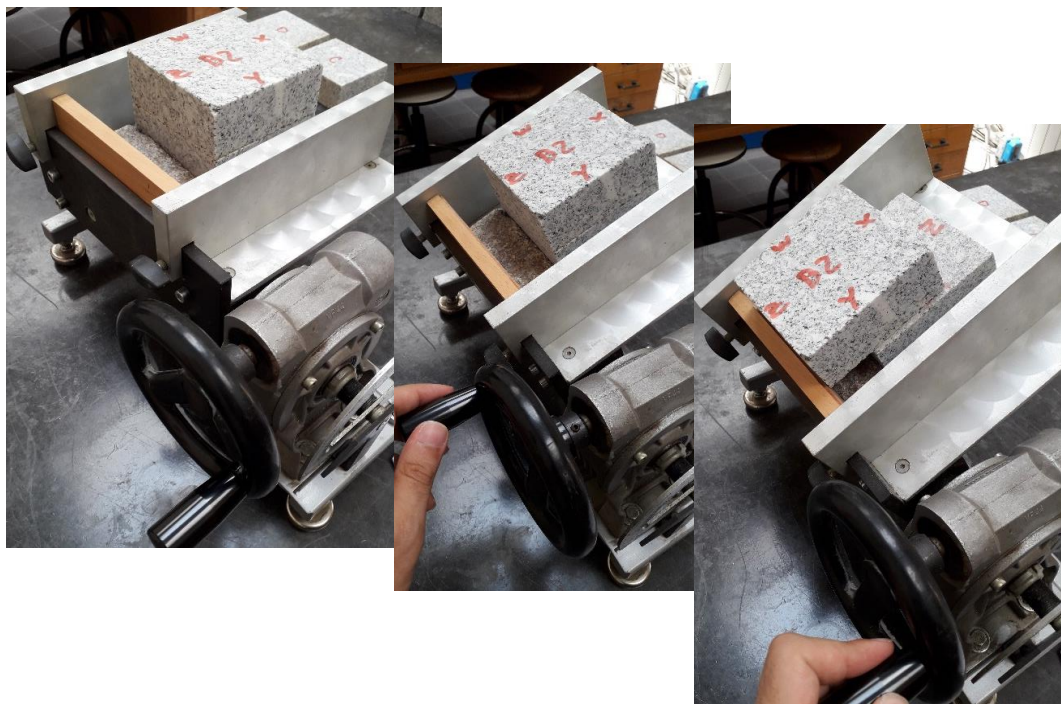


Figura 37 – Exemplo de ensaio *tilt test*, efetuado no equipamento da UA.



Figura 38 – Exemplo de ensaio *tilt test*, efetuado no protótipo construído.

Após o deslizamento do provete superior, regista-se o valor do ângulo β correspondente. No equipamento da UA o ângulo lê-se diretamente de um transferidor que está acoplado à máquina (figura 39); no protótipo de madeira, utiliza-se um transferidor externo (aristo) para medir o ângulo com a horizontal da plataforma onde repousam os provetes (figura 40).



Figura 39 – Pormenor do transferidor acoplado ao equipamento de *tilt test* da UA para retirar o ângulo β .



Figura 40 – Pormenor da leitura do ângulo β através da utilização de um aristo no protótipo de madeira construído.

Fazem-se então as 3 repetições para cada combinação unívoca, sendo que em caso de obtenção de um ângulo com uma diferença relativamente a um dos restantes desse conjunto de 3 ou mais graus, realiza-se um quarto ensaio, fazendo o resultado correspondente média com esse valor.

4.5. Resultados obtidos e tratamento dos dados

À medida que os ensaios iam decorrendo, os resultados obtidos foram sendo registados manualmente em tabelas simplificadas (apresentadas completas nos anexos F.2 e F.3), onde apenas havia entrada para os ângulos β . Havia, também, inicialmente, um local de entrada para o registo das vibrações medidas durante a execução dos ensaios (tabela 9).

Tabela 9 – Tabela simplificada para registo manual dos ângulos β (exemplo para a pedra de Joane - A1/B1).

JOANE												
A/B												
			1	2	3				1	2	3	VIBRAÇÃO
A1/B1	W/W				X/W							
	W/X				X/X							
	W/Y				X/Y							
	W/Z				X/Z							
	Y/W				Z/W							
	Y/X				Z/X							
	Y/Y				Z/Y							
	Y/Z				Z/Z							

Porém, após realizar os primeiros ensaios, verificou-se que o valor dessas vibrações era completamente desprezável, não tendo efeito prático no ângulo de atrito, tendo sido abandonado esse registo. Isto verifica-se uma vez que estes ensaios foram feitos em máquinas de *tilt test* com componente de manuseamento humano “suave”, ao contrário dos realizados por Alejano et al. (2012a, 2018), onde foi utilizada uma máquina com motor, levando a vibrações com eventual representatividade.

Após a recolha de todos os resultados, estes foram colocados e tratados de forma mais detalhada numa folha de cálculo Excel, para que fosse possível, para além de comparar os valores relativos a provetes de zonas distintas, bem como os correspondentes a equipamentos distintos e a combinações e a contactos semelhantes ou opostos, pudessem ser obtidos os valores finais do ângulo de atrito base (ϕ_b), do ângulo de atrito residual (ϕ_r) e, finalmente, para a dedução da fórmula da resistência ao corte (τ). Foram calculados elementos estatísticos como a média, a mediana (valor de que se retira o ϕ_b) e o desvio-padrão.

Na tabela 10, apresenta-se um exemplo (truncado) do tratamento dos resultados para um contacto (A1/B1), para a pedreira de Joane, realizado no protótipo construído (máquina 1). A vermelho estão assinalados os valores da mediana individual de cada rotação e a média das 16 medianas correspondentes.

Tabela 10 – Tabela de resultados de um contacto (Joane - A1/B1) (Máquina 1-Protótipo) com cálculos estatísticos.

(Inf/Sup)		W/W	W/X	W/Y	W/Z	(...)	Z/W	Z/X	Z/Y	Z/Z	
A1/B1	1	30,0	27,0	25,0	26,0	(...)	29,0	27,0	27,0	27,0	
	2	29,0	27,0	27,0	25,0	(...)	29,0	27,0	27,0	27,0	
	3	27,0	26,0	25,0	26,0	(...)	28,0	25,0	27,0	27,0	
	Média	28,67	26,67	25,67	25,67	(...)	28,67	26,33	27,00	27,00	
	Mediana	29,00	27,00	25,00	26,00	(...)	29,00	27,00	27,00	27,00	
	Desvio-padrão	1,53	0,58	1,15	0,58	(...)	0,58	1,15	0,00	0,00	
	Média do contacto	26,58									
	Média das medianas	26,63									

No anexo F, encontra-se o ficheiro Excel com todos os quadros detalhados, englobando todos os resultados obtidos e as respetivas fórmulas. Após obter a média das medianas para cada contacto, é calculada seguidamente a média dos contactos por posição (A/B e B/A) e finalmente, utilizando esses dois valores, a média final das medianas da zona. Todo o processo é depois replicado para a outra zona, repetindo-se o processo, novamente, para as duas zonas, com os resultados da outra máquina (Máquina 2-UA).

4.5.1. Ângulo β e ângulo de atrito base (ϕ_b)

Nas seguintes tabelas apresentam-se os principais resultados para o ângulo β e o respetivo ângulo de atrito base (média das medianas), bem como os restantes cálculos estatísticos. Serão divididos em zonas (pedreira de Joane e escarpa de S. Cristóvão) e, dentro de cada zona, apresentar-se-ão os resultados obtidos com cada máquina (1-Protótipo ISEP e 2-UA). Na tabela 11 encontram-se os resultados obtidos para a zona da pedreira de Joane, para o protótipo construído (Máquina 1).

Tabela 11 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 1).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	24,00	30,00	26,58	0,95	26,63
A1/B2	24,00	29,00	26,19	0,89	26,13
A2/B1	27,00	33,00	30,98	0,68	31,06
A2/B2	28,00	33,00	30,67	0,74	30,63
Posição				A/B	28,61
B1/A1	24,00	30,00	27,11	0,85	27,00
B1/A2	29,00	33,00	31,00	0,76	31,00
B2/A1	25,00	32,00	28,09	0,81	28,00
B2/A2	29,00	33,00	30,25	0,70	30,00
Posição				B/A	29,00
ZONA				JOANE	28,80

Na tabela 12 encontram-se os resultados obtidos para a zona da pedreira de Joane, para a máquina da Universidade de Aveiro (Máquina 2).

Tabela 12 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 2).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	22,00	26,00	23,65	0,77	23,63
A1/B2	21,00	27,00	24,10	0,57	24,06
A2/B1	25,00	32,00	29,04	0,55	29,13
A2/B2	27,00	32,00	29,23	0,60	29,25
Posição				A/B	26,52
B1/A1	21,00	28,00	24,75	0,60	24,75
B1/A2	27,00	33,00	29,71	0,78	29,81
B2/A1	23,00	31,00	25,85	0,84	25,81
B2/A2	28,00	32,00	29,73	0,65	29,75
Posição				B/A	27,53
ZONA				JOANE	27,02

Analisando os resultados para a zona da pedra de Joane, obtiveram-se valores entre 28 e 29 graus de ângulo de atrito base (ϕ_b), utilizando o protótipo do ISEP. Já com a máquina da Universidade de Aveiro obteve-se um valor a rondar os 27 graus. Globalmente, os valores medidos na máquina da UA são **mais baixos** do que no protótipo do ISEP.

Passando para os resultados relativos à zona da escarpa de S. Cristóvão, estes encontram-se na tabela 13, correspondentes ao protótipo construído (Máquina 1).

Tabela 13 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 1).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio (°)	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	28,00	31,00	28,92	0,39	28,94
A1/B2	26,00	35,00	29,99	0,66	29,81
A2/B1	26,00	30,00	27,54	0,71	27,44
A2/B2	26,00	32,50	28,75	0,65	28,69
Posição				A/B	28,72
B1/A1	26,00	31,00	28,26	0,63	28,44
B1/A2	25,00	29,00	27,29	0,49	27,38
B2/A1	26,00	31,00	27,96	0,64	27,94
B2/A2	26,00	30,00	28,65	0,70	28,69
Posição				B/A	28,11
ZONA				S. CRISTÓVÃO	28,41

Na tabela 14 encontram-se os resultados obtidos para a zona da escarpa de S. Cristóvão, para a máquina da Universidade de Aveiro (Máquina 2).

Tabela 14 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 2).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	26,00	31,00	28,53	0,72	28,50
A1/B2	28,00	34,00	30,77	0,80	30,69
A2/B1	22,50	28,00	25,55	0,77	25,47
A2/B2	25,00	30,00	27,79	0,59	27,94
Posição				A/B	28,15
B1/A1	26,00	30,00	27,95	0,62	28,06
B1/A2	24,00	29,00	26,09	0,62	26,03
B2/A1	25,00	32,00	29,10	0,72	28,88
B2/A2	24,00	31,00	27,40	0,65	27,38
Posição				B/A	27,59
ZONA				S. CRISTÓVÃO	27,87

Analisando os valores obtidos para S. Cristóvão, os padrões de interpretação são um pouco mais dispersos do que na pedreira de Joane. A diferença entre máquinas mantém-se, no sentido em que na máquina 1 (protótipo ISEP) se obteve um valor de ϕ_b mais alto (cerca de 28,5 graus) do que na máquina 2 (UA) onde se obteve um valor inferior de 27,9 graus. Porém, a diferença não é tão grande (cerca de 0,6 graus) como se verificou na pedreira de Joane (1,8 graus). Esse e outros aspetos mais irregulares dos ensaios da escarpa de S. Cristóvão, podem estar associados com um defeito reduzido, mas relevante no corte do provete A, onde, para além de um desnível de cerca de 1,0 mm entre as faces mais pequenas, parece haver um efeito “cunha” num dos vértices da face superior (face A1), que foi bastante visível durante os ensaios (figuras 41a e 41b).



Figura 41 – Ensaio A1/B1 (W/W e W/X) da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 1), onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.

Como se pode observar na figura 40b, o desnível verifica-se no vértice YZ da face A1 do provete A. O efeito manifestou-se, especialmente, quando o provete A era o inferior, manifestando-se também quando este se encontrava na posição superior (figura 42).



Figura 42 – Ensaio B2/A1 (X/Y) de S. Cristóvão (Máquina 1) onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.

Este efeito também se verificou nos ensaios com a máquina da UA, corroborando as conclusões anteriores (figura 43).

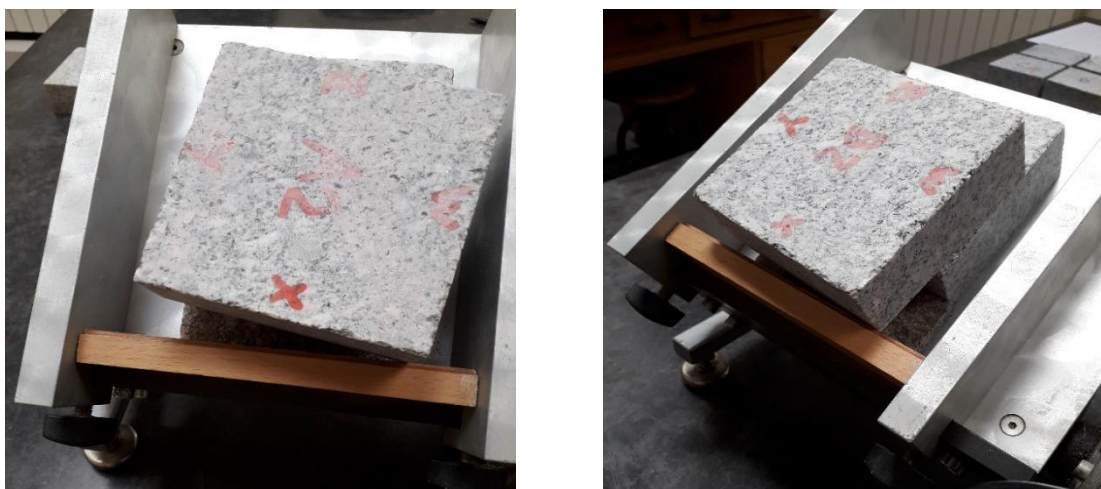


Figura 43 – Ensaio B2/A1 (W/X) e A1/B1 (W/X) de S. Cristóvão (Máquina 2) onde se pode verificar o efeito cunha no provete A.

Esse efeito cunha teve influência direta nos ângulos de atrito medidos. Quando a face A1 era interveniente no contacto, fazendo com que tanto o provete complementar (B) como a própria face, quando esta estava colocada superiormente, tivessem de vencer esse desnível para deslizar completamente, tombando sobre o lado “mais baixo”. Considerando válidos estes ensaios em que se evidenciou a anomalia relatada, os respetivos ângulos de atrito resultaram mais elevados. Voltando a observar, por exemplo, a tabela 14, onde se encontram os ensaios da escarpa de S. Cristóvão para a máquina da UA, é bem visível a diferenciação dos valores de ϕ_b , quando a face A1 intervém (assinalados a amarelo) (tabela 15).

Tabela 15 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de S. Cristóvão (Máquina 2), com destaque dos valores onde a face A1 intervém no contacto.

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	26,00	31,00	28,53	0,72	28,50
A1/B2	28,00	34,00	30,77	0,80	30,69
A2/B1	22,50	28,00	25,55	0,77	25,47
A2/B2	25,00	30,00	27,79	0,59	27,94
Posição				A/B	28,15
B1/A1	26,00	30,00	27,95	0,62	28,06
B1/A2	24,00	29,00	26,09	0,62	26,03
B2/A1	25,00	32,00	29,10	0,72	28,88
B2/A2	24,00	31,00	27,40	0,65	27,38
Posição				B/A	27,59
ZONA				S. CRISTÓVÃO	27,87

Alejano *et al.* (2012) referem, curiosamente, como um dos problemas práticos identificados no decurso de um conjunto de ensaios realizados, a possibilidade de ocorrer a rotação do provete superior durante o ensaio. Essa rotação pode ocorrer apenas numa reduzida zona, de tal modo que o provete superior pode rodar em torno de um eixo localizado no centro dessa área reduzida de contacto, facto em tudo semelhante ao que se verifica nestes ensaios.

Pelos motivos identificados acima em relação às particularidades dos ensaios da escarpa de S. Cristóvão, para efeitos de análise global, tomar-se-á o caso de estudo da pedra de Joane como mais fidedigno para estabelecer padrões e conclusões. Porém, os valores obtidos para a escarpa de S. Cristóvão serão considerados e serão tratados indiscriminadamente para obter os demais parâmetros – ângulo de atrito residual (ϕ_r) e resistência ao corte (τ).

Analisando globalmente, então, os resultados para o ângulo de atrito de base (ϕ_b), pode observar-se que, considerando as duas zonas de estudo e as duas máquinas e ignorando as diferenciações que lhes são inerentes, se obtiveram valores entre os **27 e os 29 graus**. Como já foi referido, o protótipo de madeira mediu ângulos com uma diferença entre 1,0 e 1,5 graus acima dos medidos pela máquina da UA.

Pela sensibilidade da utilização exaustiva de ambas as máquinas, o mais “simultaneamente” possível – alternando os ensaios, efetuando ora um “contacto” (48 ensaios) numa, ora na outra – é possível afirmar que, até devido à artesanidade do protótipo, possivelmente os valores medidos pela máquina da UA serão os mais próximos da realidade.

Em relação ao desvio padrão, não é muito elevado (em média), situando-se globalmente entre os 0,5 e 1,0, havendo por vezes valores de 1,4 ou 1,5 quando há disparidades iguais ou superiores a 3 graus no mesmo conjunto de repetições; porém, possui também, bastantes vezes, o valor de 0,0, obviamente quando os 3 valores de repetições são iguais (ver estes últimos 2 exemplos nos anexos F.2 e F.3).

Através da evolução dos valores parciais, é possível realizar uma análise relativa ao **efeito do desgaste** dos provetes sobre o valor do ângulo de atrito de base. Como foi referido anteriormente, os ensaios para a zona da escarpa de S. Cristóvão ficaram comprometidos com a particularidade do defeito de corte de um dos respetivos provetes, daí ser difícil padronizar esse comportamento pois não é possível dissociar os valores mais altos que se obtiveram na intervenção dessa face específica (A1). Daí que a análise da influência do desgaste é necessariamente realizada nos ensaios da zona da pedra de Joane. Ora, nesses casos é possível observar (tabelas 16 e 17) o crescimento tendencial dos valores, à medida que o ensaio evolui, especialmente visível nas médias de posição (A/B e B/A), resultando depois na média final.

Tabela 16 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da escarpa de Joane (Máquina 1).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	24,00	30,00	26,58	0,95	26,63
A1/B2	24,00	29,00	26,19	0,89	26,13
A2/B1	27,00	33,00	30,98	0,68	31,06
A2/B2	28,00	33,00	30,67	0,74	30,63
Posição				A/B	28,61
B1/A1	24,00	30,00	27,11	0,85	27,00
B1/A2	29,00	33,00	31,00	0,76	31,00
B2/A1	25,00	32,00	28,09	0,81	28,00
B2/A2	29,00	33,00	30,25	0,70	30,00
Posição				B/A	29,00
ZONA				JOANE	28,80

Tabela 17 – Principais resultados estatísticos e o ângulo de atrito de base (ϕ_b) para os ensaios da pedreira de Joane (Máquina 2).

Contacto (Inferior/Superior)	Menor valor (°)	Maior valor (°)	Média (°)	Desvio padrão médio	Média das medianas (ϕ_b) (°)
A1/B1	22,00	26,00	23,65	0,77	23,63
A1/B2	21,00	27,00	24,10	0,57	24,06
A2/B1	25,00	32,00	29,04	0,55	29,13
A2/B2	27,00	32,00	29,23	0,60	29,25
Posição				A/B	26,52
B1/A1	21,00	28,00	24,75	0,60	24,75
B1/A2	27,00	33,00	29,71	0,78	29,81
B2/A1	23,00	31,00	25,85	0,84	25,81
B2/A2	28,00	32,00	29,73	0,65	29,75
Posição				B/A	27,53
ZONA				JOANE	27,02

Os valores parciais do ângulo de atrito dependem da especificidade de cada face, bem como da ordem com que se efetua o ensaio. Por exemplo, o valor relativo ao contacto (B1/A2) sobe em relação ao anterior, uma vez que a face B1 era aquela que mais vezes tinha sido solicitada anteriormente – 3 vezes, mais 2 na outra máquina, pois os ensaios foram realizados alternadamente, por cada posição, nas duas máquinas – e depois desce para o contacto (B2/A1), pois a face B2 ainda está “nova”, ou seja com menos desgaste acumulado, levando à descida do ângulo de atrito.

Para demonstrar este facto foram realizados gráficos relacionando, no eixo das abcissas, o n.º do ensaio, com o ângulo de atrito no eixo das ordenadas, com linha de tendência, para cada posição, dividida em “blocos” de contacto (assinalados com traço espesso, sem interferir na linha de tendência). Nas figuras 44 a 47 encontram-se os referidos gráficos, para a zona da pedra de Joane.

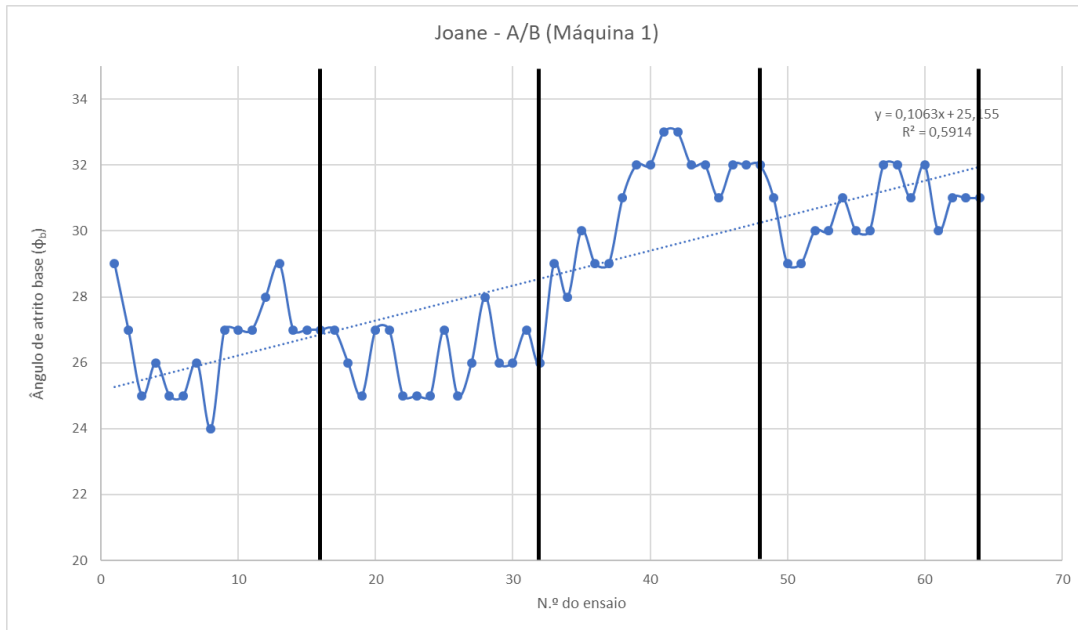


Figura 44 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedra de Joane, no par (A/B) (Máquina 1).

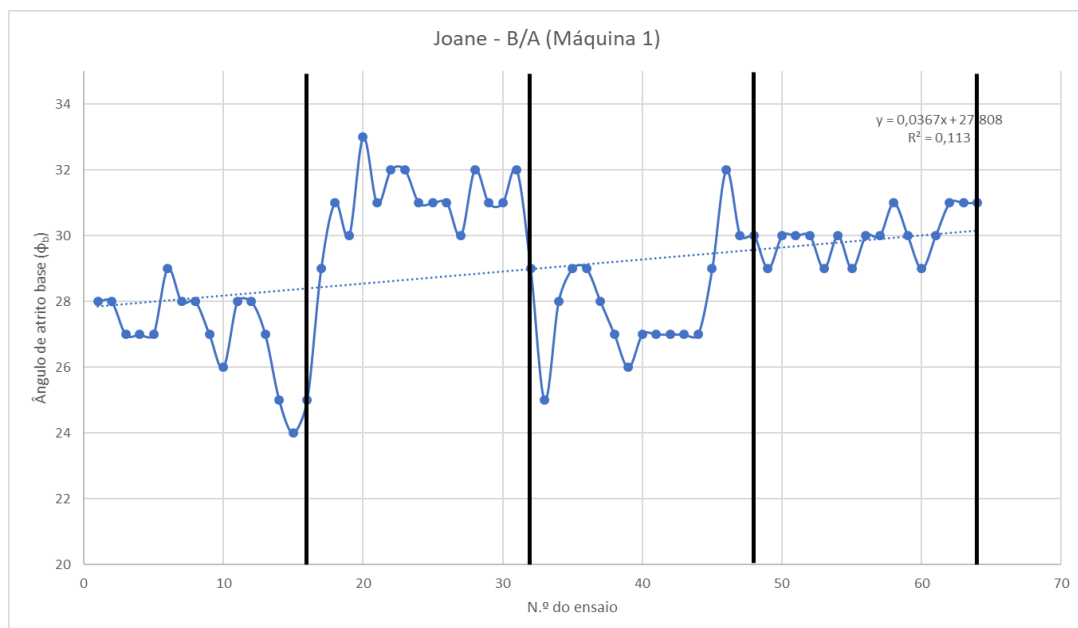


Figura 45 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedra de Joane, no par (B/A) (Máquina 1).

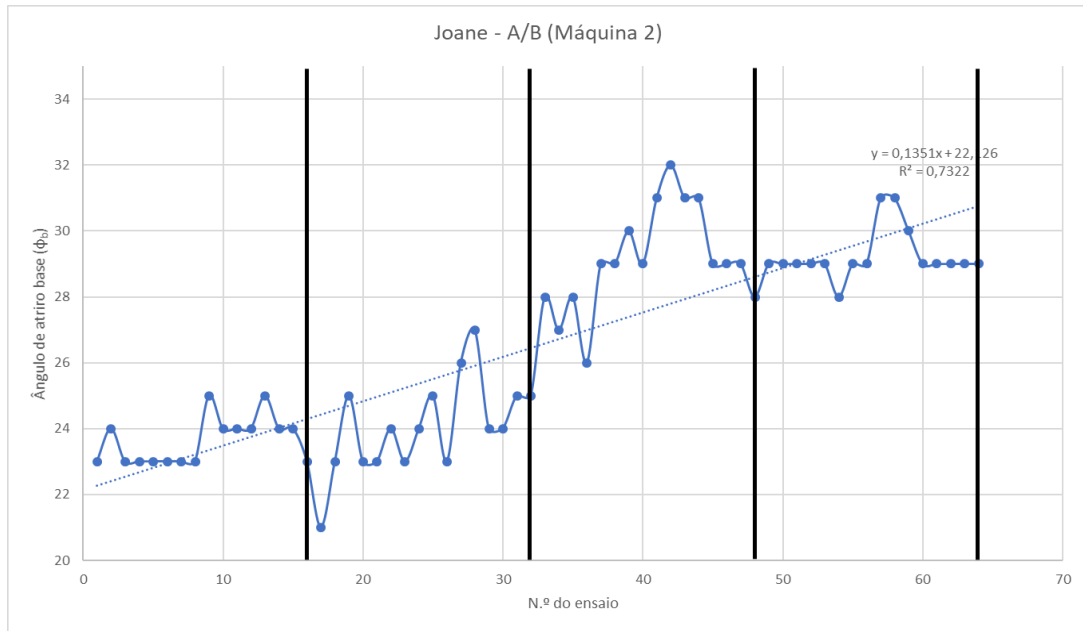


Figura 46 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedra de Joane, no par (A/B) (Máquina 2).

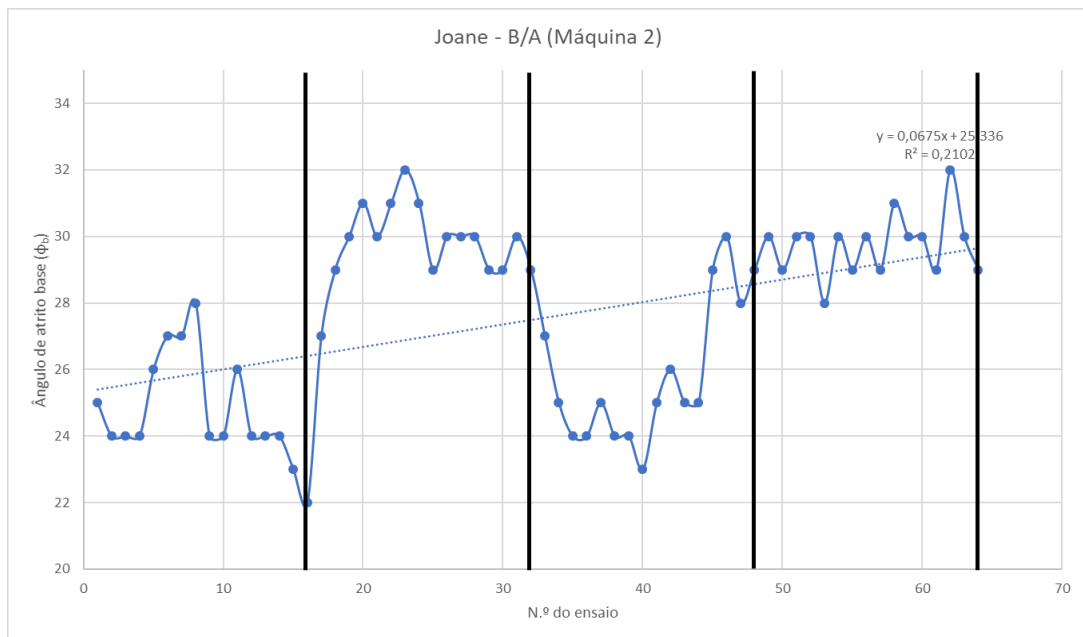


Figura 47 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da pedra de Joane, no par (B/A) (Máquina 2).

Analisando os gráficos acima (figuras 43 a 46), pode-se ver, então, a tendência de subida do ângulo de atrito base (ϕ_b). Esta tendência de subida é mais acentuada quando se mede no par A/B, pois no B/A, como já foi referido, há uma alternância de subidas e descidas, por diversos fatores, mas principalmente porque o desgaste acumulado dos ensaios anteriores não é uniforme

entre as faces. A diferença da tendência de subida entre as duas máquinas não é significativa e mantém o padrão dos pares já referido.

Nas figuras 48a e 48b podem ver-se fotografados os provetes da zona da pedreira de Joane antes e depois da realização dos ensaios e o respetivo efeito do desgaste na superfície dos provetes.

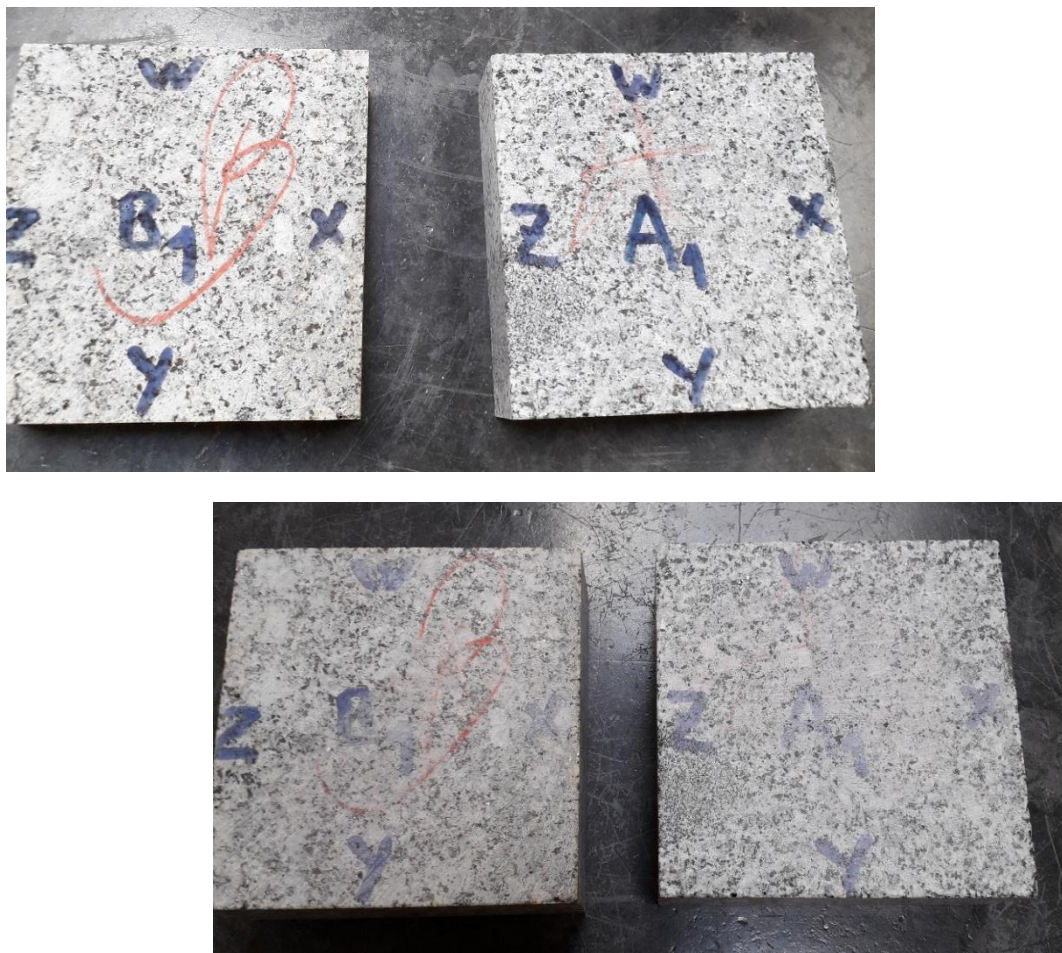


Figura 48 – Provetes A e B da zona de Joane antes (em cima) (a) e depois (em baixo) (b) da realização dos ensaios.

Para além do apagar do marcador, consequência mais visível, há um “clarear” da superfície, especialmente visível no quartzo e na biotite.

Para o caso da zona da escarpa de S. Cristóvão, apesar das já referidas condicionantes, foram também construídos os mesmos gráficos de tendência, tal como para a zona da pedreira de Joane, apresentados nas figuras 49 a 52, também divididos em pares (A/B) e (B/A), para cada uma das máquinas.

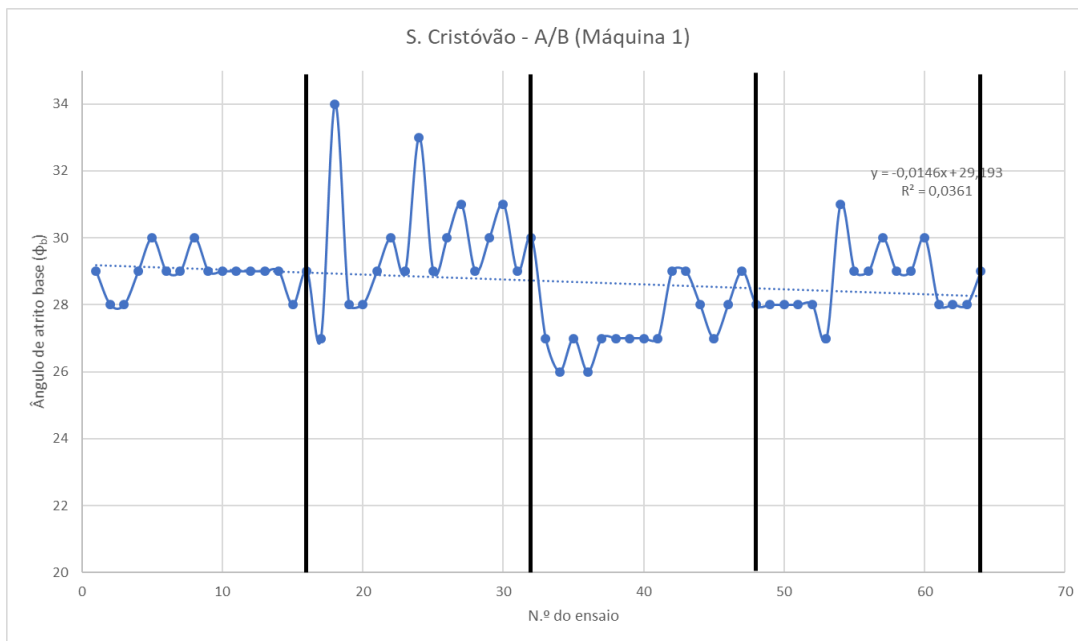


Figura 49 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (A/B) (Máquina 1).

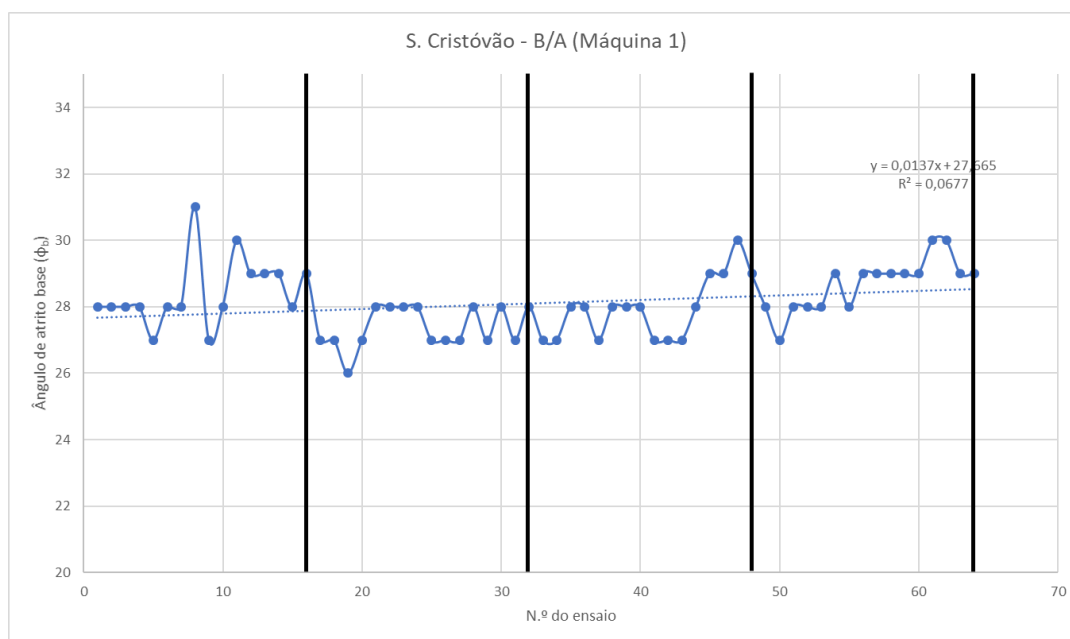


Figura 50 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (B/A) (Máquina 1).

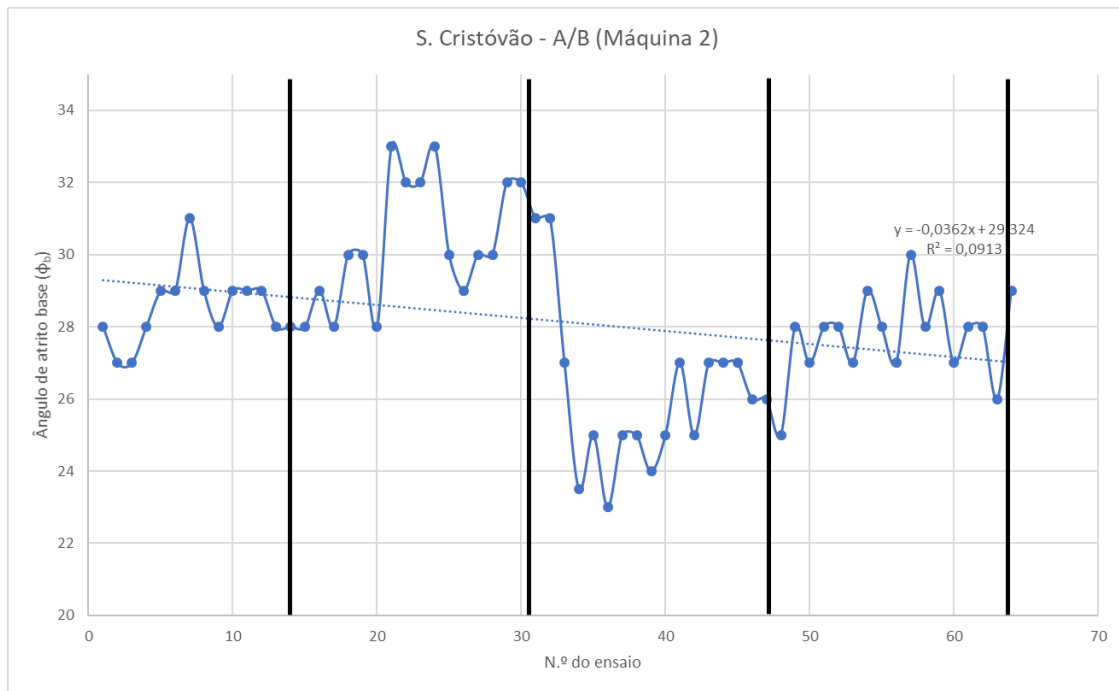


Figura 51 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (A/B) (Máquina 2).

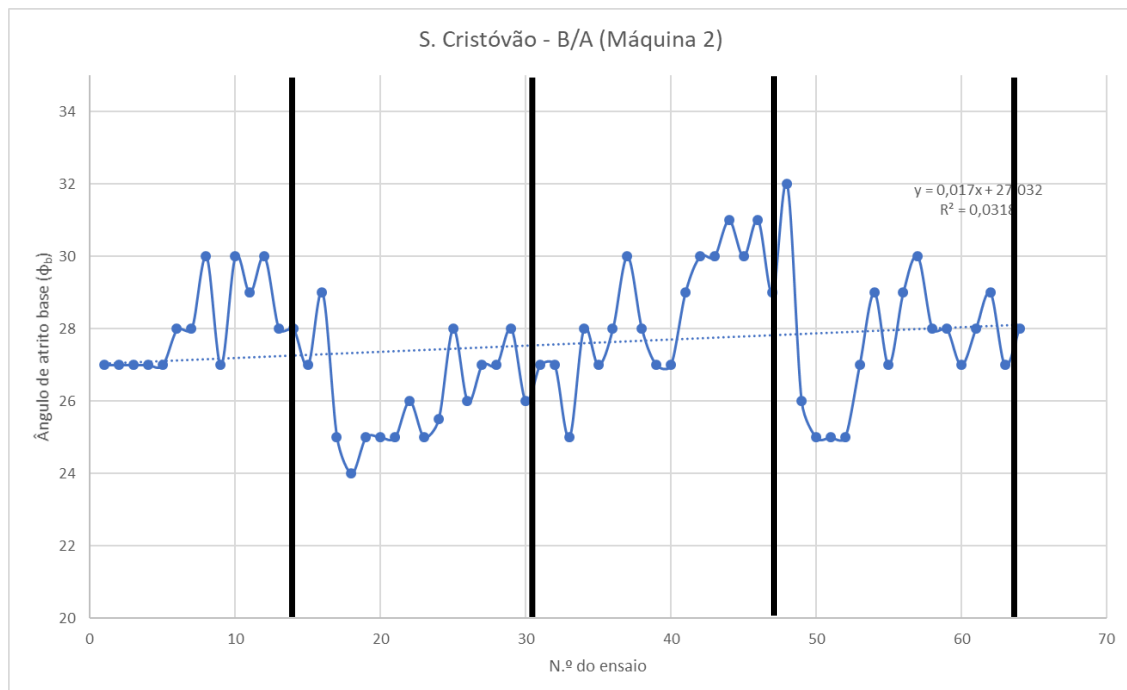


Figura 52 – Tendência da evolução do ângulo de atrito (ϕ_b) relacionada com o desgaste dos provetes para a zona da escarpa de S. Cristóvão, no par (B/A) (Máquina 2).

Os valores de R^2 , que refletem a qualidade das correlações efetuadas, não são valores que reflitam grande qualidade das mesmas, com os valores mais altos a aproximarem-se dos 0,73 no melhor dos casos na Pedreira de Joane e no caso da escarpa de S. Cristóvão, valores muito baixos

a rondar os 0,05. Isto é explicado pelas oscilações que ocorrem principalmente no caso da escarpa de S. Cristóvão, já referidas.

Na figura 53 podem-se ver fotografados os provetes da zona da escarpa de S. Cristóvão antes e depois da realização dos ensaios, com efeitos macroscópicos similares aos da zona da pedreira de Joane.

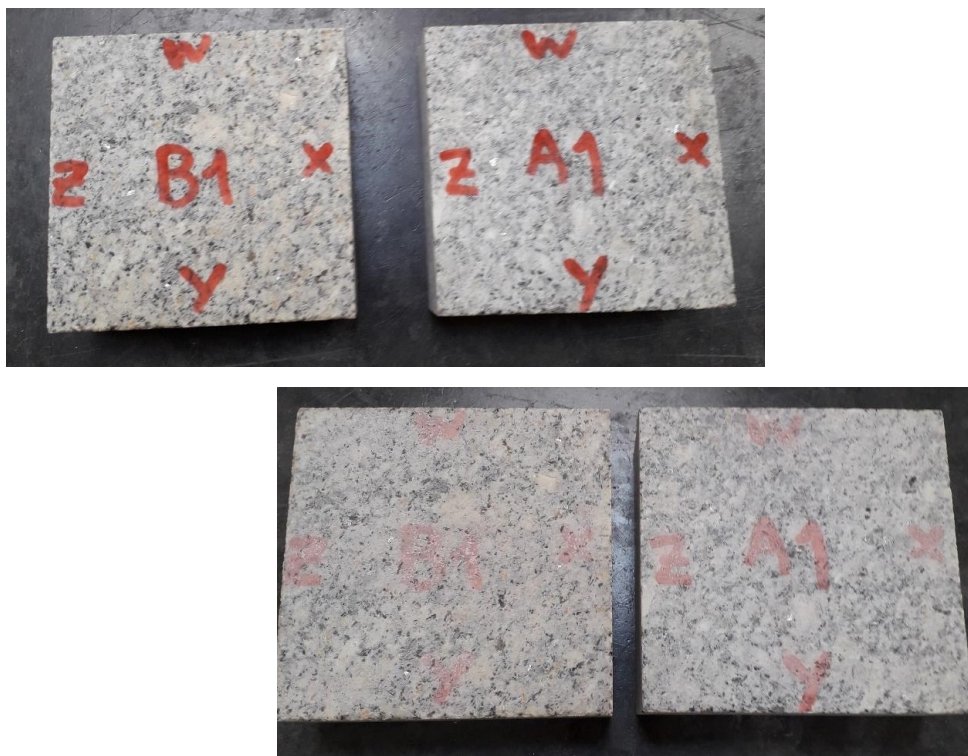


Figura 53 – Provetes A e B da zona da escarpa de S. Cristóvão antes (em cima) e depois (em baixo) da realização dos ensaios.

Na seguinte tabela (tabela 18), encontram-se arrumados em síntese, por fim, os valores obtidos para o ângulo de atrito base (ϕ_b), para cada contacto, par e zona, em cada uma das máquinas.

Tabela 18 – Quadro síntese dos valores obtidos para o ϕ_b .

Contacto (Inferior/Superior)	ϕ_b (°)			
	Joane		S. Cristóvão	
	1-Protótipo	2-Univ. Aveiro	1-Protótipo	2-Univ. Aveiro
A1/B1	26,63	23,63	28,94	28,50
A1/B2	26,13	24,06	29,81	30,69
A2/B1	31,06	29,13	27,44	25,47
A2/B2	30,63	29,25	28,69	27,94
A/B	28,61	26,52	28,72	28,15
B1/A1	27,00	24,75	28,44	28,06
B1/A2	31,00	29,81	27,38	26,03
B2/A1	28,00	25,81	27,94	28,88
B2/A2	30,00	29,75	28,69	27,38
B/A	29,00	27,53	28,11	27,59
Zona	28,80	27,02	28,41	27,87

4.5.2. Ensaio esclerométrico – Martelo de Schmidt

O ensaio esclerométrico consiste num ensaio *in situ* realizado com recurso a um esclerómetro portátil (também designado por Martelo de Schmidt) e foi desenvolvido em 1948 como um ensaio não destrutivo para betão (Aydin, 2015). Mais tarde foi aplicado o mesmo ensaio em rochas, com o intuito de estimar a sua resistência. É um método expedito e recorrente nas geociências de engenharia e geotecnia de maciços rochosos, devido à sua simplicidade e portabilidade (ISRM, 2015). Este ensaio tem como objetivo estimar a dureza do material-rocha, através da medição do valor do ressalto de uma massa de aço, quando percutida sobre a superfície da rocha, que poderá sofrer maior ou menor ressalto mediante a resistência da rocha. O valor desse ressalto é registado no equipamento e varia entre 10 e 100, numa escala adimensional. O esclerómetro portátil deve ser colocado na perpendicular à superfície escolhida, que deve estar limpa e sem detritos que possam desvirtuar os ensaios (ISRM, 2015) (figura 54).



Figura 54 – Posicionamento do martelo de Schmidt durante o ensaio numa amostra.

Em cada amostra foram efetuados, então, os ensaios esclerométricos, realizando 25 repetições numa das faces de cada amostra, depois desta ser cuidadosamente limpa de quaisquer detritos ou poeira que influenciassem negativamente o ensaio. Depois de registados os valores, apenas não foram considerados para cálculo da média os 5 valores mais altos, tendo-se optado pelo mais desfavorável por questões de segurança. O valor médio foi depois inserido no Ábaco de Miller (figura 55), considerando a orientação do martelo e a densidade média da rocha (2,65 para o granito, neste caso), de modo a se obter o valor da resistência à compressão uniaxial (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

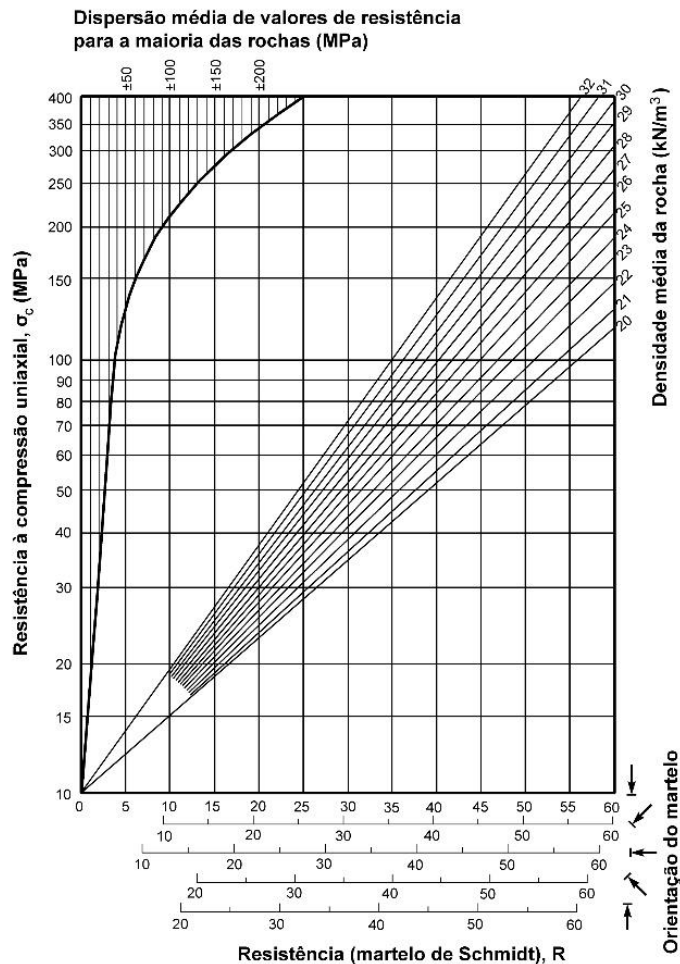


Figura 55 – Ábaco de Miller, para obter a resistência à compressão uniaxial (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

No anexo D.1, encontram-se detalhados os cálculos efetuados com o ábaco de Miller, sendo que no anexo F.1 encontram-se os valores dos 25 ressaltos e os que foram considerados. Na tabela 19, encontram-se as classes de resistência, segundo o ISRM, resultantes da resistência à compressão uniaxial considerada em MPa.

Tabela 19 – Classes de resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1981).

Intervalo (MPa)	Nomenclatura		Designações	
>200	S ₁	S ₁₋₂	Muito elevada	Elevada
60-200	S ₂		Elevada	
20-60	S ₃	S ₃	Média	Média
6-20	S ₄	S ₄₋₅	Baixa	Baixa
<6	S ₅		Muito baixa	

Foram efetuados, para além do ensaio esclerométrico nas superfícies das amostras secas, os mesmos ensaios também nas superfícies das amostras após serem molhadas, de forma a retirar a resistência à compressão nas amostras húmidas, que dá origem aos parâmetros R (utilizado no ângulo de atrito residual [ϕ_r]) e JCS (usado na resistência ao corte [τ]).

Na tabela 20, encontram-se os resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial provenientes do ensaio esclerométrico, para cada uma das quatro amostras de cada local de recolha (pedreira de Joane e escarpa de S. Cristóvão), com superfície seca.

Tabela 20 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para cada amostra com superfície seca e respetiva classe de resistência.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Valor médio do ressalto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
Pedreira de Joane	1	41,95	87,06	S ₂
	2	48,90	127,86	S ₂
	3	40,25	78,21	S ₂
	4	44,60	100,00	S ₂
		MÉDIA	98,28	S₂
		MEDIANA	93,53	S₂
Escarpa de S. Cristóvão	1	45,35	104,44	S ₂
	2	37,70	67,08	S ₂
	3	40,89	81,18	S ₂
	4	43,80	95,00	S ₂
		MÉDIA	86,93	S₂
		MEDIANA	88,09	S₂

Analisando os resultados, ambos os conjuntos de amostras resultaram numa resistência à compressão uniaxial considerada elevada (S₂), algo que seria expectável tendo em conta a natureza da rocha (granito). As amostras recolhidas na pedreira de Joane resultaram, em média, numa resistência ligeiramente superior do que a obtida para as amostras da escarpa de S. Cristóvão. O valor da mediana não difere muito do obtido para a média, com uma variação máxima de 5 unidades.

Na tabela 21, encontram-se os resultados obtidos para a resistência à compressão uniaxial provenientes do ensaio esclerométrico, para cada uma das quatro amostras de cada local de recolha (pedreira de Joane e escarpa de S. Cristóvão), com superfície húmida. Como resultado, e como seria expectável, os valores médios (e da mediana) e a maior parte dos parciais da resistência à compressão são inferiores neste caso do que os obtidos com a superfície da seca, uma vez que a água resulta numa diminuição da resistência do maciço rochoso.

Tabela 21 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para cada amostra com superfície húmida e respetiva classe de resistência.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Valor médio do ressalto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
Pedreira de Joane	1	41,25	82,22	S ₂
	2	45,35	104,44	S ₂
	3	37,30	65,60	S ₂
	4	38,00	68,00	S ₂
		MÉDIA	80,07	S₂
		MEDIANA	75,11	S₂
Escarpa de S. Cristóvão	1	42,60	89,90	S ₂
	2	38,20	68,80	S ₂
	3	38,76	70,90	S ₂
	4	43,10	91,18	S ₂
		MÉDIA	80,20	S₂
		MEDIANA	80,40	S₂

4.5.3. Ângulo de atrito residual (ϕ_r)

Após a obtenção do ângulo de atrito de base (ϕ_b), é possível, então, determinar analiticamente a resistência ao corte das superfícies das discontinuidades em estudo. Porém, para tal, é necessário ainda antes desse passo, determinar o ângulo de atrito residual (ϕ_r).

Ora, como já referido no capítulo 2, o ângulo de atrito residual, ϕ_r é estimado, de acordo com Barton & Choubey (1977), como segue:

Equação 8 – Ângulo de atrito residual (ϕ_r), por Barton & Choubey (1977).

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 \times \left(\frac{r}{R}\right)$$

Onde, para além do valor de ϕ_b já obtido a partir dos cálculos anteriores, é necessário determinar:

- o valor de r – resistência à compressão da(s) amostra(s) húmida(s) que deram origem aos provetes em estudo;
- o valor de R – resistência à compressão de um dos provetes cortados da respetiva zona em estudo.

Para o parâmetro r serão utilizados os valores da resistência à compressão uniaxial obtidos para as amostras húmidas, mas apenas tendo em conta os valores ou a média dos valores da amostra (caso da escarpa de S. Cristóvão) ou amostras (caso da pedreira de Joane) que foram efetivamente utilizados para o corte e obtenção dos provetes. Na tabela seguinte (tabela 22),

encontram-se esses valores para todas as amostras e a média utilizada referente às amostras utilizadas (destacadas).

Tabela 22 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para as amostras húmidas (parâmetro r) e respetiva classe de resistência.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Valor médio do ressalto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
Pedreira de Joane	1	41,25	82,22	S ₂
	2	45,35	104,44	S ₂
	3	37,30	65,60	S ₂
	4	38,00	68,00	S ₂
		MÉDIA CONSIDERADA	93,33	S₂
Escarpa de S. Cristóvão	1	42,60	89,90	S ₂
	2	38,20	68,80	S ₂
	3	38,76	70,90	S ₂
	4	43,10	91,18	S ₂
		MÉDIA CONSIDERADA	89,90	S₂

Para o parâmetro R , deveria ser utilizado um provete de cada zona em estudo para calcular a respetiva resistência à compressão; no entanto, uma vez que nas sobras do corte provieram alguns pedaços com superfície serrada lisa, foram usados esses blocos, que se designaram como provetes S, tanto para a pedreira de Joane (figura 56) como para a escarpa de S. Cristóvão (figura 57).



Figura 56 – Provelte S para a medição da resistência à compressão, para a zona da pedreira de Joane.

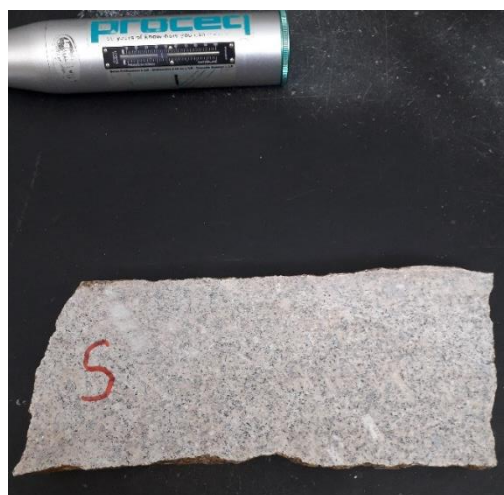


Figura 57 – Provete S para a medição da resistência à compressão, para a zona da escarpa de S. Cristóvão.

Tal como para os ensaios realizados nas amostras em bruto, foi mantido o critério, realizando 25 disparos e considerando para o cálculo de R os 5 valores mais altos. Na tabela 23 encontram-se os valores finais obtidos, em MPa, para a resistência à compressão, dando origem ao parâmetro R.

Tabela 23 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para os provetes S (parâmetro R) e respetiva classe de resistência.

Fonte da amostra	Provete	Valor médio do ressalto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
Pedreira de Joane	S	43,45	93,53	S ₂
Escarpa de S. Cristóvão	S	45,35	104,44	S ₂

A partir deste ponto, estão então disponíveis todas as variáveis necessárias para o cálculo do ângulo de atrito residual (ϕ_r). Optou-se por não se obter apenas o resultado do ϕ_r para as médias finais de zona, mas também para os valores intermédios, tal como demonstrado no quadro-síntese da tabela 18 (pág. 68) para o ângulo de atrito base, para poder observar os padrões e as semelhanças com esse parâmetro. Também como para o ϕ_b , se efetuaram os cálculos para as duas máquinas (protótipo e equipamento da UA). Na tabela 24 encontram-se os valores finais para o ângulo de atrito residual, dividido em caso de estudo e máquina, com valores parciais de contacto e de par.

Tabela 24 – Quadro síntese dos valores obtidos para o ϕ_r .

Contacto (Inferior/Superior)	ϕ_r (°)			
	Joane		S. Cristóvão	
	1-Protótipo	2-Univ. Aveiro	1-Protótipo	2-Univ. Aveiro
A1/B1	26,58	23,58	26,15	25,72
A1/B2	26,08	24,02	27,03	27,90
A2/B1	31,02	29,08	24,65	22,68
A2/B2	30,58	29,21	25,90	25,15
A/B	28,57	26,47	25,93	25,36
B1/A1	26,96	24,71	25,65	25,28
B1/A2	30,96	29,77	24,59	23,25
B2/A1	27,96	25,77	25,15	26,09
B2/A2	29,96	29,71	25,90	24,59
B/A	28,96	27,49	25,33	24,80
Zona	28,76	26,98	25,63	25,08

Analisando os valores obtidos para o ângulo de atrito residual (ϕ_r), apresentados na tabela 24, pode ver-se que, para o caso da pedreira de Joane, os valores mantiveram-se muito semelhantes ao ângulo de atrito de base, em oposição ao caso da escarpa de S. Cristóvão, em que houve uma descida de 2 a 2,5 graus. Ora, a fórmula que permite obter ϕ_r (equação 8, pág. 72), impõe que o quociente das resistências (r/R) seja o único fator diferenciador no cálculo, funcionando como um coeficiente de redução.

Assim sendo, uma vez que para a pedreira de Joane se obteve um valor de R (93,53 MPa) quase idêntico, embora superior, ao valor de r (93,33 MPa), resultando num quociente de 0,997, os valores naturalmente sofrem uma redução muito pequena. Em contraste, no caso da escarpa de S. Cristóvão, obteve-se um quociente de 0,860, fruto dos respetivos r (89,90 MPa) e R (104,44 MPa), originando uma diminuição do ângulo mais significativa, embora não ultrapassando os 2,5 graus.

Os valores obtidos para o ângulo de atrito residual serão considerados para a obtenção analítica do JRC e para a análise e dedução da fórmula da resistência ao corte (τ).

4.5.4. JRC (Joint Roughness Coefficient)

Segundo Barton (1973), o valor do *Joint Roughness Coefficient* (JRC) era sempre atribuído com os valores de 5, 10 ou 20. No entanto, existem metodologias que permitem obter valores mais concretos de JRC.

Através do teste de 136 amostras de diferentes litologias e rugosidades, foram construídos perfis-tipo agrupados em intervalos de 2 unidades de JRC de forma a servir de ábaco comparativo com

as rugosidades que se pretendem determinar (Barton & Choubey, 1977). A figura 58 mostra esses perfis-tipo.

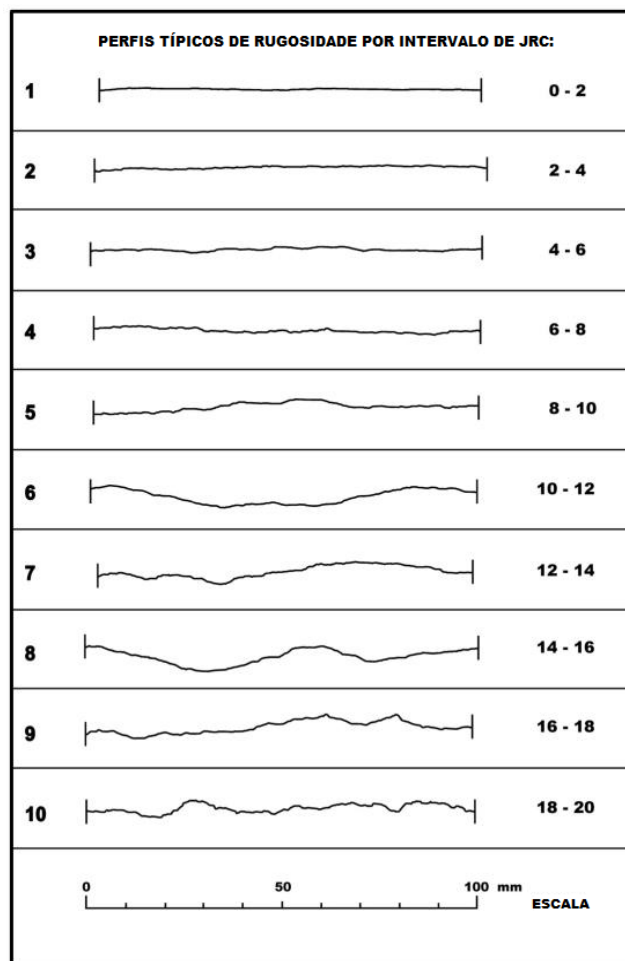


Figura 58 – Perfis tipo para determinar o JRC (Barton & Choubey, 1977)

Para obter perfis de rugosidade resultantes do material rochoso que se está a trabalhar, para depois efetuar a comparação com o ábaco da figura 58, foi realizado um método expedito, que consistiu em colocar um dispositivo constituído por um lápis perpendicular com uma ponta de aço (figura 60), de forma a percorrer a superfície da rocha em quando o lápis, simultaneamente, transcrevia essa rugosidade numa folha de papel colocada perpendicular a essa superfície (figura 59). Esta aproximação foi inspirada na metodologia expedita apresentada por Shi-Gui Du (1997) e retomada em Yong et al. (2018).

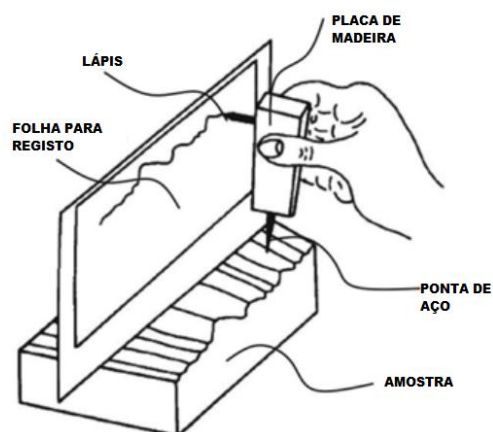


Figura 59 – Esquematização do método expedito para "perfilografar" (Yong et al., 2018).

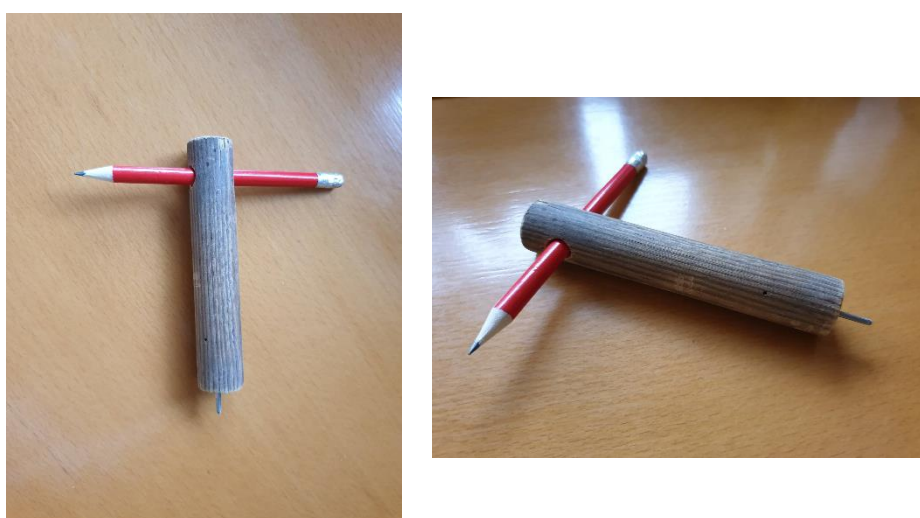


Figura 60 – Dispositivo construído para a realização dos perfis.

Na seguinte tabela (tabela 25) encontram-se os valores de JRC obtidos através deste método, para cada face das amostras em bruto.

Tabela 25 – Quadro síntese com os perfis de Barton utilizados para cada face e respetivo valor de JRC.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Face da amostra	Perfil(is) de Barton usado(s)	Valor de JRC (Barton, 1977)
Pedreira de Joane	1	A	5	9
	2	A	5	9
		B	4	7
	3	A	Entre 4 e 5	8
4	A	Entre 4 e 5	8	
	B	Entre 4 e 5	8	
Escarpa de S. Cristóvão	1	A	Entre 5 e 6	10
	2	A	5	9
		B	5	9
	4	A	7	13
B		7	13	

Para além desta, há mais duas metodologias que permitem obter o parâmetro JRC, uma delas através da medição do comprimento e a amplitude do perfil da superfície rochosa e considerando o ábaco da figura 61, retirar os respetivos valores de JRC, e a outra de forma analítica, através da equação 9, onde nesse caso são necessárias diferentes variáveis, incluindo o ϕ_r .

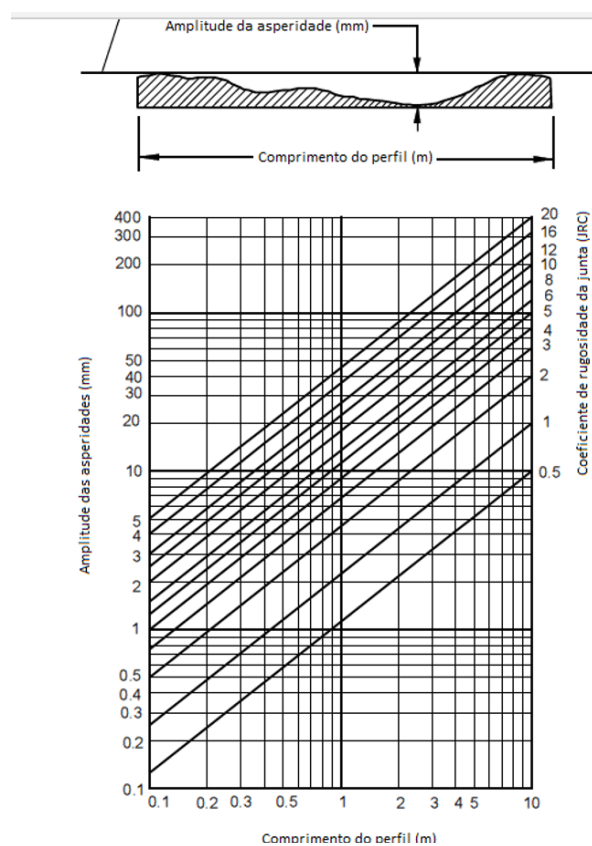


Figura 61 – Ábaco para determinação do JRC através da amplitude do perfil (Barton & Bandis, 1990).

Na tabela 26 encontram-se os resultados de JRC obtidos para o segundo método, para cada face das amostras em bruto.

Tabela 26 – Quadro síntese com valores do comprimento e amplitude do perfil de cada face e respetivo valor de JRC.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Face da amostra	Comprimento Perfil	Amplitude	JRC
Pedreira de Joane	1	A	0,270 m	5 mm	8
	2	A	0,255 m	5 mm	8
		B	0,190 m	4,25 mm	10
	4	A	0,235 m	4,75 mm	8
Escarpa de S. Cristóvão	1	A	0,275 m	3,5 mm	6
		B	0,290 m	6,5 mm	10
	2	A	0,255 m	7,5 mm	12
		B	0,275 m	3 mm	5
	4	A	0,265 m	3,75 mm	6
		B	0,240 m	3,5 mm	6
		B	0,180 m	6 mm	14

O último método consiste na aplicação direta da seguinte fórmula (equação 9):

Equação 9 – JRC obtido de forma analítica.

$$JRC = \left(\frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \right)$$

Onde, para além do ϕ_r , que já foi introduzido dos cálculos anteriores, é necessário:

- σ_n – tensão normal aplicada à descontinuidade (em MPa) – utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\sigma_n = \gamma h \cos 2\alpha, \text{ onde:}$$

- γ – peso específico do material rochoso (em kN/m³)
 - h – espessura da amostra bruta utilizada (em m)
 - α – ângulo de atrito natural das amostras em bruto (já calculado no capítulo 4.3)
- **JCS** – resistência à compressão da superfície da descontinuidade – utiliza-se a resistência à compressão nas amostras húmidas (mesmo valor do parâmetro r utilizado no ϕ_r), mais uma vez com os valores relativos às amostras utilizadas para o corte.

Para o **peso específico (γ)** foi utilizado o valor de 2,65 kg/m³, multiplicado pela aceleração gravítica (9,81).

Para retirar o parâmetro h , foram medidas as dimensões médias das amostras em bruto (tabela 27). Logicamente, os valores considerados são as médias dos valores da pedreira de Joane e do valor da escarpa de S. Cristóvão correspondentes às amostras que foram efetivamente utilizadas para o corte.

Tabela 27 – Dimensões das amostras em bruto de onde foi retirado o parâmetro espessura (h).

Zona	Amostra	Comprimento (m)	Largura (m)	Espessura (m)
Joane	1	0,290	0,220	0,160
	2	0,280	0,240	0,130
	3	0,315	0,250	0,160
	4	0,350	0,125	0,105
MÉDIA CONSIDERADA				0,145
S. Cristóvão	1	0,670	0,320	0,130
	2	0,395	0,250	0,052
	3	0,280	0,200	0,065
	4	0,280	0,235	0,100
MÉDIA CONSIDERADA				0,130

Para o parâmetro α , recorreu-se aos valores obtidos anteriormente para o ângulo de atrito natural, sendo utilizada a média dos ângulos obtidos pelas amostras que foram utilizadas para o corte (tabela 28).

Tabela 28 – Valores obtidos para o ângulo de atrito natural (α) das amostras em bruto, de onde se retira o parâmetro α .

Fonte da amostra	Ensaio	Face base/Face deslizante	Ângulo de atrito natural (°)	Face base/Face deslizante	Ângulo de atrito natural (°)
Pedreira de Joane	1	1A/2A	45	1A'/2A	52
	2	1A/2B	40	1A'/2B	33
	3	4A/3A	42	4A'/3A	38
	4	4B/3A	35	4B'/3A	38
MÉDIA CONSIDERADA				42,00	
Escarpa de S. Cristóvão	1	1A/2A	37	1A'/2A	51
	2	1A/2B	42	1A'/2B	55
	3	1A/4A	59	1A'/4A	48
	4	1A/4B	57	1A'/4B	55
MÉDIA CONSIDERADA				52,88	

Por último, para obter o parâmetro JCS foram utilizados exatamente os mesmos valores do parâmetro r , usado para o ângulo de atrito residual (ϕ_r). Na tabela 29 podem-se ver esses valores.

Tabela 29 – Quadro síntese com os resultados da resistência à compressão uniaxial para as amostras húmidas (de onde foi retirado o parâmetro JCS) e respetiva classe de resistência.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Valor médio do ressalto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de resistência (ISRM, 1981)
Pedreira de Joane	1	41,25	82,22	S ₂
	2	45,35	104,44	S ₂
	3	37,30	65,60	S ₂
	4	38,00	68,00	S ₂
		MÉDIA UTILIZADA	93,33	S₂
Escarpa de S. Cristóvão	1	42,60	89,90	S ₂
	2	38,20	68,80	S ₂
	3	38,76	70,90	S ₂
	4	43,10	91,18	S ₂
		MÉDIA UTILIZADA	89,90	S₂

Depois de demonstrada a obtenção de todos estas variáveis, na tabela 30 encontram-se resumidos todos os valores finais utilizados na fórmula da resistência ao corte, à exceção do ϕ_r , em cada uma das zonas.

Tabela 30 – Quadro síntese das variáveis calculadas para a fórmula do JRC.

Parâmetro	Unidade	Joane	S. Cristóvão
γ	kN/m ³	26,00	
h	m	0,145	0,130
α	º	42,00	52,88
σ_n	MPa	0,0021	0,0012
JCS	MPa	93,33	89,90

Na tabela 31, encontram-se os valores obtidos analiticamente para o JRC, neste caso, considerando que foi necessário utilizar o valor do ϕ_r , apenas para as amostras utilizadas para o corte e relativos às duas máquinas utilizadas para o ensaio, uma vez que aí precisamente o valor de ϕ_r difere.

Tabela 31 – Valores obtidos para o JRC analítico, para cada zona e cada máquina.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Máquina 1				
		α (º)	ϕ_r (º)	JCS (MPa)	σ_n (MPa)	JRC
Joane	1	42	28,76	82,22	0,0019	2,9
	2	42	28,76	104,44	0,0023	2,8
S. Cristóvão	1	52,88	25,63	89,90	0,0012	5,6
		Máquina 2				
Joane	1	42	26,98	82,22	0,0019	3,2
	2	42	26,98	104,44	0,0023	3,2
S. Cristóvão	1	52,88	25,08	89,90	0,0012	5,7

Importa agora comparar os resultados de JRC obtidos através das três metodologias aplicadas. Na tabela 32, pode-se ver essa comparação.

Tabela 32 – Quadro síntese comparativos dos valores obtidos para o JRC através das três diferentes metodologias.

Fonte da amostra	N.º da amostra	Face da amostra	Método 1-Perfilógrafo	Método 2-Comp/Amp Perfil	Método 3-Fórmula		
					Máquina 1	Máquina 2	
Pedreira de Joane	1	A	9	8	2,9	3,2	
	2	A	9	8	2,8	3,2	
		B	7	10			
	3	A	8	8	--	--	
	4	A	8	6	--	--	
		B	8	10	--	--	
	Escarpa de S. Cristóvão	1	A	10	12	5,6	5,7
		2	A	9	5	--	--
B			9	6	--	--	
4		A	13	6	--	--	
		B	13	14	--	--	

Como se pode ver, os dois primeiros métodos – métodos expeditos – resultaram em valores mais ou menos semelhantes (tirado uma ou outra exceção, diferenças a rondar no máximo as 3 unidades), ao passo que o terceiro método – analítico – resultou em valores consideravelmente mais baixos e díspares em relação aos anteriores. Essa situação será explicada pelo facto de os métodos expeditos terem sido realizados única e exclusivamente na superfície das amostras em bruto ao passo que o método analítico possui variáveis relativos aos provetes e à amostra húmida que provocam essa redução no resultado final.

4.5.5. Resistência ao corte (τ)

Para a obtenção da resistência ao corte (em MPa), segue-se, a partir dos resultados do ângulo de atrito residual, a fórmula proposta por Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis (1990):

Equação 10 – Resistência ao corte de uma descontinuidade (Barton & Choubey (1977) e Barton & Bandis 1990).

$$\tau = \sigma_n \times \tan[\phi_r + JRC \times \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n})]$$

Dissecando esta fórmula proposta por Barton, esta vem no seguimento das diversas variáveis obtidas anteriormente, nomeadamente o ângulo de atrito residual (ϕ_r), a rugosidade intrínseca das descontinuidades (JRC), a resistência à compressão (JCS) e a tensão normal.

O fator mais determinante da resistência ao corte é logicamente a tensão normal uma vez que é diretamente proporcional e possui um peso linear no seu crescimento, função principalmente da espessura do maciço em causa, juntando-se à influência do peso específico do material e do ângulo de atrito natural (ver descrição da equação 9, pág. 79). No gráfico da figura 62 é corroborada essa relação.

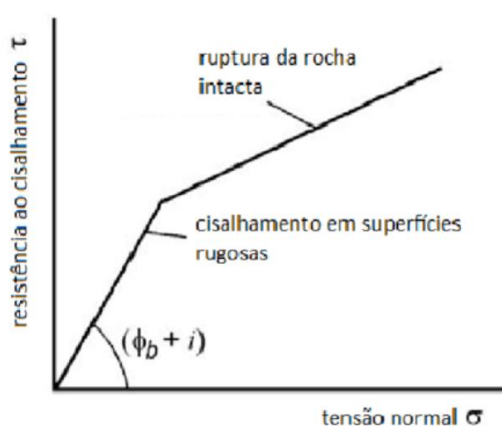


Figura 62 – Critério de resistência ao corte (τ) para descontinuidades (adaptado de Patton, 1966).

O outro fator serve de fator de acréscimo ou decréscimo resultante das tensões tangenciais originadas pelos vários parâmetros determinados nesta dissertação, sendo que ao JRC (rugosidade) é multiplicado um quociente entre a resistência à compressão na superfície húmida e a tensão normal, originando um valor que poderá oscilar entre 20 e 40, que será somado ao ângulo de atrito residual (ϕ_r), valor que situa normalmente entre 20 e 30 graus. Tomando esses valores todo o segundo fator da expressão estará situado entre os valores de 0,75 e 2,50, aproximadamente.

Em suma, é, portanto, pertinente a obtenção dos parâmetros determinados nesta tese, de forma a conseguir um valor rigorosa da resistência ao corte (τ) de um maciço granítico.

4.5.6. Síntese dos parâmetros obtidos

Na tabela 33, encontram-se sintetizados todos os resultados obtidos para os 2 parâmetros calculados com base nos resultados obtidos através do *tilt test* – ângulo de atrito base (ϕ_b) e ângulo de atrito residual (ϕ_r), de maneira a obter uma visão geral.

Tabela 33 – Quadro síntese dos valores finais de ângulo de atrito base (ϕ_b) e ângulo de atrito residual (ϕ_r) divididos em contacto, par, zona e máquina.

Contacto (Inf/Sup)	ϕ_b (°)				ϕ_r (°)			
	Joane		S. Cristóvão		Joane		S. Cristóvão	
	1- Protótipo	2-Univ. Aveiro	1- Protótipo	2-Univ. Aveiro	1- Protótipo	2-Univ. Aveiro	1- Protótipo	2-Univ. Aveiro
A1/B1	26,63	23,63	28,94	28,50	26,58	23,58	26,15	25,72
A1/B2	26,13	24,06	29,81	30,69	26,08	24,02	27,03	27,90
A2/B1	31,06	29,13	27,44	25,47	31,02	29,08	24,65	22,68
A2/B2	30,63	29,25	28,69	27,94	30,58	29,21	25,90	25,15
A/B	28,61	26,52	28,72	28,15	28,57	26,47	25,93	25,36
B1/A1	27,00	24,75	28,44	28,06	26,96	24,71	25,65	25,28
B1/A2	31,00	29,81	27,38	26,03	30,96	29,77	24,59	23,25
B2/A1	28,00	25,81	27,94	28,88	27,96	25,77	25,15	26,09
B2/A2	30,00	29,75	28,69	27,38	29,96	29,71	25,90	24,59
B/A	29,00	27,53	28,11	27,59	28,96	27,49	25,33	24,80
Zona	28,80	27,02	28,41	27,87	28,76	26,98	25,63	25,08

Capítulo V.

Conclusões

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

A realização desta dissertação teve como objetivo a determinação de vários parâmetros de caracterização de material rochoso – ângulo de atrito natural (α), ângulo de atrito base (ϕ_b), ângulo de atrito residual (ϕ_r) e, por fim, resistência ao corte (τ) – através da realização do método laboratorial sugerido *Tilt Test*, um ensaio de basculamento (ou inclinação) de superfícies rochosas planas. Este método foi realizado em provetes paralelepípedicos para a obtenção de todos os referidos parâmetros, à exceção do ângulo de atrito natural, que foi executado nas amostras em bruto.

Como foi referido anteriormente, para a realização deste ensaio, foi necessária a recolha de amostras de material rochoso – granito – de dois locais de estudo diferentes – Joane e S. Cristóvão –, bem como sintetizar as respetivas características geológicas, geotécnicas e geomecânicas de campo de estudos prévios e uma descrição geológico-geotécnica das amostras.

Foram também executados ensaios complementares essenciais para a obtenção dos parâmetros anteriormente referidos, nomeadamente a determinação da resistência à compressão uniaxial (utilizando o martelo de Schmidt), quer nas amostras em bruto (secas e húmidas), quer nos provetes, e a determinação do coeficiente de rugosidade (JRC).

Para a execução propriamente dita dos *tilt test*, e de forma a poder comparar as grandezas obtidas, recorreu-se à construção de um protótipo (ISEP) de utilização manual e à utilização de uma máquina mecânica cedida pela Universidade de Aveiro.

Os provetes foram obtidos através do corte selecionado das amostras em bruto, corte esse proporcionado pela Cooperativa dos Pedreiros, gerando quatro provetes paralelepípedicos para cada setor de estudo.

Depois, foi cumprida a execução de uma grande quantidade de ensaios de basculamento/inclinação (*tilt test*), respeitando todas as combinações possíveis de disposição dos provetes, repetindo cada ensaio único por três vezes, e realizado alternadamente em cada uma das máquinas, ensaios dos quais se retirou o ângulo de atrito de base (ϕ_b).

Em seguida, passou-se ao gabinete, onde se analisou pormenorizadamente os valores obtidos, a relação entre as diferentes máquinas e os diferentes setores de estudo, bem como a evolução do ângulo de atrito durante a execução dos ensaios, com suporte dado através de análise estatística.

Com os valores do ϕ_b , foi possível então calcular os restantes parâmetros, aos quais se juntaram aqueles obtidos nos ensaios complementares, obtendo por fim valores para resistência ao corte (τ).

Posto isto, retiram-se as seguintes conclusões:

- O ângulo de atrito natural (α), medido através do contacto de amostras em bruto é globalmente muito superior (entre 40 e 50 graus) do que o ângulo de atrito de base (entre 25 e 35 graus) medido através do contacto de provetes.
- O tipo de granito influencia o ângulo de atrito de base e a resistência ao corte: maior rugosidade, dureza e peso naturais natural geram ângulos de atrito de base superiores entre 1 e 1,5 graus, e a maior resistência à compressão, leva a maior resistência ao corte.
- O corte dos provetes tem de ser minuciosamente cumprido ao nível das dimensões de corte, sendo que possíveis “desníveis” (defeitos) no corte, mesmo na ordem de 0,5 mm, influenciam negativamente a qualidade dos ensaios, levando a ângulos de atrito superiores dos reais e desvirtuando as respetivas análises estatísticas.
- As duas máquinas utilizadas para o *tilt test* geraram valores diferentes para o ângulo de atrito de base (discrepância entre 1 e 1,5 graus), resultante das diferenças entre si, quer na sua composição mecânica e estabilidade da plataforma quer no método de medição, para além das diferenças de desgaste entre as mesmas combinações em diferentes máquinas.
- Apesar de haver uma amplitude máxima de ângulos de atrito de base (ϕ_b) ensaiados, grosso modo, de 12 graus (entre os 22 e os 34 graus), foi possível, através da aplicação de métodos estatísticos inerentes ao método do *tilt test* (medianas e média das medianas), estimar um intervalo mais pequeno do ângulo de atrito de base para o granito: entre os 27 e os 29 graus.
- O desgaste acumulado das faces dos provetes, levaram a que os ângulos de atrito de base medidos fossem gradualmente maiores, ou seja, o ϕ_b cresceu proporcionalmente ao desgaste. Isto resultou provavelmente da acumulação de detritos à medida que os ensaios se foram realizando.
- A diferença das variáveis r – resistência à compressão das amostras húmidas que deram origem aos provetes em estudo e R – resistência à compressão de um dos provetes, funciona como fator de redução do ângulo de atrito residual, ou seja, quanto maior é essa diferença, maior a redução do ϕ_r .

- A resistência ao corte é fundamentalmente proporcional e função da tensão normal, mas também é influenciada pela rugosidade, resistência à compressão e pelo ângulo de atrito residual, sendo estes três últimos parâmetros calculados nesta dissertação.
- O *Tilt test* é um método viável e fiável para a determinação do ângulo de atrito de material rochoso, desde que haja muito rigor quer na preparação dos provetes, quer na execução dos ensaios, quer no tratamento dos resultados, quer na determinação das variáveis provenientes de ensaios complementares.

Em resumo, pode-se afirmar que foram cumpridos os objetivos que foram propostos no início desta dissertação, tendo sido executados os devidos estudos quer no plano teórico, quer no plano experimental e de análise de resultados, sendo os mesmos alvo das respetivas conclusões.

Acrescenta-se ainda que se instalou no protótipo, após a realização destes ensaios, um esquema de leitura dos ângulos, representado nas figuras 63a e 63b, em que estes podem ser consultados com maior precisão num dos prumos que ladeiam a superfície de apoio dos provetes, reduzindo desta forma o erro eventualmente associado ao processo prolongado e repetido de leituras.



Figura 63 – Escala de ângulos adaptada ao protótipo construído (ISEP).

5.2. Perspetivas futuras

A ciência e a engenharia estão em constante evolução, quer a nível do próprio conhecimento, da tecnologia, consequências da investigação e do estudo contínuos.

Efetuada uma análise crítica em relação a todo o processo de estudo prático e laboratorial, é possível apresentar algumas recomendações e perspetivas futuras que poderão melhorar eventuais novas abordagens deste tema:

- Realizar o *tilt test* numa máquina com dispositivo de inclinação motorizado, de forma a eliminar o erro humano resultante das diferentes execuções manuais de levantamento da plataforma, onde não é possível manter uma velocidade de inclinação constante durante o mesmo ensaio e idêntico em todos os ensaios.
- Utilizar mais amostras e provetes provenientes de locais diferentes aumentando a diversidade de características de forma a obter um refinamento metodológico para os parâmetros estudados.
- Utilizar programas de modelação para simular situações de queda de blocos, com introdução dos parâmetros obtidos experimentalmente e a forma como estes se comportam com diversas solicitações.

Capítulo VI.
Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

6. Referências bibliográficas

Aires-Barros, L., 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, INIC, Lisboa, 384 p.

Alejano L.R., Ferrero A.M., Ramírez-Oyanguren P., Álvarez-Fernández M.I., 2011. Comparison of limit equilibrium, numerical, and physical models of wall slope stability. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48:16–26.

Alejano L.R., Gómez-Márquez I., Martínez-Alegría R., 2010. Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology*, 114:93–104.

Alejano L.R., Gonzalez J., Muralha, J., 2012a. Comparison of different tilt testing techniques and basic friction angle variability assessment. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 45(6):1023-1035.

Alejano L.R., Gonzalez J., Muralha, J., 2012b. Response by the authors to S.R. Hencher's discussion of the paper "comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment". *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 45(6):1141–1143.

Alejano L.R., Muralha J., Ulusay R., Li C.C., Karakul H., Chryssanthakis P., Aydan Ö., 2018. ISRM Suggested Method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(12):3853–3859.

Alejano L.R., Muralha J., Ulusay R., Li C.C., Pérez-Rey I., Karakul H., Chryssanthakis P., Aydan Ö., Martínez J., Zhang N., 2017. A benchmark experiment to assess factors affecting tilt test results for sawcut rock surfaces. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 50(9):2547–2562.

Alejano L.R., Taboada J., Bastante F.G., Rodríguez P., 2008. Multiapproach back-analysis of a roof collapse in a mining room excavated in stratified rock. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45:899–913.

Aydan Ö., Shimizu Y., Kawamoto T., 1992. The anisotropy of surface morphology characteristics of rock discontinuities. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 29(1):47–59.

Aydin A., 2015. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: R. Ulusay (Ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer, Cham, Heidelberg, p. 25-33.

Barton N.R., Bandis S., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: N. Barton, O. Stephansson (Eds.), *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam. p. 603–610.

Barton N.R., 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7:287-332.

Barton N.R., 1974. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105*, NGI, Oslo.

Barton N.R., 1976. The shear strength of rock and rock joints. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13:1-24.

Barton N.R., 1982. Modelling rock joint behaviour from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. *Technical Report 81-83*, Terra Tek, Salt Lake City.

Barton N.R., 2012. From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering: a shortened version of the 6th Müller Lecture. *ISRM News Journal*, 14:60–66.

Barton N.R., 2016. Non-linear shear strength for rock, rock joints, rockfill and interfaces. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1: 30.

Barton N.R., Bandis S., 1982. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock mass. In: *23rd US Symposium on Rock Mech.* Berkeley, CA, pp 739–760.

Barton N.R., Choubey V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10(1-2):1-54.

Barton N.R., Quadros E., 2015. Anisotropy is everywhere, to see, to measure and to model. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 48:1323–1339.

Brown E.T., 1991. Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, Ano IV (48):9-29*.

Bruce I., Cruden D.M., Eaton T.M., 1989. Use of a tilting table to determine the basic friction angle of hard rock samples. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(3):474-479.

Cawsey D.C., Farrar N.S., 1976. A simple sliding apparatus for the measurement of rock joint friction. *Géotechnique*, 26(2):382-386.

CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Research Council, National Academy Press, 568 p.

Chaminé H.I., 2016. Técnicas de amostragem em estudos de maciços rochosos fracturados: importância na prática da geologia estrutural, geociências de engenharia e mecânica das rochas. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem*. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 297-343.

Chaminé H.I., Afonso M.J., Ramos L., Pinheiro R., 2015. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6:357-361.

Chaminé H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R., Galiza A.C., 2013. Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Journal*, 36:27-33.

Chaminé H.I., Pinheiro R., Meirinhos J., Santa C., Pereira R., Silva R.S., Moreira P., Madureira M.M., Martins A., Fonseca L., Ramos L., 2016. Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem*. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345–377.

Construal, 2019. Descrição técnico do modelo CB – Máquina destinada ao corte de mármore e granito com disco até 1 600 mm. [<http://www.construal.pt/pt/produtos/14/cb>] (consultado em Junho de 2019).

Coulson J.H., 1972. Shear strength of flat surfaces in rock stability of rock slopes. In: E.J. Cording (ed.), *Proceedings of 13th Symposium on Rock Mechanics*, American Society of Civil Engineers, New York, p. 77–105.

Dinis da Gama C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación de las rocas ornamentales. In: López Jimeno, C. (ed.), *Manual de Rocas Ornamentales*. Entorno Gráfico S.L., Madrid, p. 231-246.

Duarte S., 2017. *Investigações geotécnicas em taludes rochosos: o caso da escarpa de S. cristóvão (Cinfães)*. DEG, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Eberhardt E., 1998. *Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression*. University of Saskatchewan, Canada (Tese de Doutoramento). [https://www.eoas.ubc.ca/personal/erik/e-papers/98EE_PhDThesis.pdf] (consultado em Maio de 2019).

Ferraz P., 2016. *Reforço e proteção de escarpas rochosas. Caso de estudo da escarpa de S. Cristóvão*. DEC, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Ferrer M., González de Vallejo L., 2007. *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. 2 Ed., Publicaciones ITGE, Madrid.

Gonzalez de Vallejo L.I., Ferrer M., 2011. *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 p.

-
- González J., González–Pastoriza N., Castro U., Alejano L.R., Muralha J., 2014. Considerations on the laboratory estimate of the basic friction angle of rock joints. In: L.R. Alejano, A. Perucho, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), *Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses* (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014), CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 199–204.
- Griffiths J.S., 2014. Feet on the ground: engineering geology past, present and future. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 47(2):116-143.
- GSE [Geological Society Engineering Group Working Party Report], 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Geological Society, 28(3):207-242.
- Hencher S.R., 1976. A simple sliding apparatus for the measurement of rock friction (Discussion). *Géotechnique*, 26(4):641–644.
- Hencher S.R., 2012. Discussion of Alejano, Gonzalez and Muralha (2012). *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 45(6):1137–1139.
- Hencher S.R., Richards L.R., 2015. Assessing the shear strength of rock discontinuities at laboratory and field scales. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 48:883–905.
- Hoek E., 2007. *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek’s Corner, 342 p.
- Horn H.M., Deere D.U., 1962. Frictional characteristics of minerals. *Géotechnique*, 12:319–335.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, 2011. Informação estatística sobre a população portuguesa: Concelho de Joane. <http://www.ine.pt/> (consulta em Abril de 2019)
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 85-110.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: R. Ulusay & J.A. Hudson, eds., *suggested methods prepared by the commission on testing methods*, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: R. Ulusay, ed., *suggested methods prepared by the commission on testing methods*, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 pp.
- Kim D.H., Gratchev I., Hein M., Balasubramaniam A., 2016. The application of normal stress reduction function in tilt tests for different block shapes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8):3041–3054.
- Li C.C., Zhang N., Ruiz J., 2019. Measurement of the basic friction angle of planar rock discontinuities with three rock cores. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2):847–856.
- López Jimeno C., López Jimeno E., Carcedo F.J.A., 1995. *Drilling and blasting of rocks*. A.A. Balkema, Taylor & Francis Group, Rotterdam, 400 p.
- Mendes A.S.B., 2018. *Estabilidade de taludes em explorações rochosas fracturadas: cartografia geotécnica e avaliação geomecânica* (Joane, Famalicão). DEG, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).
- Montenegro de Andrade M., Noronha, F., Rocha A., 1986. *Carta Geológica de Portugal*, folha 9B-Guimarães, escala 1:50000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Muralha J., Grasselli G., Tatone B., Blumel M., Chryssanthakis P., Jiang Y., 2014. ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 47:291–302.
- Norbury D., 2016. *Soil and rock description in engineering practice*. 2nd Edition, Whittles publishing, CRC Press. 320 p.
-

-
- Palmström A., Stille H., 2014. Rock engineering. 2nd revised edition, ICE Publishing, London, 352 p.
- Patton F.D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock. In: Proceedings of 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics Lisbon 1:509–513.
- Pedrosa M.Y. [coord.], 1998. Carta hidrogeológica de Portugal, à escala 1/200.000. Folha 1. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Pereira E., 1992. Carta Geológica de Portugal - Notícia Explicativa da Folha 1, Escala 1/200000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 76 p.
- Pérez-Rey I., Alejano L.R., Muralha J., 2019. Experimental study of factors controlling tilt-test results performed on saw-cut rock joints. *Geotechnical Test Journal*, 42(2): 307–330.
- Price D.G., 2009. Engineering geology: principles and practice. Springer-Verlag, Berlin. 450 p.
- Priest S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman and Hall, London, 473 p.
- Ribeiro A., Munhá J., Dias R., Mateus A., Pereira E., Ribeiro L., Fonseca P.E., Araújo A., Oliveira J.T., Romão J., Chaminé H.I., Coke C., Pedro J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26(TC6009): 1-24.
- Rocha M., 2013. Mecânica das Rochas. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha – 1913-2013. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 436 p.
- Ruiz J., Li C.C., 2014. Measurement of the basic friction angle of rock by three different tilt test methods. In: L.R. Alejano, A. Peruchó, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014), CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 261–266.
- Sagaseta C., 1986. On the modes of instability of a rigid block on an inclined plane. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 19:261–266.
- Santana T., Lamas P., 2006. Modelos físicos simples de apoio ao ensino da geotecnia. In: Actas do 10.º Congresso Nacional de Geotecnia, 22 a 26 de Março de 2006. UNL, Lisboa.
- Stimpson B., 1981. A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18:63–65.
- Teixeira C., 1973. Un barrage construit sur une grande faille. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, 18(II-III):137-141.
- Teixeira C., Medeiros A.C., Fernandes A.P., 1968. Carta Geológica de Portugal, escala 1/50000. Folha 14-A (Lamego), Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Terzaghi R.D., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Geotéchnique*, 15(3):287-304.
- USBR, 2009. Procedure for determining the angle of basic friction (static) using a tilting table test (Designation USBR 6258–09). [<http://www.usbr.gov/>]. (consultado Abril de 2019).
- Wyllie D.C., 2014. Rock fall engineering. CRC Press, 270 p.
- Wyllie D.C., Mah C.W., 2004. Rock slope engineering: civil and mining. 4th Edition. Spon Press, London and New York, 431 p.
- Yong R., Fu X., Huang M., Liang Q., Du, S.-G., 2018. A rapid field measurement method for the determination of joint roughness coefficient of large rock joint surfaces. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1):101-109.

Capítulo VII.

Anexos

(página propositadamente em branco)

ANEXO A

Peças Desenhadas

7. Anexos

A.1. Protótipo para o *Tilt Test*

(**FICHEIRO:** Protótipo_para_tilt_test.dwg)

(**FICHEIROS:** A.1. Protótipo_para_tilt_test (1).pdf

A.1. Protótipo_para_tilt_test (2).pdf

A.1. Protótipo_para_tilt_test (3).pdf)

A.2. Dimensões dos provetes

(**FICHEIRO:** Dimensões_dos_provetes.dwg)

(**FICHEIROS:** A.2. Dimensões_dos_provetes (1).pdf

A.2. Dimensões_dos_provetes (2).pdf

A.2. Dimensões_dos_provetes (3).pdf)

ANEXO B

Ângulo de atrito natural (α)

B.1. Fotografias dos ensaios – Amostras da Pedreira de Joane





B.2. Fotografias dos ensaios – Amostras da Escarpa de S. Cristóvão





ANEXO C

Tilt Test

C.1. Tabelas de registo do valor de β durante os ensaios

PROTÓTIPO

31/07/2019

IOANE

A/B

		1			2			3			VIBRAÇÃO		
A1/B1	W/W	30	29	27	X/W	24	25	26	15	16	17	18	
	W/X	22	27	26	X/X	21	24	28	17	18	19	20	
	W/Y	25	27	25	X/Y	28	26	26	19	20	21	22	
	W/Z	26	25	26	X/Z	24	24	25	15	16	17	18	
	Y/W	25	27	27	Z/W	29	29	28	20	21	22	23	
	Y/X	27	26	29	Z/X	27	27	25	16	17	18	19	
	Y/Y	28	27	25	Z/Y	27	27	27	18	19	20	21	
	Y/Z	20	28	27	Z/Z	27	27	27	15	16	17	18	

20/28

A1/B2	W/W	26	29	27	X/W	26	27	27	15	16	17	18
	W/X	26	26	24	X/X	25	25	27	17	18	19	20
	W/Y	25	25	26	X/Y	27	29	25	19	20	21	22
	W/Z	26	27	27	X/Z	25	25	25	15	16	17	18
	Y/W	26	27	28	Z/W	26	26	26	20	21	22	23
	Y/X	25	26	24	Z/X	25	26	27	15	16	17	18
	Y/Y	27	26	25	Z/Y	29	27	27	19	20	21	22
	Y/Z	29	28	27	Z/Z	26	25	27	16	17	18	19

A2/B1	W/W	29	28	29	X/W	29	31	29	10	11	12	13
	W/X	28	28	27	X/X	30	22	31	12	13	14	15
	W/Y	30	29	30	X/Y	31	22	32	14	15	16	17
	W/Z	28	30	29	X/Z	31	22	32	13	14	15	16
	Y/W	33	32	31	Z/W	31	22	31	15	16	17	18
	Y/X	32	32	33	Z/X	31	22	32	12	13	14	15
	Y/Y	32	32	32	Z/Y	31	22	32	12	13	14	15
	Y/Z	21	32	33	Z/Z	32	33	32	13	14	15	16

A2/B2	W/W	30	32	31	X/W	30	30	30				
	W/X	32	29	29	X/X	31	32	21				
	W/Y	28	30	25	X/Y	30	30	20				
	W/Z	30	30	30	X/Z	29	20	30				
	Y/W	30	32	32	Z/W	30	20	31				
	Y/X	32	33	30	Z/X	20	31	32				
	Y/Y	31	31	32	Z/Y	32	30	31				
	Y/Z	32	32	31	Z/Z	31	31	32				

Handwritten signature

1/08/2019

		B/A						VIBRAÇÃO			
		1	2	3	1	2	3				
B1/A1	W/W	28	28	28	X/W	28	27	27			
	W/X	29	28	28	X/X	30	29	28			
	W/Y	27	26	27	X/Y	28	27	29			
	W/Z	28	26	27	X/Z	29	28	28			
	Y/W	27	28	26	Z/W	28	27	26			
	Y/X	26	27	26	Z/X	25	25	26			
	Y/Y	26	28	29	Z/Y	24	26	24			
	Y/Z	26	28	29	Z/Z	25	25	25			

B1/A2	W/W	29	30	29	X/W	30	31	32			
	W/X	31	30	32	X/X	32	30	32			
	W/Y	31	30	30	X/Y	32	32	31			
	W/Z	31	33	33	X/Z	31	31	32			
	Y/W	31	31	33	Z/W	31	30	31			
	Y/X	31	32	30	Z/X	31	31	32			
	Y/Y	32	30	30	Z/Y	32	32	31			
	Y/Z	31	32	32	Z/Z	29	29	29			

B2/A1	W/W	25	25	25	X/W	30/29	28	27			
	W/X	27	28	28	X/X	27	27	28			
	W/Y	28	29	30	X/Y	26	27	26			
	W/Z	29	29	30	X/Z	26	27	28			
	Y/W	26	31/29	27	Z/W	29	28	29			
	Y/X	26	28	27	Z/X	22	32	32			
	Y/Y	28	26	27	Z/Y	29	30	30			
	Y/Z	27	29	27	Z/Z	29	30	31/31			

B2/A2	W/W	29	29	30	X/W	30	29	29			
	W/X	29	30	30	X/X	30	30	32			
	W/Y	30	30	30	X/Y	29	29	30			
	W/Z	30	30	30	X/Z	30	30	32			
	Y/W	29	29	30	Z/W	30	30	31			
	Y/X	31	31	33	Z/X	31	32	31			
	Y/Y	31	30	30	Z/Y	30	31	32			
	Y/Z	29	29	31	Z/Z	32	30	31			

31/2 1/08

Temperatura	20°C	15,5°C
-------------	------	--------

Humidade relativa	64%	90%
-------------------	-----	-----

31/07 1/08

Observações

Paula

S. CRISTÓVÃO

		A/B			B			VIBRAÇÃO			
		1	2	3	1	2	3				
A1/B1	W/W	29	28	29	X/W	29	30	27			
	W/X	28	28	28	X/X	29	29	29			
	W/Y	28	28	28	X/Y	29	30	29			
	W/Z	28	29	29	X/Z	30	30	32 ⁸⁰			
	Y/W	29	29	30	Z/W	29	28	29			
	Y/X	29	29	29	Z/X	29	29	29			
	Y/Y	29	29	30	Z/Y	28	28	28			
	Y/Z	29	29	28	Z/Z	28	29	29			

R. 13

A1/B2	W/W	27	26	27	X/W	29	29	27			
	W/X	26	25	24	X/X	30	30	29			
	W/Y	28	29	28	X/Y	29	30	29			
	W/Z	28	28	31/30	X/Z	33	33	23			
	Y/W	28	29	29	Z/W	29	30	30			
	Y/X	30	30	31	Z/X	30	32	31			
	Y/Y	27	27	31	Z/Y	29	29	30			
	Y/Z	30	29	29	Z/Z	32	30	30			

A2/B1	W/W	27	26	26	X/W	26	27	27			
	W/X	26	26	27	X/X	26	27	28			
	W/Y	27	27	27	X/Y	27	27	28			
	W/Z	26	28	26	X/Z	29	27	27			
	Y/W	26	27	28	Z/W	26	27	29/28			
	Y/X	28	29	31/29	Z/X	28	28	29			
	Y/Y	28	30	29	Z/Y	30	29	29			
	Y/Z	28	28	27	Z/Z	28	28	28			

A2/B2	W/W	28	27	28	X/W	27	28	26			
	W/X	28	29	28	X/X	30	33/30	21			
	W/Y	28	28	29	X/Y	29	29	29			
	W/Z	28	28	29	X/Z	29	29	29			
	Y/W	30	29	30	Z/W	28	28	29			
	Y/X	28	29	29	Z/X	28	28	29			
	Y/Y	28	29	30	Z/Y	28	28	28			
	Y/Z	28	30	30	Z/Z	29	33	29			

30

R. 14

B/A											
		1	2	3	1	2	3	VIBRAÇÃO			
B1/A1	W/W	26	27	26	X/W	22	23	23			
	W/X	28	28	27	X/X	24	24	28			
	W/Y	28	28	28	X/Y	24	28	28			
	W/Z	28	28	28	X/Z	31	31	28			
	Y/W	26	27	27	Z/W	28	29	29			
	Y/X	26	28	29	Z/X	28	30	30			
	Y/Y	29	30	30	Z/Y	28	29	28			
	Y/Z	29	29	29	Z/Z	28	29	29			

B1/A2	W/W	26	27	27	X/W	28	28	28			
	W/X	27	27	27	X/X	28	28	27			
	W/Y	26	26	28	X/Y	27	28	28			
	W/Z	28	26	27	X/Z	28	27	28			
	Y/W	27	28	27	Z/W	28	27	27			
	Y/X	27	27	27	Z/X	28	28	27			
	Y/Y	27	28	27	Z/Y	27	27	27			
	Y/Z	27	28	29	Z/Z	28	28	27			

B2/A1	W/W	27	28	27	X/W	27	26	28			
	W/X	27	27	27	X/X	28	28	28			
	W/Y	27	28	29	X/Y	28	28	27			
	W/Z	27	28	29	X/Z	28	28	27			
	Y/W	29	29	30	Z/W	27	29	29			
	Y/X	29	28	28	Z/X	29	30	29			
	Y/Y	29	31	30	Z/Y	29	30	29			
	Y/Z	30	29	30	Z/Z	29	29	30			

B2/A2	W/W	28	27	29	X/W	28	28	30			
	W/X	28	27	28	X/X	29	30	29			
	W/Y	28	29	28	X/Y	28	28	29			
	W/Z	28	28	29	X/Z	29	29	29			
	Y/W	28	29	29	Z/W	28	30	30			
	Y/X	29	28	29	Z/X	28	30	30			
	Y/Y	28	29	29	Z/Y	28	29	29			
	Y/Z	29	28	29	Z/Z	29	29	30			

4/05
 Temperatura 22,6°

Humidade relativa 77%

4/05

Observações

[Handwritten signature]

AVEIRO

31/01/2019

JOANE

A/B

		1	2	3			1	2	3	n.º VIBRAÇÃO	
A1/B1	W/W	22	22	24	X/W	23	24	23	25	25	25
	W/X	23	24	24	X/X	24	23	23	25	25	25
	W/Y	23	24	23	X/Y	23	24	22	25	25	25
	W/Z	25	22	23	X/Z	23	24	23	25	25	25
	Y/W	25	26	25	Z/W	25	24	25	25	25	25
	Y/X	24	25	23	Z/X	25	24	23	25	25	25
	Y/Y	24	24	23	Z/Y	25	23	24	25	25	25
	Y/Z	24	24	23	Z/Z	23	22	23	25	25	25

A1/B2	W/W	24	24	24	X/W	24	23	23	25	25	25
	W/X	23	23	23	X/X	24	24	24	25	25	25
	W/Y	25	25	25	X/Y	23	22	23	25	25	25
	W/Z	26	22	23	X/Z	25	24	24	25	25	25
	Y/W	25	24	25	Z/W	23	24	24	25	25	25
	Y/X	23	24	23	Z/X	24	24	25	25	25	25
	Y/Y	25	26	26	Z/Y	25	26	25	25	25	25
	Y/Z	26	22	23	Z/Z	25	24	25	25	25	25

A2/B1	W/W	27	28	28	X/W	29	29	29	29	29	29
	W/X	27	28	27	X/X	29	30	28	29	29	29
	W/Y	28	28	28	X/Y	29	29	30	29	29	29
	W/Z	26	26	25	X/Z	29	29	29	29	29	29
	Y/W	31	32	30	Z/W	29	29	29	29	29	29
	Y/X	32	31	32	Z/X	29	28	29	29	29	29
	Y/Y	31	31	31	Z/Y	30	28	29	29	29	29
	Y/Z	29	31	31	Z/Z	29	28	28	29	29	29

A2/B2	W/W	28	29	29	X/W	29	29	29	29	29	29
	W/X	29	27	30	X/X	29	28	28	29	29	29
	W/Y	29	29	28	X/Y	29	28	29	29	29	29
	W/Z	29	29	29	X/Z	29	29	29	29	29	29
	Y/W	31	31	30	Z/W	29	29	31	29	29	29
	Y/X	31	31	29	Z/X	29	29	29	29	29	29
	Y/Y	30	30	29	Z/Y	29	29	29	29	29	29
	Y/Z	29	29	29	Z/Z	30	29	29	29	29	29



1/08/2019

		B/A									VIBRAÇÃO			
		1	2	3	1	2	3							
B1/A1	W/W	26	25	26	X/W	26	25	27						
	W/X	24	26	24	X/X	27	23	23						
	W/Y	24	24	24	X/Y	22	27	22						
	W/Z	24	24	23	X/Z	28	28	22						
	Y/W	24	24	24	Z/W	23	24	24						
	Y/X	25	23	24	Z/X	22	25	24						
	Y/Y	26	26	26	Z/Y	24	22	22						
	Y/Z	24	24	25	Z/Z	23	22	21						

B1/A2	W/W	28	27	28	X/W	30	30	30						
	W/X	28	30	29	X/X	29	31	30						
	W/Y	29	30	30	X/Y	31	32	32						
	W/Z	31	32	30	X/Z	30	31	31						
	Y/W	28	28	29	Z/W	30	29	29						
	Y/X	31	30	30	Z/X	28	29	29						
	Y/Y	30	28	30	Z/Y	30	31	30						
	Y/Z	28	30	30	Z/Z	28	29	30						

B2/A1	W/W	22	22	25	X/W	23	25	25						
	W/X	21	25	26	X/X	24	26	24						
	W/Y	26	24	24	X/Y	23	24	24						
	W/Z	24	25	24	X/Z	24	23	23						
	Y/W	24	25	25	Z/W	29	28	29						
	Y/X	25	26	26	Z/X	30	30	31						
	Y/Y	24	26	25	Z/Y	28	30	28						
	Y/Z	24	25	26	Z/Z	29	29	30						

B2/A2	W/W	29	30	30	X/W	28	29	28						
	W/X	28	29	30	X/X	30	31	30						
	W/Y	30	30	31	X/Y	28	29	29						
	W/Z	31	30	30	X/Z	30	29	30						
	Y/W	29	29	28	Z/W	29	30	29						
	Y/X	31	29	32	Z/X	32	32	32						
	Y/Y	30	29	30	Z/Y	29	31	30						
	Y/Z	30	29	30	Z/Z	29	29	30						

21/07 4/08
 Temperatura 20°C | 25°C

Humidade relativa 64% | 90%

21/07 1/08

Observações

RA

1/08/2019

S. CRISTÓVÃO

A/B

		1	2	3	A/B			VIBRAÇÃO			
					1	2	3				
A1/B1	W/W	28	30	28	X/W	29	28	30			
	W/X	22	23	23	X/X	29	29	28			
	W/Y	22	27	28	X/Y	30	21	31			
	W/Z	29	28	28	X/Z	29	30	28			
	Y/W	29	28	27	Z/W	28	27	28			
	Y/X	23/28	24	28	Z/X	28	30	28/28			
	Y/Y	29	30	29	Z/Y	28	28	28			
	Y/Z	30	29	29	Z/Z	29	29	28			

A1/B2	W/W	28	28	30	X/W	32	34/31	34			
	W/X	29	31	30	X/X	32	32	32			
	W/Y	22	30	29	X/Y	32	32	29/31			
	W/Z	28	28	28	X/Z	33	33	35			
	Y/W	30	31	29	Z/W	31	32	32			
	Y/X	29	31	29	Z/X	31	32	32			
	Y/Y	31	29	30	Z/Y	31	31	32			
	Y/Z	29	30	31	Z/Z	30	31	31			

A2/B1	W/W	22	22	28	X/W	24	25	25			
	W/X	22/23	23/24	26	X/X	23/24	25	26			
	W/Y	26	25	25	X/Y	25	24	24			
	W/Z	23	25	22/23	X/Z	24	25	25			
	Y/W	27	26	27	Z/W	27	27	26			
	Y/X	26	25	25	Z/X	25	27	26			
	Y/Y	28	27	27	Z/Y	27	25	26			
	Y/Z	27	27	27	Z/Z	24	25	26			

A2/B2	W/W	28	28	28	X/W	27	27	26			
	W/X	27	27	26	X/X	29	30	28			
	W/Y	28	28	27	X/Y	28	27	28			
	W/Z	28	28	28	X/Z	26	27	27			
	Y/W	20	29	30	Z/W	28	28	27			
	Y/X	26	28	28	Z/X	28	28	29			
	Y/Y	29	29	28	Z/Y	26	27	25			
	Y/Z	27	27	28	Z/Z	29	29	30			

Paul

		B/A						VIBRAÇÃO			
		1	2	3	1	2	3				
B1/A1	W/W	27	27	27	X/W	29	27	27			
	W/X	27	27	28	X/X	26	28	28			
	W/Y	27	28	28	X/Y	28	27	28			
	W/Z	26	27	27	X/Z	27	30	30			
	Y/W	28	27	27	Z/W	28	28	28			
	Y/X	30	30	28	Z/X	28	29	29			
	Y/Y	28	29	29	Z/Y	27	27	27			
	Y/Z	29	30	30	Z/Z	28	29	29			

B1/A2	W/W	27	25	25	X/W	24	25	26			
	W/X	24	24	25	X/X	26	26	26			
	W/Y	26	25	24	X/Y	25	25	26			
	W/Z	25	25	24	X/Z	24	27	25			
	Y/W	28	29	28	Z/W	28	28	27			
	Y/X	25	26	26	Z/X	26	27	26			
	Y/Y	27	27	27	Z/Y	26	27	27			
	Y/Z	28	27	27	Z/Z	26	27	27			

B2/A1	W/W	27	25	27	X/W	30	31	30			
	W/X	26	28	24	X/X	27	29	27			
	W/Y	27	27	27	X/Y	28	27	27			
	W/Z	29	28	28	X/Z	26	28	27			
	Y/W	30	29	29	Z/W	30	29	27			
	Y/X	30	30	31	Z/X	31	32	32			
	Y/Y	30	30	31	Z/Y	31	29	29			
	Y/Z	31	32	31	Z/Z	32	32	32			

B2/A2	W/W	26	26	27	X/W	27	27	27			
	W/X	25	27	26	X/X	29	29	29			
	W/Y	25	26	27	X/Y	27	25	27			
	W/Z	25	25	26	X/Z	29	29	32/30			
	Y/W	31	29	30	Z/W	28	28	30/28			
	Y/X	27	28	29	Z/X	29	28	27			
	Y/Y	27	28	28	Z/Y	27	29	27			
	Y/Z	28	27	27	Z/Z	27	27	28			

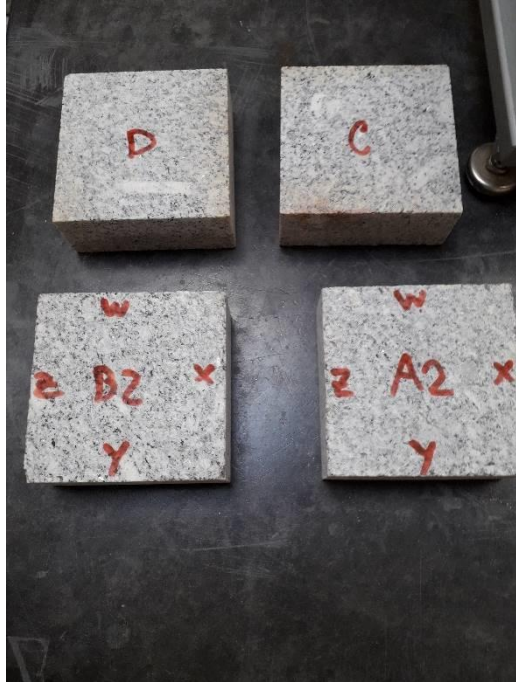
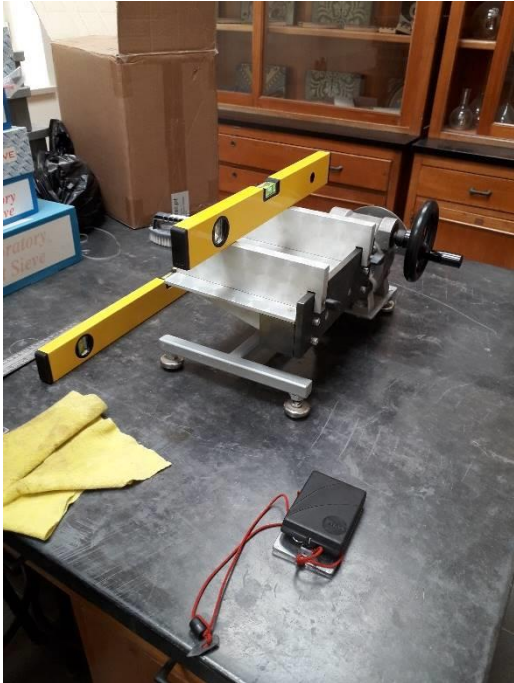
Temperatura $\frac{4}{3}$ 22,6°C

Humidade relativa 77%

Observações

Handwritten signature

C.2. Fotografias dos ensaios *tilt test*







C.3. Vídeos dos ensaios *tilt test*

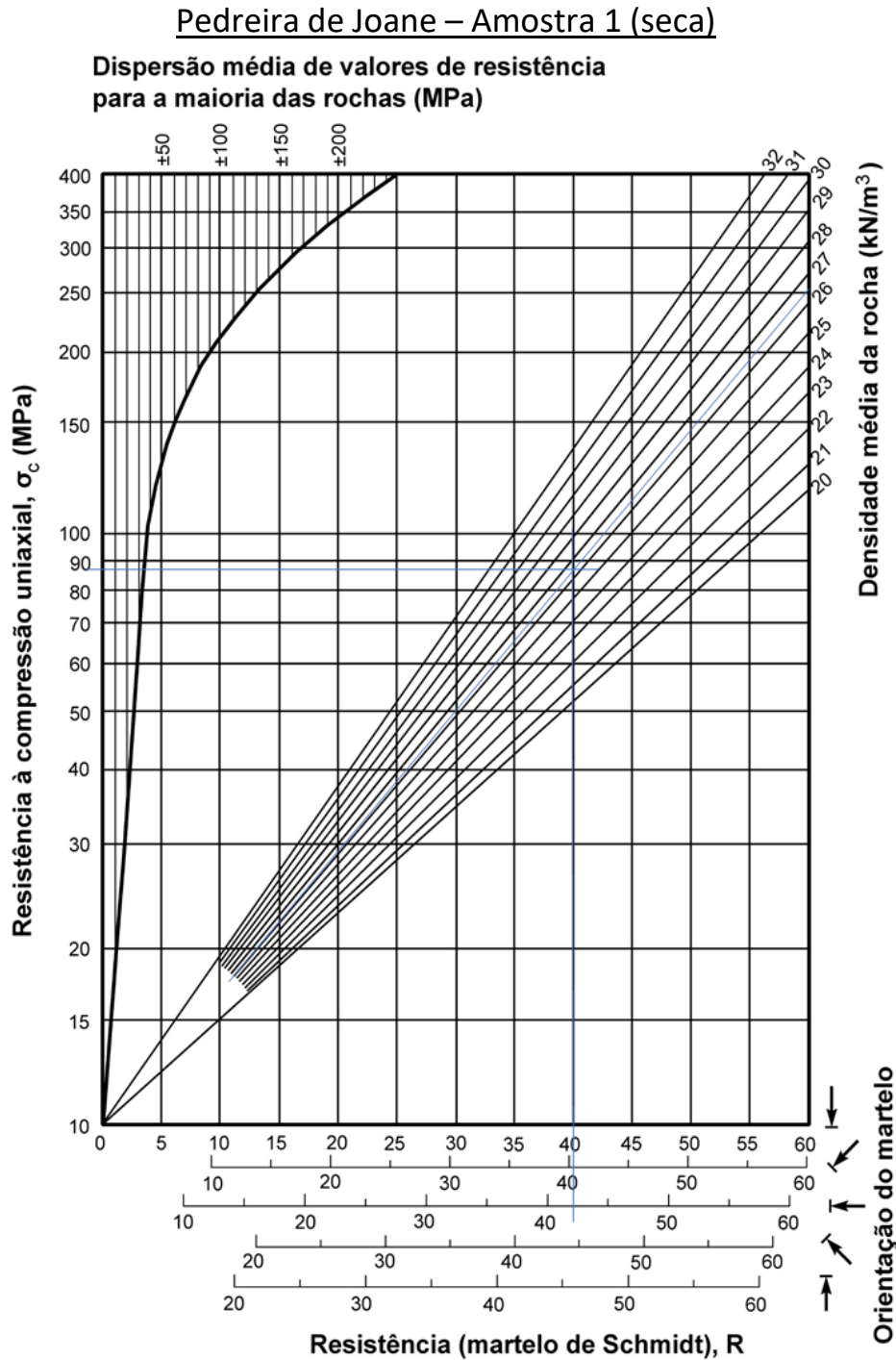
(FICHEIRO: TILT TEST_Máquina_1.mp4)

(FICHEIRO: TILT TEST_Máquina_2.mp4)

ANEXO D

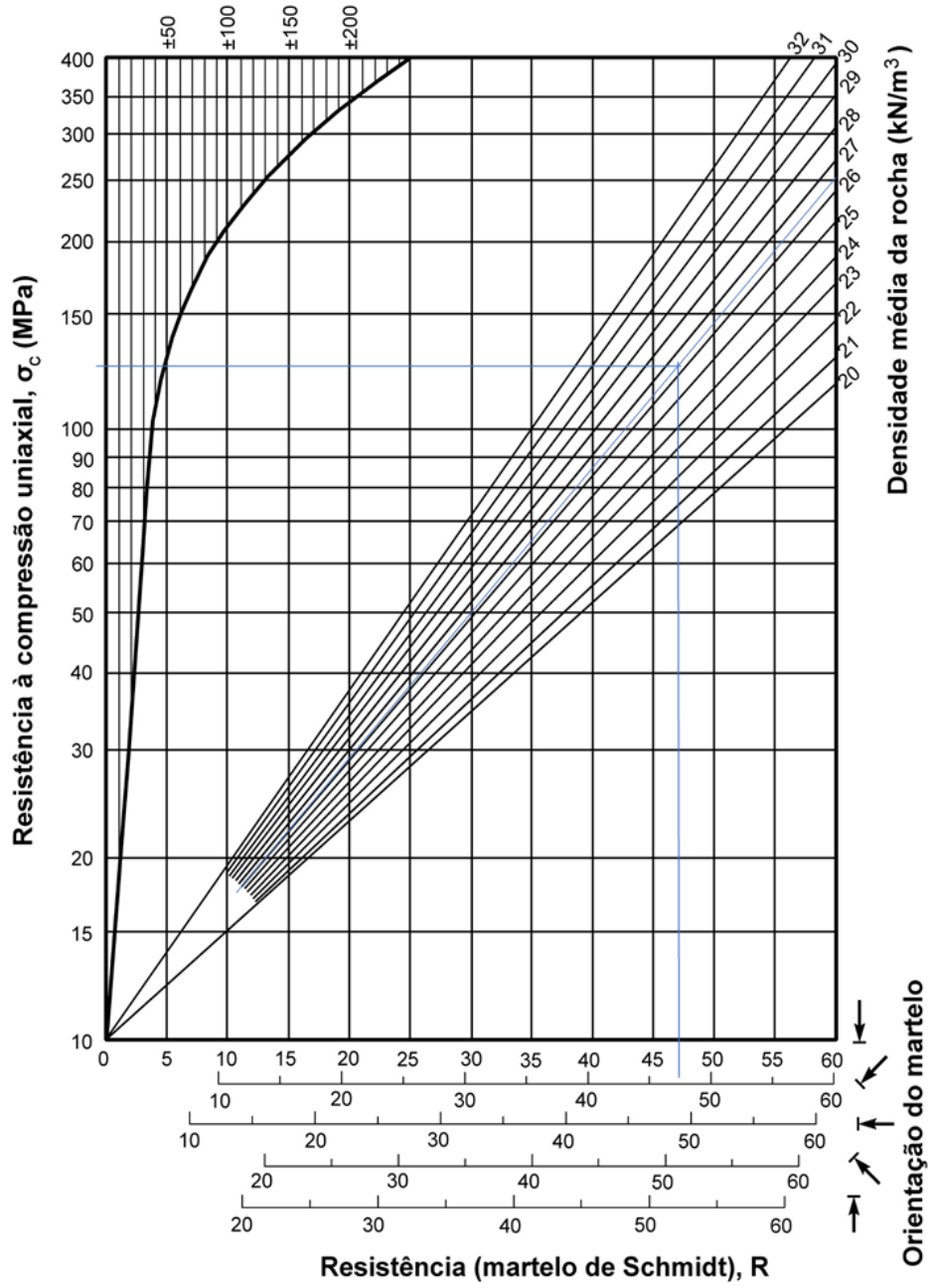
Ensaio Esclerométrico

D.1. Resistência à compressão retirada pelo ábaco de Miller



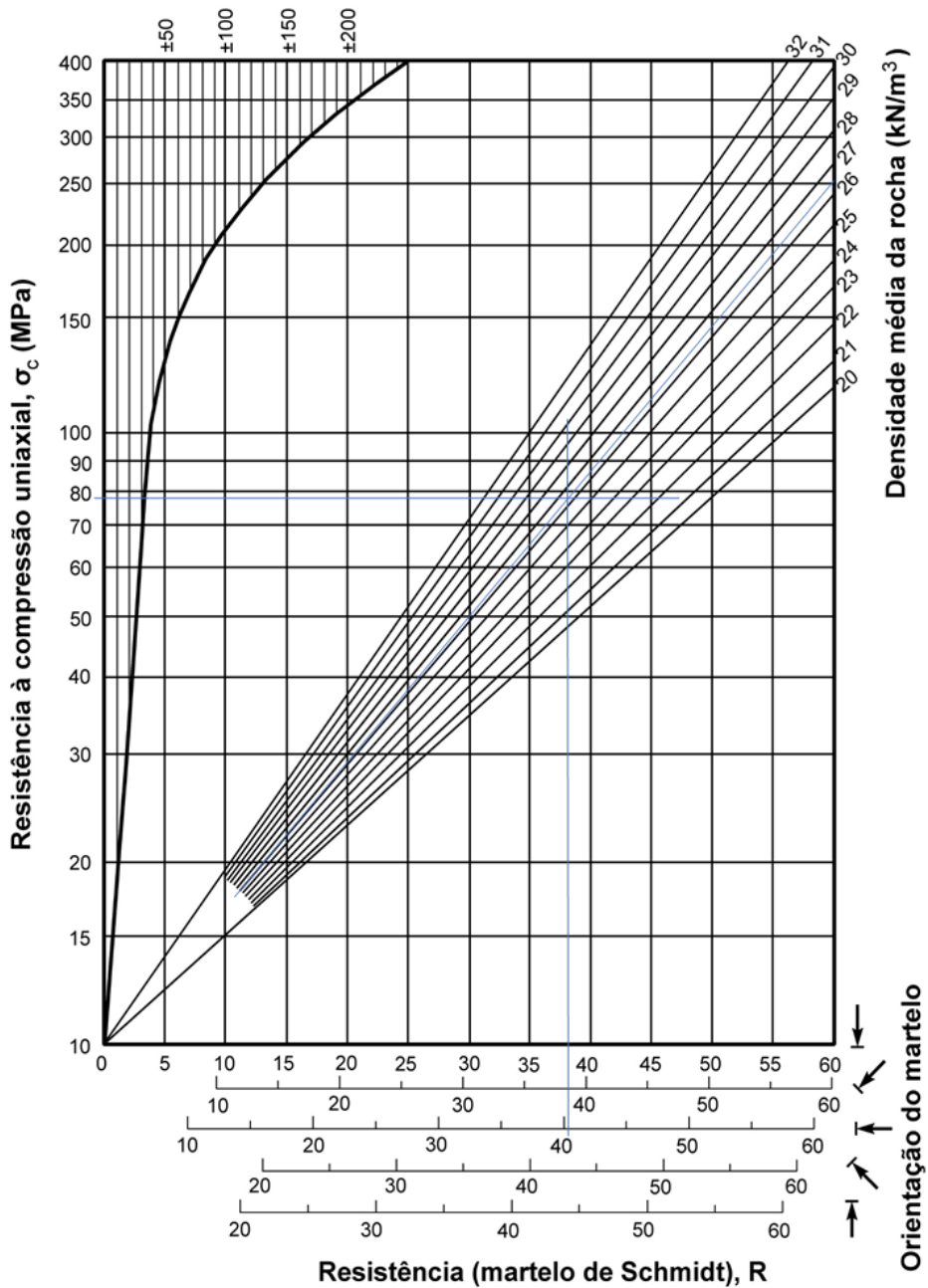
Pedreira de Joane – Amostra 2 (seca)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



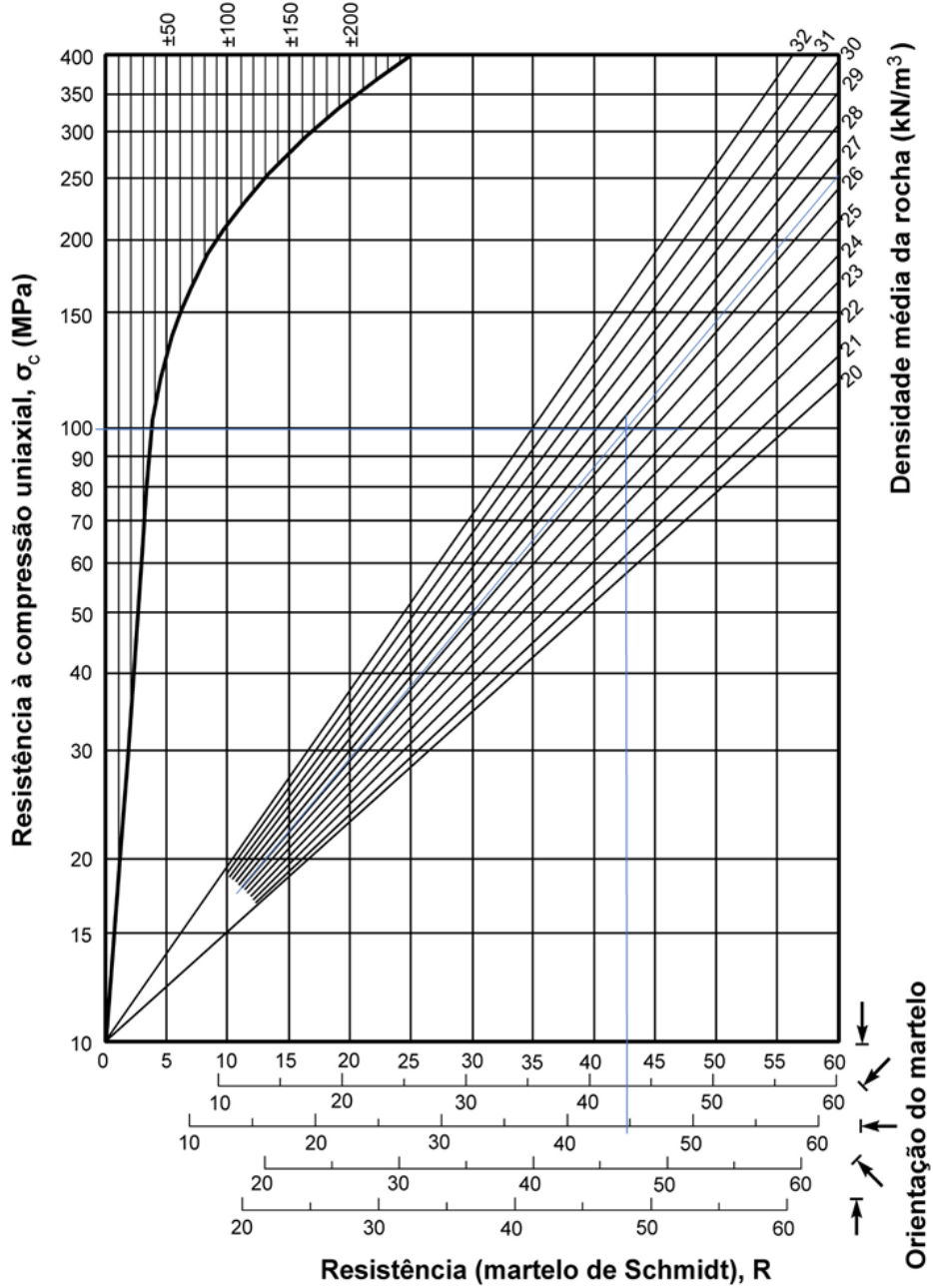
Pedreira de Joane – Amostra 3 (seca)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)

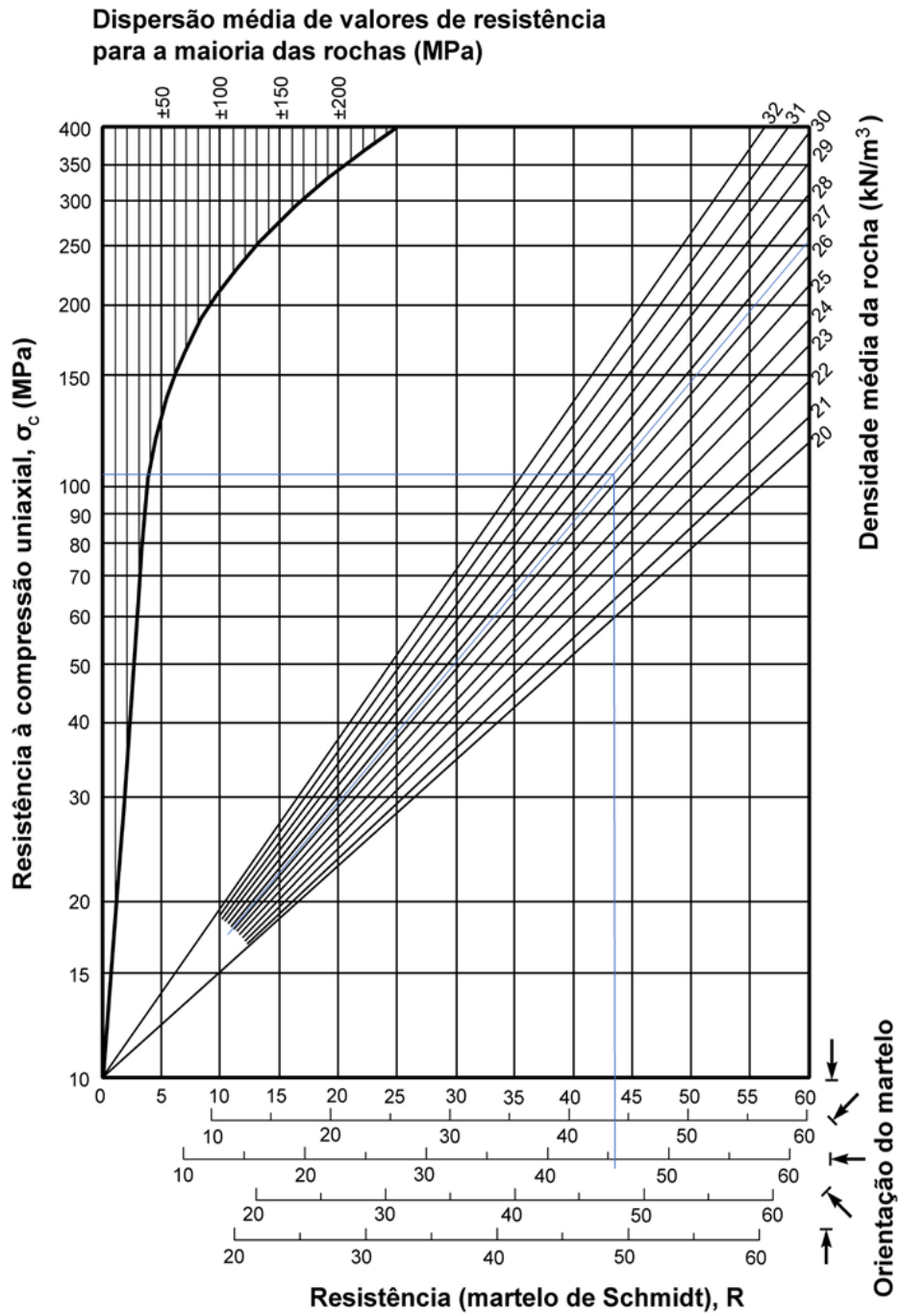


Pedreira de Joane – Amostra 4 (seca)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)

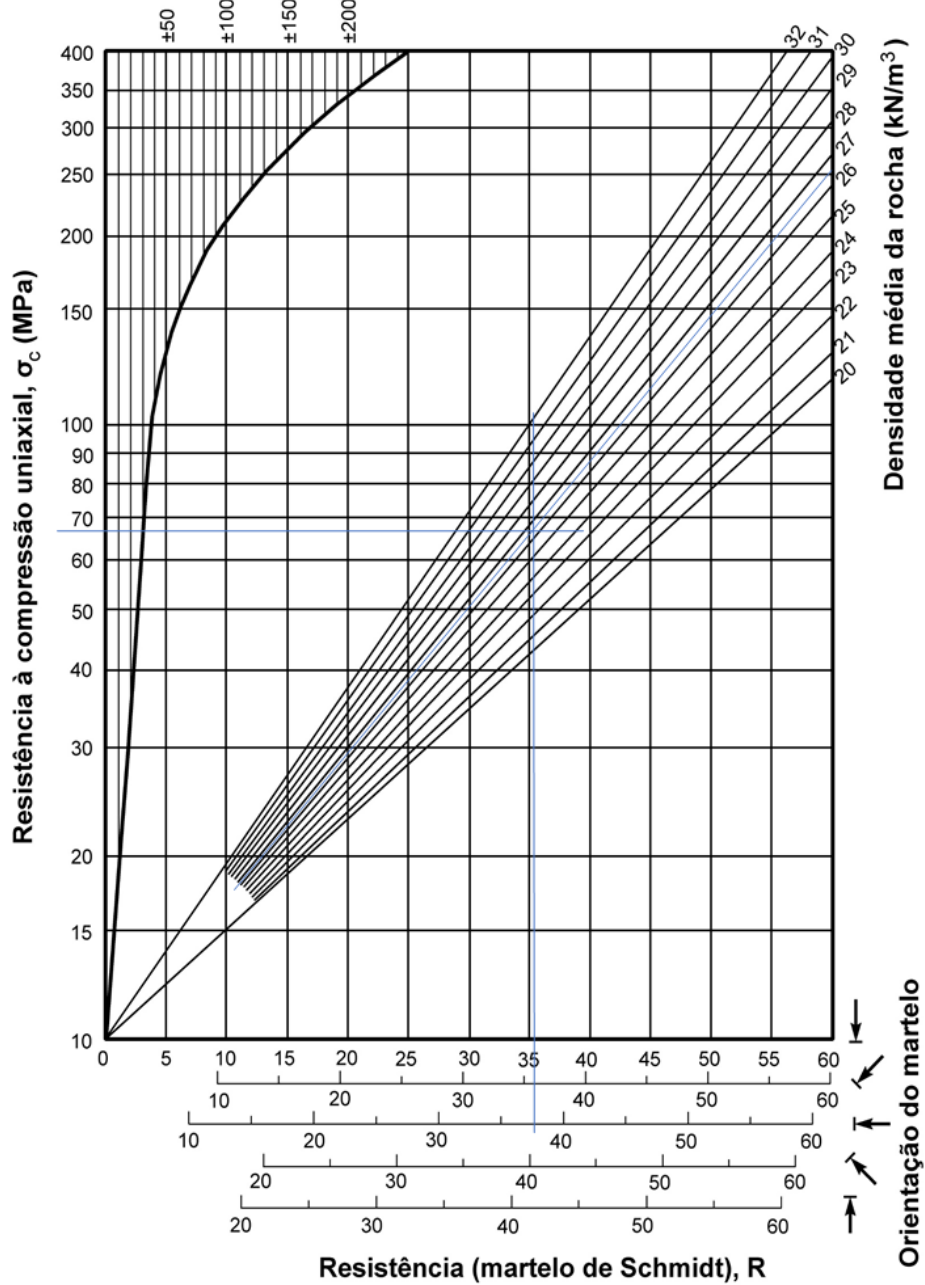


Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 1 (seca)



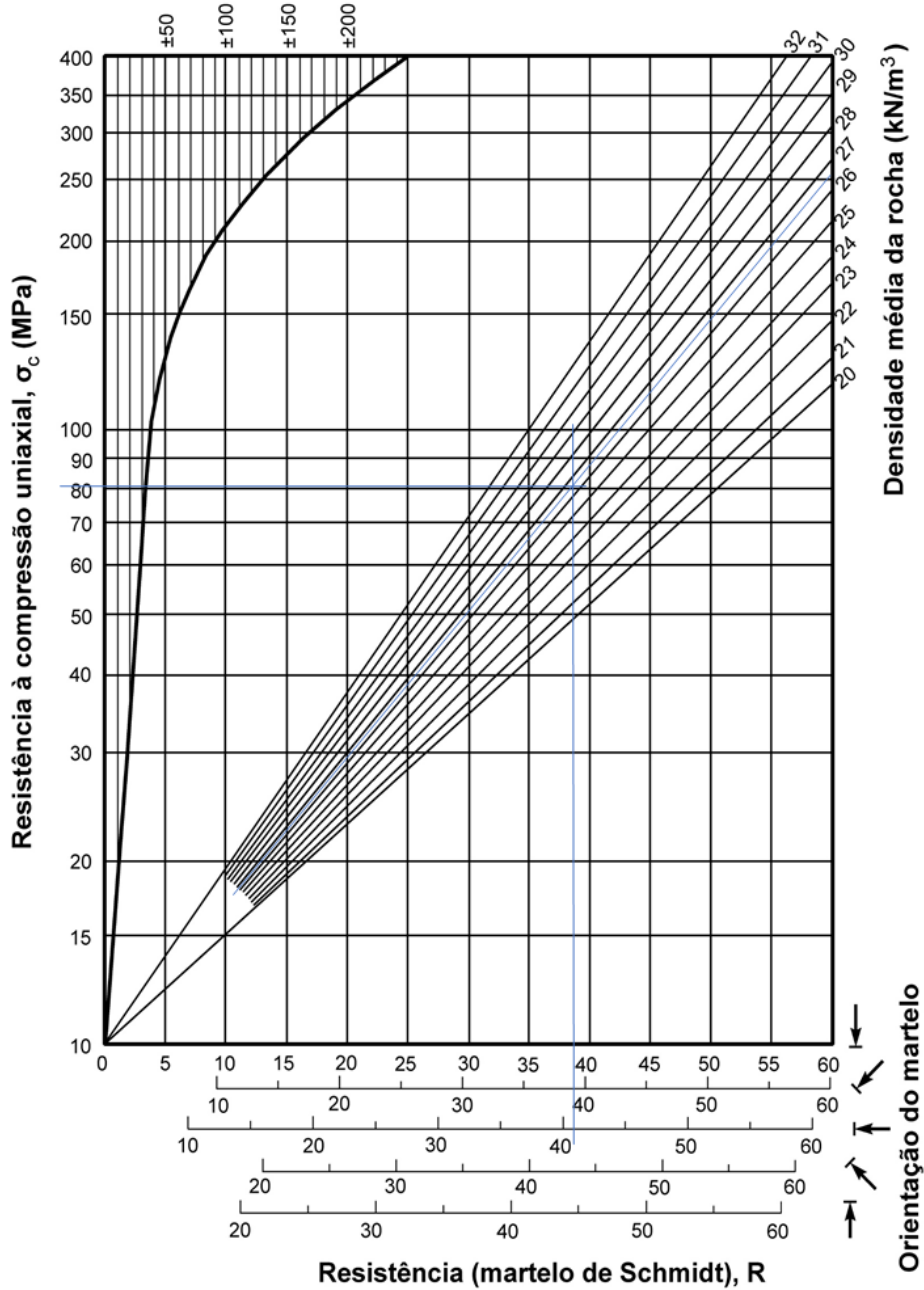
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 2 (seca)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



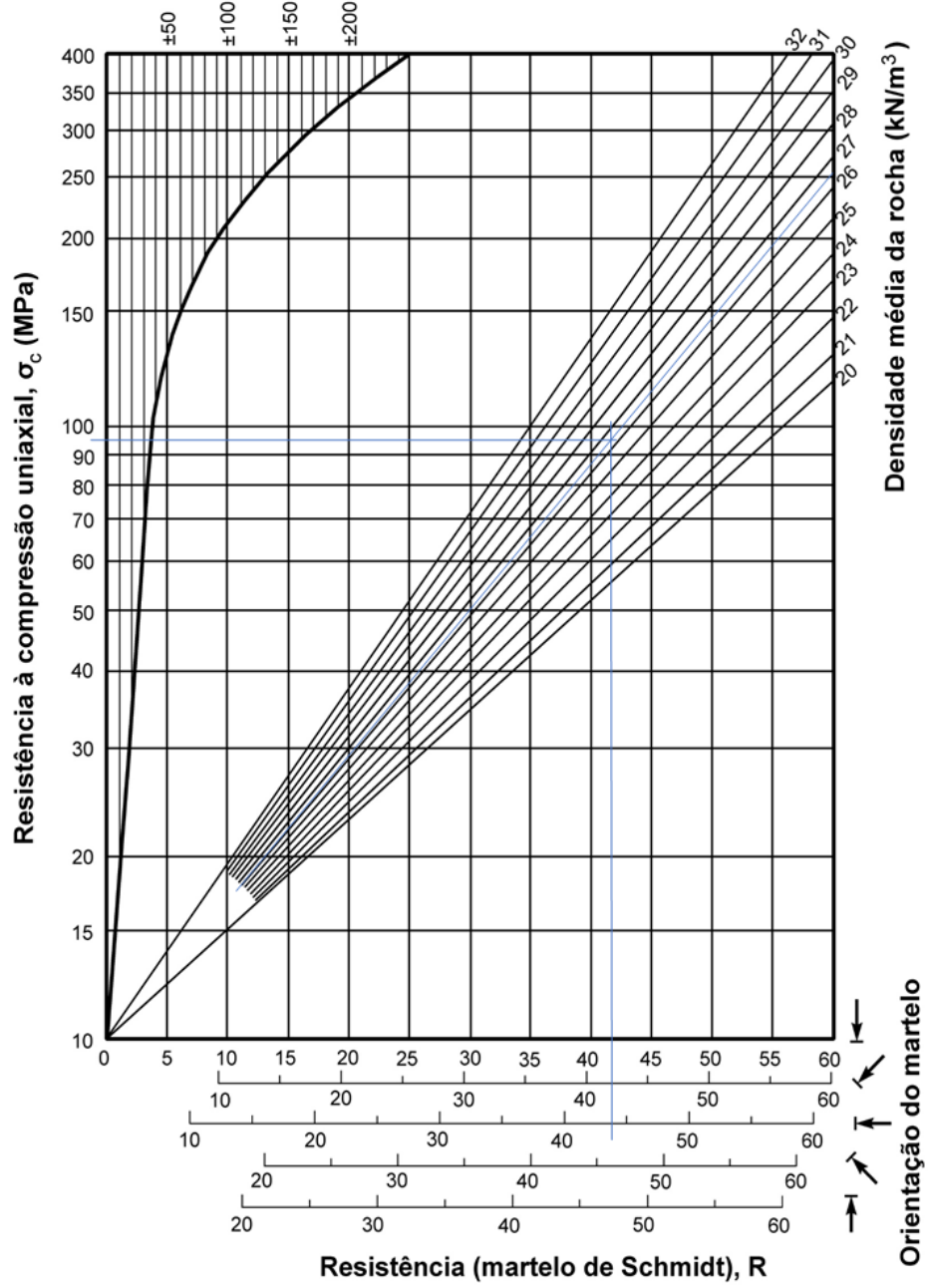
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 3 (seca)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



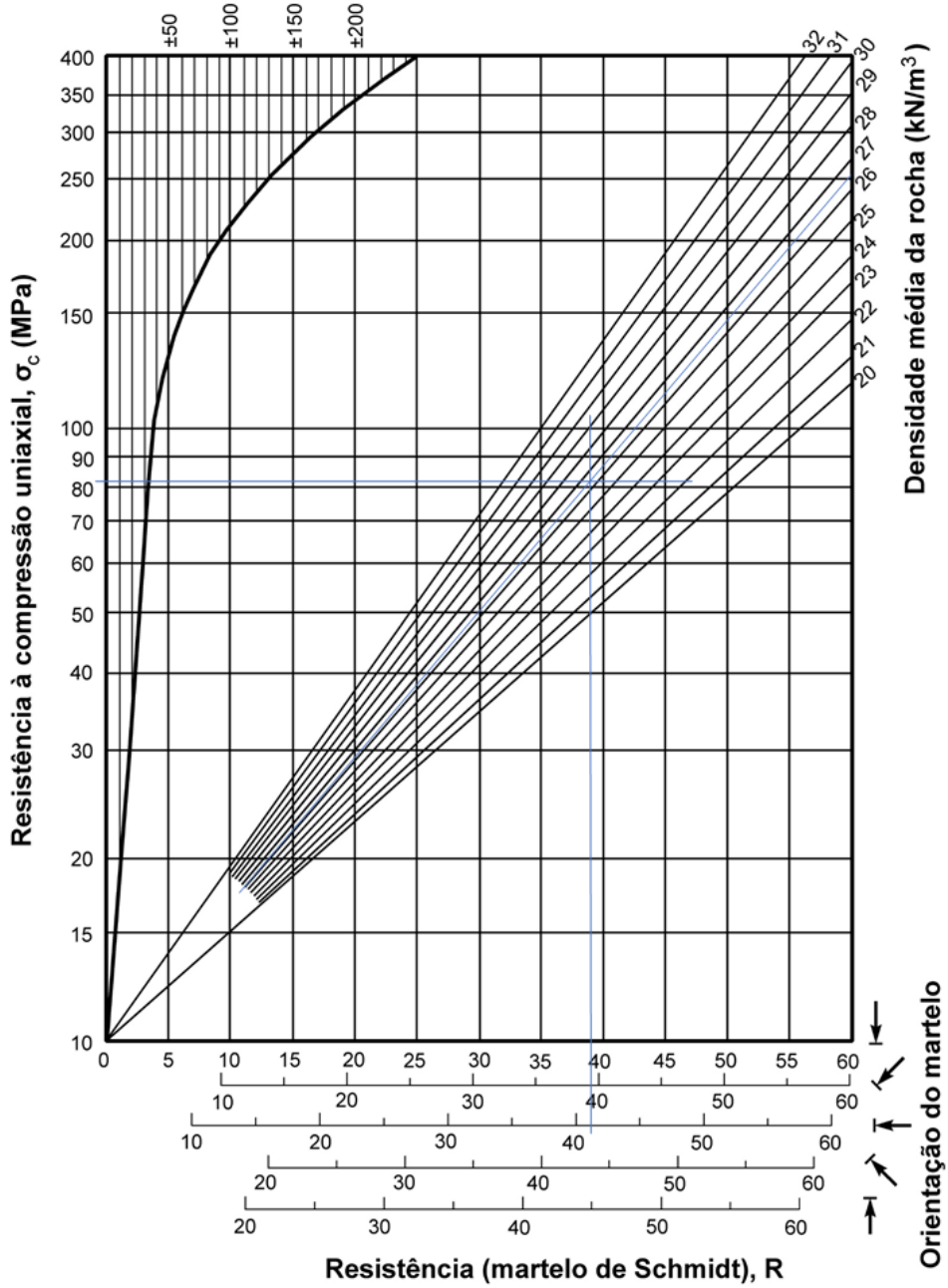
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 4 (seca)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



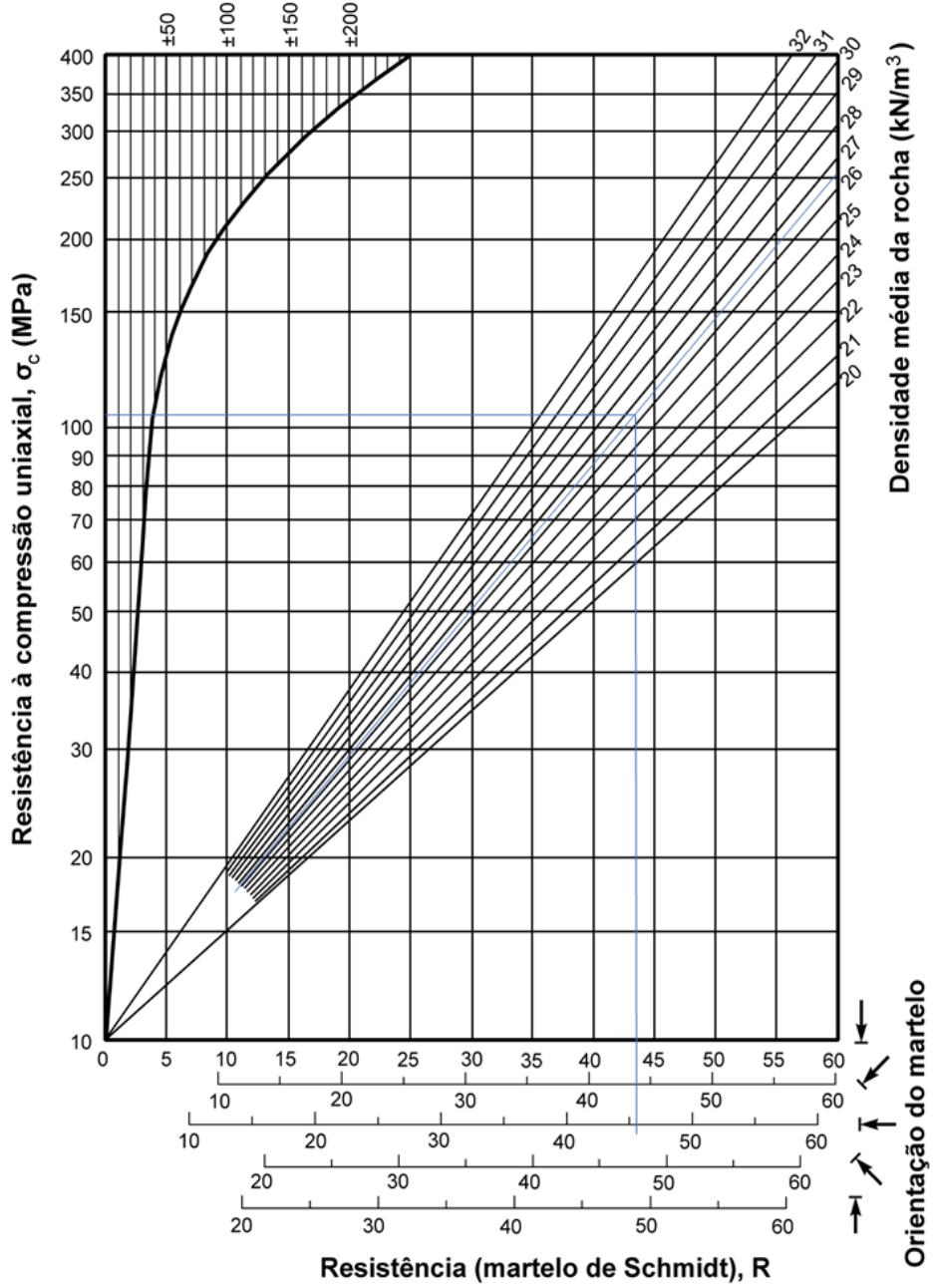
Pedreira de Joane – Amostra 1 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



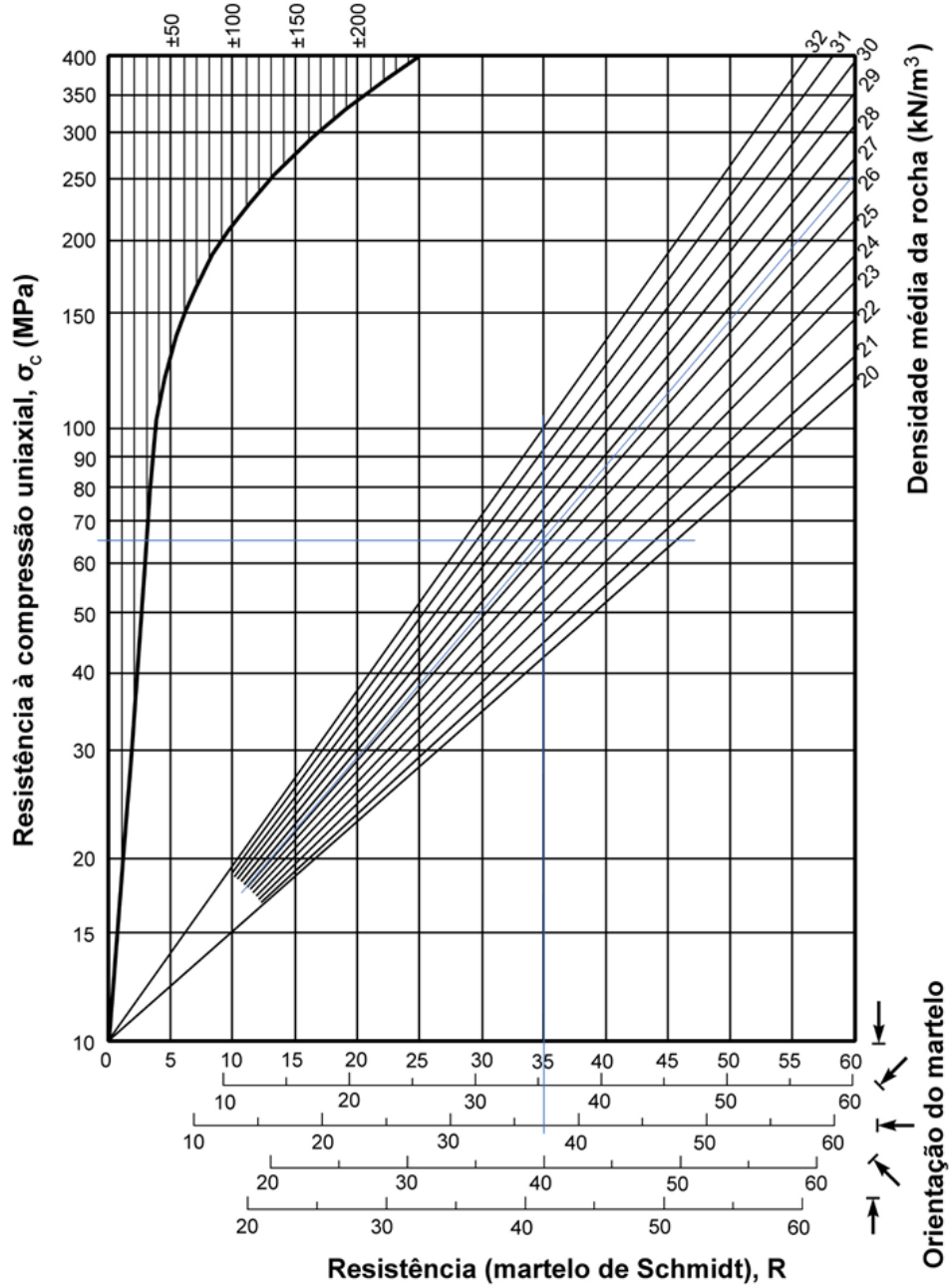
Pedreira de Joane – Amostra 2 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



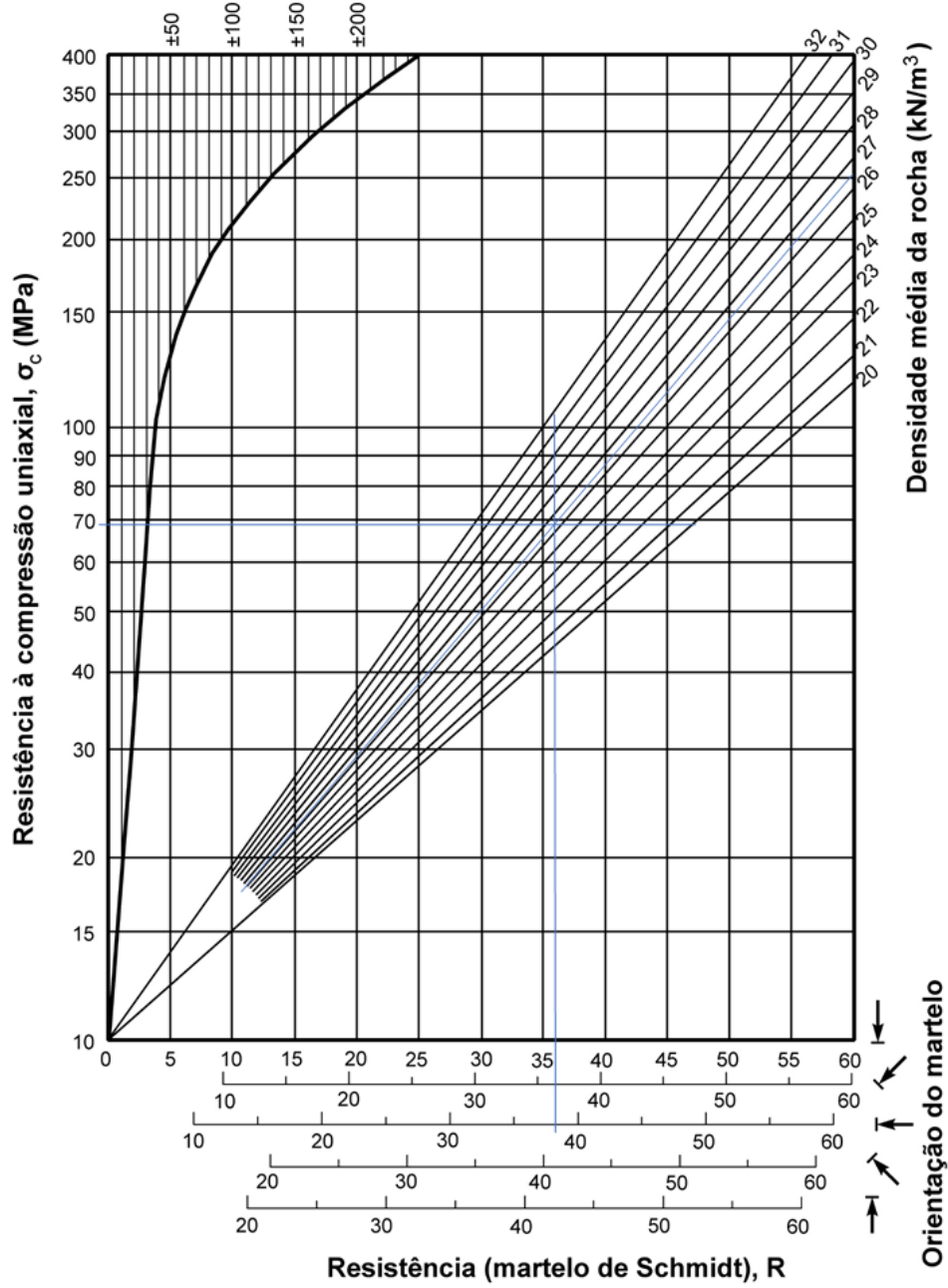
Pedreira de Joane – Amostra 3 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



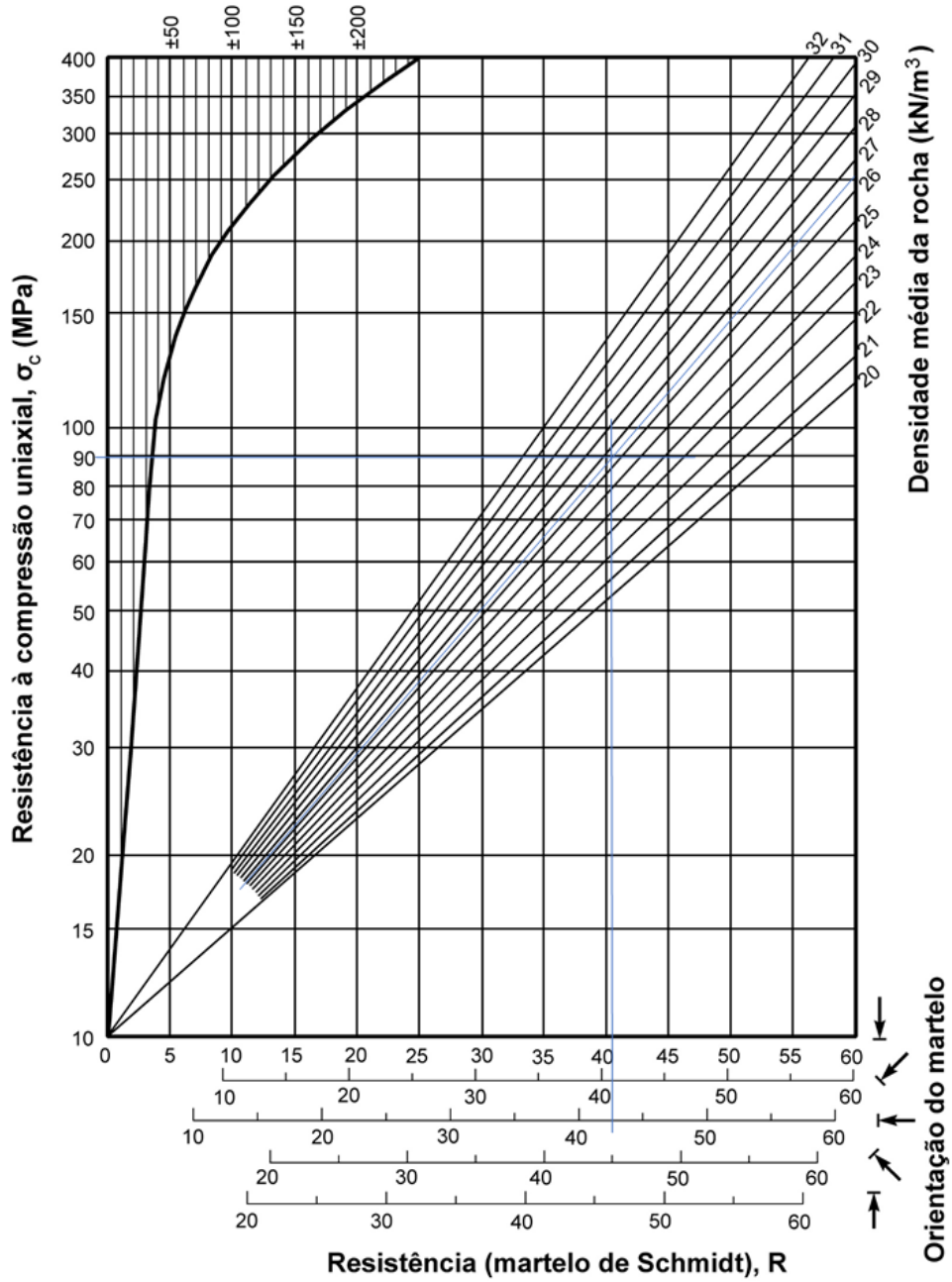
Pedreira de Joane – Amostra 4 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



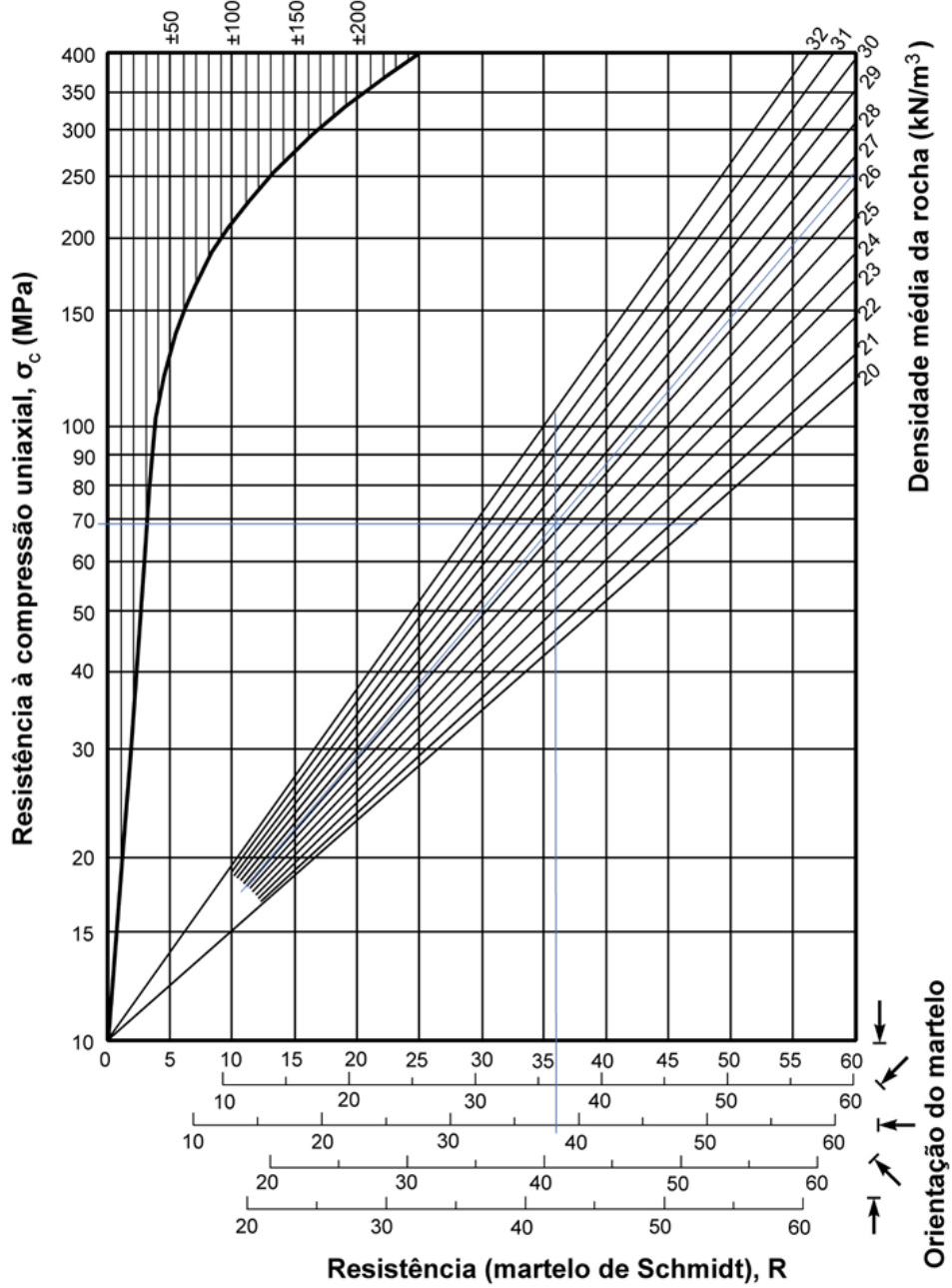
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 1 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



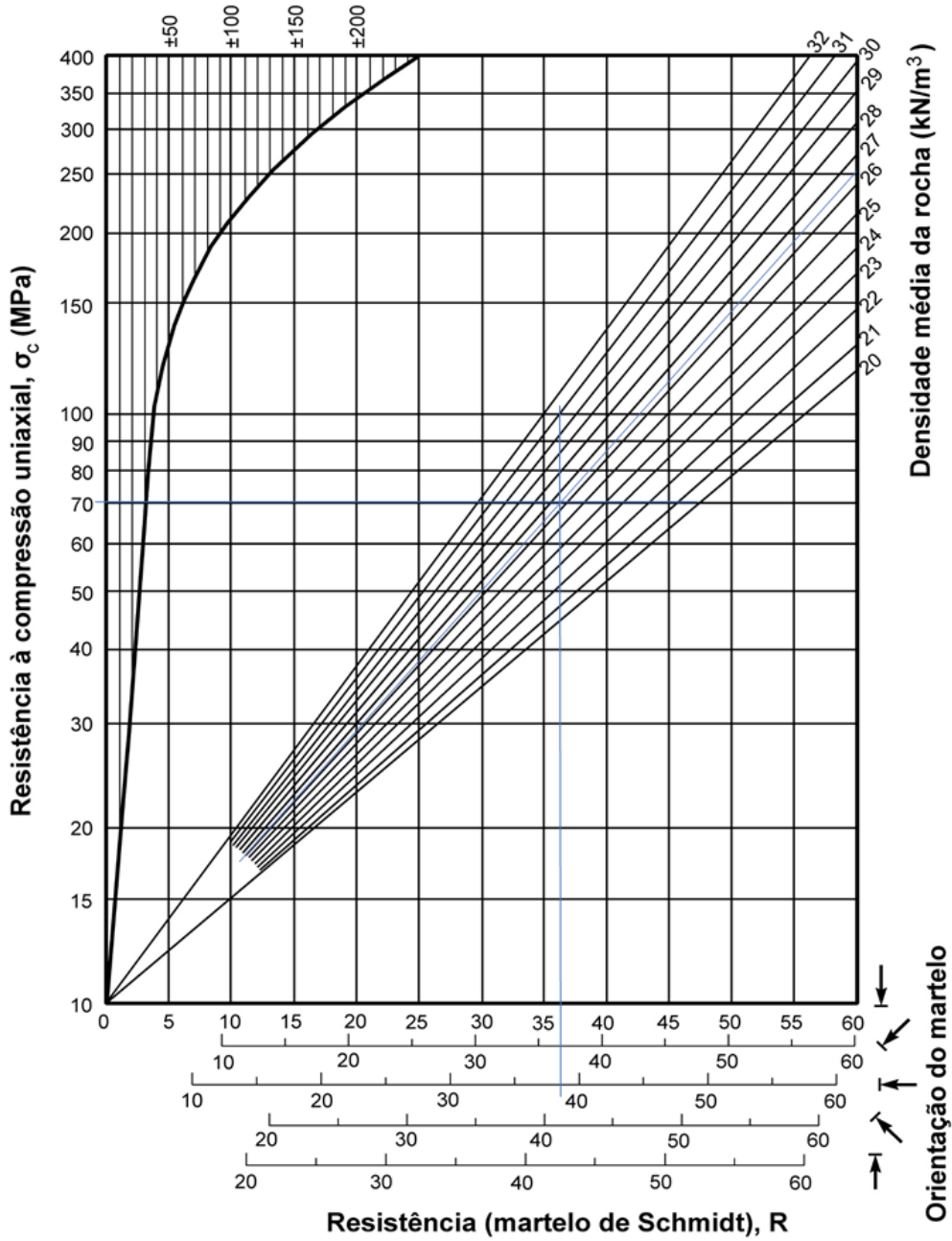
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 2 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



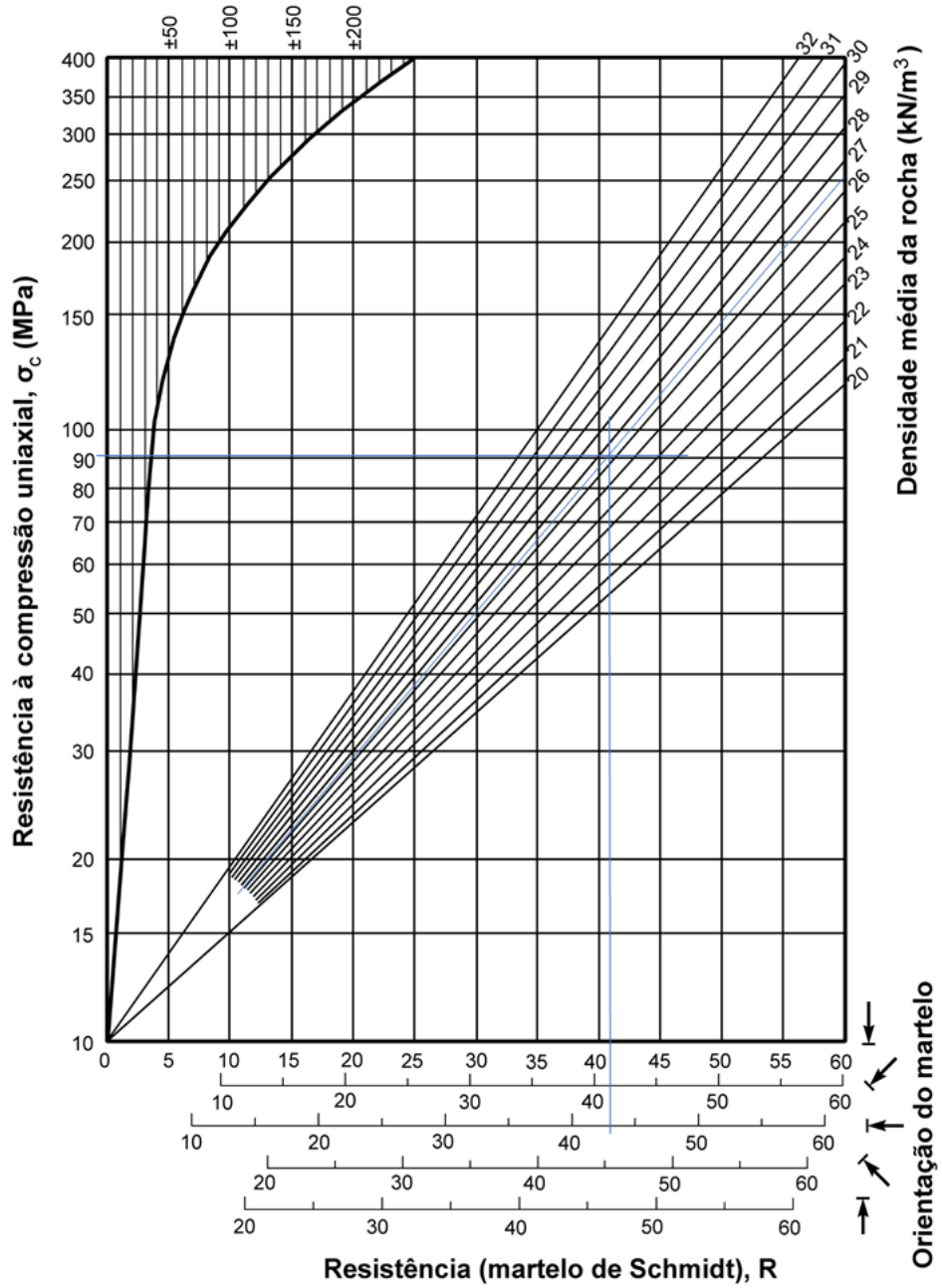
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 3 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



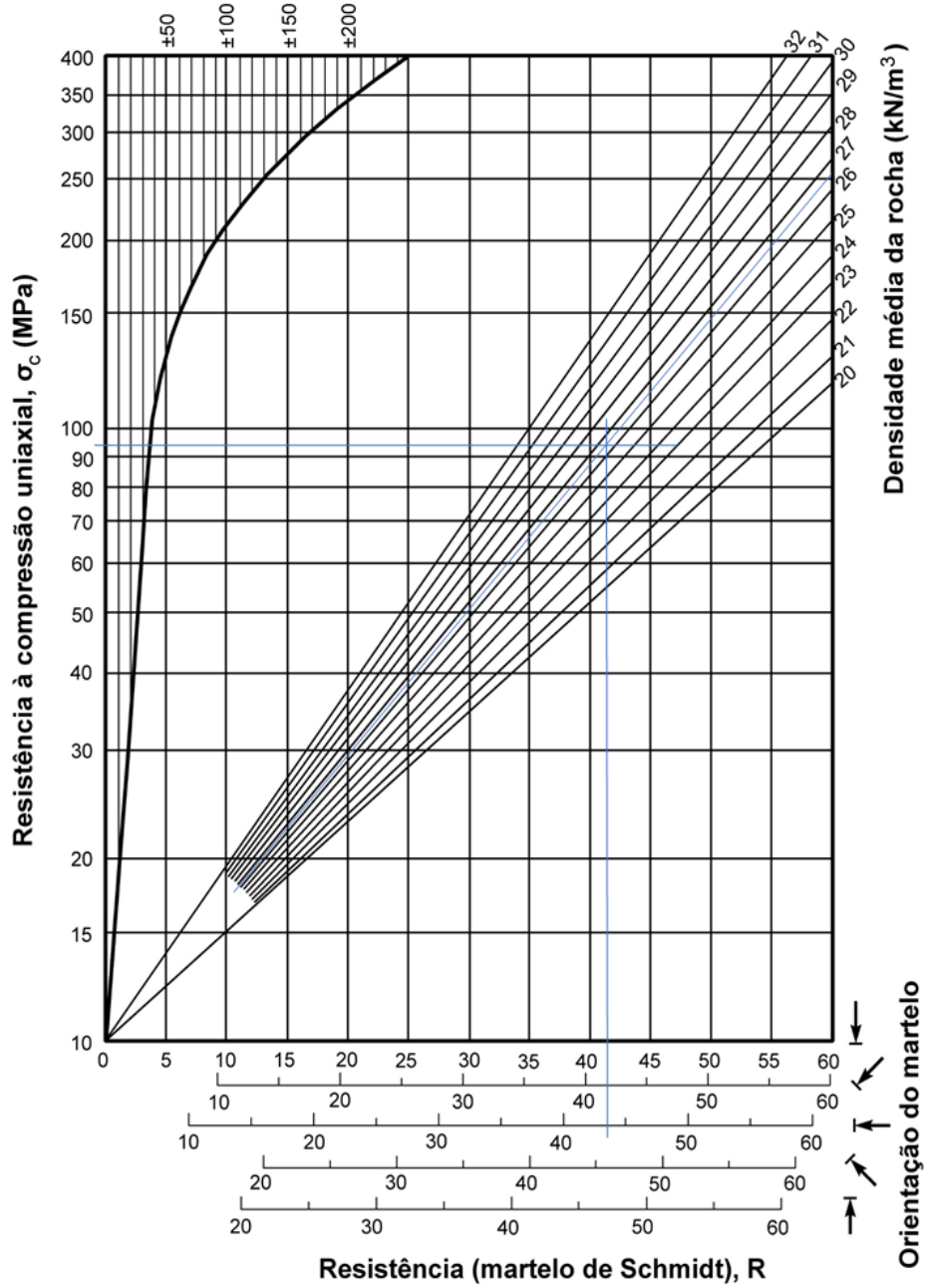
Escarpa de S. Cristóvão – Amostra 4 (húmida)

Dispersão média de valores de resistência para a maioria das rochas (MPa)



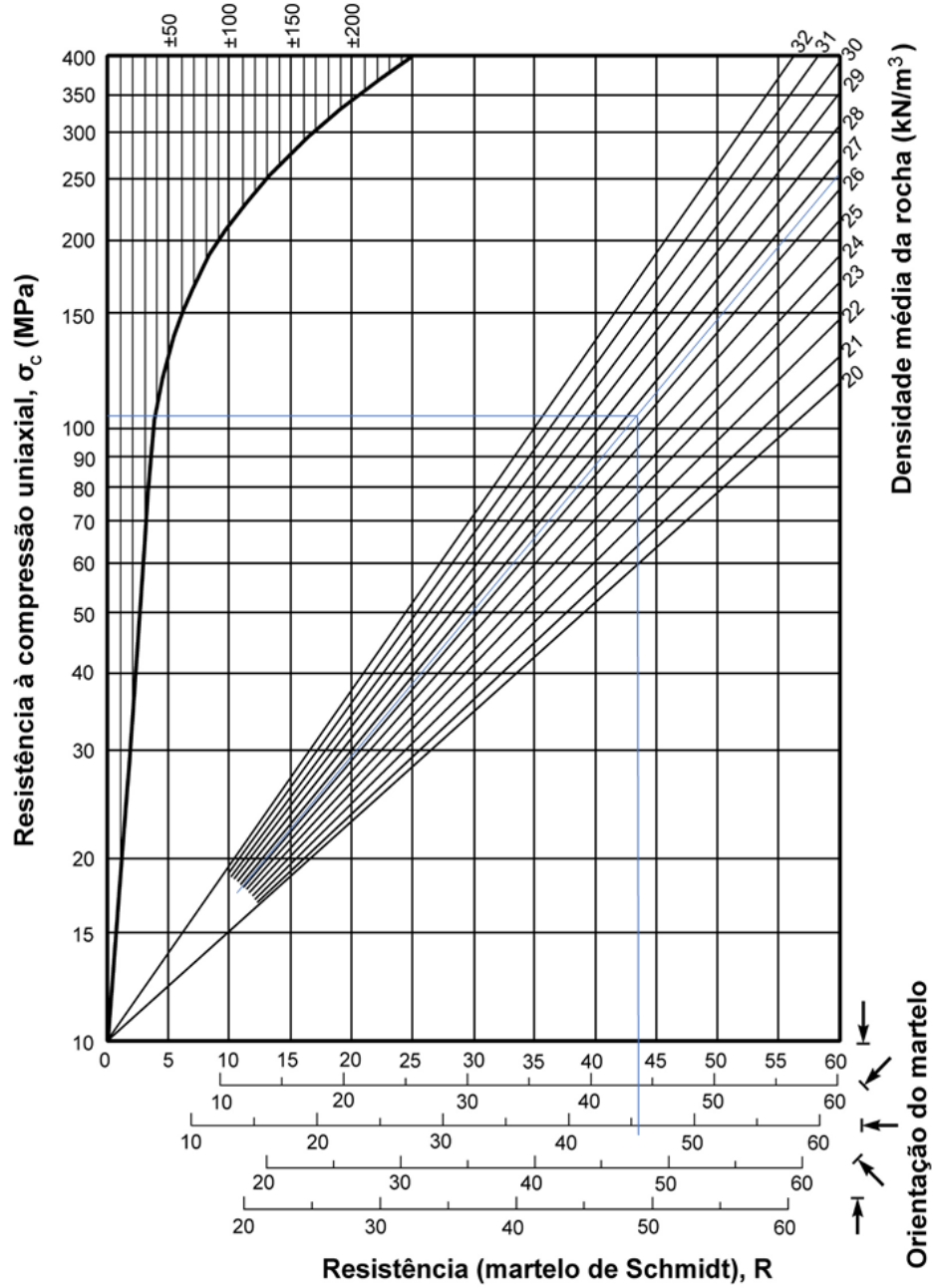
Pedreira de Joane – Provete (S)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



Escarpa de S. Cristóvão – Provete (S)

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)



D.2. Fotografias dos ensaios esclerométricos

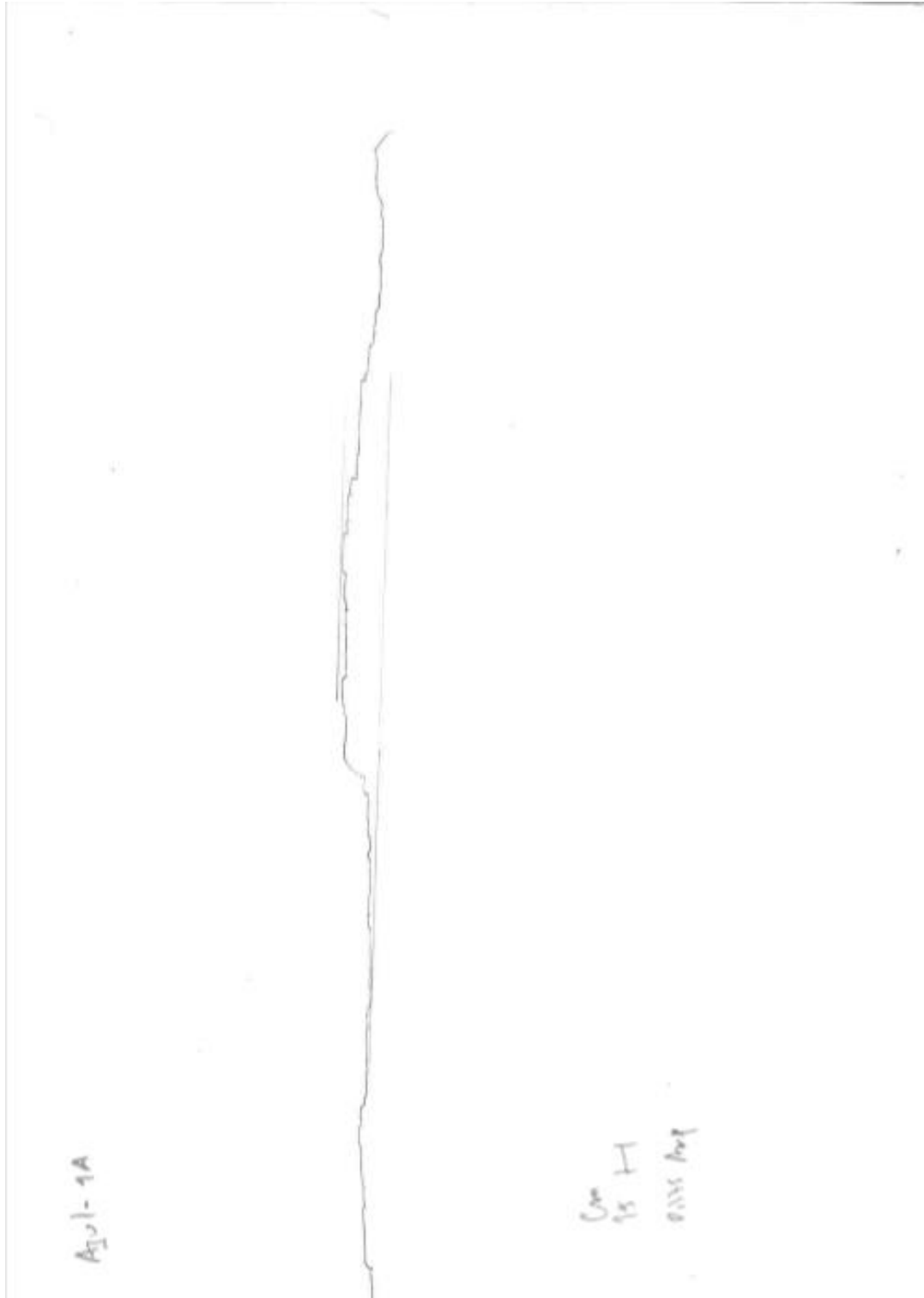


ANEXO E

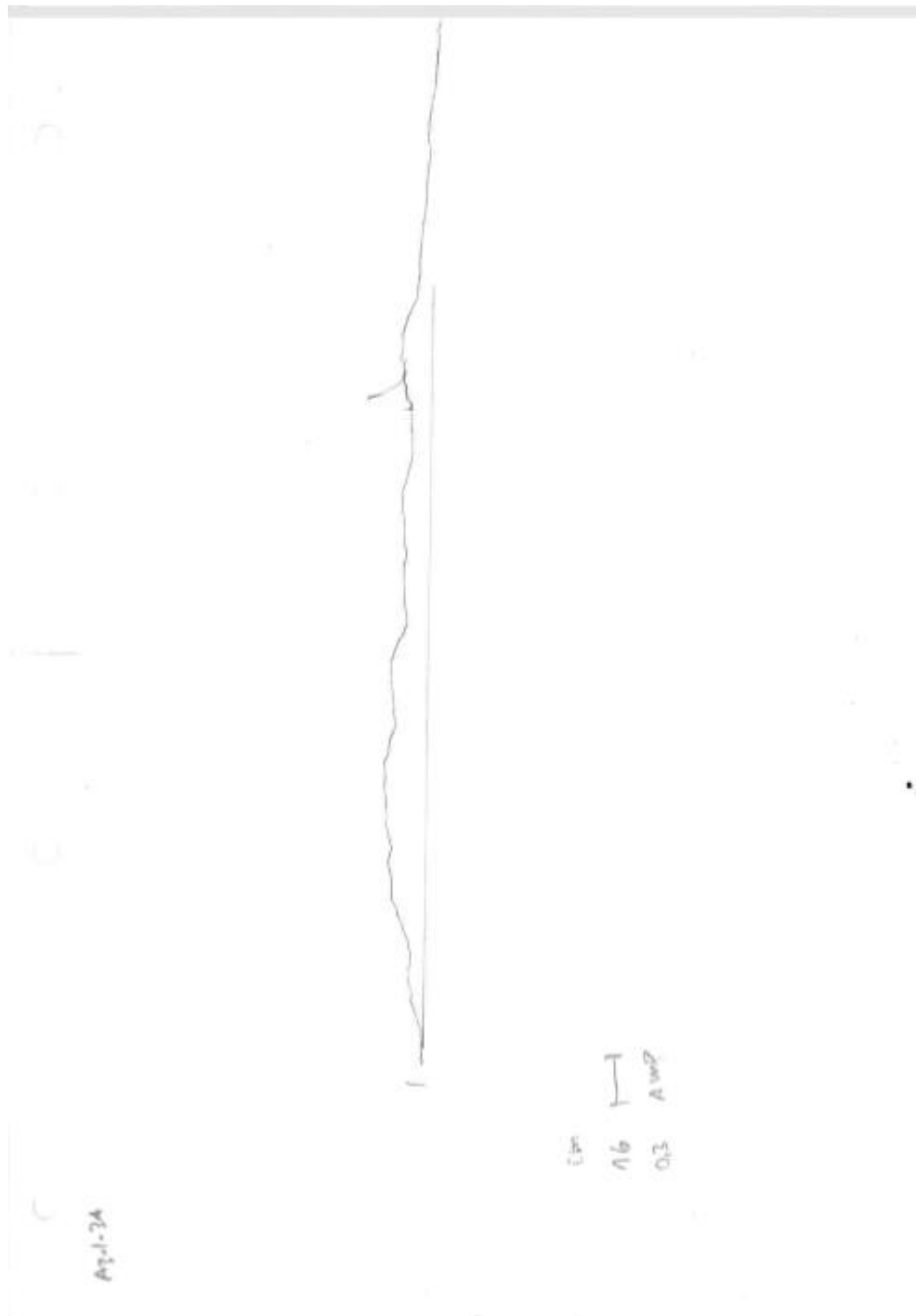
Determinação de JRC

E.1. Métodos expeditos – Registo dos perfis

Pedreira de Joane – Face 1A



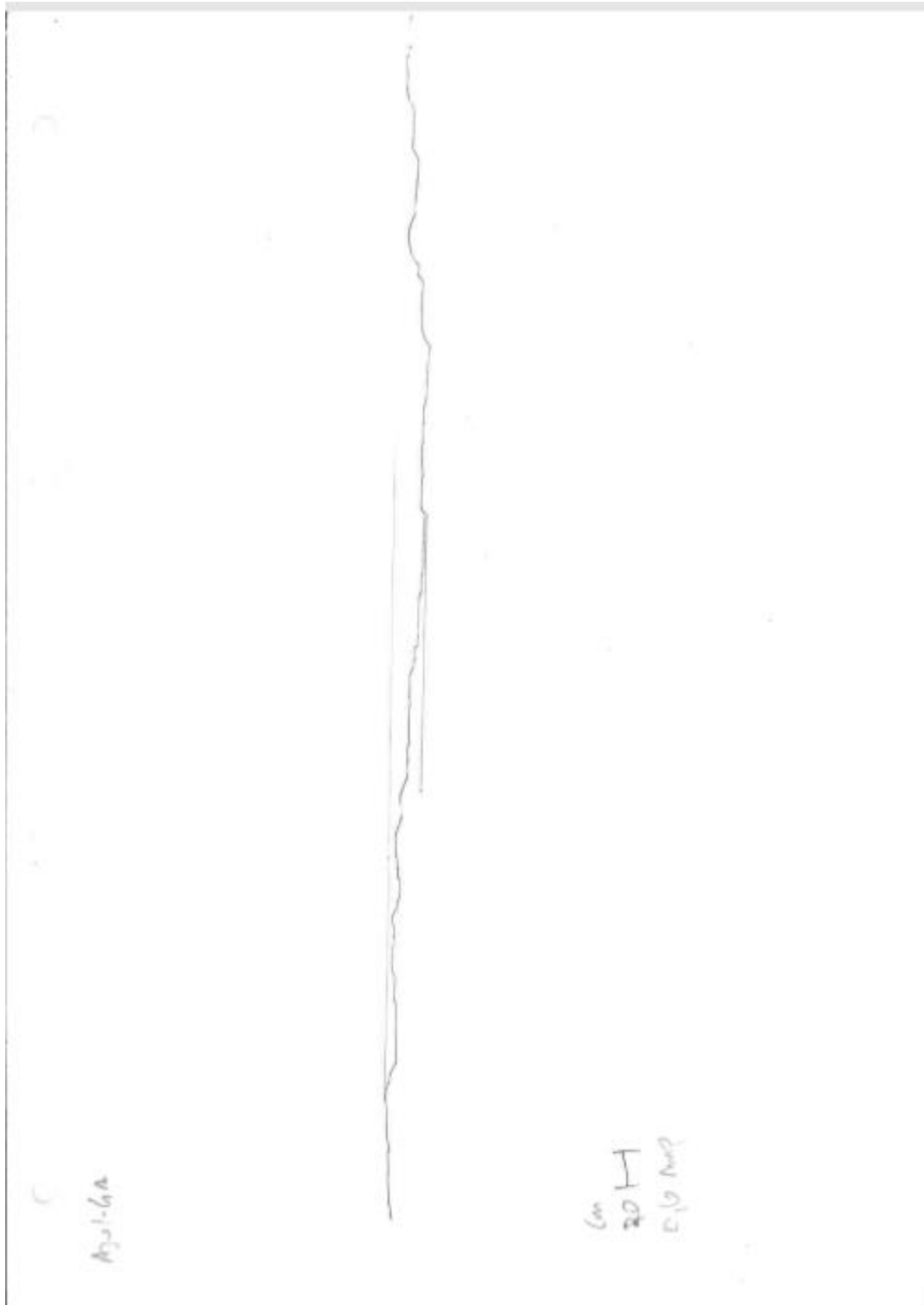
Pedreira de Joane – Face 2A



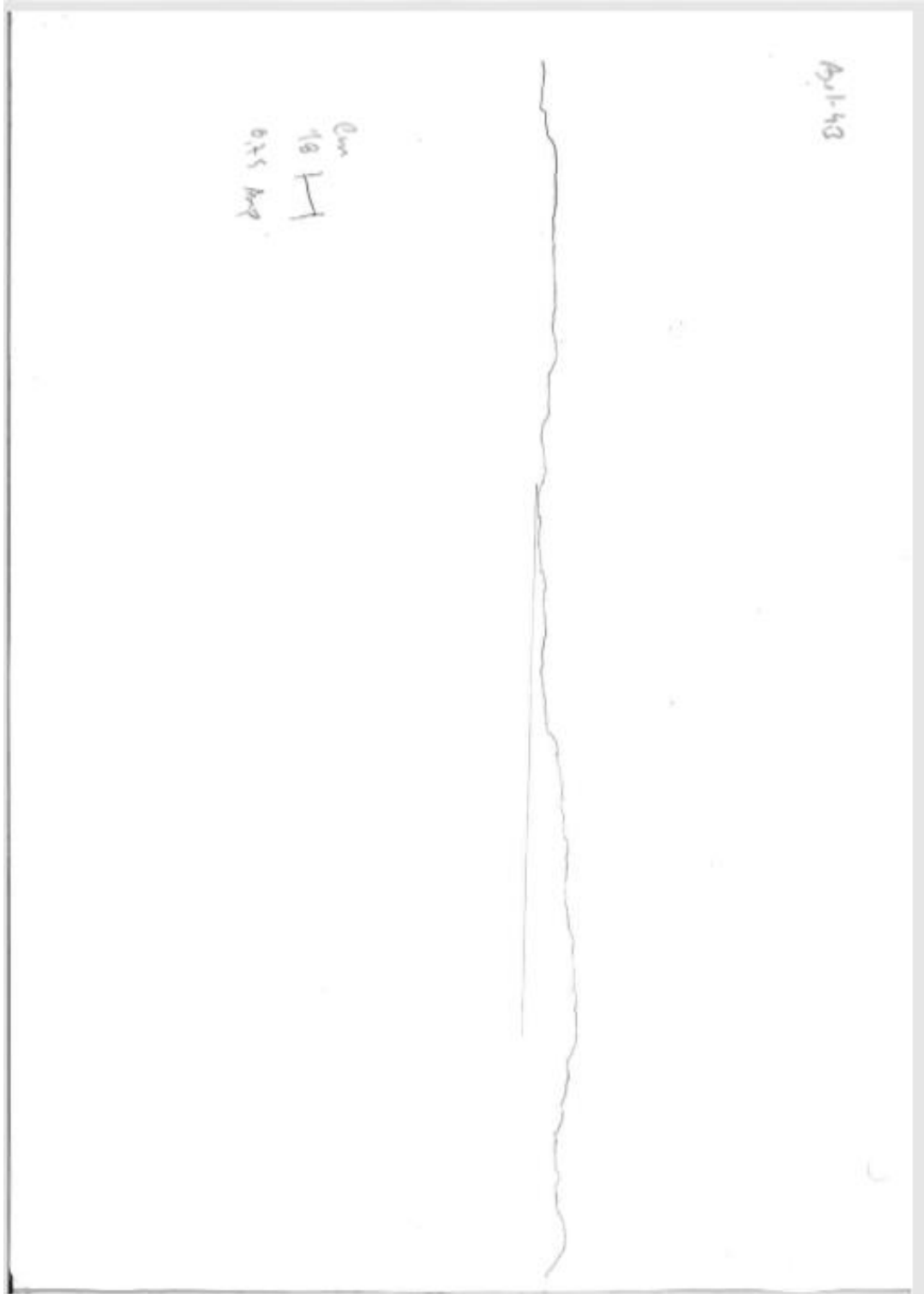
Pedreira de Joane – Face 2B



Pedreira de Joane – Face 4A



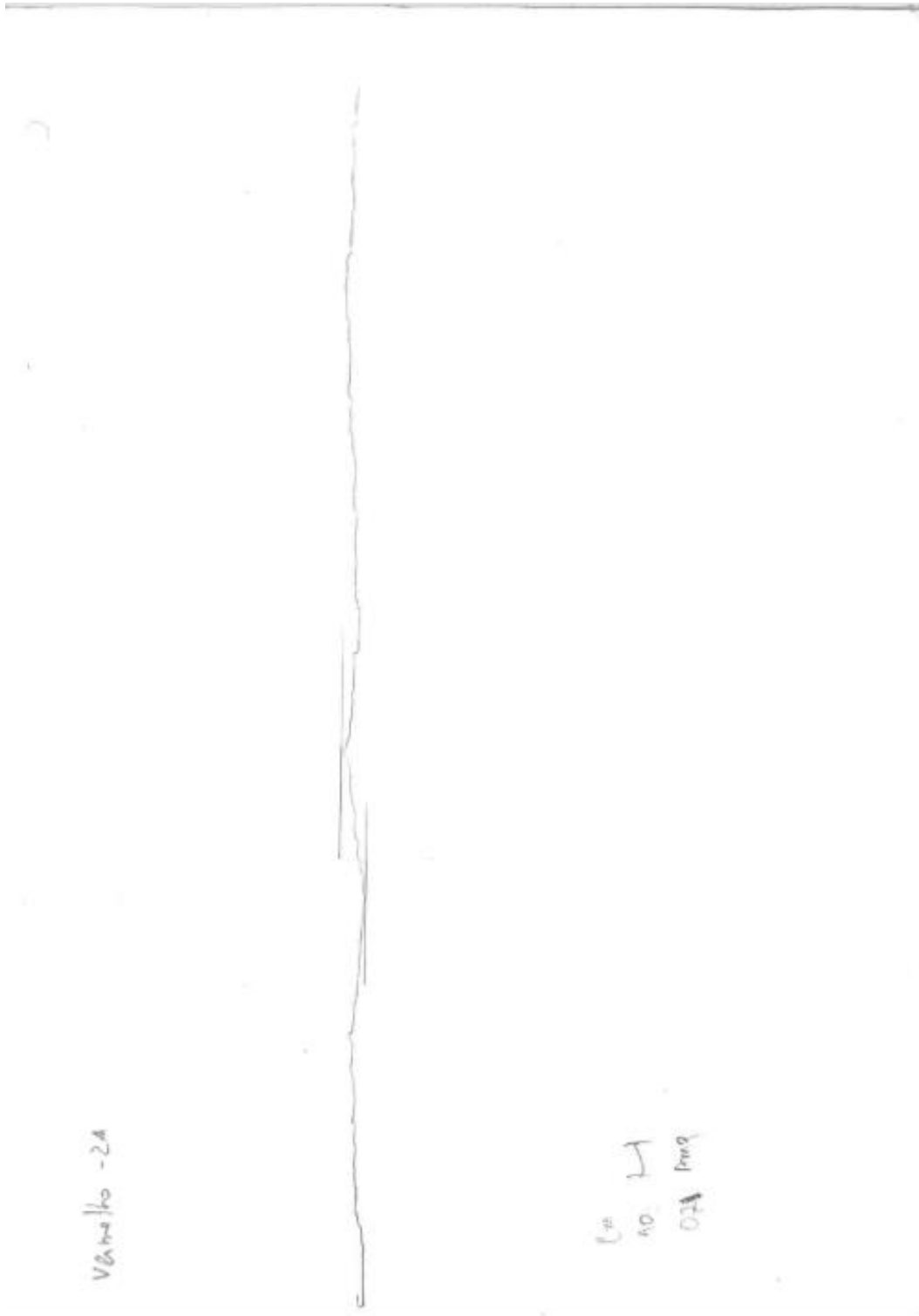
Pedreira de Joane – Face 4B



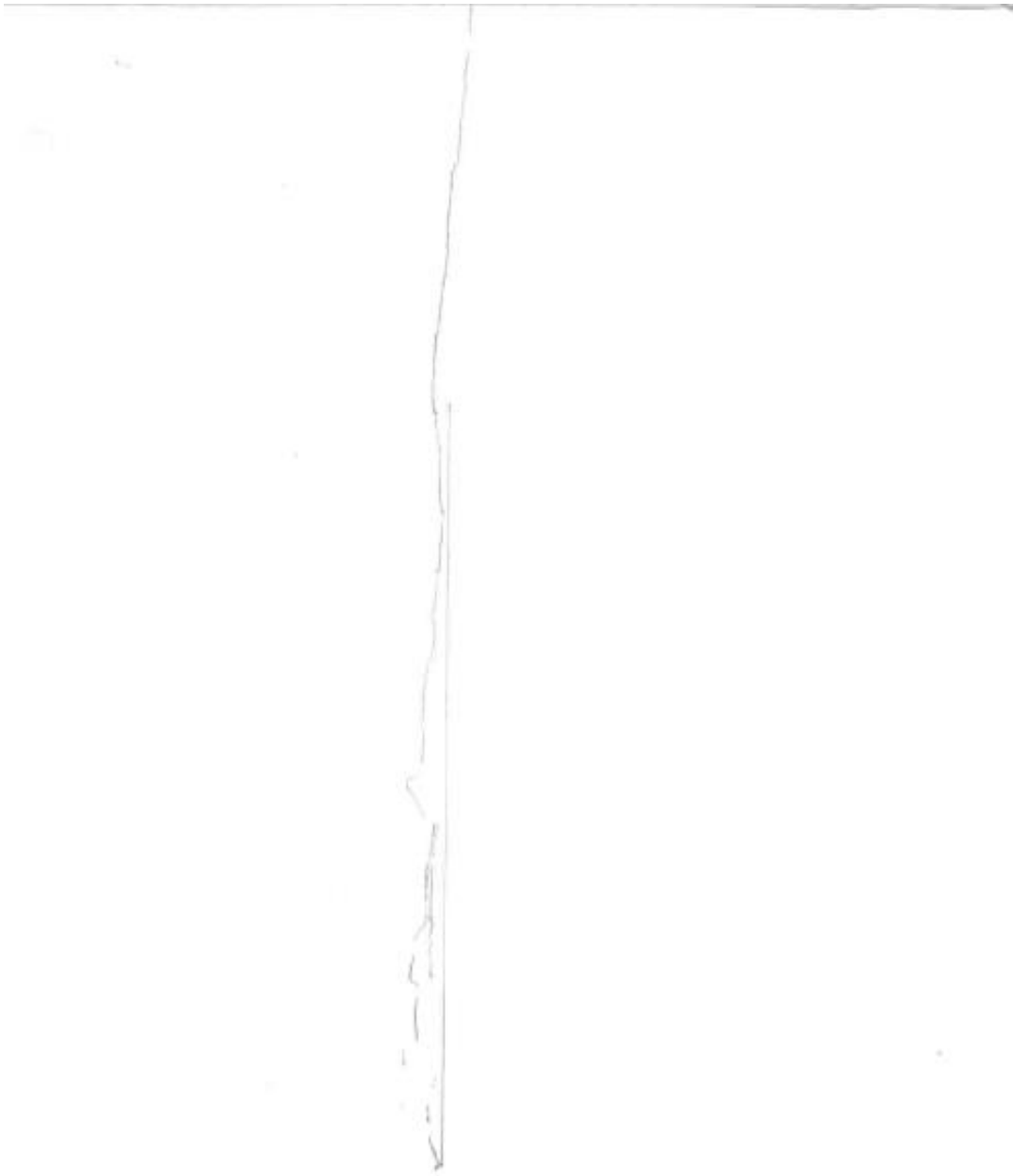
Escarpa de S. Cristóvão – Face 1A



Escarpa de S. Cristóvão – Face 2A



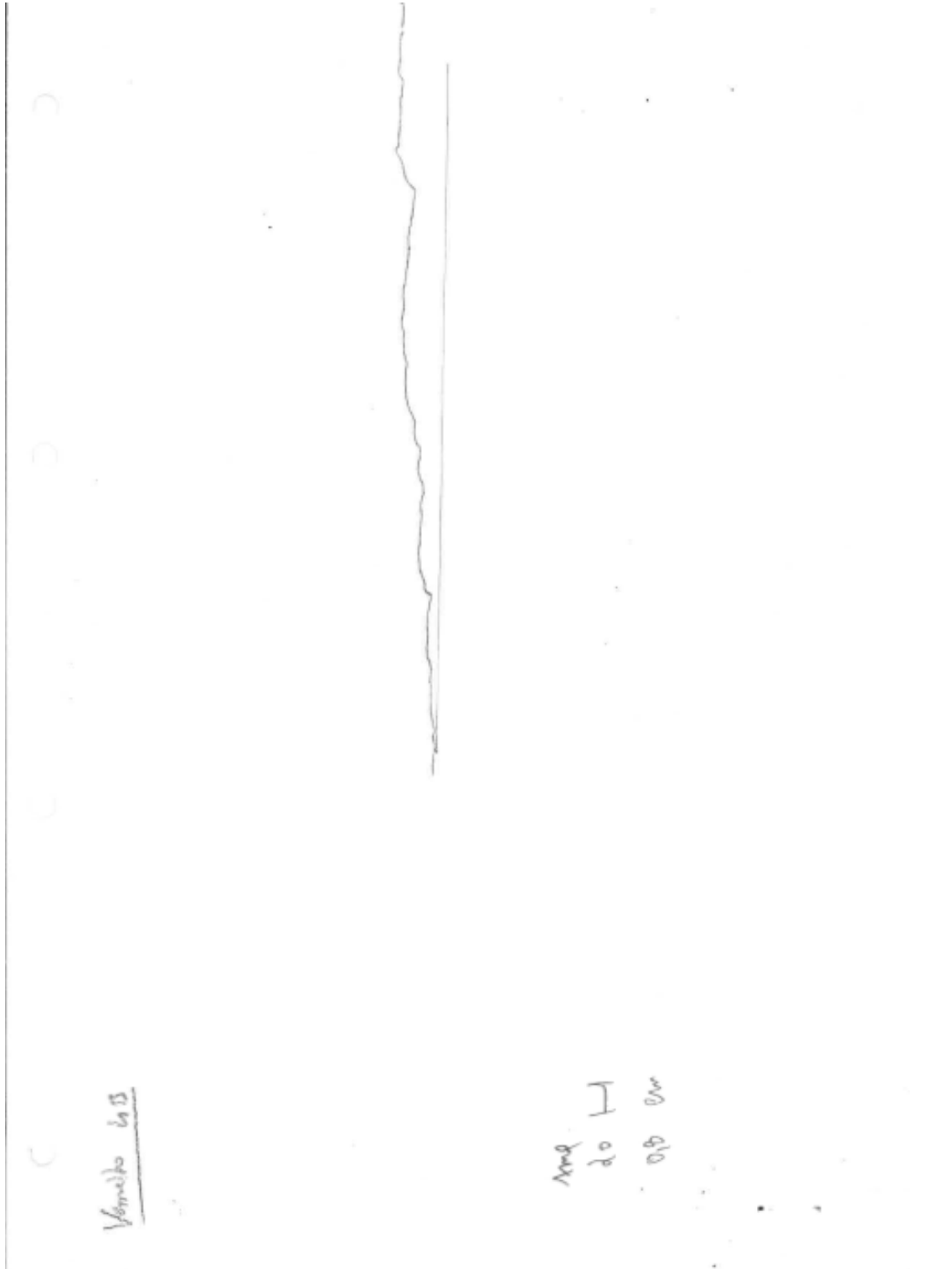
Escarpa de S. Cristóvão – Face 4A



Vermelho 4 A

I
37
016 Pano

Escarpa de S. Cristóvão – Face 4B



E.2. Fotografias das faces perfilografadas

Pedreira de Joane



Escarpa de S. Cristóvão



ANEXO F

Folhas de Cálculo MS Excel

F.1. Resultados do Ângulo de Atrito Natural (α), Resistência à compressão e JRC

(FICHEIRO: ALFA, ESCLERÓMETRO E JRC.xls)

F.2. Resultados dos Ensaios Tilt Test com a máquina 1 (Protótipo de Madeira) e restantes parâmetros obtidos

(FICHEIRO: TILT-TEST (1-PROTÓTIPO).xls)

F.3. Resultados dos Ensaios Tilt Test com a máquina 1 (Protótipo de Madeira) e restantes parâmetros obtidos

(FICHEIRO: TILT-TEST (2-AVEIRO).xls)