

**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-RECURSOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DESVIÓMETRO PARA
AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE FUROS E SUA
APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO**

GEAN FRANK FAUSTINO DA SILVA

**Tese realizada no âmbito do
Programa Doutoral em Engenharia Minas e Geo-Recursos**

PORTO, 2021

(Página intencionalmente em branco)

UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-RECURSOS

DESENVOLVIMENTO DE UM DESVIÓMETRO PARA AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE FUROS E SUA APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO

GEAN FRANK FAUSTINO DA SILVA

Tese apresentada ao Programa Doutoral em Engenharia de Minas e Geo-Recursos, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Minas e Geo-Recursos.

Orientador: **Doutor José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho**, Professor Associado do Departamento de Engenharia de Minas, FEUP, Porto.

Coorientador: **Doutor Alexandre Júlio Machado Leite**, Professor Associado do Departamento de Engenharia de Minas, FEUP, Porto.

PORTO, 2021

Silva, Gean Frank Faustino

Desenvolvimento de um Desviómetro para Avaliação Geométrica de Furos e sua Aplicação na Mineração, 2021. 201p.

Orientador: José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho
Coorientador: Alexandre Júlio Machado Leite

Tese (doutoramento) – Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia FEUP– Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Recursos. 2021.

1. Desviómetro 2. Desmonte de Rocha 3. Perfuração 4. Desvio de Furos 5. Equipamento de Avaliação. I. Soeiro, José Manuel. II. Leite, Alexandre. III Faculdade de Engenharia FEUP – Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Recursos.

RESUMO

Em processos de desmonte de maciços rochosos, a proximidade de cargas explosivas perto de faces livres ou concentrações de alto consumo específico decorrentes de desvios imprevisíveis da geometria de perfuração são uma das principais causas de projeções descontroladas de rochas, vibrações no solo e fragmentação pobre ou excessiva. Esses pontos afetam diretamente a distância de segurança, podendo colocar em causa a integridade humana e de equipamentos, a produção e os custos de operação. Em face disto, este documento científico explora as análises, os processos, os estudos e atividades desenvolvidas em torno da criação de uma ferramenta eletrônica denominada Desviómetro. Este equipamento mede desvios de furos em desmontes de rochas, e outras aplicações na mineração e obras civis, de modo a identificar as suas reais inclinações e direções (azimutes) dentro de uma escala de 360 graus, baseado em sensores com magnetómetro, giroscópio e acelerómetro. Com baixo custo, o equipamento resultante foi desenvolvido com tecnologia moderna, testado ao longo da investigação e comparado com alguns equipamentos afins existentes no mercado. A ideia principal foi desenvolver um recurso moderno, e validar a acurácia do novo sistema, matemática e estatisticamente, através das metodologias adotadas e do resultado dos testes. Este documento pretende mostrar os benefícios desta nova metodologia e o uso da tecnologia inovadora, além de relatar os passos da investigação necessários para se chegar à proposta do desenvolvimento de um equipamento eficaz para avaliação de desvios de furos.

Palavras-Chave: Desviómetro – Desmonte de Rocha – Perfuração – Desvio de Furos – Equipamento de Avaliação

ABSTRACT

In rock masses blasting processes, the proximity of explosive loads to free faces or specific high-consumption concentrations deriving from unpredictable deviations of the drilling geometry are the main causes of ultra-launching rocks, ground vibration, and poor or excessive fragmentation. These aspects have a direct bearing on the safety distance, may put humans and equipment at risk, and affect the production and operating costs. In light of this, the present scientific document explores the analyses, processes, studies, and activities developed around the creation of an electronic tool called Deviometer. The device measures the deviations in rock blasting and other applications in mining and civil works, in a way to identify their real inclinations and directions (azimuths) in a 360-degree scale, based on magnetometer, gyroscope, and accelerometer sensors. At a low cost, the resulting equipment was developed using modern technology, tested throughout the investigation, and compared with some similar devices available on the market. The main idea was to create a modern resource and validate the new system's accuracy, mathematically and statistically, through the methodologies adopted and the tests' results. This document intends to show the benefits of this new methodology and the use of innovative technology, as well as to report on the research steps that had to be taken to develop an effective device to evaluate borehole deviations.

Keywords: Deviometer – Rock Blasting – Rock Drilling – Borehole Deviation – Measurement Device

“Toda conquista começa com a decisão de tentar”
- John Fitzgerald Kennedy

AGRADECIMENTOS

Estas linhas são poucas para expressar o merecido agradecimento à todos os que fizeram este trabalho se concretizar:

Em primeiro lugar, ao povo português, ao seu belo país, cultura, sua democracia e fortes instituições, em especial, aos portuenses e seus ótimos vinhos.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. José Soeiro Carvalho, orientador, e Prof. Dr. Alexandre Leite, coorientador, por nortear esta investigação, pela revisão crítica, pedagógica e técnica, como também pelo profissionalismo, compreensão e colaboração das minhas dificuldades não só na investigação como em todo meu percurso académico, inclusive em assuntos pessoais que não eram de suas competências, mas se prontificaram espontaneamente em ajudar.

À todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas da FEUP, em especial à Prof.^a Dr.^a. Maria de Lurdes Dinis, ao Prof. Dr. José Guedes, Prof. Dr. Joaquim Góis, e ao conceituado Prof. Emérito Dr. António Fiuza.

À toda equipe dos Serviços Acadêmicos da FEUP, em especial à Carla Silva.

Aos autores das referências bibliográficas consultadas.

Aos colegas da companhia finlandesa Forcit Explosives Internacional, em especial ao CEO da empresa, Tomi Kouvonen, por ter acreditado no projeto de pesquisa, e, juntamente com o Blast Technician Jari Tarkkanen e o Technical Manager Jarkko Manninen, pelas recepções, ensinamentos e troca de experiências quando de nossos encontros na Finlândia, Suécia e Portugal. Conhecê-los foi de uma riqueza pessoal e profissional imensurável.

Ao Geólogo Diogo Fonseca do Departamento de Produção do Grupo DST Agregados por permitir e colaborar com os inúmeros testes que realizamos na pedreira da empresa localizada na freguesia de Gouvães da Serra, concelho de Vila Pouca de Aguiar.

Ao Prof. Assistente e Doutorando Carlos Almeida do Laboratório de Sistemas Autônomos do Instituto de Engenharia de Sistema e Computadores, Tecnologia e Ciência do Instituto Superior de Engenharia do Porto (INESCTEC ISEP), pelo tempo dedicado, conselhos e disponibilização dos equipamentos do laboratório para o desenvolvimento do desviômetro.

Ao Engenheiro e Pesquisador Thomas Seidl e ao Bacharelado em Engenharia de Minas Alexandros Evangelatos, ambos do Departamento de Engenharia de Mineração e Economia Mineral da Montanuniversität Leoben, Áustria, pela cooperação mútua em nossas pesquisas e troca de experiências.

Aos meus eternos mestres e aos meus verdadeiros e saudosos amigos da UFPE.

Pela troca de experiências e conselhos, agradeço aos amigos e experientes Engenheiros de Minas Dr. Paulo Couceiro e Doutorando Eraldo Florêncio: da UFPE para o mundo, do mundo para a FEUP.

Aos amigos do Café Cristina, pelos essenciais momentos de descontração desta árdua jornada: Srt^a. Sônia Ferreira, D. Cristina Fonseca, aos colegas que lá conheci, e em especial ao meu amigo sr. Fernando Fonseca, pelas agradáveis conversas sobre 51 assuntos diversos, principalmente sobre o esporte bretão.

Aos colegas da Agência Nacional de Mineração (ANM) que contribuíram com empenho e presteza com os trâmites legais do processo do meu doutoramento: Victor Hugo Bicca (Diretor-Geral), Fabiano Piñeiro Miranda (ex-Superintendente do extinto DNPM/TO), André Marques (Assessor Técnico da Diretoria Colegiada), Júlio César (Ex-Superintendente de Administração e Finanças), Regina Carvalho (Coordenadora de Desenvolvimento de Pessoas) e Gleyton Marçal (Chefe do Serviço de Gestão Administrativa da ANM/TO).

Aos grandes Engenheiros de Minas que tive o privilégio de trabalhar quando debutei na mineração e que foram minhas referências profissionais: Marcos Holanda, José Carlos Madruga (*in memoriam*), Werther Larrazabal e Alípio Agra Lima, da ANM/PE; José Edson Bezerra, fundador e Diretor da Polimaq Engenharia; e João Afonso Sitônio do Grupo Queiroz Galvão.

Aos meus colegas de trabalho da ANM/TO, mas acima de tudo, meus grandes amigos, Eng. de Minas Moacir Haruo Massani e o Técnico em Mineração Ricardo de Alencar Silva que, mesmo de Palmas/TO, me apoiaram desde o início desta jornada, e mantiveram suporte até o meu retorno ao Brasil e conclusão deste trabalho. Sei que posso contar com vocês sempre. Isto é recíproco.

À O-Pitblast, empresa que forneceu os subsídios de todas as etapas do desenvolvimento do Desviómetro através do protocolo de mútua cooperação celebrado com o Departamento de Engenharia de Minas da FEUP, à toda equipe, amigos antigos e novos, mas em especial às seguintes pessoas:

- Aos jovens e promissores Engenheiros de Minas João Soares, Sávio Olímpio, Renato Laerth e Thalles Xavier, por suas ajudas com os n-ésimos testes de campo que realizamos.
- Aos Amigos da Areosa, pelas suas enriquecedoras contribuições, cada um em suas respectivas especialidades: Eng. de Minas MSc. Auã Kiahla, Gustavo Queiroz, Daniel Paralta, Eng. de Minas Pedro Pereira e Eng. Mecânico Rômulo Cardoso.
- Aos Originais, Engenheira de Minas Raquel Sobral e Engenheiro Eletrotécnico Pedro Brito, pelas vitais contribuições, suportes essenciais, excelente trabalho, e dedicação de horas de suas ocupações no desenvolvimento de ideias em todo desenrolar deste projeto, notadamente com os procedimentos de campo, aplicação e eletrônicos.

- Ao Eng. de Minas, cofundador e COO da O-Pitblast Francisco Leite, a quem “adotei” como irmão, por tudo que fez por mim desde que eu pisei pela primeira vez em Portugal, por ter acolhido minha família, e por não hesitar em nenhum momento para nos ajudar tanto no andamento do projeto, como em sua preocupação com nosso bem-estar no Porto. Sua amizade, disponibilidade e prontidão foram fundamentais para o desenvolvimento do Desviómetro.
- Ao Engenheiro de Minas, cofundador e CEO da O-Pitblast, MSc. em Engenharia Matemática, cientista, coorientador desta investigação, mas o mais importante, meu grande amigo Vinícius Miranda, pelo conjunto da obra, por ser o mentor intelectual do meu retorno a vida acadêmica, onde me apresentou a FEUP e propôs realizarmos ciência juntos no nosso doutoramento, por todo conhecimento, dedicação, críticas construtivas, amizade sincera e oportunidade ofertados.

Mudanças bruscas são difíceis de se adaptar, mas se realizadas com a perfeita companhia, o objetivo da mudança sempre será alcançado da forma menos dolorosa possível. Por isto, sou eternamente grato à minha esposa Audilene Marinho pela companhia, suporte, zelo e conforto nas noites ruins. Por enfrentarmos juntos outra importante caminhada em nossas vidas, por ter abdicado, mais uma vez, de seu conforto profissional, financeiro e emocional, para se juntar a mim nesta peleja, mas que com certeza, renderá frutos.

Nós conseguimos!

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Renê Faustino (in
memoriam) e Jandira Ferreira, aos
meus irmãos e aos meus filhos.*

Sumário

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iv
DEDICATÓRIA.....	viii
Sumário	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xviii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Motivação	7
1.2 – Organização da Tese.....	9
PARTE I – ESTADO DA ARTE	11
2 – DESVIO DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS.....	11
2.1 – Perfuração	12
2.2 – Desvio de Perfuração	14
2.3 – Introdução sobre Erro de Desvio	16
2.3.1 – Erro de Posição do Emboquilhamento	18
2.3.2 – Erro Angular: Inclinação e Orientação.....	19
2.3.3 – Erro de Curvatura (Flexão).....	19
2.3.4 – Erro de Comprimento	20
2.3.5 – Erros Decorrentes das Características Geomecânicas da Rocha.....	23
2.4 – Consequências do Desvio de Furo.....	25
2.4.1 – Problemas de Produção	25
2.4.2 – Problemas de Segurança.....	26
2.5 – Aferição de Desvio de Furos.....	26
2.6 – Resultados da Medição de Desvios de Furos.....	27
3 – ANÁLISES PRELIMINARES DE EQUIPAMENTOS DIVERSOS PARA AVALIAÇÃO DE DESVIOS	29
3.1 – Inclinómetros	31
3.1.1 – Durham Geo Slope Indicator (DGSI).....	34
3.1.1.a – Digitilt AT System	34
3.1.1.b – Digitilt Classic Inclinometer System	35
3.1.2 – Soil Instruments Inclinometers	37
3.2 – Dispositivos para Medição de Desvios	39
3.2.1 – Carlson Software© - Sistema de Medição de Desvios de Furos Boretrak®.....	40
3.2.1.a – Boretrak® de Barras	41

3.2.1.b – Boretrak® de Cabos	43
3.2.2 – Century Geophysical LLC	46
3.2.2.a – Detetor de Raios Gama e Medidor de Desvio - Natural Gamma/Deviation Tool Model 9702	47
3.2.2.b – Dipímetro - Dipmeter Model 9412.....	49
3.2.3 – Devico AS	52
3.2.3.a – DeviFlex <i>Rapid</i>	52
3.2.3.b – DeviGyro™	54
3.2.3.c – DeviShot™	56
3.2.4 – Pulsar Measuring Systems© - Blasthole Probe®.....	57
3.2.5 – Reflex™ Soluções	58
3.2.5.a – Conjunto de Instrumentos de Pesquisa Reflex™	60
3.2.5.b – Reflex Gyro™	62
3.2.5.c – Reflex™ Maxibor® - Dispositivo de Flexão Ótica	63
3.2.6 – Robit® Sense Systems - M Sense	64
3.2.7 – Stockholm Precision Tools (SPT).....	66
3.3 – Conclusão.....	68
PARTE II – DESENVOLVIMENTO DO DESVIÓMETRO	69
4 – DEFINIÇÃO DO DESVIÓMETRO	69
5 – COMPONENTES DO DESVIÓMETRO: PROJETOS UNITÁRIOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	81
5.1 – Histórico	82
5.2 – Mecânica do Invólucro Metálico da Sonda	87
5.2.1 – Material Constituinte: Aço Inox AISI 304	88
5.2.2 – Configuração Dimensional do Invólucro.....	91
5.2.2.a – Formato	91
5.2.2.b – Dimensões: Comprimento e Diâmetro.....	96
5.2.3 – Peso da Sonda.....	100
5.3 – Sistema Eletrônico	107
5.3.1 – Sensores	107
5.3.2 – Memória e Comunicação por <i>Bluetooth</i>	112
5.3.3 – Alimentação do Sistema.....	115
5.3.3.a – Requisitos Mínimos da Bateria	115
5.3.3.b – Descrição da Bateria Seleccionada.....	115
5.3.3.c – Carregamento	116
5.3.4 – Resumo da Configuração Geral do Sistema Eletrônico	117
5.4 – Sistema de Suporte e Tração	119
5.4.1 – Introdução	119

5.4.2 – Tipos de Cordas Testadas	120
5.4.3 – Marcos Visuais	123
5.4.4 – Meios de Ligação do Sistema de Tração	125
6 – APLICAÇÃO	128
6.1 – Introdução	128
6.2 – Comandos Preparatórios e Configurações	131
6.2.1 – Preparando o Dispositivo de Controle para Uso do Aplicativo	133
6.2.1.a – Ícones da Aplicação	133
6.2.1.b – Conectando com a Sonda	134
6.2.2 – Projetos	135
6.2.2.a – Projetos <i>Online</i>	135
6.2.2.b – Projetos <i>Offline</i>	138
6.2.3 – Interface com os Parâmetros Teóricos dos Furos	142
6.2.4 – Definindo os Parâmetros Teóricos dos Furos na Aplicação Utilizando a Sonda	144
6.2.5 – Demais Funcionalidades: Configurações	145
7 – MODO DE UTILIZAÇÃO DO DESVIÓMETRO	148
7.1 – Funcionamento da Sonda	148
7.2 – Usando o Aplicativo para Aferir os Parâmetros Geométrico dos Furos	150
7.3 – Meio de Tração: Sistema de Marcação e Registro do Offset.....	154
7.4 – Resumo	158
8 – TRATAMENTO DOS DADOS	160
8.1 – Aferição do Furo de Forma Contínua: Tentativa pelo Método de Euler	160
8.1.1 – O Método de Euler	160
8.1.2 – Procedimento de Campo.....	161
8.1.3 – Análise dos Dados e Resultados.....	162
8.1.4 – Considerações sobre o Método Adotado	163
8.2 – Aferição do Furo de Forma Intercalada: Transformação dos Dados por Rotação Vetorial	164
PARTE III – VALIDAÇÃO	167
9 – VALIDAÇÃO	167
9.1 – Procedimento de Campo	167
9.2 – Análise Estatística	170
9.3 – Considerações sobre o Método Adotado.....	174
PARTE IV – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	175
10 – CONCLUSÃO.....	175

11 – TRABALHOS FUTUROS	176
12 – BIBLIOGRAFIA	180
13 – ANEXOS	193
13.1 – Anexo I - Programa de Cátedra entre a Maxam e <i>Universidad Politécnica de Madrid</i>	193
13.2 – Anexo II - Comparativo das Principais Características Técnicas de Equipamentos de Medição	194
13.3 – Anexo III - Orçamento dos 2 Principais Equipamentos de Medição de Furos (2019)	195
13.4 – Anexo IV - Projetos e Detalhamentos Técnicos do Invólucro do Desviómetro.....	196
13.5 – Anexo V - Certificado de Calibração do Desviómetro emitido por Laboratório Acreditado Internacionalmente	200

Índice de Figuras

Figura 1 – Detalhe do protótipo do case de plástico com um smartphone em seu interior utilizado para medir desvio de furos (Miranda & Leite, 2018).....	8
Figura 2 – Exemplo de Carro de Perfuração (Blaster's Training Modules: Blasthole Drilling, 2017)	14
Figura 3 – Carro de perfuração SmartROC D65 perfurando uma linha de furos num ângulo de 20° (Mining & Construction, 2011).....	15
Figura 4 – Flexão da haste quando o bit passa de um meio mais brando a um de maior competência. Ilustração do autor adaptado de Hardrockdrills (2018) 20	
Figura 5 – 4 dos erros comuns de perfuração (arte do autor adaptado de Miranda & Leite, 2018) (Hardrockdrills, 2018).....	23
Figura 6 – Exemplo de desvio de furo causado pela transição da rocha (OSMRE, 2017).....	24
Figura 7 – Esquema de flexão da haste de perfuração causado pela transição da rocha. Ilustração do autor, adaptado de Price (2018)	24
Figura 8 – Detecção de afastamento crítico e perfil de um furo na linha da face livre (Miranda, 2017)	28
Figura 9 – Esquema das leituras da direção da inclinação (arte do autor adaptado de Raposo, 2011).....	32
Figura 10 – Princípio do funcionamento do inclinómetro: a) e b) esquema do tubo inclinométrico; c) e d) demonstração do cálculo feito pelo equipamento (arte do autor adaptado de Dunncliff, 1988; Fernandes, 2011; Raposo, 2011 & Coelho, 2017).....	33
Figura 11 – Sistema Digitilt AT (DGSI Slope Indicator, 2019)	34
Figura 12 – Esquema do cabo e tampa de suporte (DGSI, 2019).....	35
Figura 13 – Unidade de controle portátil robusta de alumínio de grandes dimensões (DGSI Slope Indicator, 2019).....	36
Figura 14 – Conjunto polia e carretel: mecanismos para o cabo de tração e transmissão de dados. Abaixo, sonda em aço inox (DGSI Slope Indicator, 2019).....	36
Figura 15 – Principais inclinômetros da Soil Instruments: a) C17- Pro Vertical Digital Inclinometer System; b) C19-1 Horizontal Digital Inclinometer System; e c) Inclined Digital Inclinometer System (30° e 60°) (Soil Instruments, 2019)....	37
Figura 16 – Exemplo de utilização de um tipo do C19-1 Horizontal Digital Inclinometer System da Soil Instruments (Soil Instruments, 2017)	38
Figura 17 – Capa para o furo que em conjunto com a marcação no cabo permite que a altura das marcações seja uniforme (Soil Instruments, 2017)...	38
Figura 18 – Boretrak® Viewer: sistema de processamento, edição e visualização dos dados	40
Figura 19 – Faixa de medição do Boretrak® de Barras: downholes de 0° a 45° e upholes de 135° a 180° (Carlson, 2018)	41
Figura 20 – Representação geral do uso do Boretrak® de barras (Carlson, 2018)	42
Figura 21 – Boretrak® de Cabos (Carlson, 2018)	44
Figura 22 – Plataforma de calibração (Carlson, 2018)	45
Figura 23 – Representação do modelo 9702 (fora de escala) (Century Geophysical LLC, 2019).....	48

Figura 24 – a) Dipímetro de 6 braços (Pöppelreiter, García-Carballido, & Kraaijveld, 2010), e b) esboço da funcionalidade de um dipímetro de quatro braços (Luthi, 2001)	50
Figura 25 – Exemplos de dados obtidos com dipímetros: cada coluna apresenta informações do furo como posição, características geomecânicas e físicas (Pöppelreiter, García-Carballido, & Kraaijveld, 2010)	51
Figura 26 – a) Esquema do DeviDrill™ e b) exemplo de perfuração direcionada (Devico AS, 2017)	52
Figura 27 – Mecanismo de tracionamento anti-rotação da sonda e unidade de controle (PDA) (Devico AS, 2017).....	53
Figura 28 – Sonda do DeviFlexRapid (acima), e destaque dos 3 centralizados com rodas retráteis (abaixo) (RL & GV, 2011)	53
Figura 29 – DeviFlexRapid (Devico AS, 2017, 2019)	54
Figura 30 – Unidade de controle: Smartphone com aplicativo Android (Devico AS, 2019)	55
Figura 31 – De cima para baixo: a) dispositivo DeviGyro™ em destaque e dentro da sonda com centralizadores; b) sonda de ultrapassagem; e c) núcleo adaptável ao conjunto barrilete/broca (imagens fora de escala, adaptado de Devico AS, 2017)	56
Figura 32 – DeviShot™ (Devico AS, 2017)	57
Figura 33 – Equipamento de medição da Pulsar©: Sistema tipo Guincho e a unidade de controle Datamat 5 (Ewer, 2018).....	58
Figura 34 – Software para aquisição e gerência de dados de todos os equipamentos Reflex™	59
Figura 35 – Exemplo de 3 kits Reflex™ que juntos, compõem um só equipamento (Reflex Now, 2017).....	61
Figura 36 – Algumas das etapas da complexa montagem do equipamento (Reflex Now, 2017).....	61
Figura 37 – Meio de transferência de dados entre a UC e a sonda por meio de cabo (Reflex Now, 2017).....	62
Figura 38 – Aplicativo de controle do Reflex Gyro™ (Reflex, 2018).....	63
Figura 39 – Dispositivo de Flexão Óptica: exemplo de sua funcionalidade e aplicações (Reflex).....	64
Figura 40 – O M Sense da Robit® Sense Systems (Robit, 2019)	65
Figura 41 – Linha de equipamentos de aferição de furos da SPT: a) Core Retriever™; b) GyroLogic™; c) GyroMaster™, e ; d) MagCruiser™ (Stockholm Precision Tools, 2019).....	67
Figura 42 – o Desviômetro: resumo de sua funcionalidade.....	69
Figura 43 – Um dos resultados da pesquisa do termo “deviometer”, o Digital Mineral Logging System é uma invenção usada em sondagem de rochas, cuja tecnologia dos anos 80 já está obsoleta (West, 1979), o que não o caracteriza como o desviômetro proposto	73
Figura 44 – Desenhos técnicos do pedido de patente referente ao “aparelho para análise de mineração”: fig. 1 vista lateral do aparelho dentro de um furo de sondagem num maciço em ambiente subterrâneo; fig. 2 princípio mecânico do equipamento baseado num sistema de engrenagens; e fig. 3 representação da sonda num furo vertical	75
Figura 45 – Esquema operacional de medição do desviômetro: todas as direções e sentido (orientação absoluta 360°)	76

Figura 46 – Alguns dos registros dos vários testes positivos do desviômetro em furos descendentes, em mina subterrânea a pedreira a céu aberto (acervo do autor).....	78
Figura 47 – Registro do uso do desviômetro num furo ascendente de uma obra subterrânea (foto: Jarkko Manninen, Forcit Finlândia)	79
Figura 48 – Primeiro esboço do “inclinômetro sem rodas”: ideia inicial. Abril de 2018 (acervo do autor)	82
Figura 49 – Protótipos #2 (esq.) e #4 (dir.): únicas tentativas de transmissão de dados por cabo (acervo do autor)	82
Figura 50 – Da esquerda para a direita: protótipos dos primeiros invólucros nºs 1 a 5 (acervo do autor)	83
Figura 51 – Protótipo da sonda #1 com o invólucro #2: tubo de aspirador de pó adaptado com o primeiro sistema eletrônico (acervo do autor).....	84
Figura 52 – Invólucro #4 com suas 2 peças para adaptação da sonda para uso com cabo ou corda.....	85
Figura 53 – Invólucro #6	86
Figura 54 – Invólucro #6 em alumínio: a) desmontada; b) deformidade logo no primeiro impacto.....	87
Figura 55 – a) um dos primeiros esquemas do invólucro feito em Power Point, e b) exemplo de uma das versões feitas em ambiente Auto Desk Inventor Profissional (arte do autor)	87
Figura 56 – Detalhamento do invólucro metálico final e seus complementos .	88
Figura 57 – Variações de pontas maciças das sondas experimentadas para superar a tensão superficial e o empuxo de fluídos nos furos	91
Figura 58 – Formato dos objetos "a", "b" e "c" respectivamente. Imagem adaptada de Helerbrock (s.d.) e Rosa (1999). Ilustração fora de escala	94
Figura 59 – Formato final do invólucro com ponta cilíndrica baseado no princípio do coeficiente de arrasto e geometria do tipo torpedo, com as 3 partes que o compõem: ponta maciça arredondada, receptáculo dos eletrônicos e suporte para o meio de tração.....	95
Figura 60 – Centro de gravidade do invólucro determinado automaticamente no Auto Desk Inventor	107
Figura 61 – Três sensores em um único dispositivo: acelerômetro, magnetômetro, giroscópio (Autoria própria adaptado de Bosch Sensortec, 2016)	109
Figura 62 – Registro da exposição dos eletrônicos à uma temperatura de -16° graus pelo período de 24 horas: a) sem o invólucro; b) com invólucro (acervo do autor).....	111
Figura 63 – Microcontrolador ESP32 WROOM 32U (Autoria do autor adaptado de Espressif Systems (2019)).....	113
Figura 64 – a) e b) esboços com as dimensões de uma bateria de íons de lítio tamanho 18650 c) comparação com uma bateria alcalina AA para escala (Google), e d) bateria selecionada para o desviômetro (acervo do autor)	116
Figura 65 – Porta USB-C para carga da sonda	116
Figura 66 – Diagrama de blocos com os elementos necessários para efetuar os passos do sistema eletrônico do desviômetro	117
Figura 67 – Detalhamento dos componentes eletrônicos.....	118
Figura 68 – Suporte interno dos eletrônicos	119
Figura 69 – Cordas de náilon obtidas e testadas durante o desenvolvimento do desviômetro (acervo do autor).....	121

Figura 70 – Corda de Kevlar testada (acervo do autor).....	122
Figura 71 – Primeiro esquema de marcação desenvolvido para corda de kevlar	123
Figura 72 – Configuração final do sistema de marcação com cores e números (fora de escala)	124
Figura 73 – Exemplos de máquinas para medir e enrolar cordas (Fonte: Google)	124
Figura 74 – Um dos registros do teste de fixação dos marcos da corda, com a ajuda de estagiários da O-Pitblast (acervo do autor)	125
Figura 75 – Conector semipermanente para unir a sonda ao meio de tração.....	126
Figura 76 – Conector para unir o equipamento a um local seguro	126
Figura 77 – Imagem ilustrativa da conexão sonda/meio de tração (acervo do autor).....	127
Figura 78 – Peças em destaque nas pontas da corda chamadas "sapatilhas". (acervo do autor).....	127
Figura 79 – Configuração final do meio de tração (acervo do autor).....	127
Figura 80 – Ambiente Android Studio: plataforma de desenvolvimento da aplicação	131
Figura 81 – Exemplo de tela da configuração Bluetooth com código da sonda pareada	133
Figura 82 – a) tela "Projects; b) barra lateral; c) sondas pareadas e selecionada; d) sondas desconectadas	134
Figura 83 – Interface dos projetos com os parâmetros geométricos dos furos	135
Figura 84 – Interfaces a) "Projects - Online", b) planos de perfuração e c) mensagem informando não ser possível deletar furos na interface "Online" .	136
Figura 85 – Dados teóricos dos furos (Planned Values) em destaque.....	137
Figura 86 – Como baixar um projeto para interface "Offline": a) escolha do projeto, b) arrastar o ícone para esquerda, c) confirmação, d) aparecerá o ficheiro e, e) o projeto selecionado estará pronto.....	137
Figura 87 – Como mudar da interface "online" para a "offline": a) tela "online", b) mudar para tela "offline" com as pastas salvas, e c) ficheiro com projeto armazenado na memória do telefone.....	139
Figura 88 – Sequencial de imagens explicativas para adicionar um projeto offline.....	139
Figura 89 – Renomeando um projeto	140
Figura 90 – Apagando um projeto de furos: a) escolher o projeto, b) arrastar o link do projeto para a esquerda e clicar no botão de deletar e c) confirmar esta ação	140
Figura 91 – Adicionando furos a um projeto offline: a) e b) projeto criado inicialmente com 3 furos, e c) e d) após adicionar 1 furo	141
Figura 92 – Sequência de como apagar um furo.....	142
Figura 93 – a) tela dos projetos e b) lista de furos do projeto exemplo nomeado "UFPE" e suas características.....	143
Figura 94 – Editando furos teóricos: a) dados automáticos, b) clicar no número para abrir caixa de texto e teclado numérico, c) repetir passo para as informações desejadas, d) e e) valores teóricos modificados	144
Figura 95 – Tomando valores teóricos a partir da sonda: a) informação do furo 2 com valores de inclinação e azimuth automáticos; b) posicionando a sonda	

no emboque do furo (acervo do autor); c) Botão "Get Theoretical Info from Probe; d) e e) valores teóricos modificados	145
Figura 96 – Demais funcionalidades para configuração da aplicação e da sonda	146
Figura 97 – Rótulos dos furos: a) por identificação alfanumérica, e b) por sequência numérica	146
Figura 98 – Informações visuais das luzes de LED	149
Figura 99 – Interface com dados do furo (Borehole) 1	150
Figura 100 – Registro do offset na aplicação	151
Figura 101 – Interfaces das medições do furo.....	153
Figura 102 – Saídas gráficas com representação da geometria dos furos após sondagem: em azul geometria planeada, e em vermelho, condições reais ...	154
Figura 103 – Acima, conector semipermanente de 75 mm para acoplar a corda à sonda, e abaixo mosquetão 11 cm para conectar ao cinto de segurança do operador ou outro local seguro.....	154
Figura 104 – Esquema de cores e números do meio de tração	156
Figura 105 – Destaque das opções de escolha do intervalo de medição no aplicativo	156
Figura 106 – Procedimento de visualização do offset com a corda para cada intervalo de medição selecionado (steps): a) 1m, b) 2 m, e c) 3 m (imagem ilustrativa fora de escala)	158
Figura 107 – Primeiro protótipo funcional utilizado em teste de campo para validar a operacionalidade do equipamento pelo método de Euler.....	160
Figura 108 – Exemplo do método de Euler. Dados genéricos de unidade qualquer	161
Figura 109 – Procedimento de campo: a) montagem da sonda; b) introdução da sonda no furo; c) medição do offset e; d) registro da medição.....	162
Figura 110 – Comparação da geometria de um furo resultante: pela metodologia de Euler (azul), pelo Boretrak® de cabos (verde) e pelo método usual (laranja).....	163
Figura 111 – a) desviômetro representado como vetor u iniciado no ponto (0,0,0); b) representação da primeira rotação, e; c) representação da segunda rotação vetorial. Esquema fora de escala	165
Figura 112 – Exemplo dos dados com duas rotações apresentados na aplicação do desviômetro.....	166
Figura 113 – Comparação das medições de direção e inclinação feitas pelos 2 dispositivos, utilizando o software O-Pitblast: acima resultado do equipamento tradicional. Abaixo, resultado do desviômetro pelo método de rotação vetorial	166
Figura 114 – Alguns registros dos testes: a) e b) com o protótipo; c) e d) com o Blasthole Pulsar® (acervo do autor).....	168
Figura 115 – Análise e comparação visual dos dados obtidos pelos equipamentos na plataforma O-Pitblast® (acervo do autor)	169
Figura 116 – Resultados dos testes de campo: comparação visual entre os dados dos equipamentos	169
Figura 117 – Boxplots de resíduos em todos os dispositivos	170
Figura 118 – Boxplot após remoção dos outliers.....	171
Figura 119 – Teste de Normalidade: Ângulo (AN) e Azimute (AZ).....	171
Figura 120 – Gráfico Q-Q para o par de dados	172
Figura 121 – Resumo de todos os resíduos.....	174

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Resumo técnico dos inclinômetros da Soil Instruments	39
Tabela 2 – Comparativo das propriedades do Boretrak® de Cabos em suas 2 configurações: com e sem haste.....	43
Tabela 3 – Características físicas e técnicas do DeviFlexRapid (Devico AS, 2019)	54
Tabela 4 – Características físicas e técnicas do DeviShot™ (Devico AS, 2019)	57
Tabela 5 – Características técnicas do conjunto Reflex™ (Reflex, 2018)	60
Tabela 6 – Características técnicas do Reflex Gyro™ (Reflex, 2018)	62
Tabela 7 – Resumo técnico dos instrumentos de aferição de furos da SPT....	67
Tabela 8 – Resultados das pesquisas técnicas e bibliográficas sobre os termos "desviómetro", "desviômetro" ou "deviometer" em bibliotecas e plataformas digitais ou virtuais.....	71
Tabela 9 – Resultados das pesquisas técnicas e bibliográficas sobre os termos "desviómetro", "desviômetro" ou "deviometer" em algumas bibliotecas de faculdades de engenharia e outras fontes	72
Tabela 10 – Denominação das peças que compões o invólucro do desviómetro	88
Tabela 11 – Designação dos tipos de aço inox austeníticos determinado pelo sistema AISI, de acordo com a quantidade dos elementos metálicos (Hosford, 2012)	90
Tabela 12 – Coeficientes de arrasto para objetos com diferentes geometrias (Rosa, 1999).....	93
Tabela 13 – Diâmetro dos furos com base no tipo de coroa e granulometria dos fragmentos de uma pilha. Adaptação de Silva (2009). Imagens das peças: Epiroc (2017). Fora de escala	97
Tabela 14 – Diâmetro dos furos com base nas áreas de seções de galerias de obras subterrâneas e túneis. Adaptação de Silva (2009).....	97
Tabela 15 – Diâmetro teórico dos furos relacionados ao método de perfuração e tipo de aplicação. Adaptado de Jimeno, Llera & Urbina (2003).....	98
Tabela 16 – Comprimento e diâmetro de 4 equipamentos de medição de desvios adotados como referência (Carlson, 2018; Ewer, 2018; e Robit, 2019)	99
Tabela 17 – Dimensões finais das peças e totalidade do invólucro do desviómetro.....	99
Tabela 18 – Peso de 4 equipamentos de medição de desvios adotados como referências (Carlson, 2018; Ewer, 2018; e Robit, 2019).....	100
Tabela 19 – Peso total e por componentes do desviómetro	107
Tabela 20 – Listagem nominal dos componentes eletrônicos.....	118
Tabela 21 – Identificação dos componentes do suporte interno dos eletrônicos	119
Tabela 22 – Principais problemas encontrados com os tipos de tração experimentados e descartados	123
Tabela 23 – Ícones da Aplicação	133
Tabela 24 – Representação e identificação do sistema de cores e números do meio de tração do desviómetro	155
Tabela 25 – Procedimento das medições	167

Tabela 26 – Teste da homogeneidade da variância	171
Tabela 27 – Teste ANOVA para amostras.....	172
Tabela 28 – Análise descritiva dos dados.....	172
Tabela 30 – Resumo dos resíduos: análise de ângulo e azimuth.....	173

1 – INTRODUÇÃO

A forma de perfurar uma rocha para aplicação de explosivos como forma de promover a sua fragmentação desenvolveu-se originalmente de forma rudimentar com o surgimento do emprego da pólvora no século XVII, onde os furos eram abertos através de processos manuais. Mais tarde, com a Revolução Industrial do século XIX e a invenção da dinamite por Alfred Nobel em 1867, surgiram as primeiras perfuradoras que funcionavam inicialmente a vapor, e posteriormente a ar comprimido (Jimeno, Guezala, Jimeno, & Bermúdez, 2013). Ao longo da história da evolução da indústria mineira, o processo de perfuração foi otimizado e tornou-se muito mais complexo, envolvendo novos métodos de perfuração para diferentes aplicações, máquinas de perfuração melhoradas, novas metodologias e tecnologias para um melhor desempenho desta operação, aumentando a sua precisão (Miranda, *et al.*, 2019).

A perfuração de rocha, dentro do campo do desmonte, é a primeira operação realizada tendo em conta o processo produtivo (poderão haver outras que a antecedem de aquisição de informação, tendo em vista o planeamento e otimização do desmonte) e tem como finalidade a perfuração de furos com uma distribuição e geometria adequados dentro dos maciços, para alojar cargas de explosivos e acessórios iniciadores (Hustrulid, 1999). Assim, é possível transformar o maciço rochoso em vários fragmentos menores para que possam ser devidamente movimentados e transformados posteriormente pelos equipamentos disponíveis (Giraudi, Cardu, & Kecojevic, 2009). As variadas técnicas e métodos de perfuração de rochas podem ser aplicadas tanto em obras à superfície, como subterrâneas, variando naturalmente o tipo de máquinas adstrita a estes diferentes ambientes da atividade mineira.

A relevância da perfuração de rocha na cadeia produtiva pode ser enfatizada com as palavras do especialista Jair Carlos Koppe¹, que afirmou: “*a perfuração e o desmonte são operações unitárias que influenciam todas as operações*”

¹ Engenheiro de Minas, Doutor em Geociências e Professor na UFRGS

subsequentes. Se forem mal executadas, irão refletir na demais” (Oliveira, 2019). Já para Vicente Huélamo², outro *expert* no assunto, “*a perfuração constitui uma pequena porção dos custos da mineração*” (Explosives & Blasting, 2019), porém, é um procedimento bastante importante no processo de promover fragmentação da rocha que, se não for devidamente planeada e executada, pode gerar altos custos na cadeia de produção de uma mina (Martin, 2004). Entre os inúmeros parâmetros que se podem observar no processo de otimização de desmonte de rocha com recurso à explosivo, existe um que se afigura como fundamental: o desvio da perfuração.

O desvio do caminho do furo planeado pode conduzir a diversos problemas não desejados tanto de produção como de segurança. Furos mal executados, se não forem identificadas as suas anomalias, podem causar incidentes com o potencial de resultar em ferimentos ou fatalidades, que resultam em consequências nefastas, como perda de reputação da empresa, cancelamento de licenças para operar, perda de clientes e exposição da responsabilidade (Giles & Roller, 2012). A geometria anómala de um conjunto de furos pode promover o aparecimento de blocos de rocha de grandes dimensões, impossibilitando o seu transporte. Além disso, a colocação de cargas explosivas em zonas críticas pode gerar ultralançamentos de fragmentos³, os quais podem pôr em risco a segurança de trabalhadores e de equipamentos. Geração de repé, sub escavação, estabilidade dos taludes, custo de perfuração elevado, níveis de fragmentação inadequados, irregularidades no piso, praça e rampas nas zonas de desmonte e danos em instrumentos, são outros exemplos observados por Harris (1999).

Perante as contrariedades mencionadas, afigura-se importante e necessário realizar análise do perfil do furo com o uso de equipamento apropriado para observação do desvio, abrindo caminho para a realização de controle e minimização dos problemas citados (Miranda & Leite, 2018). A observação e o

² *Technical Applications Manager*, Maxam (Arias, 2020)

³ Ultralançamento ou projeções descontroladas e geralmente violentas de fragmentos de rochas fora da área planeada em um desmonte são também popularmente definidas como “*flyrocks*”, mesmo em países de língua portuguesa

acompanhamento ao pormenor das atividades de engenharia em geral, afigura-se bastante importante, principalmente as que envolvem impactos ou riscos associados ao meio ambiente e pessoas direta ou indiretamente ligadas a uma obra. Com a verificação das condições de segurança das estruturas e no apoio ao projeto durante o período de execução, criam-se oportunidades de prever, sempre que necessário, medidas de mitigação dos impactos negativos. Instrumentos de observação são utilizados para aferir grandezas que contribuem para o conhecimento, avaliação e adaptação de diversos parâmetros de um procedimento de engenharia (Raposo, 2011). No que diz respeito à engenharia de minas, mais especificamente ao desmonte de rochas com recurso à explosivo, as medidas de observação apresentam-se como fundamentais para o planeamento da pega de fogo (fase de projeto), na perfuração da rocha e na aplicação e detonação da carga explosiva (fase de execução), bem como na caracterização das variáveis nas fases de projeto, execução e resultado do desmonte para previsão das condições de segurança e custos indesejados (fase de avaliação). Como exemplos de instrumentação de observação no tocante à fragmentação de rochas com uso de explosivos, recorre-se na etapa de planeamento a simuladores de desmonte de rochas como o Jk Simblast, ShotPlus e O-Pitblast. Na fase de pré-execução cita-se aqui os inclinômetros, aparelhos de *scanning* de topografia e face livre de bancada por laser 3D, e os drones que, assim como o laser 3D, servem para a construção de modelos digitais de bancadas, localização de furos e fotogrametria (Miranda, 2017), com a vantagem de se apresentarem com grande versatilidade operacional e de aquisição cada vez menos onerosa. Na etapa de execução existem os aparelhos para medição da VoD⁴, geofones e sismógrafos. Já na pós-execução, cita-se como exemplo os detetores de gases gerados pelos explosivos e as ferramentas de análise de fragmentação por foto (Miranda, Leite & Faustino, 2017).

Numa entrevista ao periódico eletrónico *Central Cultura da Comunicação* (2019), o Engenheiro de Minas Flávio Borges⁵ afirmou que: “A execução de uma lavra mineral, sem acompanhamento técnico, pode resultar, por exemplo,

⁴ Velocidade de Detonação de um Explosivo Confinado (Silva V. C., 2009)

⁵ Inspetor do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado do Paraná/Brasil

no encurtamento da vida útil da mina. E para a sociedade, são efeitos colaterais diversos, desde a redução de arrecadação de impostos, danos causados ao meio ambiente, perda de postos de trabalho com o término precoce da atividade mineral até riscos de segurança aos trabalhadores envolvidos nas atividades mineiras.”

Das palavras deste engenheiro, entende-se que ao se referir que a lavra (e demais atividades do ciclo mineral) deva ter um acompanhamento técnico, implica no envolvimento das pessoas e equipamentos inerentes à um empreendimento, podendo-se então afirmar que o uso de instrumentos e ferramentas de gestão e execução técnica é imprescindível, e estão diretamente ligados, de forma a facilitar o planejamento e desenvolvimento de uma obra ou atividade de mineração, em todas as etapas nela existentes. Reforça-se esta ideia com o posicionamento de Holmvall⁶, que em seu artigo *Cost Saving in Surface Drilling: Construction and Quarries* (2001), afirmou que as minas e pedreiras existentes no mundo têm a necessidade real de equipamentos de medição de desvios de furos, pois a sua utilização, além de proporcionar poupanças significativas, é capaz de evitar riscos que podem gerar problemas críticos.

As operações mineiras requerem análises prévias, segurança nas atividades, redução de custos e impactos ambientais. O planejamento de uma lavra congrega técnicas de engenharia e de gestão de modo a favorecer os empreendimentos mineiros a atingir estas metas (Instituto Minere, 2020). A implementação de melhorias tecnológicas é confirmada pela disputa entre empresas e os recursos que estas conseguem desenvolver e apresentar (Silva, 2008), e a indústria de desmonte de rochas com uso de explosivos não foge desta regra. A necessidade de se obter resultados mais confiáveis, rápidos, e, principalmente, com baixo custo conduzem à procura constante de inovação, aos quais os pesquisadores de tecnologia tentam responder positivamente (*South African Technology and Services*, 2017). A situação atual do consumismo mundial faz com que a mineração esteja em ritmo acelerado. A

⁶ *Owner and President of Export Pro Inc.* (2018)

mudança cultural e técnica gradual que está sendo observada na maioria das operações da mineração permite a implementação de novos conhecimentos e incorporação de metodologia operacionais, entretanto desenvolvidas. Por estas razões as empresas sofrem reestruturações com base em lições e erros do passado (MineMagazine, 2018). É comum que empresas invistam em desenvolvimento de novas ferramentas, algumas vezes em convênio com universidades, e aqui podemos citar, como exemplo, a empresa *Maxam*⁷ (2018), que possui um programa de cátedra junto a *Universidad Politécnica de Madrid* (ver anexo I). A presente investigação seguiu esse rumo, nomeadamente através de uma estreita colaboração entre Universidade/Empresa. Esta cooperação foi possível devido ao protocolo de ajuda mútua entre a empresa portuguesa O-Pitblast e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), parceria que fez com esta investigação fosse possível, e pudesse contar com vários protótipos e testes de laboratório e de campo.

Diante do exposto, devido ao avanço tecnológico e sua fácil acessibilidade, com a presente investigação foi possível idealizar e construir um protótipo portátil de aferição de desvio de furo com materiais relativamente fáceis de obter, recorrendo a sensores eletrónicos com acelerómetro, giroscópio e magnetómetro. Este equipamento foi batizado de Desviómetro, cuja explicação nominal e técnica está detalhada no capítulo 4. A ideia principal foi validar os dados obtidos pelos sensores dos protótipos através de algoritmos matemáticos e análise estatística. A partir disto, a pesquisa consistiu na criação de um equipamento assente em bases tecnológicas, para, de maneira rápida, simples e precisa, avaliar inclinação e direção de furos realizados em operações de desmonte de rocha em minas a céu aberto e subterrâneas. Assim reuniram-se os meios de desenvolver um conjunto eletrónico com sensores, microcontrolador e bateria para aquisição de dados, juntamente com uma sonda de fácil manuseio e usabilidade, construída em aço inoxidável AISI⁸ 304

⁷ <https://www.maxamcorp.com/>

⁸ *American Iron and Steel Institute* – Instituto americano responsável pela criação do sistema de designação e quantidade dos elementos metálicos em uma liga (Hosford, 2012). Isto será mais bem detalhado na seção 5.2.1 do presente trabalho

ou 316 para proteger os referidos equipamentos eletrônicos responsáveis pela leitura e coleta dos dados em ambientes muitas vezes adverso inerentes à mineração e obras. Em paralelo, foram idealizados os meios necessários à propagação do sinal até o utilizador da sonda. Necessariamente que se afigurou fundamental construir uma aplicação inovadora de interface em dispositivos móveis com sistema *Android*⁹ para visualização, controle, armazenamento e envio dos dados dos furos, para que, em tempo real, seja possível observar os resultados medidos com a sonda. Ao mesmo tempo, com a criação de meios de transmitir os dados por radiofrequência (*Bluetooth*), *cloud*, *e-mail* ou redes sociais, implementando-se assim condições para transferir um ou mais arquivos com as informações dos furos diretamente para qualquer *software* de análise de dados para a otimização do processo de desmonte de rocha utilizados por engenheiros e gerentes de minas em qualquer lugar do mundo. Também foi pesquisada uma corda flexível e resistente para suspender e guiar a sonda, com um sistema inédito de cores e números desenhados para auxiliar na identificação da posição da sonda dentro do furo.

Esta ferramenta permitirá ao engenheiro responsável por um determinado projeto, de qualquer lugar que ele esteja, identificar, prevenir e controlar riscos laborais, operacionais e de segurança resultante do desmonte de rocha, tais como *flyrocks* provenientes da ação de explosivo, geração de blocos de rocha de grande dimensão, vibrações em estruturas sensíveis e má fragmentação, problemas estes realçados por Luz e Salvador (2009). Descrevendo a ideia de um modo geral, o protótipo desenvolvido consiste numa sonda, que disponibiliza à saída os valores analógicos referentes aos sensores existentes no seu interior. Na maioria dos equipamentos existentes no mercado, os dados são transmitidos através de um cabo até um dispositivo de controle e exibição de informação. Nesta pesquisa foi possível fazer com que o cabo sirva apenas para suspender e guiar a sonda no furo, e que a comunicação desta com o

⁹ Atualmente existem vários sistemas operacionais para desenvolvimento e execução de aplicativos móveis, dentre eles destacam-se 2: *Android* e *iOS* (Györödi, Adrian, Zmandara, & Györödi, 2017). No Capítulo 6 será explicado o motivo da escolha do sistema *Android*

dispositivo de controle e operação no telemóvel seja realizada por radiofrequência (*Bluetooth*).

Tanto a operacionalidade da sonda e o modo de controle da aplicação foram planeadas para que pessoas de todos os níveis técnicos de um empreendimento pudessem operá-los com apenas um rápido processo de formação. Para isto, a sonda e seus acessórios foram projetados para serem leves, tornando o conjunto de fácil manuseio, e o aplicativo desenhado com poucas interfaces para dados de entrada e de saída. Tudo foi planeado para que o Desviómetro seja de fato aceite pela indústria internacional de mineração, de modo a atender as normas da Comunidade Europeia (CE).

1.1 – Motivação

Uma vez que as minas e pedreiras se encontram na base da indústria e são fundamentais para a economia mundial, torna-se essencial o desenvolvimento de ferramentas que possam ajudar a otimizar a cadeia produtiva. O mercado do setor extrativo de matérias primas naturais, já altamente competitivo, apresenta uma grande procura de soluções que sejam economicamente viáveis, de elevada eficácia e de baixo custo (Couceiro, Lopez Cano & Jafa, 2018). Mesmo que as normas da indústria variem bastante em escala global, as vantagens do uso de equipamentos de observação, incluindo os de medição de desvio de furo, são amplamente reconhecidas. Para se ter uma ideia, Portugal tem aproximadamente um total de 230 pedreiras e minas¹⁰ em atividade que possivelmente recorrem a explosivos para fragmentar os seus maciços rochosos (DGEG, 2020). Poucas destas empresas portuguesas possuem equipamentos para avaliação de desvio¹¹. Alguns países estão mais adiantados do que outros na institucionalização de uso de dispositivos de segurança. Como exemplo, citamos a Suécia, onde a medição do desvio do furo é obrigatória para um mínimo da primeira linha da malha de furação (Moore, 2017). A nível mundial, existem mais de 50 mil minas e pedreiras em

¹⁰ 205 Pedreiras em Portugal Continental e 13 minas. Última atualização: 02/09/2020. Fonte: DGEG - Estatística de Recursos Geológicos da DSEF-RG (DGEG, 2020)

¹¹ Informações verbais adquiridas em visita a empresas de mineração e observações feitas ao longo da investigação

operação (GDP from Mining, 2018), abrindo assim uma gama de potenciais utilizadores, uma vez que se desconhece a existência de ferramentas para este fim com custo significativamente menor que os praticados no mercado.

Algumas medidas para controle de perfuração de rochas têm sido adotadas, como a tecnologia desenvolvida recentemente por Orive *et al* (2017), que apresentaram um equipamento para medições de desvio de furos ascendentes (*upholes*) em minas subterrâneas de método *sublevel stoping*. Outra inovação foi revelada por Miranda & Leite (2018), apresentado no Fragblast 12¹²: trata-se do uso de um acelerómetro e sensor magnético presente num *smartphone* para medir desvios de furos de produção em rochas não magnéticas. O modo de operação é baseado no uso de dois *smartphones*, ambos com aplicativos específicos instalados. O operador insere um dos telefones protegidos por um invólucro tipo sonda de plástico, e ao mesmo tempo utiliza o outro aparelho para recepção e leitura das medidas. No final, os dados de ambos os aparelhos são combinados, e o resultado gera um ficheiro contendo os elementos do furo: número, inclinação e tempo das medidas. A Figura 1 mostra o esquema do protótipo criado por estes pesquisadores.

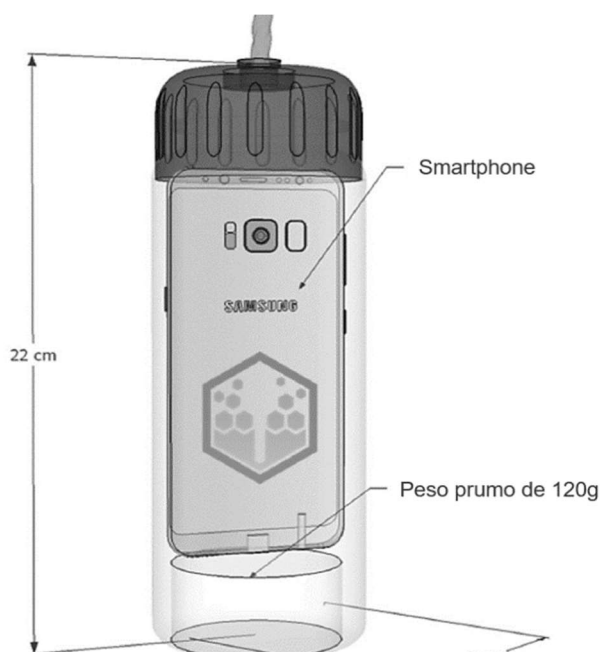


Figura 1 – Detalhe do protótipo do case de plástico com um smartphone em seu interior utilizado para medir desvio de furos (Miranda & Leite, 2018)

Os autores do referido estudo concluíram que esta nova tecnologia é pouco complexa, fácil de usar e barata. Porém, com todo respeito aos citados investigadores e sua excelente pesquisa, entendemos que a utilização de *smartphones* é mais bem aplicada para realizar chamadas, solicitar serviços de transportes e fornecimento de alimentação, fazer pagamentos, para entretenimento, e conhecer pessoas. O uso deste

¹² 12th International Symposium on Fragmentation by Blasting - Luleå, Suécia

objeto tão sensível e de custo considerável num ambiente hostil como frentes de lavras, especificamente dentro de furos de produção, onde é comum equipamentos e sondas se perderem por efeitos de encravamento, pode não ser bem aceite por engenheiros, gerentes ou empreendedores de minas. Fora isto, observou-se também que os equipamentos de medição de desvio de furos tradicionais e mais utilizados disponíveis no mercado têm valor agregado consideravelmente elevado.

Assim, tendo em vista o já referenciado artigo de Miranda & Leite, que serviu como motivação fundamental e “gatilho” para a presente investigação, decidimos pela continuidade do uso desta tecnologia, porém, substituindo o *smartphone* por sensores e componentes eletrônicos protegidos por um invólucro tipo sonda feito de um material resistente às intempéries do percurso ao longo da trajetória de um furo realizado num maciço rochoso (atrito, choque com o fundo do furo, presença de água e temperatura), com transmissão dos dados captados pela sonda a um *smartphone* através de rádio frequência (*Bluetooth*). Neste processo de criação, afigurou-se fundamental que todo o equipamento resultante fosse desenvolvido à baixíssimo custo. Somado a isto, também serviram como motivação inicial para o desenvolvimento do projeto apresentado neste trabalho, a observação pelo interesse das empresas em adaptação tecnológica e o foco na gestão de riscos para evitar danos à reputação e perdas financeiras (Scovira, 2012).

1.2 – Organização da Tese

A presente dissertação encontra-se dividida em 13 capítulos ao longo de 4 partes:

Após o Capítulo 1, Introdução, onde apresentamos a motivação da investigação e a estrutura do trabalho, expomos a 1ª parte, que contém os seguintes capítulos:

O capítulo 2 onde abordamos sobre desvios de perfuração de rochas, com uma breve introdução sobre perfuração em geral e as causas e consequências do

erro de execução de furos, bem como apresentamos a importância do uso de instrumentos para aferição precisa da geometria e posicionamento de um furo executado.

No capítulo 3 apresentamos uma revisão bibliográfica e técnica sobre os conceitos, métodos e princípios dos equipamentos de avaliação de desvios de estruturas em geral, que consideramos mais relevantes no mercado, com vistas à colher e organizar informações positivas e negativas do ponto de vista técnico e operacional dos variados fabricantes e modelos, bem como verificar a possibilidade de usar o protótipo desenvolvido em outros campos da engenharia (obras civis, barragens, geomecânica, e outras).

Na 2ª parte descrevemos todas as etapas do desenvolvimento do desviômetro e seus componentes: invólucro metálico, sistema eletrônico e meio de tração (capítulo 5), a aplicação móvel para controle e gerenciamento da sonda e transmissão dos dados (capítulo 6), o modo de utilização do equipamento (capítulo 7), e o modelos matemático utilizado para no funcionamento do desviômetro (capítulo 8).

Na 3ª parte temos o capítulo 9 onde apresentamos o teste e método matemático de validação do equipamento.

Na 4ª e última parte estão a conclusão da investigação (capítulo 10), recomendações para trabalhos futuros (capítulo 11), bibliografia (capítulo 12), e os projetos e detalhamentos técnicos, certidão acreditada da calibração do protótipo, além de uma tabela com o resumo dos comparativos dos equipamentos observados no capítulo 3, anexados à presente tese (capítulo 13).

PARTE I – ESTADO DA ARTE

2 – DESVIO DE PERFURAÇÃO DE ROCHAS

A qualidade do resultado da operação de desmonte por explosivos depende de muitos fatores, dos quais se destacam:

- As características do maciço rochoso, um conceito incontrolável mas imprescindível;
- O desenho da pega de fogo, uma operação especialmente complexa, dependente de critérios e com objetivos dificilmente quantificáveis;
- A execução da perfuração, especialmente no posicionamento e no cumprimento dos parâmetros geométricos de desenho dos furos;
- Os explosivos e a sua iniciação.

Todo o trabalho cujo desenvolvimento apresentamos se baseia na verificação da correta execução de furos individuais de perfuração, nomeadamente no cumprimento dos seguintes parâmetros geométricos:

- Comprimento – Dimensão do eixo de orientação da coluna perfurada na rocha, que expressa a distância entre a praça/emboquilhamento e o fundo do furo, sendo geralmente maior que a altura da bancada, devido à inclinação e a subfuração (Silva, 2009);
- Inclinação¹³ – Relação angular entre o eixo do comprimento do furo e o plano horizontal da superfície da frente livre¹⁴, respeitando as regras de paralelismo entre ambas, geralmente expressa em medida angular, com unidade em graus (°);

¹³ Em outros casos é chamado de “mergulho” ou “*dip*”, principalmente no âmbito de furos de sondagens

¹⁴ Eixo vertical para bancadas a céu aberto, ou eixo horizontal para perfuração subterrânea, ou eixo inclinado em ambos os casos

- **Orientação** – Grandeza física espacial que caracteriza a direção e sentido do furo, cuja representação gráfica é definida em azimute num plano horizontal, com unidade em graus (°). Pode ser relacionado com o norte magnético, norte geográfico ou outro referencial (marco local) previamente escolhido;
- **Rectilidade** – Variável dependente do tipo de rocha, diâmetro e profundidade da perfuração, tipo de equipamento, etc. Consiste em o furo, vertical, horizontal ou inclinado, ser tão reto quanto possível para distribuição ótima dos explosivos (Silva, 2009);

2.1 – Perfuração

O desmonte de rocha com recurso de explosivos é indicado quando a rocha a desmontar é competente o suficiente para que a escavação mecânica ou outra tecnologia não seja tecnicamente viável e/ou economicamente desaconselhada (Couceiro, 2013). Este processo da extração mineral pode ser dividido em três etapas distintas: perfuração da rocha, carregamento de explosivos e detonação, seguindo-se esta ordem de execução, como é explicado em diversos documentos técnicos sobre o assunto.

Ao se falar sobre planeamento e execução de perfuração e desmonte de rocha, se faz necessário separar conceptualmente o desenho da pega de fogo da sua execução. Conforme afirmado por Bernaola, Castilla & Herrera (2013), denomina-se pega de fogo o plano que engloba o conjunto dos elementos que permitem uma perfuração e detonação correta, observando-se os seguintes conceitos:

- *Layout* do furo – Parâmetros geométricos e localização dos furos;
- Carga explosiva – Quantidade de agentes explosivos por furo;
- Sequência – Ordem de detonação dos furos;
- Fragmentação – Distribuição do tamanho da pilha de rocha detonada;
- Deslocamento – Movimento da pilha de rocha detonada.

Já a execução do desmonte é entendida como o arranjo de um grupo de furos, no qual uma determinada carga de explosivo é colocada e começa com uma sequência tal que os resultados de fragmentação e deslocamento planeados sejam alcançados, sem afetar outros elementos limítrofes. Esta definição não especifica o local da detonação, sendo possível efetuar detonações a céu aberto ou em obras subterrâneas, cada uma com características diferentes através do equipamento previsto para este serviço e dos tempos necessários ao cumprimento do cronograma. Assim, ainda de acordo com Bernaola, Castilla & Herrera (2013) *“é importante observar que para saber se os resultados de um desmonte são bons ou não, é necessário saber o que se estava procurando quando foi projetada. Pode-se dizer que uma detonação foi realizada com sucesso se os resultados obtidos coincidirem com o objetivo pretendido”*.

Por outro lado, entende-se por perfuração o processo de desgaste, fragmentação e desagregação de partículas de um determinado material sólido no intuito de penetrá-lo, através de efeitos físicos ou químicos, cumprindo regras da pega de fogo. É a primeira operação efetiva de produção a ser realizada no desmonte de rochas, portanto, um procedimento indispensável em termos de rochas resistentes, e tem por objetivo abrir furos cilíndricos retilíneos na massa rochosa, que são posteriormente preenchidos em parte com materiais e artefactos explosivos (Lutz Jr., 2000).

A perfuração de rocha necessita de uma atenção especial, tanto no seu planeamento como na sua execução, devido a necessidade de se ter que garantir, no final, um grau de fragmentação adequado aos fins a que esta se destina. Os altos investimentos em explosivos apropriados por si só não garantem que os procedimentos de detonação façam a diferença nos resultados finais da fragmentação, pois a maneira como os explosivos são posicionados, condicionados e estabilizados depende intrinsecamente da precisão das perfurações realizadas e das suas relações com as frentes livres presentes (Gleeson, 2019). Em suma, a perfuração é feita no contexto da pega de fogo, entretanto, o resultado esperado da pega de fogo depende da operação de perfuração.

A sua geometria será aquela que, se devidamente dimensionada, melhor se adequa para gerar uma distribuição ótima da energia explosiva, permitindo uma fragmentação do maciço de forma eficaz (Jimeno, 2017). Há vários fatores intrínsecos ao diagrama de perfuração que terão, naturalmente, repercussões



Figura 2 – Exemplo de Carro de Perfuração (Blaster's Training Modules: Blasthole Drilling, 2017)

económicas no processo de perfuração, tais como: diâmetro, comprimento, ângulo e direção do furo, tipo de rocha, seleção do explosivo que melhor se adapta às características dos furos, e da operação de desmonte, entre outros (Holmberg, Lee, & Person, 1994).

De acordo com Bernaola (2013), existem dois métodos principais de perfuração destinados à implementação de um diagrama de desmonte de rocha com explosivos: o método roto-percussivo e o método rotativo, sendo o primeiro método o mais utilizado. Em geral, o martelo de perfuração é a fonte de energia mecânica de um conjunto que consiste numa broca (comumente chamado de *bit*) conectada em série a uma única ou múltiplas hastes de aço (coluna de perfuração), e um sistema de ar pressurizado que permite a extração dos detritos da rocha de dentro dos furos, provenientes da perfuração (Jimeno, Llera, & Urbina, 2003).

2.2 – Desvio de Perfuração

É bastante comum encontrar furos destinados a desmontes com explosivos com geometria bastante diferente daquela que foi planeada ao desenhar-se as pegas de fogo. O processo de perfuração é passível de conter erros, principalmente quando há uma clara componente humana na sua execução. Assim, determina-se desvio de perfuração como sendo a diferença entre a posição espacial do furo executado com relação ao furo planeado (Rosa I. B.,

2015). E ainda, com base no estudo de Kangwa & Sinkala (2004), afirmamos que esta anormalidade ao qual o furo é submetido em relação à sua trajetória originalmente prevista, só pode ser considerada como um desvio, se e somente se for realizada de maneira não intencional. Os motivos para erros de geometria de perfuração podem ter várias origens, desde lapsos no dimensionamento da malha, deficiências na execução do furo, condições de terreno, sobrecarga e/ou falta de manutenção do equipamento de perfuração, desgaste diferencial de *bits*, erros operacionais e até sabotagens (Raposo, 2011).

Harris, J. E., no artigo *Drill Accuracy* (1999), afirma que, devido à pressão muitas vezes existente para um rápido incremento do processo produtivo, e a compromissos de calendário para satisfação da procura de produtos finais, os erros humanos são uma das principais causas que afetam a precisão da perfuração, e que mais de 50% do erro da geometria dos furos realizados, quando comparada com a de projeto, é devido à subjetividade e eventual falta de experiência do operador da máquina de perfuração.



Figura 3 – Carro de perfuração SmartROC D65 perfurando uma linha de furos num ângulo de 20° (Mining & Construction, 2011)

As diferenças entre a geometria de projeto e a realmente correspondente aos furos realizados, podem ser divididas em várias tipologias, cada uma com sua própria causa. Destacam-se as 5 principais causas de imprecisão de furos: erro de posição do emboquilhamento (*collar*), erro do ângulo de ataque do furo, erro de curvatura (flexão) (Sinkala, 1986), erro de comprimento e erros decorrentes de anisotropias de caráter geológico/estrutural do maciço rochoso (características geomecânicas) (Brown, Green & Sinha, 1981).

2.3 – Introdução sobre Erro de Desvio

Antes da abordagem sobre os tipos de erros comuns na perfuração de rocha, cabe ressaltar que a maior parte das medições na engenharia são relativas, ou seja, verifica-se a variação de uma grandeza física executada, comparando-a com a grandeza teórica ou planeada (Caspurro, 1999 *apud* Raposo, 2011). Define-se como erro à esta diferença entre o valor medido e o valor de origem, que por estarem relacionados, são erros relativos não constantes (adaptado de Tabacniks, 2009). Doravante tomaremos esta definição de erro aqui ressaltada como padrão. Vale destacar que, conforme afirmado por Tabacniks (2009), como também pelo estudo aqui realizado com os mais variados tipos de equipamentos (capítulo 3), as leituras de erros de desvio medidos por equipamentos em sua maioria são relativas, ou seja, são dependentes da posição da leitura do erro anterior.

Com relação ao erro de desvio angular, cabe ressaltar que não há autores que adotem um limite conveniente ótimo. Não há nas várias bibliografias consultadas uma afirmação comum que indiquem um desvio de furo ideal ou aceitável com relação à sua inclinação ou direção (azimute). Do ponto de vista de perfurações de sondagens geológicas ou perfurações de petróleo e gás, onde há uma extensa gama de estudos sobre o assunto, verificou-se que vários estudiosos e autores não chegam a um valor comum. Bulant *et al* (2007) informam que várias empresas e técnicos da prospecção geofísica costumam adotar a precisão do desvio angular de um poço vertical médio como sendo 5,0°. Mas os mesmos autores estimam de maneira conservadora que, para furos profundos de prospecção, os valores de desvio devem estar dentro da

faixa de 2,0°. Já Williamson (2000) também de forma conservadora considera o valor tolerável de desvio do mesmo tipo de furos na faixa de 0,5°. Ficaremos apenas com estes 2 exemplos na área de sondagens geológicas e exploração de hidrocarbonetos, tendo em vista que são várias as metodologias e modelos matemáticos que determinam o valores ótimos de desvio.

No campo de perfuração de rochas para desmonte com recursos a explosivos, quase não há na literatura técnica com estudos de caso sobre o assunto. No campo de minas e obras subterrâneas, Silva (2009) considera que desvios de 50 mm em uma perfuração de 3 m (0,95°) podem acarretar em resultados ruins. No trabalho de Rosa (2015) há a informação de que furos horizontais, verticais ou inclinados possuem uma precisão de $\pm 2,0^\circ$, independente de onde o furo é executado (a céu aberto ou em obras subterrâneas). Um dos estudos que correlacionam os parâmetros do furo e desvios admissíveis foi apresentado por Quaglio (2003), onde o referido pesquisador afirma o seguinte:

- Desvio de Emboquilhamento Admissível

$$E = \frac{1}{2} \varnothing \quad \text{Equação 1}$$

- Desvio de Alinhamento (Inclinação e Orientação) Admissível

$$E = |L| \quad \text{Equação 2}$$

- Desvio de Curvatura (Flexão) Admissível

$$E = 0,6L^{3/2} \text{ (Furos Horizontais)} \quad \text{Equação 3}$$

$$E = 0,2L^{3/2} \text{ (Furos Horizontais ou Inclinados até 1:20)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

E = Desvio Admissível (cm)

L = Comprimento do Furo (m)

$\varnothing$ = Diâmetro do Furo (cm)

Assim, de maneira geral, não se pode estimar categoricamente o desvio de perfuração ideal de forma quantitativa, mas de maneira qualitativa, pois o desvio ideal é aquele que pode ser previamente identificado com os variados instrumentos de observação (como *lasers* 3D e drones para *scanning* de faces livres, *softwares* de *design*, desviómetro, etc.), de preferência de forma conjunta, de maneira a planejar ajustes deste erro para diminuição ou eliminação dos problemas consequentes, fazendo com que o serviço ou obra seja concluído operacionalmente excelente (Giles & Roller, 2012). Todavia, ficará recomendado como trabalho futuro uma pesquisa para determinação quantitativa dos limites aceitáveis do desvio de perfuração em minerações a céu aberto, em obras subterrâneas e furos de sondagens.

2.3.1 – Erro de Posição do Emboquilhamento

Este caso acontece quando o *bit* de perfuração é posicionado num lugar diferente do planeado. O OSMRE¹⁵ define um furo não executado no local projetado como "*o deslocamento lateral de um furo a partir do ponto de partida planeado*" (2017). Para muitos autores, como Orpen (2007), as causas dos desvios de perfuração com relação a posição do embocamento são:

- Erro humano:
 - (In)Experiência do Operador;
 - Levantamento ou comunicação incorreta entre o *blaster* e o perfurador;
- Topografia do local da perfuração;
- Qualidade do equipamento:
 - Configuração inadequada;
 - Desgaste do equipamento;
- Configuração da plataforma de perfuração e sua posição;
- Estabilizadores (localização, número e folgas).

¹⁵ *Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement*, órgão do Departamento do Interior estadunidense (OSMRE, 2017)

2.3.2 – Erro Angular: Inclinação e Orientação

Mesmo que o furo seja iniciado na posição planeada (emboquilhamento), pode ocorrer desvio da perfuração relativamente ao projeto inicialmente estabelecido. O desvio relacionado ao ângulo de projeto pode ser causado quando a haste não está estabilizada no ângulo correto antes do início da perfuração (Leite, 2013), ou seja, o desvio no ângulo ocorre quando o furo é iniciado com uma inclinação ou orientação (azimute) diferentes dos determinados no planeamento da perfuração. Este erro pode logo ser induzido no processo de emboquilhamento. Ainda de acordo com Orpen (2007), as causas dos desvios de perfuração com relação ao ângulo são:

- Características geológicas do maciço rochoso;
- Topografia do local da perfuração;
- Fatores do equipamento;
- Ângulo de inclinação do furo;
- Configuração da plataforma (carro) de perfuração e sua posição;
- Erro humano;
- Qualidade ou configuração inadequada do equipamento.

2.3.3 – Erro de Curvatura (Flexão)

Este erro consiste na tendência da haste de aço encurvar enquanto a broca está progredindo no processo de perfuração dentro da massa rochosa (Leite F. S., 2013). Orpen (2007) e Hendricks (1994) atribuem que os principais fatores contribuintes para este tipo de erro são:

- Comprimento do furo – quanto mais comprido o furo, maior será o desvio (ex. Bancadas altas);
- Diâmetro do furo – quanto menor o diâmetro, maior será a probabilidade de desvio;
- Ângulo de inclinação do furo;
- Fatores do equipamento;
- Qualidade da coluna de perfuração:
 - Haste, broca e acessórios;

- Peso aplicado sobre a coluna de perfuração;
- Propriedades da broca:
 - Tipo do *bit* e seu projeto mecânico básico;
 - Circulação hidráulica no *bit*;
 - Desgaste do *bit*;
- Propriedades da massa rochosa;
- Natureza heterogênea da formação e ângulo de mergulho;
- Características da coluna de perfuração;

Por exemplo, quando o *bit* de perfuração atinge um plano de anisotropia entre uma rocha mais branda e uma outra formação rochosa mais competente, é possível imaginar um comportamento de encurvamento das hastes que estão acima do *bit*, resultante precisamente de uma maior resistência desta segunda formação rochosa, resistência essa que dificultará a ação de perfuração do *bit*. A figura 4 mostra uma representação meramente ilustrativa desta situação.



Figura 4 – Flexão da haste quando o bit passa de um meio mais brando a um de maior competência. Ilustração do autor adaptado de Hardrockdrills (2018)

2.3.4 – Erro de Comprimento

Este subtópico não tem relação direta com o equipamento objeto da investigação. Porém, como erros de comprimento podem ter consequências nefastas, como por exemplo, no posicionamento da carga de fundo, mereceu estar nesta tese para fins didáticos. O desviômetro não foi projetado para medir o comprimento, como será demonstrado no capítulo 6, pois esta informação deve ser inserida pelo operador. Seu meio de tração (corda)¹⁶ e suas características foram desenvolvidas apenas como um medidor de apoio visual ao operador do equipamento, para que este consiga identificar o

¹⁶ Ver tópico 5.4 – Sistema de Suporte e Tração

posicionamento da sonda dentro do furo. Para uma melhor checagem do comprimento do furo, recomenda-se recorrer à própria máquina de perfuração ou a um equipamento de precisão específico para este parâmetro.

O erro de comprimento consiste em o furo ter sua distância entre o emboquilhamento e o fundo do furo não executada de maneira planeada, de maneira que o furo fica com dimensão díspar da determinada na pega de fogo, seja para mais ou para menos. De acordo com Jimeno, Llera e Urbina (2003), a subperfuração é o comprimento do furo abaixo da praça ou do nível teórico de exploração necessário para quebrar a rocha na altura da bancada, e conseguir fragmentação e deslocamento adequados para permitir que o equipamento de carregamento alcance o nível de escavação esperado. Os problemas de uma má subperfuração podem acarretar os seguintes problemas:

Subperfuração pequena, nula ou negativa – O corte ou a base não ocorrerá na inclinação projetada, resultando no aparecimento de repés, exigindo assim perfurações e desmontes secundários de acabamento, situação onerosa de alto risco (Silva, 2009), ou ainda, necessidade de uso de rompedores, aumentando consideravelmente os custos de desmonte e atrasando o processo de carregamento.

Subperfuração excessiva – Aumento dos custos de perfuração e detonação. Aumento da razão de carregamento devido ao aumento na carga de fundo, podendo acarretar ainda no aumento no nível de vibrações e problemas na face da bancada, como taludes negativos na parte inferior do banco. Problemas com sobre escavação (*backbreak*).

Apesar disto ser um erro majoritariamente humano (Orpen, 2007), Kangwa e Sinkala (2004) afirmam que existem ainda cinco categorias de fontes de fatores que contribuem para o erro de comprimento. São eles:

- Variáveis Geométricas do Furo:
 - Inclinação, diâmetro e comprimento do furo estão diretamente relacionados. Por exemplo: comprimento do furo aumenta com a inclinação, entretanto, a subperfuração diminui com esta (Silva V. C., 2009);
- Deficiência ou excesso dos parâmetros e métodos de perfuração:
 - Considerando os 3 principais métodos de perfuração: rotativa com brocas tricônicas (*Holler Bit*), martelo de superfície (*Top-Hammer*, método roto-percussivo) ou martelo de fundo de furo ou furo abaixo (DTH¹⁷, método rotopercussivo). Por exemplo: quanto mais profundo for o furo, maior será a probabilidade de falha em sua execução, no caso de martelo de superfície, tendo em vista que a energia transmitida é dissipada ao longo da coluna de perfuração. Neste caso o ideal seria a utilização de um martelo de fundo de furo (DTH) que age diretamente sobre a coroa, eliminando essas perdas de transmissão de energia (Quaglio, 2003);
- Equipamento de perfuração:
 - Tipo de máquina;
 - Pressão excessiva ou deficiente aplicado sobre a coluna de perfuração;
 - Componentes desgastados da plataforma de perfuração em geral;
 - Configuração inadequada;
- Propriedades da broca:
 - Tipo do *bit* e seu projeto mecânico básico;
 - Circulação hidráulica no *bit*;
 - Desgaste do *bit*;
- Propriedades da rocha:
 - Estrutura rochosa;
 - Dureza da rocha;
 - Intervalo entre foliações ou juntas unidirecionais;
 - Grau de coesão entre folheações ou limites de junta;
 - Variação de propriedades dentro da massa rochosa.

¹⁷ *Down the Hole*

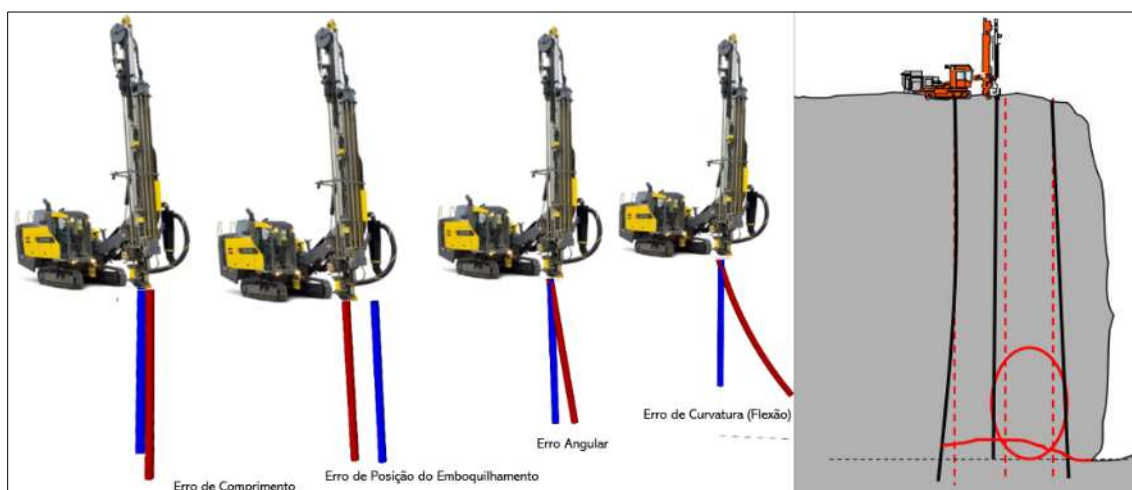


Figura 5 – 4 dos erros comuns de perfuração (arte do autor adaptado de Miranda & Leite, 2018) (Hardrockdrills, 2018)

2.3.5 – Erros Decorrentes das Características Geomecânicas da Rocha

As características geomecânicas do maciço rochoso que está a ser perfurado tem um impacto significativo na trajetória do furo. De acordo com o artigo de Brown, Green & Sinha (1981), a estrutura da rocha é o único fator que está inteiramente fora de controle. Desde que a prática perspicaz da perfuração seja mantida, então o desvio da trajetória é predominantemente uma consequência da interação broca/maciço rochoso. Embora este seja o único fator que o operador não pode controlar, entender como isso afeta o processo será benéfico.



Figura 6 – Exemplo de desvio de furo causado pela transição da rocha (OSMRE, 2017)

Singh (1996) afirma que o desvio pode ser iniciado quando a broca atravessa a transição da rocha (falhas, camadas, juntas, encaixe, clivagens, zonas de contato, foliações, etc.). A Figura 6 mostra um exemplo de furo desviado após cruzar a zona de uma junta de uma rocha (o furo está representado com traços amarelos e a junta é realçada com coloração castanho-avermelhada). Nesta face da bancada verifica-se que no início do furo, o conjunto broca/haste avançou girando num alinhamento quase perpendicular à junta.

Quando o furo cruzou a junta, tornou-se quase paralelo a ela. Ao longo da junta, o furo continuou na mesma trajetória, terminando precisamente no fundo de um furo adjacente. A consequência deste desvio vai traduzir-se numa excessiva carga de fundo localizada nas bases dos dois furos, que no momento da detonação irá gerar uma cavidade e uma superfície de talude de bancada negativa, como observado na face inferior à direita da bancada (fig. 6).

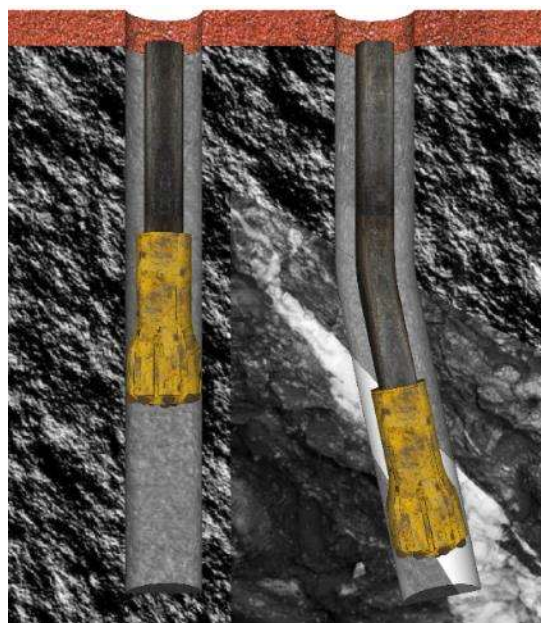


Figura 7 – Esquema de flexão da haste de perfuração causado pela transição da rocha. Ilustração do autor, adaptado de Price (2018)

2.4 – Consequências do Desvio de Furo

Para muitas operações de desmonte de rochas com o uso de explosivos, existe a necessidade de proteger o ambiente circundante. O desvio do furo pode originar vibrações, ruído, ultralanchamentos e outros problemas que podem ser evitados com cautela nos procedimentos e análise da detonação (Hall, Worsey, & Rouse, 2018).

2.4.1 – Problemas de Produção

Os maiores blocos, gerados com o desmonte, que necessitam de fragmentações secundárias ou a presença exagerada de material com granulometria muito reduzida podem resultar de configurações de planos de desmonte mal projetados ou de condições geológicas adversas. Danos nas frentes livres da bancada (como talude negativo, por exemplo), sobreescavação (*overbreak*) e alta diluição são outros exemplos de problemas no processo de desmonte causados pela perfuração irregular (Bhandari, 1997).

Erros relacionados com inclinação ou alinhamento do furo podem ter consequências como extensão da perfuração e extrapolação da profundidade do furo (subfuração), levando ao aumento do consumo específico de explosivos, problemas de fragmentação, sobreescavações (gerando problemas graves para a operacionalidade do sistema de carga e transporte do material desmontado por pisos de praças de pedreira irregulares), e custos de manutenção do equipamento. Furos desviados entre si geram má fragmentação, tendo em vista que alteram o afastamento e espaçamento efetivos ao longo da trajetória planeada do furo (do embocamento até o fundo). Por exemplo, para um furo na primeira linha, se sua inclinação em relação à vertical tomar uma direção contrária à face da bancada diferente ao que foi planeado, fazendo com que o fundo deste furo se afaste da face livre da bancada, e se o seu emboquilhamento se aproximar do topo da crista, uma concentração mais alta na razão de carga será gerada nas proximidades do topo da bancada, condição esta que pode reduzir a eficiência no fundo da coluna e a produção de repés (Jimeno, Jimeno, & Carcedo, 1995).

2.4.2 – Problemas de Segurança

Um desmonte não controlado pode comprometer a viabilidade de um projeto, seja devido a reclamações da comunidade (resultando em problemas legais), danos a estruturas adjacentes, e exposição de vidas e bens materiais a diversos tipos de risco. Erros na perfuração, como por exemplo, baixa subfuração, excesso de perfuração, furo muito próximo a uma face livre, podem levar a uma deficiente fragmentação seguida de movimento do solo, vibrações, deslocamento excessivo de ar, gases tóxicos e *flyrocks* (Fernberg, 2008).

2.5 – Aferição de Desvio de Furos

Pelo atrás exposto, uma aferição precisa e em tempo útil da geometria e posicionamento de um furo executado, desempenha um papel importante na identificação de desvios e potenciais problemas que deles venham a resultar (Sandhaus & McClure, 2012). Existem vários instrumentos no mercado que permitem a modelação de perfis de furos e que fornecem informações importantes para os engenheiros responsáveis pela implementação de pegas de fogo, a fim de evitar problemas de segurança. Por exemplo, a obtenção da informação da existência de um afastamento crítico, de valor diminuto, pode permitir a identificação do risco de projeções, que é uma grande preocupação em termos de segurança. Neste caso, pode-se inferir nestas zonas do maciço com o devido redimensionamento das cargas de explosivos, ou então recorrer-se ao uso de espaçadores (*dekes*). Isto também está relacionado com problemas de produção porque, ao fazer um controlo dos furos realizados, é possível minimizar as zonas de segurança e reduzir o movimento das máquinas antes da detonação, otimizando os deslocamentos de pessoas e equipamentos na mina. De igual modo, identificando afastamentos críticos de valor exagerado, poderão ser gerados blocos de grande dimensão que necessariamente irão interferir nos processos subsequentes de carga, transporte e transformação.

Há vários estudos sobre melhorias e compreensão da precisão da perfuração, em virtude de os desvios dentro de furos serem de difícil visualização a olho nu. Jimeno (2017) afirma que lanternas são utilizadas em algumas minerações para verificar a linearidade dos furos. Este método simples, porém, não muito confiável, consiste em apontar o feixe de luz para o interior do furo. Se o foco da luz se perde, é sinal de que há o desvio. Entretanto, esta técnica rudimentar apenas informa que existe um desvio dentro do furo, mas não é possível identificar qual sentido e direção (azimute) e ângulo de inclinação que o desvio seguiu. O método de observação por espelho é outra maneira de examinar os furos ao ar livre e quando a luminosidade do sol permite. Como explicado no *The Drilling Manual* (2015), um espelho é colocado acima da “boca” do furo para refletir a luz do sol em seu interior. Em seguida, um prumo de centro é introduzido no furo. A posição da corda do prumo na “boca”, quando o prumo toca a parede do furo, fornece uma indicação da inclinação do furo. Ao medir a distância entre a corda e a parede, bem como a profundidade do prumo, a inclinação pode ser calculada usando fórmulas de trigonometria simples. A grande desvantagem deste método é a dependência de luz e inclinação solar. Além disso, pode não haver espaço suficiente na entrada do furo, levando em consideração seu diâmetro, para que o prumo fique suspenso livremente, condição necessária para se obter uma medida precisa.

Diante destes métodos rústicos citados acima, entende-se que atualmente as melhores opções são os instrumentos de alta precisão para avaliação de desvios de furos. Assim, no próximo capítulo propomo-nos apresentar alguns exemplos de equipamentos que já estão presentes no mercado no setor da mineração.

2.6 – Resultados da Medição de Desvios de Furos

Após o procedimento de campo com o uso do instrumento de medição, o operador recebe a informação da inclinação real, direção e profundidade do furo. Com estas informações e com um *software* de *design* de desmonte, é possível analisar diferentes situações e problemas de acordo com o perfil do

furo, de modo a realizar possíveis alterações com base nas seguintes características:

- Perfil crítico: linhas muito próximas ou distantes de mais da face livre;
- Afastamentos críticos;
- Risco de projeção: perfuração incorreta (inclinação/azimute errado) causam risco de *flyrock*;
- Distribuição da razão de carga;
- Qualificação do desvio;
- Ângulo real: possibilidade de ver se o furo planejado e o furo real tem o mesmo ângulo;
- Geração de repé.

Todas essas informações podem ser reunidas em modelos digitais de terreno e simuladas como mostrado na figura abaixo, onde o sistema de cores informa o utilizador que os furos da a primeira linha, contada a partir da frente livre, têm um desenvolvimento perto ou longe demais dessa face livre. Neste exemplo, a cor vermelha indica que esta situação pode gerar projeções descontroladas de fragmentos de rocha, e que pode ser evitada devido à informação retirada do dispositivo de medição de furos.

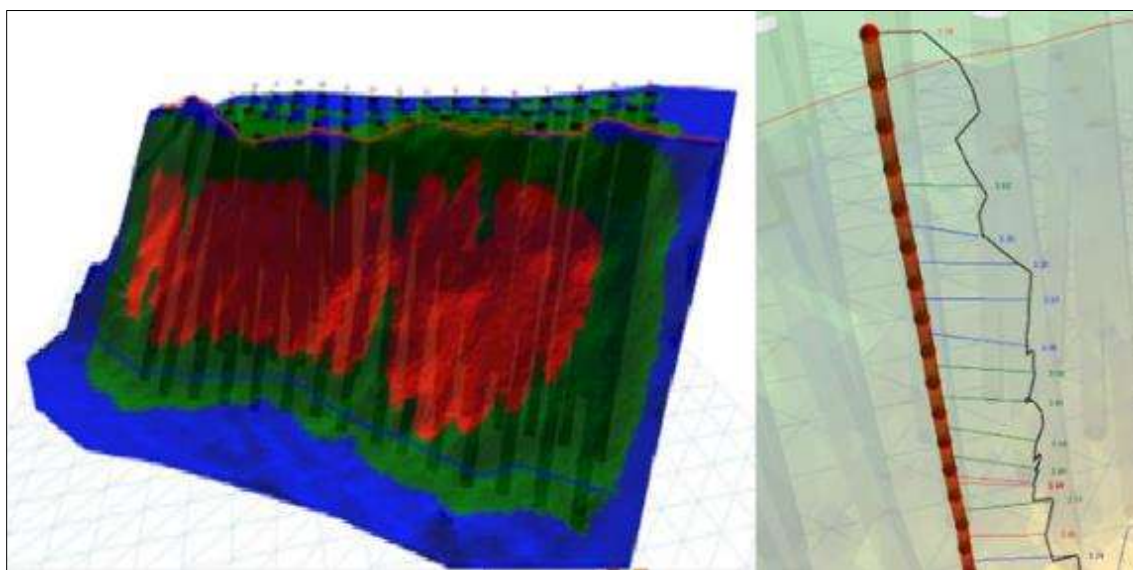


Figura 8 – Detecção de afastamento crítico e perfil de um furo na linha da face livre (Miranda, 2017)

3 – ANÁLISES PRELIMINARES DE EQUIPAMENTOS DIVERSOS PARA AVALIAÇÃO DE DESVIOS

Existe um número diversificado de equipamentos com o objetivo de observar obras de terra, de enrocamento e mineração. De acordo com Cruz (apud Coelho, 2017), os instrumentos de auscultação¹⁸ podem ser classificados em três divisões: local de instalação (solo, concreto e maciço rochoso), funcionamento do transdutor (mecânico, ótico, elétrico, pneumático e hidráulico), e pela grandeza medida (nível de água, pressão, tensão, deslocamento, vazão e aceleração). No tocante à presente investigação, antes e durante a mesma, verificou-se que existe uma vasta gama de equipamentos de diversas marcas e modelos para avaliar deslocamentos em estruturas, maciços rochosos e, mais especificamente, geometria de furos. É inegável que pela considerável oferta de dispositivos de medida afins, fica comprovada a importância do seu uso em medição de perfis de poços e furos, principalmente em desmonte de rocha, quando utilizado em conjunto com ferramentas como *lasers* e drones para *scanning* de faces livres, e *softwares* de *design* e otimização de desmonte de rochas.

Mesmo que o objetivo desta investigação esteja centrado no desenvolvimento de um dispositivo inovador de medição de furos em rochas e operações mineiras, foram analisados outros equipamentos com a intenção de colher e organizar informações positivas e negativas do ponto de vista técnico e operacional dos variados fabricantes e modelos, bem como verificar a possibilidade de usar o protótipo desenvolvido em outros campos da engenharia (obras civis, barragens, geomecânica, etc.). Todavia, serão destacados a seguir apenas os equipamentos conhecidos no mercado que de alguma forma foram merecedores de nota por motivo de características ímpares ou importância, isto, naturalmente, do nosso ponto de vista. Entretanto, isto não significa, de forma alguma, que este trabalho serviu como propaganda ou recomendação das marcas e produtos descritos. Logicamente

¹⁸ Instrumentação de auscultação é o processo de observação, detecção e caracterização do desempenho e tendência de comportamento de estruturas com utilização de ferramentas apropriadas (Machado, 2007)

não foi possível analisar todos equipamentos e modelos existentes no mercado mundial, e por isso, alguns deles, que podem ser relevantes em determinadas regiões do mundo ou nichos da mineração, não foram listados. Anexado a este trabalho encontra-se uma tabela com a comparação das características principais dos equipamentos, bem como algumas informações relevantes para esta Tese (anexo II).

Ressalta-se que os dispositivos listados¹⁹ a seguir são modelos e marcas registadas pertencentes a grandes empresas, possuidores de direitos autorais, e em alguns casos, patentes. Para que a investigação tomasse rumo imparcial, oferecesse inovação, e para garantir a lisura e ética deste trabalho, de maneira a se obter um protótipo de equipamento de medição de desvio de furos através desta pesquisa científica original, evitou-se, na íntegra, violar o conteúdo interno de equipamentos já existentes ou tentativa de engenharia reversa. O conhecimento das informações técnicas, funcionalidades e operacionalidade dos instrumentos observados foram adquiridos de maneiras diversas como: experiência do investigador em pedreiras e minas do Brasil, Portugal e Finlândia; em instituições de ensino, notadamente a FEUP; participação em feiras, congressos e conferências, como por exemplo, o EFEE 2017²⁰ e 2019²¹, onde algumas empresas citadas a seguir apresentaram seus produtos em *stands* próprios ou de parceiros; e informações gerais das bibliografias consultadas, bem como através de fontes disponibilizadas pelos próprios fornecedores e fabricantes.

¹⁹ Os equipamentos neste capítulo estão listados em ordem alfabética

²⁰ *European Federation of Explosives Engineers: 9th World Conference on Explosives and Blasting* – Estocolmo, Suécia, 2017.

²¹ *European Federation of Explosives Engineers: 10th World Conference* – Helsinque, Finlândia, 2019

3.1 – Inclínómetros

Os inclinómetros enquadram-se na categoria de medidores de deformação transversal, entretanto, como são usados muito mais amplamente do que os demais equipamentos de medição alternativos (Dunnicliff, 1988), eles mereceram uma seção separada neste trabalho.

Afigurou-se fundamental o estudo e aprofundamento deste tipo de equipamento para análise e conhecimento do seu método de funcionamento e utilização, com o objetivo de se tentar melhorar e adaptar algumas funcionalidades dos modelos observados para o desenvolvimento do protótipo objeto da investigação, de maneira a tornar seu uso possível não apenas em mineração como também em obras civis e geotecnia.

Como o próprio nome sugere, inclinómetro é a designação genérica de aparelhos que medem ângulos de inclinação de deslocamentos que se verificam na direção perpendicular ao plano de referência que contem o seu eixo. São amplamente utilizados na auscultação de barragens de terra, controle de taludes (na fase construtiva e na fase de monitorização), deslizamento de terrenos e medição de deslocamentos de aterros (Raposo, 2011). Na mineração, podem ser utilizados na verificação de estabilidade de pilhas de estéril e estruturas de barragens de rejeitos, furos de sondagens, e com menos frequência, em furos de produção para desmonte de rochas com recurso a explosivos. Fornece dados para definir a deformação horizontal do solo, podendo ser utilizado para análise de desvios verticais ou axiais, dependendo do modelo do equipamento (Dunnicliff, 1988). De uma maneira geral, o equipamento consiste em quatro partes: uma sonda com dois pares de rodas na parte externa, um cabo geralmente conectado à um carretel/bobina, uma unidade controladora e tubos plásticos flexíveis. A sonda metálica em forma de projétil é conectada à uma unidade controladora para leitura, recolha e tratamento dos dados obtidos pela sonda. A conexão entre estas duas unidades é feita através de um cabo elétrico graduado para visualização dos intervalos de deslocamento da sonda que, além de servir para a movimentar nos furos, permite transmitir os dados. O interior da sonda possui um sensor

contendo um pêndulo que se encontra livre sob ação da gravidade. Este e uma série de sensores (entre eles, acelerômetros) emitem um sinal elétrico proporcional à inclinação, que são exibidos para o utilizador como dados do deslocamento. Para o seu pleno funcionamento, é necessária a introdução de tubos flexíveis nos furos. Estes tubos, denominados tubos inclinométricos, possuem dois pares de guias ortogonais, em formato de calha. Cada par destes guias estabelece duas direções para medições. Os dois pares de rodas da sonda descem por estas calhas do tubo, para que a sonda não sofra rotação. Os acelerômetros instalados em cada par de eixo das rodas medem as inclinações. Quando a sonda se inclina na direção A_0 ou B_0 , as leituras são positivas. Consequentemente, as direções A_{180} ou B_{180} serão negativas (fig. 9) (Raposo, 2011).

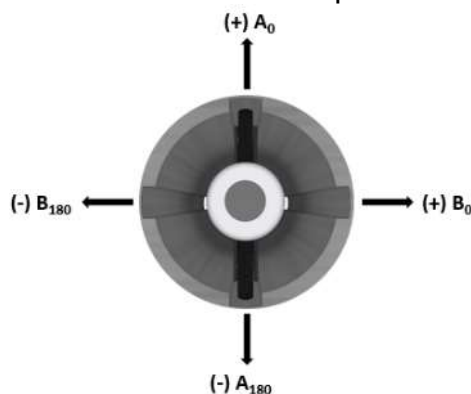


Figura 9 – Esquema das leituras da direção da inclinação (arte do autor adaptado de Raposo, 2011)

O deslocamento horizontal total será obtido a partir da soma vetorial dos dois deslocamentos da sonda. Em alguns casos o deslocamento será predominante em algum plano. Os registos da sonda do inclinómetro são feitos a partir de seu movimento no furo, onde os sensores captam sua inclinação “ θ ” em intervalos regulares e pré-definidos de valor “ L ”. A cada registo da sonda nos intervalos, os sensores realizam os cálculos da distância horizontal da superfície do solo por trigonometria simples, nos intervalos de alturas “ L ”, “ $2L$ ”, “ $3L$ ”, etc. Para cada furo é necessário fazer duas medições, uma para cada par de calhas, de modo a obter os respetivos planos verticais ortogonais do tubo inclinométrico (Fernandes, 2011). A figura a seguir mostra o princípio do funcionamento de um inclinómetro:

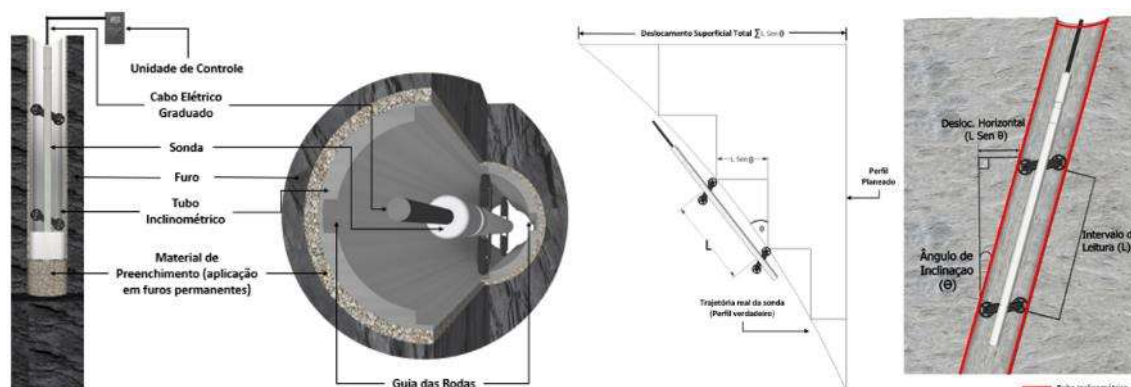


Figura 10 – Princípio do funcionamento do inclinômetro: a) e b) esquema do tubo inclinométrico; c) e d) demonstração do cálculo feito pelo equipamento (arte do autor adaptado de Dunncliff, 1988; Fernandes, 2011; Raposo, 2011 & Coelho, 2017)

Em geral, os inclinômetros são mais precisos devido ao uso do sistema de sonda com rodas e tubos com calhas. Este é um processo meramente mecânico, pouco passível de interferências externas, como por exemplo, (in)dependência do campo magnético. Entretanto, a necessidade dos tubos inclinométricos pode ser considerada também como uma desvantagem(!), tendo em vista que estes podem facilmente colapsar e sofrer quebras ou folgas em qualquer campo de sua aplicação. No desenvolvimento do desviômetro objeto da presente investigação, tentou-se replicar a funcionalidade e precisão dos inclinômetros, sem a dependência de tubos ou rodas na sonda, e sem interferência da rotação da sonda para tomada das medidas, com a finalidade de abranger seu uso não só em desmonte de rochas, mas em auscultação de barragens de terra, sondagens, obras geotécnicas e civis. Lamentavelmente, devido à uma série de fatores negativos durante o período da investigação, entre elas, o período de contingência de atividades devido à pandemia gerada pelo novo Corona Vírus, não foi possível testar o protótipo nestes campos da engenharia.

Passa-se a seguir à exposição detalhada dos principais inclinômetros que foram analisados para fins de obtenção de informações operacionais para aplicação no dispositivo desenvolvido nesta investigação.

3.1.1 – Durham Geo Slope Indicator (DGSi)

A Durham Geo Slope Indicator, empresa estadunidense, projeta e fabrica equipamentos de instrumentação para aplicações geotécnicas e ambientais. Dentre seus mais variados produtos, destacam-se os dois equipamentos de aferição de desvios que se referem a seguir:

3.1.1.a – Digitilt AT System

O sistema Digitilt AT inclui uma sonda digital, cabo de controle e tração marcado em metros ou pés, uma tampa que serve como guia para o cabo, uma bobina para enrolar o cabo e, com componentes eletrônicos no seu interior, para servirem de transmissor de dados por tecnologia *Bluetooth*, e uma unidade controladora com aplicativo de controle específico para dispositivos baseados em sistema *Android*. Todo este conjunto pode ser transportado numa mochila de costas projetada sob medida pela DGSi (DGSi Slope Indicator, 2019).



Figura 11 – Sistema Digitilt AT (DGSi Slope Indicator, 2019)

Os principais componentes do conjunto Digitilt AT possuem as seguintes características (DGSi, 2019):

Sonda – Com 50 cm de comprimento e feita em aço inox, sendo constituídos os seus componentes eletrônicos por 2 sensores de inclinação com tecnologia MEMS²² (acelerômetros), que transformam os sinais mecânicos em sinais digitais. O alcance das medições da sonda é de $\pm 30^\circ$. Funciona em ambientes

²² *Micro Electro Mechanical Systems* - sistemas microeletromecânicos (Ferreira, 2013)

com temperaturas entre -20°C a 70°C. A profundidade máxima operacional é de 300m.

Cabo – O cabo de controle é numerado em intervalos de metros, e possui anéis metálicos a cada meio metro para encaixe na tampa de guia e suporte para o cabo. Esta tampa, que substitui as clássicas polias, alinha as graduações dos cabos precisamente na parte superior do tubo inclinométrico ou furo, eliminando o potencial de compensações e erros de posicionamento (Figura 12).



Figura 12 – Esquema do cabo e tampa de suporte (DGSi, 2019)

Unidade de Controle – A unidade de controle consiste numa aplicação para dispositivos que possuem sistema operacional *Android*, que se conecta com o carretel através de transmissão *Bluetooth*. O aplicativo desenvolvido pela empresa é disponibilizado gratuitamente na plataforma *Google Play*. Entretanto, são apenas 3 modelos de dispositivos (*tablets*) que suportam a aplicação de controle. Realçamos a funcionalidade para tomadas das medidas do furo: para fazer o registo a cada intervalo do furo, basta puxar o cabo de controle para cima até ao próximo nível de profundidade. O aplicativo deteta o movimento e armazena a última leitura estável. Não há necessidade de segurar a unidade de controle ou apertar botões, ou seja, o operador manipula apenas a sonda através do cabo. A transmissão das informações da unidade de controle para *software* gestor é feita pela *internet*. Em caso desta não estar disponível, a transferência das leituras pode ser feita através de cabo USB²³.

3.1.1.b – Digitilt Classic Inclinometer System

O sistema Digitilt Classic é um modelo mais simples comparando-se ao modelo descrito acima. Como o próprio nome sugere, é um inclinómetro clássico composto pelo conjunto sonda digital, cabo de controle e tração, bobina, e unidade controladora. Sua tecnologia emprega dois sensores analógicos tipo acelerómetro para cálculo das medidas. O sistema e método de recolha de

²³ *Universal Serial Bus* (Axelson, 2015)

dados por fios consiste numa caixa portátil robusta de alumínio de grandes dimensões (127 x 178 x 178 mm) e pesada (3 kg). Os dados coletados por esta unidade são transferidos, via cabo USB, para computadores com *software* gestor próprio da empresa, onde é possível criar uma base de dados do inclinómetro para seu tratamento (DGSI Slope Indicator, 2019).



Figura 13 – Unidade de controle portátil robusta de alumínio de grandes dimensões (DGSI Slope Indicator, 2019)

O cabo de controle possui marcações de profundidade de borracha vulcanizadas moldadas no seu revestimento para não deslizarem. Junto com ele a DGSI fornece uma polia que se encaixa na parte superior da sonda, para ajudar o operador a controlar sua profundidade, e proteger o cabo de controle contra abrasão (figura 14).



Figura 14 – Conjunto polia e carretel: mecanismos para o cabo de tração e transmissão de dados. Abaixo, sonda em aço inox (DGSI Slope Indicator, 2019)

Outras características deste equipamento são:

- Comprimento da sonda: 50 cm;
- Temperatura operacional: -20°C à 50°C;
- Precisão (inclinação): $\pm 6\text{mm}/25\text{m}$ ($\pm 0,01^\circ$).

3.1.2 – Soil Instruments Inclinerometers

A empresa britânica Soil Instruments possui 3 tipos de inclinômetros, cuja utilização é direcionada para indústria de construção civil (túneis rodoviários e ferroviários), monitorização de deslocamento em aplicações geotécnicas (paredes de diafragma, aterros, muros de contenção, represas, aterros e diques), e monitorização do solo e aferição de furos e poços em rochas. Como o nome dos equipamentos indicam na descrição da figura 15, é necessário um equipamento específico para cada direção. Por exemplo, para realizar medidas em furos ou poços horizontais, a empresa disponibiliza o equipamento mostrado na figura 15.b. São 3 os equipamentos para medições em 4 direções (Soil Instruments, 2017):

- C17- Pro Vertical Digital Inclinerometer System – vertical;
- C19-1 Horizontal Digital Inclinerometer System – horizontal;
- Inclined Digital Inclinerometer System – diagonal (precisa ser ajustado para operar na faixa de 30° ou 60°).



Figura 15 – Principais inclinômetros da Soil Instruments: a) C17- Pro Vertical Digital Inclinerometer System; b) C19-1 Horizontal Digital Inclinerometer System; e c) Inclined Digital Inclinerometer System (30° e 60°) (Soil Instruments, 2019)

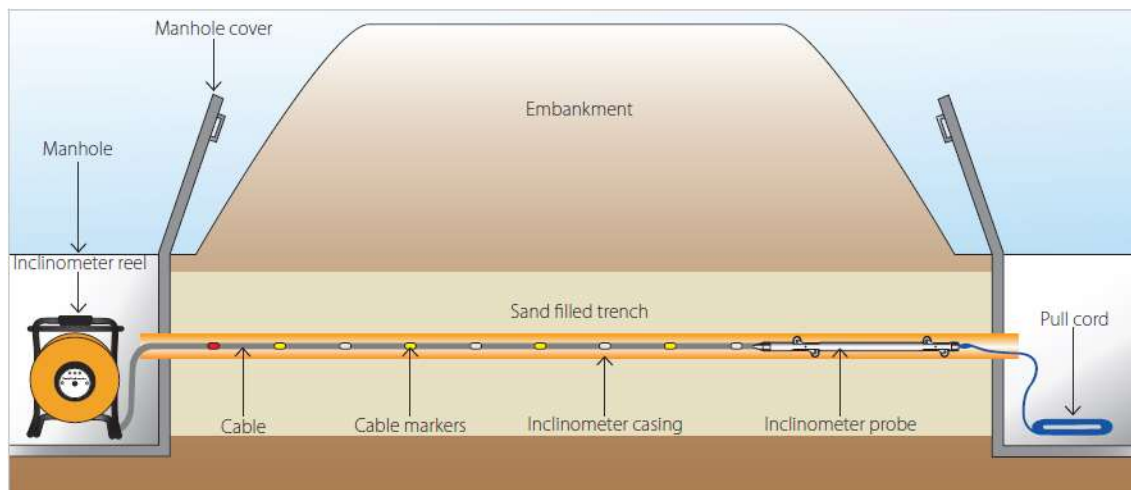


Figura 16 – Exemplo de utilização de um tipo do C19-1 Horizontal Digital Inclinometer System da Soil Instruments (Soil Instruments, 2017)

Em comum estes inclinômetros digitais compreendem num conjunto composto por uma sonda, enrolador de cabo (carretel) e uma unidade controladora fornecido com o *software* de apresentação de dados. As sondas são feitas em aço inoxidável AISI 316, permitindo assim que seja utilizado em locais com presença de sal, como em obras no litoral, praia ou minas de rocha salinas (como minas de potássio, etc.) (Hosford, 2012). Os sensores utilizam tecnologia de sistemas MEMS, que permite leituras precisas e transferência por um sinal digital, convertendo o sinal mecânico medido (a gravidade) num sinal de tensão. Os equipamentos foram projetados para que as informações captadas pela sonda sejam transmitidas por cabo até o carretel, que além de servir para enrolar o cabo, contém um sistema eletrônico para armazenamento e transmissão dos dados. Do carretel, a comunicação até a unidade controladora (*tablet*) é feita por *Bluetooth*. Já a transmissão de dados da unidade controladora até *softwares* gestores instalados em computadores, pode ser feita através de cabo via USB ou via conexão sem fio (*Bluetooth* ou *internet*). O cabo que serve de tração e transmissão dos dados é feito de *Kevlar* com um sistema de marcadores em aço inoxidável com um formato que, quando encaixado em uma tampa adaptada para boca do furo (Fig. 12), faz com que todos



Figura 17 – Capa para o furo que em conjunto com a marcação no cabo permite que a altura das marcações seja uniforme (Soil Instruments, 2017)

os intervalos da medição ocorram sempre na mesma altura, fornecendo assim melhoras na precisão e controle de profundidade. Com todos esses recursos combinados, verifica-se que o sistema de inclinómetros da Soil é de alta precisão, e cuja sonda, cabo e carretel se apresentam como um conjunto leve, compacto e fácil de operar (Soil Instruments, 2019).

Modelo	Dimensões ²⁴	Ambiente Operacional ²⁵	Precisão
C17-Pro	Ø 28,5mm/ Compr.: 50cm	Ø TI máx./mín.: 83/48 mm	Inclinação:
Vertical	Peso: 8,5/9,5/11,5 kg	Temperatura -20°C à 60°C	±4mm/25m (±0,01°)
C19-1	Ø 44mm/ Compr.: 50cm	Ø TI máx./mín.: 87/57 mm	Inclinação:
Horizontal	Peso: 9/11/15 kg	Temperatura -20°C à 60°C	±2mm/25m (±0,005°)
Inclined 30°	Ø 28,5mm/ Compr.: 50cm	Ø TI máx./mín.: 83/48 mm	Inclinação:
	Peso: 8,5/9,5/11,5 kg	Temperatura -20°C à 60°C	±2mm/25m (±0,005°)
Inclined 60°	Ø 28,5mm/ Compr.: 50cm	Ø TI máx./mín.: 83/48 mm	Inclinação:
	Peso: 8,5/9,5/11,5 kg	Temperatura -20°C à 60°C	±3mm/25m (±0,007°)

Tabela 1 – Resumo técnico dos inclinómetros da Soil Instruments

3.2 – Dispositivos para Medição de Desvios

Os equipamentos de medições de furos, que serão detalhados a seguir, são mais rápidos, em termos operacionais, tendo em vista que só são usados numa direção (decida ou subida) para aquisição de medidas de um furo, e só dependem da necessidade de outros acessórios para guiar a trajetória da sonda dentro dos furos quando há interferências externas, como por exemplo, influência do campo magnético, ou quando empresas que usam os equipamentos criam o seu próprio sistema de referência, tal qual em muitas minas subterrâneas.

²⁴ Peso do conjunto varia de acordo com o comprimento e bitola do cabo fornecido (50, 100 ou 150 metros)

²⁵ Ø TI máx./mín. – Diâmetro interno limite de máximo e mínimo do tubo inclinométrico ou do furo que as rodas da sonda podem variar

3.2.1 – Carlson Software© - Sistema de Medição de Desvios de Furos Boretrak®

Talvez o sistema de medição de furos mais conhecido na indústria de mineração mundial, o sistema Boretrak® é referenciado em livros, artigos, teses e conferências. Os dispositivos sob esta marca foram criados e popularizados pela empresa britânica Measurement Devices Ltd (MDL)®, incorporada em 2013 pela também britânica Renishaw© (Renishaw, 2013), que é uma empresa de engenharia e tecnologia com experiência em equipamentos de medição de precisão. Em 2017, a empresa americana Carlson Software© adquiriu as linhas de produtos de mineração pertencentes à Renishaw©, incluindo os equipamentos Boretrak® (Carlson, 2017).

O sistema de medição de desvio de furos Boretrak® apresenta-se no mercado em 2 equipamentos com operacionalidades distintas: o Boretrak® de barras (*Rodded Boretrak®*) e o de cabos (*Cabled Boretrak®*). Em comum, os dados de campo obtidos por estes dois equipamentos são compatíveis com vários *softwares* de simuladores de desmonte de rochas e afins. Entretanto, a empresa Carlson Software© desenvolveu seu próprio sistema denominado Boretrak® Viewer para *download*, processamento, edição e visualização dos dados registados pelos equipamentos (Zlatunic, 2018).

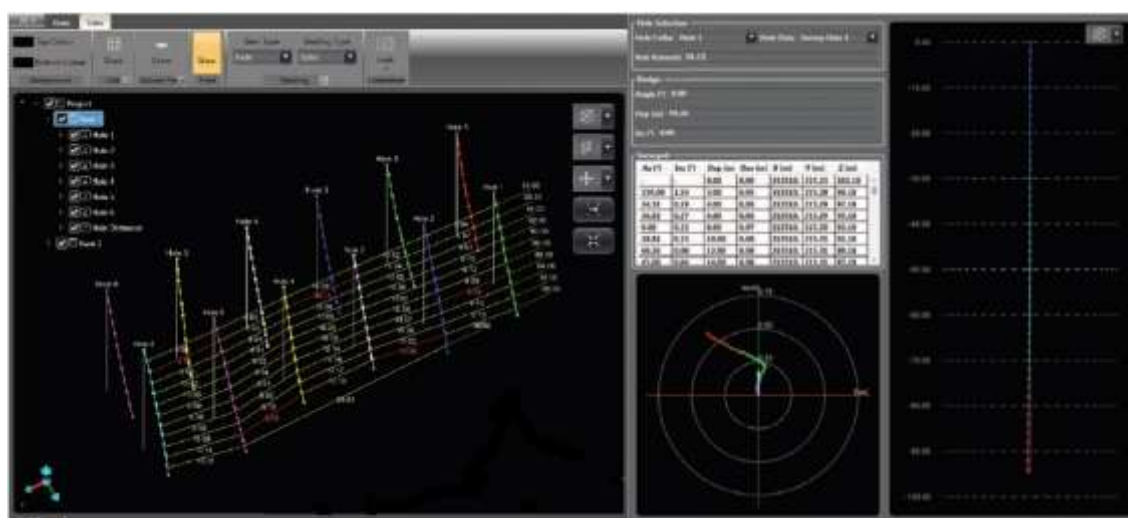


Figura 18 – Boretrak® Viewer: sistema de processamento, edição e visualização dos dados

3.2.1.a – Boretrak® de Barras

O Boretrak® de barras (*Rodded Boretrak®*) é um sistema completo, tendo em vista que pode ser utilizado em qualquer tipo de mina, incluindo operações em minas com maciços onde estão presentes minerais ferromagnéticos, podendo medir desvios em furos horizontais e furos ascendentes (*upholes*), que são muito comuns em minas subterrâneas. É um equipamento que não conta com sensor magnetômetro (bússola) para determinação de desvios (Quaglio, 2003), por isso é possível seu uso em locais com interferência do campo magnético. Este equipamento é composto por um conjunto de barras conectadas que servem para introduzir a sonda no furo, como também permite ao operador medir o desvio de furo a intervalos regulares (em metros). As barras medem 1,00 m de comprimento, e servem como condutor para obtenção de informações de direção do furo e azimuth em substituição do magnetômetro (bússola). O fabricante garante uma precisão do equipamento de 0,2° e resolução 0,01°, podendo tomar inclinações com intervalo angular de 0° a 45° (*downholes*) e 135° a 180° (*upholes*) (figura 19) configurando assim uma desvantagem devido à limitação da tomada de dados do dispositivo, especificamente com relação à inclinação do furo (Carlson Software Inc, 2018).

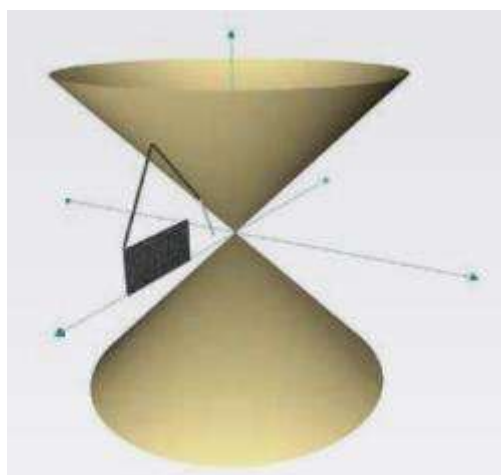


Figura 19 – Faixa de medição do Boretrak® de Barras: downholes de 0° a 45° e upholes de 135° a 180° (Carlson, 2018)

Em 2018, a Carlson desenvolveu um sistema de coleta e transmissão de dados entre a sonda e o controlador por meio de tecnologia sem fio. Basicamente, a funcionalidade deste equipamento consiste em o operador configurar e controlar a sonda por meio de PDA²⁶. A cada intervalo predefinido de cada barra, o operador faz um registro no PDA. Após cada medição dos furos, os dados do sensor da sonda são transferidos para o

PDA por meio de conexão *Bluetooth*. Uma aplicação específica da empresa

²⁶ *Personal Digital Assistant* (assistente pessoal digital, como por exemplo, um *Palmtop*) (Laberge & Vujosevic, 2003)

instalado no PDA extrai e lê os registos nos dados da sonda (Carlson, 2018). Apesar da transmissão dos dados entre a sonda e o PDA ser feita por *Bluetooth*, a transferência dos dados do PDA para computadores é feita por meio de cabos (USB) (Zlatunic, 2018).

Tivemos a possibilidade de adquirir experiência com este equipamento, seja pelo seu uso por ofício da profissão ou por recorrente utilização do mesmo durante a investigação, tendo em vista, como já referido, este ser o equipamento mais popular na maioria dos empreendimentos visitados. Com estas experiências e a respetiva recolha de informações de utilizadores em diversas minas (a céu aberto, subterrânea, pedreiras ou minas complexas) de 3 países (Brasil, Portugal e Finlândia), observou-se que este equipamento tem como desvantagens do ponto de vista operacional, o peso do conjunto sonda/barras para medições em malhas com dezenas ou até centenas de furos, tornando árduo o trabalho de campo do operador, e principalmente, no que se refere ao posicionamento das barras, que também servem como gabarito para definição do azimuth. Isto porque é comum a irregularidade do piso em frentes de lavra, o que faz com que as barras não “apontem” para um alvo pré-definido. O mínimo desvio do posicionamento das barras, já é suficiente para “contaminação” dos dados coletados pela sonda, nomeadamente no que diz respeito à direção do furo.



Figura 20 – Representação geral do uso do Boretrak® de barras (Carlson, 2018)

3.2.1.b – Boretrak® de Cabos

O equipamento denominado Boretrak® de Cabos (*Cabled Boretrak®*) tem uma metodologia de uso diferente do Boretrak® de barras. Neste caso, a sonda está conectada a um cabo marcado metro a metro para auxiliar na medição de comprimentos na trajetória dos furos, registrando-se a inclinação e rumo em intervalos fixos. Não pode ser usado em operações de minas com rochas com minerais ferromagnéticos, pois, ao contrário do equipamento anterior, este recorre a sensores no interior da sonda que incluem uma bússola (magnetômetro) para medir a orientação e o desvio do furo em relação à vertical, gerando uma direção em relação ao norte geomagnético, sendo assim sensível a interferências. Entretanto, é possível utilizar este equipamento em locais sem a necessidade de referenciá-lo com o norte magnético, devido à um sistema visual desenvolvido neste equipamento. Este método consiste num orifício perto do topo na sonda que deve ser usado como mira, para ser apontado para dois locais que servirão como sistema de referência da orientação. Uma seta gravada no metal serve para definir a maneira correta de posicionamento da sonda. O mancal observado ajuda a alinhar a orientação do cabo do Boretrak® com outros dados que não são referenciados ao norte magnético. Outra característica física do equipamento consiste numa adaptação da sonda, no qual uma barra extra é fornecida junto com o equipamento para serem unidas por método de parafuso, fornecendo assim peso adicional à sonda quando submetida à furos profundos e inundados. (tabela 2). Esta haste é oca, possibilitando assim a aplicação de materiais com densidades diversas em seu interior para aumentar ainda mais seu peso (exemplo, chumbo) (Carlson Software Inc., 2018).

Configuração	(C x Ø) (mm)	Peso (kg)	Cabo (g/m)	Total Conjunto (kg/1ºm)
Sem Haste	480 x 38	2,50	50	2,550
Com Haste	1480 x 38	3,46 ²⁷	50	3,510

Tabela 2 – Comparativo das propriedades do Boretrak® de Cabos em suas 2 configurações: com e sem haste

²⁷ Haste vazia



Figura 21 – Boretrak® de Cabos (Carlson, 2018)

O equipamento possui um inclinômetro de eixo duplo, cujos dados obtidos por este sensor são usados para derivar o ângulo no qual a sonda é inclinada em relação à direção da gravidade. De acordo com o fabricante, este equipamento está calibrado para fornecer dados de furos com inclinação na faixa de $\pm 40^\circ$ com a vertical. Estas características restringem a utilização deste equipamento apenas em furos descendentes (*downholes*). A precisão e a resolução, são, respectivamente, $0,2^\circ$ e $0,1^\circ$. Já o magnetômetro opera numa faixa de 0 a 360° , com precisão de $\pm 1^\circ$ e resolução de $0,1^\circ$ (Zlatunic, 2018).

Um sistema de calibração da sonda é fornecido pelo fabricante, que recomenda que o equipamento seja calibrado nas seguintes situações:

- No primeiro uso;
- Sempre que a sonda for movida para uma nova área;
- Se a sonda tiver sido sujeita a fortes campos magnéticos;
- Pelo menos a cada seis meses;
- Após a manutenção.

Uma plataforma de calibração tipo tripé é fornecida junto com o equipamento para auxiliar neste processo (Carlson, 2018).



Figura 22 – Plataforma de calibração (Carlson, 2018)

O procedimento para coleta e transmissão dos dados do furo consiste no seguinte: a sonda é fornecida já conectada à um cabo (que tem funcionalidade tripla de fornecimento de energia para a sonda, transferência dos dados, e como meio de o operador baixar e elevar a sonda), e este por sua vez está conectado à uma unidade de exibição de controle (CDU²⁸), cuja função é registrar cada medição da sonda e detalhes do tempo, intervalo de medição e número do furo. Todos esses valores são inseridos ou acionados pelo operador. Esta unidade de controle serve para alimentar a sonda e a própria CDU, com baterias que dela fazem parte. Nenhuma fonte de energia é mantida dentro da sonda. É através desta unidade que a sonda é configurada e controlada. Todos os dados gravados são enviados da sonda para a CDU, ou seja, nenhum dado é armazenado na sonda. Para transferência dos dados, é necessário desconectar a CDU do cabo, e conectar a CDU à um computador por meio de cabo de dados. Para tal, o computador deve estar munido de uma porta serial para importação dos dados da CDU, ou um adaptador serial USB (Carlson , 2018).

Ainda como desvantagem, verificou-se em campo durante os testes realizados com este equipamento na investigação, que a sonda necessita de, em média, 1 minuto para transmitir as informações obtidas de um furos com 10 metros para sua unidade de controle. Esta informação foi verificada no manual do

²⁸ Control Display Unit (Carlson, 2018)

equipamento, onde foi confirmado que o fabricante informa que o conjunto sonda/CDU necessita de aproximadamente 3 minutos para transferência dos dados obtidos em um furo com 30 m (Carlson Software Inc., 2018). O procedimento para calibração da sonda também se mostrou moroso e complexo. São necessários vários procedimentos para estacionar a plataforma, recorrendo ao auxílio de um nível de bolha, e aguardar que a CPU identifique a calibração, que nem sempre ocorre rapidamente. Verificou-se também que é necessário calibrar a sonda praticamente entre cada utilização.

3.2.2 – Century Geophysical LLC

Esta empresa sediada em Oklahoma, EUA, possui uma vasta gama de instrumentos para executar medidas diversas em geotecnia, explorações de petróleo, gás e mineração em geral, mas especialmente dedicados para serem usados em sondagens em pesquisas geológicas. Os equipamentos fabricados por esta empresa têm em comum serem compostos por sensores envoltos por uma sonda metálica, um sistema para guiar a sonda através dos furos e uma plataforma portátil para controle e aquisição de dados. Grande parte dos dispositivos são personalizáveis, permitindo a junção de duas ou mais aplicações num só modelo, como por exemplo, adaptação de um detetor de densidade com um espectrómetro, e vice-versa. Os modelos dos equipamentos de observação e coleta de informação em maciços rochosos disponibilizados por esta empresa são, em suma, compostos por: ferramentas de detecção de raio gama natural para definir as partes superior e inferior dos estratos, densidade e porosidade; instrumentos sônicos ou de neutrões; de resistividade múltipla com polarização induzida; suscetibilidade magnética; e para captação de imagem de furo de poço usando ferramentas acústicas, micro-resistividade e ótica. Devido à estas características, a empresa informa que as referidas ferramentas foram projetadas para serem utilizadas maioritariamente em exploração de poços para aplicações em depósitos de carvão, de minério de ferro, mineração de urânio, elementos de terras raras, minas de lixiviação (superficial, subterrânea e *in situ*) e em poços de gás e petróleo. Entretanto, verifica-se a utilização generalizada destes dispositivos em todo o tipo de atividades de mineração, conforme suas particularidades, além de aplicações

em estudo de mecânica de rochas para construção de barragens de terra e enrocamento, represas, túneis e construções de edificações e estradas (Century Geophysical LLC, 2019).

Em relação aos equipamentos da Century Geophysical, que também podem ser utilizados para aferição de desvios de furos, destacam-se os seguintes modelos:

3.2.2.a – Detetor de Raios Gama e Medidor de Desvio - Natural Gamma/Deviation Tool Model 9702

Este equipamento é uma conjugação de um espectrômetro com um medidor de desvios de furos. É utilizado quando é necessário obter as informações do espectro bruto de raios gama γ , especificamente no que se refere ao conteúdo de potássio (K), urânio (U) e tório (Th) nas rochas, juntamente com as informações dos desvios dos furos de sondagens dentro dos depósitos.



Figura 23 – Representação do modelo 9702 (fora de escala) (Century Geophysical LLC, 2019)

No que diz respeito ao desvio, para determinar a orientação de um furo, o equipamento possui sensores internos que consistem em um conjunto de dois inclinômetros e três magnetômetros. A sonda além de ser usada em furos limpos, pode ser introduzida em furos revestidos por tubos de plástico/PVC²⁹ e tubos não-metálicos. Esta última condição implica que o equipamento é sensível a interferências magnéticas, não podendo assim ser utilizado em rochas com minerais ferromagnéticos. Suporta uma pressão de 281 kg/cm² (4.000 psi), verificando-se assim sua viabilidade operativa apenas em furos profundos. Um operador é suficiente para manipulá-lo. Os componentes eletrônicos estão dispostos dentro de

uma sonda com 41 mm de diâmetro e 154,4 cm de comprimento. Em relação à resposta dos sensores, o fabricante informa que a aquisição de medidas de inclinação em um plano é limitada de 0 à 45°, com uma precisão de $\pm 0,5^\circ$. Já em relação ao azimute, as medidas são passíveis de ser obtidas num intervalo de 0 a 360°, com precisão de $\pm 2,0^\circ$ (Century Geophysical LLC, 2015).

Uma das desvantagens observadas neste modelo é que, para total aproveitamento de suas duas funções, o seu uso fica limitado a minas de minérios de potássio, urânio e terras raras. Apesar de ser possível a utilização do equipamento apenas para aferir desvios, é praticamente inviável seu

²⁹ Policloreto de Vinila

emprego apenas para este fim, tendo em vista a relação custo x benefício. Não foi encontrada informações sobre calibração.

3.2.2.b – Dipímetro - Dipmeter Model 9412

A determinação da trajetória e formato de poços de pesquisa e exploração de petróleo é fundamental. Para este propósito, a indústria do petróleo desenvolveu nos anos 40 do século passado, a técnica de cabo elétrico conhecida como dipímetro. A partir desses primórdios, no entanto, o dipímetro evoluiu para se tornar um dispositivo capaz de fornecer dados importantes para uma descrição geológica completa de massas rochosas atravessadas por furos. Os dipímetros determinam o ângulo de mergulho e direção medindo parâmetros de formação do furo por meio de três ou mais sensores idênticos montados em “braços” (figura 24), de modo a realizar varrimentos em detalhes das superfícies da parede de um furo. As anomalias detetadas são registradas em tempos e profundidades ligeiramente diferentes, de maneira que os resultados do registro do perfil do furo são obtidos quase que continuamente. As informações da trajetória da sonda são produzidas a partir da saída de um conjunto de três magnetômetros montados ortogonalmente e uma matriz semelhante de acelerômetros (Goetz, 1993).

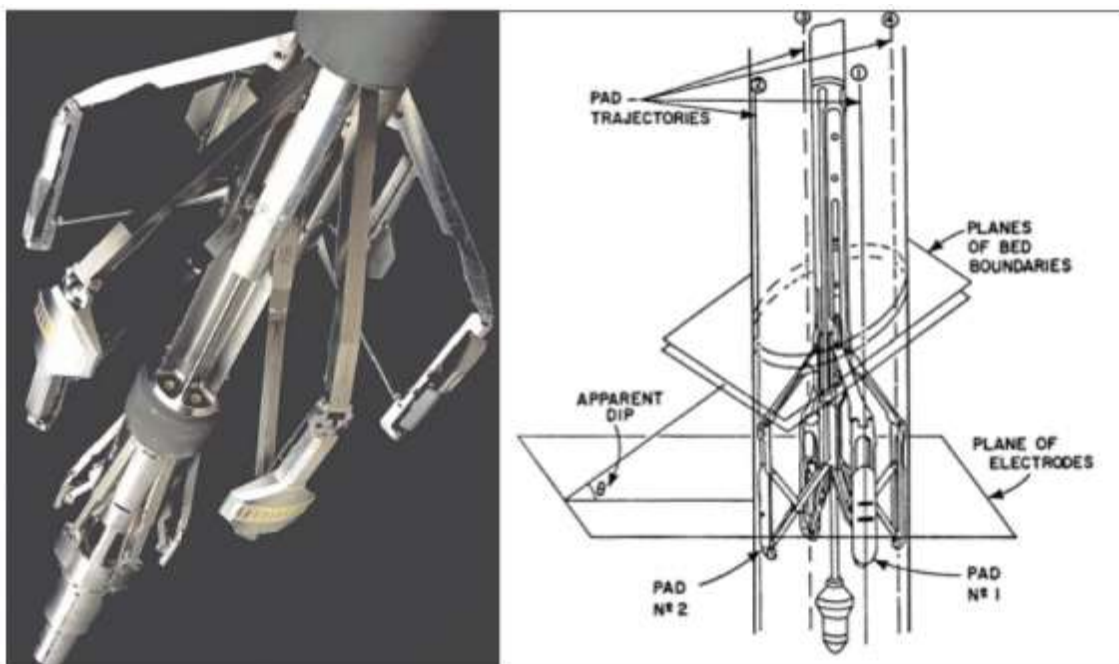


Figura 24 – a) Dipímetro de 6 braços (Pöppelreiter, García-Carballido, & Kraaijveld, 2010), e b) esboço da funcionalidade de um dipímetro de quatro braços (Luthi, 2001)

O principal objetivo da medição do dipímetro é obter direção e mergulho estruturais das camadas de rocha atravessadas pelo poço. Isso é concretizado pelo registo das variações nas propriedades físicas e geométricas das rochas ao longo das superfícies da parede do furo e correlacionando-as. Os mergulhos são medidos em relação ao poço ("mergulhos aparentes") ou em relação ao norte geográfico da Terra e à vertical em um determinado local ("mergulhos verdadeiros"). Além disto, com os variados dados obtidos com este equipamento, é possível não só obter valores de desvios do furo como a sua deformação interna (Luthi, 2001).

Com a evolução do dipímetro ao longo dos anos, é possível encontrar equipamentos com três sensores dispostos em três braços, até 192 sensores dispostos em dipímetros com 8 braços. Toda essa evolução permite que com esta ferramenta seja possível determinar e obter informações diversas, além das expostas acima, tais como: imagem de alta resolução estratigráfica, micro e macro varrimento da rocha, orientação de fraturas, dados de permeabilidade, raio gama, fator fotoelétrico, porosidade, resistividade e outras características geomecânicas e petrofísicas (Pöppelreiter, García-Carballido, & Kraaijveld, 2010).

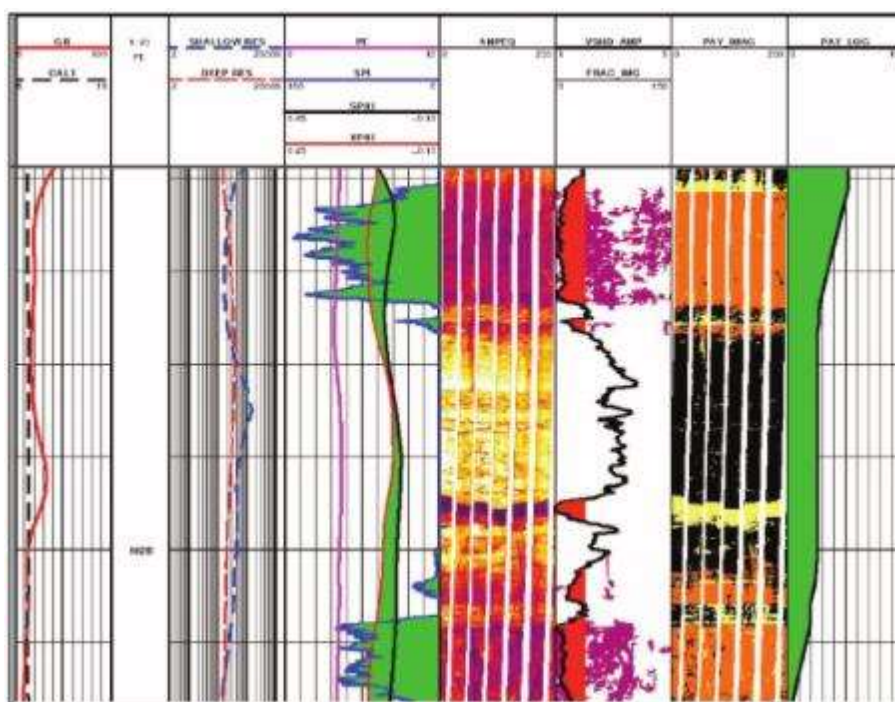


Figura 25 – Exemplos de dados obtidos com dipímetros: cada coluna apresenta informações do furo como posição, características geomecânicas e físicas (Pöppelreiter, García-Carballido, & Kraaijveld, 2010)

O dipímetro da Century Geophysical LLC, modelo 9412 com quatro braços, é uma ferramenta que combina aquisição de medidas de desvio e deformidade do furo com resistividade elétrica para determinar o mergulho e a direção dos estratos da rocha presentes. Além disso, a ferramenta também registra o espectro gama natural da rocha. O desvio do furo é calculado a partir do ângulo de inclinação e medições a partir dos sensores inclinómetro e magnetómetro (Century Geophysical LLC, 2019). A sonda metálica possui 325 cm de comprimento por 69 mm de diâmetro. Os braços possuem um diâmetro de 6,4 cm fechadas até 30,5 cm quando estão totalmente abertas. O limite de pressão suportado pelo equipamento é 176 kg/cm² (2.500 PSI). Devido a dependência do magnetómetro para obtenção de medidas, o seu uso em rochas com minerais ferromagnéticos é limitado. A inclinação pode ser medida de 0 à 90°, com uma precisão de $\pm 0,5^\circ$, e de 0 à 360°, com precisão de $\pm 2,0^\circ$, com relação ao azimute (Century Geophysical LLC, 2015). Não é muito usual a sua utilização para verificação de furos de rochas para desmonte.

3.2.3 – Devico AS

A Devico AS é uma empresa norueguesa especializada em serviços e equipamentos de perfuração direcionada para uso na indústria de mineração e projetos geotécnicos. Dos vários equipamentos desenvolvidos pela empresa, destaca-se o DeviDrill™ (Kajastie, 2015). Patenteado, este é um equipamento especial de sondagem realizadas à rotação destinado à obtenção de testemunhos de rochas para avaliação de depósitos minerais, no qual é possível controlar a direção do conjunto barrilete/coroa da sonda, simultaneamente com a perfuração. Logicamente que é necessário sensores de medição de desvios próximo da broca deste equipamento na medida que ele avança, para garantir o caminho planeado dos furos executados por esta e outras perfuratrizes da empresa (Devico AS, 2017).

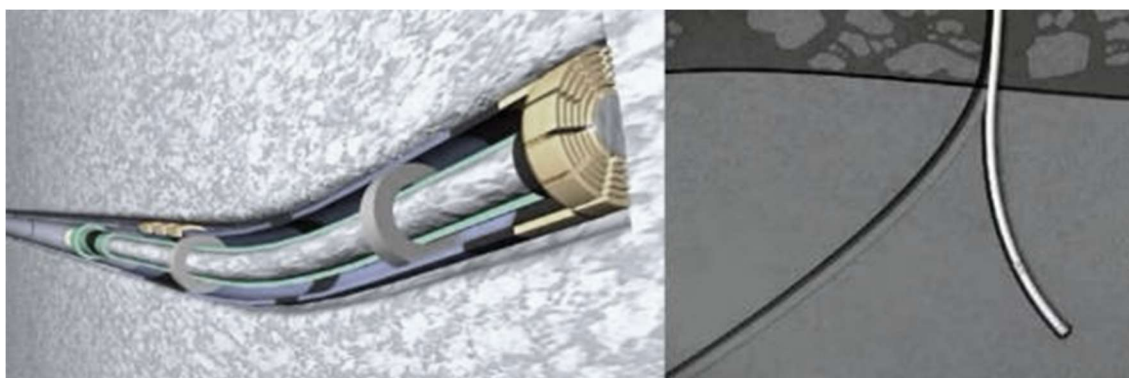


Figura 26 – a) Esquema do DeviDrill™ e b) exemplo de perfuração direcionada (Devico AS, 2017)

A seguir serão destacados os principais instrumentos de avaliação de orientação de furos da Devico.

3.2.3.a – DeviFlexRapid

O DeviFlexRapid funciona com base em acelerômetros de três eixos que medem a inclinação absoluta e o ângulo de rotação do eixo da sonda para definir o azimuth, além de sensores de tensão (extensômetros) que medem a curvatura do instrumento entre os três centralizadores da sonda para detectar o encurvamento ou deflexão ao longo do seu comprimento. Por não possuir magnetômetro, este equipamento pode ser usado em todos os tipos de formações rochosas e em furos revestidos a aço ou outros materiais que alteram localmente o campo magnético da Terra. Uma vez que a sonda possui

uma série de centralizadores com rodas retráteis para ser guiada dentro dos furos, em conjunto com um sistema de barras e cabos com um mecanismo anti-rotação, o conjunto funciona como sistema de referência para definir (zerar) o azimute num dado ponto estabelecido. O referido mecanismo consiste numa pequena estrutura



Figura 27 – Mecanismo de tracionamento anti-rotação da sonda e unidade de controle (PDA) (Devico AS, 2017)

com motor que também serve para descer e elevar a sonda por cabo de aço e de forma automática, reduzindo ao máximo a operação manual (Figura 27). Desta forma, este sistema mecânico garante maior precisão dos dados obtidos em relação à direção. O fabricante recomenda que este dispositivo seja utilizado dentro de colunas de perfuração ou tubos com diâmetros uniformes para oferecer melhores resultados, verificando-se assim que com o conjunto tubos/centralizadores, este equipamento tem um funcionamento similar à um inclinómetro. Entretanto, é possível utilizá-lo, com ou sem os centralizadores com rodas, em furos abertos ou tubos com diâmetro interno variável, apesar da empresa alertar que este método deve ser evitado por afetar a precisão do equipamento, caracterizando assim uma dependência de estruturas externas para seu melhor aproveitamento (Devico AS, 2017).



Figura 28 – Sonda do DeviFlexRapid (acima), e destaque dos 3 centralizados com rodas retráteis (abaixo) (RL & GV, 2011)

Esta tecnologia permite que a coleta dos dados sobre a trajetória do furo seja realizada de forma contínua, a uma velocidade máxima de 45 m/min. Além do mecanismo de sustentação, o kit *DeviFlexRapid* consiste em duas partes principais: a sonda e uma unidade controladora (PDA), usada para operar e apresentar os dados do levantamento realizado. O controle da sonda e

transmissão das informações através do PDA utiliza uma tecnologia que engloba conexão entre ambos por cabo mais transmissão sem fio. Da unidade de controle, os dados são transmitidos para um *software* de gestão por meio de cabo USB ou cartão de memória. O PDA possui uma aplicação específica que, além de informações da trajetória real do furo, exibe dados da profundidade (localização da sonda). Devido à sua tecnologia, o *DeviFlexRapid* é mais bem aproveitado em furos profundos de sondagens geológicas (Devico AS, 2017). Realça-se que, de entre várias desvantagens encontradas neste equipamento, destaca-se a necessidade de uma série de adaptações físicas e configurações na aplicação para alterar as medições de furos verticais para horizontais e vice-versa (RL & GV, 2011). Outras características técnicas do *DeviFlexRapid* são:

Características	Ambiente Operacional	Precisão
Diâm. externo: 40 mm	Temperatura -15°C à 75°C	Azimute: $\pm 0,01^\circ$
Comprimento: 4,0 m	Pressão: 300 bar/4.350 psi	Inclinação: $\pm 0,20^\circ$
Peso: 20 kg		Alcance: -90° a +90°

Tabela 3 – Características físicas e técnicas do *DeviFlexRapid* (Devico AS, 2019)



Figura 29 – *DeviFlexRapid* (Devico AS, 2017, 2019)

3.2.3.b – *DeviGyro*™

Trata-se de um pequeno dispositivo com 14 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro que é encaixado em três tipos de invólucros tipo sonda. Desta forma é possível sua ampla utilização em mineração e geotecnia, sendo usado preferencialmente em furos de sondagem, porém, adaptável para desmonte de rochas. O seu conjunto de sensores é baseado na tecnologia de giroscópio MEMS, que detecta e quantifica o desvio ao qual o instrumento está sujeito enquanto atravessa o furo. O fabricante afirma que o equipamento é sensível a



Figura 30 – Unidade de controle: Smartphone com aplicativo Android (Devico AS, 2019)

interferências magnéticas, por isto as sondas são guiadas dentro dos furos por equipamento anti-rotação acoplado à um conjunto barras/cabo, que também servem como sistema de referência, garantindo desta forma uma alta precisão das medições ($\pm 0,1^\circ$ para azimute e inclinação) (Fig. 27).

Permite que a aferição do perfil do

furo seja realizada de modo contínuo a velocidades de até 100 m/min ou no modo padrão com paragens a intervalos pré-definidos. Faz medições de inclinação, direção e localização apenas em furos descendentes. O DeviGyro™ é controlado por um dispositivo portátil e operado através de um aplicativo *Android*, ambos fornecidos pela empresa. A comunicação entre o instrumento e o dispositivo portátil é feita por uma mescla de transmissão sem fio e cabos (Devico AS, 2019). Não há informações acerca da tecnologia de transmissão dos dados sem fio, nem de como os dados são transferidos da unidade de controle para um sistema de gestão.

Os três tipos de sonda fornecidos pela empresa em que o dispositivo DeviGyro™ pode ser utilizado são (Devico AS, 2017):

Sonda com Centralizadores – Possui dois centralizadores tipo hélice com abertura e tamanhos múltiplos para levantamento contínuo, melhorando assim sua precisão;

Sonda de Ultrapassagem – Sonda utilizada em medições de furos de sondagens profundas, sendo inserida dentro do núcleo das hastes de sondagem rotativa por onde passa o resíduo de perfuração e testemunhos (ultrapassagem). É necessária a paragem da perfuração para introdução da sonda até ao extremo da coluna de perfuração, junto do barrilete/broca.

Conjunto Barrilete/Broca – Ao contrário da sonda de ultrapassagem, aqui o dispositivo é instalado dentro do topo (cabeça) do conjunto barrilete/broca, fornecendo assim informações de inclinação e direção durante o próprio processo de perfuração, não sendo necessário interrompê-lo.

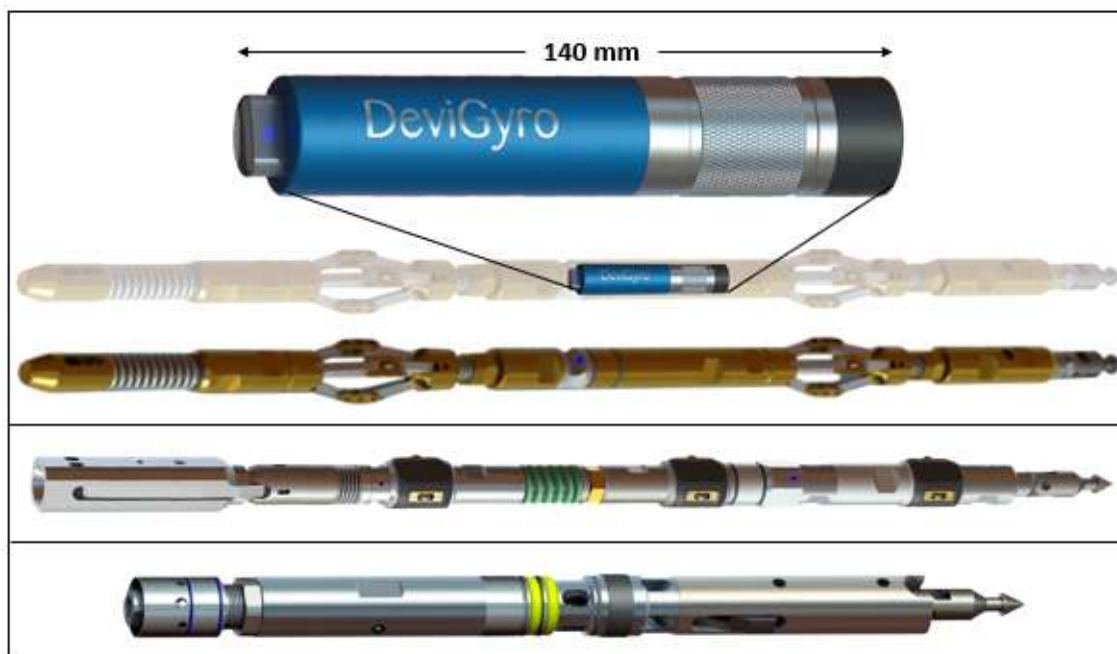


Figura 31 – De cima para baixo: a) dispositivo *DeviGyro*TM em destaque e dentro da sonda com centralizadores; b) sonda de ultrapassagem; e c) núcleo adaptável ao conjunto barrilete/broca (imagens fora de escala, adaptado de Devico AS, 2017)

3.2.3.c – *DeviShot*TM

Da linha de equipamentos de aferição de furos da empresa Devico, o *DeviShot*TM é o equipamento mais simples, cuja sonda não possui acessórios especiais como os modelos anteriores, porém, é construída numa estrutura de titânio. Além dos acelerômetros (três no total), o seu conjunto de sensores utiliza três magnetômetros para medir a direção do furo com referência ao norte magnético. Assim, em áreas onde existem minerais magnéticos ou materiais à base de ferro, as leituras feitas pelo dispositivo serão afetadas. Também possui um sensor de temperatura. Os dados obtidos pelos sensores durante a sondagem são armazenados numa memória interna da sonda, e podem ser recolhidos quando o equipamento é ligado ao PDA por cabo ou comunicação *Bluetooth*. Esta unidade de controle consiste num *smartphone* com uma aplicação desenvolvida pela empresa no sistema operacional *Android*, sendo utilizada também para inicializar, ativar e exibir resultados obtidos com o

equipamento. Ao contrário dos dois modelos descritos nos subtópicos anteriores, este dispositivo não realiza levantamento contínuo ao longo da trajetória do furo, sendo necessário a paragem da sonda em intervalos pré-definidos. Pode ser guiado por barras ou cabos, e usado em qualquer direção e inclinação, em furos abertos já executados ou em furos que estão a ser perfurados. O DeviShot™ foi projetado para ambientes operacionais de até 450 bar e temperaturas entre -5°C e 60°C (Devico AS, 2019). Outras características técnicas do equipamento são:

Características	Precisão
Diâmetro externo: 35 mm	Azimute: $\pm 0,5^\circ$
Comprimento: 1,170 m	Inclinação: $\pm 0,1^\circ$
Peso: 5,6 kg	Alcance: -90° a $+90^\circ$

Tabela 4 – Características físicas e técnicas do DeviShot™ (Devico AS, 2019)



Figura 32 – DeviShot™ (Devico AS, 2017)

3.2.4 – Pulsar Measuring Systems© - Blasthole Probe®

Esta ferramenta permite ao utilizador ver a inclinação, direção e profundidade dos furos. O procedimento consiste em o operador baixar a sonda no furo e realizar medições num intervalo definido por ele, que pode ser de 2, 3, 5 metros ou mais. De acordo com o fabricante, a precisão deste dispositivo é de $\pm 0,25^\circ$ para a inclinação e $\pm 1^\circ$ para o azimute. A sonda tem um cabo a ela ligado que serve para, além de conduzir a sonda dentro do furo, transmitir os dados captados da sonda para a unidade de controle denominada Datamat 5. Para visualização dos dados recolhidos em ensaios de campos, o fabricante disponibiliza *software* próprio para desenho de pegas de fogo em desmonte de rochas, denominado Blast Designer 32. No entanto, os dados coletados por este equipamento são compatíveis com os *softwares* Quarry.4, Winprof Rockface (Ewer, 2018) e O-Pitblast. Observou-se que este equipamento possui

como vantagem a função extra que permite detetar a presença de água nos furos. Como desvantagem, entende-se que o sistema de apoio tipo guincho portátil oferecido em conjunto com o equipamento torna as medições mais demoradas, mesmo o fabricante garantindo que o conjunto é leve, pois para malhas de perfurações extensas, é necessário a montagem e desmontagem desta base. Ainda como desvantagem, toda transmissão de dados é feita com necessidade de conexão por cabos.



Figura 33 – Equipamento de medição da Pulsar©: Sistema tipo Guincho e a unidade de controle Datamat 5 (Ewer, 2018)

3.2.5 – Reflex™ Soluções

A empresa australiana Reflex™ é uma fornecedora global de soluções voltadas para instrumentação, gestão e modelação de estruturas geológicas (perfurações e sondagens de pesquisas geológicas, geologia estrutural, geoquímica e geofísica, etc.). A Reflex™ faz parte da Index™ Group Limited, uma empresa de soluções em inteligência para mineração subterrânea, que também fornece produtos como fluidos de perfuração e equipamentos especiais para as indústrias de mineração, poços de água, construção civil, túneis, etc. (Reflex, 2019).

A Reflex™ possui uma vasta linha de equipamentos de perfuração em geral, como por exemplo, na área de geologia estrutural, onde apresenta várias ferramentas que são utilizadas desde a perfuração da rocha, até a extração/coleta, definição da orientação, registro e interpretação dos testemunhos de sondagem e seus dados. Também possui uma linha de

dipositivos com a finalidade de medição de desvios de furos, porém, na sua totalidade voltada para furos de prospecção.

Esta empresa também possui um *software* próprio denominado IMDEXHUB-IQ™ para análise e interpretação dos dados recolhidos pelos instrumentos do sistema Reflex™. Entretanto, ela garante que os dados obtidos com os seus equipamentos de medição são compatíveis com *softwares* de terceiros. Este sistema permite a gestão e recolha de dados operacionais e geológicos baseados em nuvem, com processos básicos de QA/QC³⁰. O sistema tem capacidade de armazenamento e exportação de dados, produção de relatórios automáticos, disponibilizando a troca destas informações instantaneamente entre o campo e o escritório (Reflex, 2018).

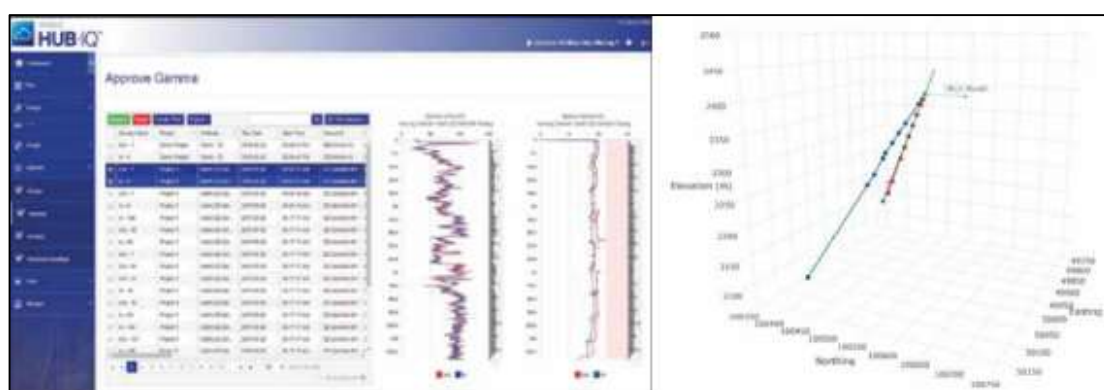


Figura 34 – Software para aquisição e gerência de dados de todos os equipamentos Reflex™

Tendo em vista que esta empresa apresenta uma grande oferta de diferentes equipamentos voltados para o estudo de desvio de furos, serão apresentadas a seguir as descrições de apenas 3 equipamentos, os quais consideramos serem os mais relevantes para recolha de informações que pudessem contribuir para o desenvolvimento do protótipo, objeto central desta Tese.

³⁰Quality Assurance and Quality Control ou controle e garantia de qualidade. Amplamente utilizado em países como Austrália e Canadá - onde é regra. Orienta quanto aos procedimentos, técnicas e ferramentas essenciais para prospecção e exploração mineral para dar transparência, materialidade e competência aos dados gerados nos projetos, para auditorias internas ou externas (Leite A. , 2016)

3.2.5.a – Conjunto de Instrumentos de Pesquisa Reflex™

Trata-se um conjunto de equipamentos que foram desenvolvidos para, quando acoplados, medirem a direção, inclinação e azimute de furos profundos de prospeção geológica. A montagem do equipamento é complexa, e exige a conexão de um ou mais adaptadores a uma sonda núcleo para sua completa operação. A sonda núcleo deste equipamento possui sensor com giroscópio para definir a orientação vertical e angular do furo. O fabricante oferece várias peças para que em conjunto, forneçam a indicação do norte verdadeiro para orientação do azimute, fazendo assim com que o dispositivo não seja suscetível de interferência magnética. Entretanto, não há informações do fabricante qual o tipo de sensor ou metodologia utilizados para definição do norte verdadeiro (Reflex, 2019). Algumas das características técnicas do conjunto principal³¹ são:

Dimensões	Ambiente Operacional	Precisão
Diâm. externo: 42,5 mm	Temperatura 0°C à 70°C	Azimute: $\pm 1^\circ$
Comprimento: 1,40 m	Profundidade: 3 km ou 6.000 psi	Inclinação: $\pm 0,30^\circ$
Peso: 8kg	Resistência choque e água	

Tabela 5 – Características técnicas do conjunto Reflex™ (Reflex, 2018)

³¹A pesquisa limitou-se ao conjunto principal formado pelos equipamentos denominados Reflex Gyro Sprint-IQ™, Reflex Rota-Lock Overshot™ e Reflex EZ-Gyro™



Figura 35 – Exemplo de 3 kits Reflex™ que juntos, compõem um só equipamento (Reflex Now, 2017)



Figura 36 – Algumas das etapas da complexa montagem do equipamento (Reflex Now, 2017)

O equipamento possui opção de escolha para realizar medições contínuas ou em intervalos. Na unidade de controle é possível que o operador visualize as seguintes leituras do equipamento: inclinação, azimute, velocidade da sonda (em m/min) e profundidade do furo.

Para a transmissão e recolha de dados entre a sonda e a unidade controladora é necessário um cabo específico. Como desvantagem verificou-se que é necessário o operador segurar a parte do cabo conectado a sonda até que os dados sejam totalmente recolhidos (Figura 37). A partir da sonda, os dados são

exportados para computadores dos gestores técnicos dos projetos, através de cabos USB ou WiFi.



Figura 37 – Meio de transferência de dados entre a UC e a sonda por meio de cabo (Reflex Now, 2017)

Devido as características deste equipamento descritos acima, entende-se que não compensa, técnica e economicamente, o seu uso em operações de lavra, especificamente para medições de desvios de furos para aplicação de explosivos em minas a céu aberto e subterrânea.

3.2.5.b – Reflex Gyro™

Com este equipamento, os dados da pesquisa, uma vez trazidos à superfície, são transferidos da memória interna da sonda para o PC através conexão *Bluetooth*. O equipamento também funciona em terreno magneticamente perturbado. Realiza a coleta de uma grande variedade de informações dos furos, incluindo as principais relativas a dados direcionais (azimute e inclinação), além de temperatura, tempo e rotação (Reflex, 2019). Algumas das características técnicas do conjunto principal são:

Dimensões	Ambiente Operacional	Precisão
Diâm. externo: 32 mm	Temperatura 0°C à 70°C	Azimute: $\pm 0,5^\circ$
Comprimento: 807 mm		Inclinação: $\pm 0,2^\circ$
Peso: 1,1 kg		

Tabela 6 – Características técnicas do Reflex Gyro™ (Reflex, 2018)



Figura 38 – Aplicativo de controle do Reflex Gyro™ (Reflex, 2018)

Os dados obtidos são processados através de uma aplicação desenvolvida pela empresa denominada Reflex GMIT5™, onde o utilizador pode realizar o tratamento dos dados dos furos obtidos em campo. Esta aplicação orienta o operador no processo de pesquisa, desde a configuração da pesquisa e conexão da ferramenta, até o alinhamento pré-pesquisa, entrada de azimuth, execução de medidas, alinhamento pós-operação e captação dos dados do giroscópio e acelerómetro.

3.2.5.c – Reflex™ Maxibor® - Dispositivo de Flexão Ótica

Este dispositivo entrou na lista de equipamentos relevantes para esta Tese devido à sua peculiar e ímpar tecnologia para aferição de furos. Os instrumentos de flexão ótica determinam as mudanças de direção usando medições óticas da luz refletida em anéis dentro de seu invólucro. De acordo com Cook (2005), este instrumento ótico é usado para levantamentos altamente precisos. A operacionalidade dos instrumentos de medida óticos é semelhante ao conceito de medição de um teodolito usado em topografia de superfície: a detecção ótica de ângulos e distâncias. Este instrumento calcula as coordenadas espaciais ao longo de um furo com base em medições óticas de mudanças de direção e medições gravimétricas de alterações do mergulho. Isso é feito medindo a curvatura de segmentos consecutivos dos furos usando a luz refletida dentro da sonda. Quando o equipamento sonda dobra num furo curvo, os anéis que a câmara vê são deslocados de forma correspondente à curvatura. Ao quantificar essa mudança, a medida do desvio é calculada. Por ser um instrumento com princípio de funcionamento ótico, fornece informações precisas mesmo em ambientes com rochas magneticamente perturbadas. Utiliza sensores com acelerómetros triaxiais e um sensor de imagem semiconductor. A sonda é adaptável para ser guiada por hastes ou cabo de aço. A recolha de dados do furo é realizada em intervalos de 1, 5 ou 3 metros. Por não possuir sensores com magnetómetro, necessita de gabaritos externos para servir como sistema de referência da orientação do azimuth. Um *software* de

processamento converte os dados coletados em informações posicionais, ou seja, coordenadas XYZ (Reflex Maxibor II: Optical Borehole Survey System). Nota-se como desvantagens, para os nossos objetivos, que este tipo de equipamento é demasiadamente sofisticado, do ponto de vista técnico e financeiro, sendo recomendado a sua aplicação em obras (notadamente túneis) e minas complexas, com furos profundos ou extensos³². O preço deste é elevado, na ordem de US\$ 60.000,00 (Cook, 2005).

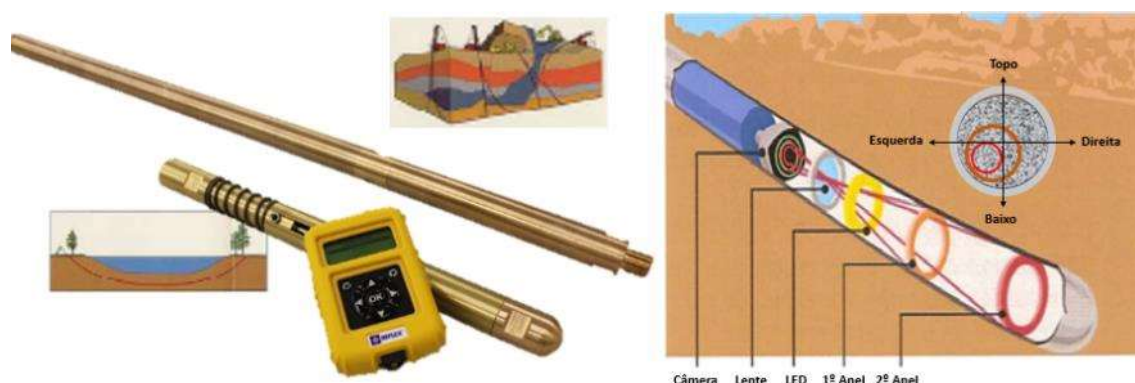


Figura 39 – Dispositivo de Flexão Óptica: exemplo de sua funcionalidade e aplicações (Reflex)

3.2.6 – Robit® Sense Systems - M Sense

O nosso primeiro contato com a empresa finlandesa Robit® aconteceu durante a 10ª Conferência Mundial da EFEE em Helsinque, Finlândia, em 2019. Nessa Conferência, foi apresentado o sistema de equipamentos para medição de desvio de furos denominado *Sense Systems*, séries “S” e “M”. O Sistema S Sense é um conjunto de sensores e adaptadores lançados no mercado no início de 2017 e patenteados pela empresa. Eles são colocados na coluna de perfuração (*bit* ou haste), e realizam a medição do desvio do furo durante o processo de perfuração. Já a ferramenta M Sense é um equipamento de uso manual, e consiste no tradicional conjunto sonda, cabo e unidade controladora (Moore, 2017).

³² Em toda bibliografia consultada, verificou-se que em apenas 2 estudos este equipamento foi utilizado em pequena e média mineração: *Flyrock Elimination Program Part 2: Profilers and Boretracks* (2012), e *Avaliação de Trajetória de Furos de Sondagem em Maciços Rochosos na Mina de S11D - Carajás, PA* (2015)



Figura 40 – O M Sense da Robit® Sense Systems (Robit, 2019)

formações rochosas, incluindo rochas com minerais magnéticos, desde que, neste último caso, o magnetômetro seja desligado através da aplicação, sendo assim necessário definir uma referência visual. Não foram encontradas informações de como referenciar o azimuth com o equipamento. O cabo elétrico é disponibilizado em versões de 30 e 100 metros, com marcações de metro a metro para localização da profundidade em que está da sonda dentro do furo. Além de servir para suspender e guiar a sonda, o cabo também serve para transmitir os dados para a unidade controladora. O dispositivo é operado através de um computador portátil tipo *tablet* robusto de grandes dimensões (293 x 208 x 325 mm) e pesado (1,3kg), com ecrã tipo *touch* de 10". Possui um *software* desenvolvido pela empresa, que funciona em ambiente *Microsoft Windows*, que, apesar de não ser um sistema tão robusto como o sistema *Android*, permite ter uma melhor resolução e interface gráfica. As informações de desvio podem ser recolhidas do *tablet* por cartão SIM, cabos USB e *ethernet* ou quando conectado ao WiFi. A precisão do equipamento é de $\pm 0,5^\circ$ para inclinação e $\pm 1^\circ$ para azimuth (Robit, 2019).

A sonda do M Sense possui tamanho compacto (460 x 38mm) e é leve por ser fabricada em alumínio. Devido ao seu peso (1,057 g), é necessário adaptar pesos extras à sonda para vencer a resistência de furos com fluídos. O sistema utiliza acelerómetros, giroscópios e bússola (magnetómetro). O fabricante afirma que o equipamento pode ser usado em todos os tipos de

3.2.7 – Stockholm Precision Tools (SPT)

A empresa sueca Stockholm Precision Tools (SPT) possui 4 modelos principais de equipamentos de avaliação de desvio de furos. O interesse em investigar os equipamentos desta empresa sueca ocorreu pela reputação destes, principalmente nos trabalhos de vistoria de prospecção geológica em que tivemos oportunidade de participar no Brasil. Entretanto, não foram encontradas fontes bibliográficas disponíveis que apresentassem informações sobre os instrumentos desta empresa. Logo, o resumo com as características técnicas mais relevantes dos instrumentos da SPT, conforme é apresentado a seguir, foi extraído das limitadas informações disponibilizadas pela empresa em seu *website* (Stockholm Precision Tools, 2019):

Core Retriever™ – Utilizado em furos profundos de sondagens geológicas, com este equipamento, além de realizar as medições do perfil do furo, é possível recuperar o testemunho de sondagem de forma simultânea. Adaptado com o GyroMaster™, permite realizar medições contínuas (Figura 41.a).

GyroLogic™ – Realiza medições em ambientes com interferência magnética de modo contínuo ou em intervalos. Tem capacidade para realizar perfil de furos inclinados e horizontais, limitado a uma variação de inclinação de -85° a +85° (Figura 41.b).

GyroMaster™ – Este equipamento pode ser usado em todos os tipos de formações rochosas. Opera em furos verticais, horizontais e inclinados, limitado a uma faixa de inclinação -90° a +90°. Além de medições em intervalos, sua tecnologia permite que a recolha dos dados da trajetória do furo seja realizada de forma contínua, a uma velocidade máxima de 150 m/min. O sistema não requer adaptadores ou referências externas para definição do azimuth, entretanto, a sonda possui centralizadores para melhoria da precisão (Fig. 41.c). Quando adaptado ao Core Retriever™ permite a recolha de testemunhos da sondagem. O controle da sonda e transmissão das informações através do PDA utiliza uma tecnologia *Bluetooth*, e a exportação de relatórios de dados do

PDA para unidades de gestão pode ser feita por *Bluetooth*, mas também por sistema *WiFi*, *e-mail* ou porta USB.

MagCruiser™ – Equipamento que utiliza magnetómetro, possui a menor sonda da linha da empresa (1 m), podendo ser utilizado tanto em furos verticais e inclinados, como em perfurações direcionadas³³ e furos ascendentes. O controlo da operação do equipamento e a aquisição dos dados da sonda são feitos por tecnologia sem fio (*Bluetooth*), através de um equipamento portátil fornecido pela empresa (Fig. 41.d).



Figura 41 – Linha de equipamentos de aferição de furos da SPT: a) Core Retriever™; b) GyroLogic™; c) GyroMaster™, e; d) MagCruiser™ (Stockholm Precision Tools, 2019)

Modelo	Dimensões	Ambiente Operacional	Precisão
Core Retriever™	Ø: 50 mm	Temperatura -30°C à 60°C	Azimute: ± 0,5°
	Compr.: NI	Pressão: 5 km ou 7.110 psi	Inclinação: ± 0,05°
	Peso: 10 kg		
GyroLogic™	Ø: 35 mm	Temperatura -10°C à 70°C	Azimute: ± 0,5°
	Compr.: 1,73 m	Pressão: 600 m ou 4.350 psi	Inclinação: ± 0,05°
	Peso: 8 kg		
GyroMaster™	Ø: 42 mm	Temperatura -30°C à 60°C	Azimute: ± 0,5°
	Compr.: 1,46/1,84 m	Pressão: 7.250 psi	Inclinação: ± 0,05°
	Peso: 8 kg		
MagCruiser™	Ø: 35 mm	Temperatura -0°C à 60°C	Azimute: ± 0,9°
	Compr.: 1,00 m	Pressão: 4 km ou 5.670 psi	Inclinação: ± 0,15°
	Peso: 6 kg		

Tabela 7 – Resumo técnico dos instrumentos de aferição de furos da SPT

Em comum, todos os equipamentos possuem uma aplicação, utilizável em dispositivos manuais sem fio, para controle das sondas e tratamento dos dados das medidas nos furos, onde também são detalhados, de várias formas, os resultados destas. Não há informações de qual tipo de dispositivos e sistema operacional em que a aplicação da empresa funciona, como também não foram

³³ Operação semelhante ao equipamento descrito no primeiro parágrafo do item 3.2.3 e figura 26

encontradas informações sobre a tecnologia e tipos de sensores utilizados para determinação da trajetória dos furos.

3.3 – Conclusão

Todos equipamentos pesquisados possuem limitações nas formas como são processadas as medidas de inclinação: equipamentos que medem furos ascendentes e descendentes são limitados a uma gama de inclinações de 0 à 45°, enquanto equipamentos que medem apenas furos descendentes só conseguem realizar medidas entre a faixa de 0 a 90°. Outros equipamentos precisam de adaptações ou de operar em conjunto com outras peças e acessórios para realizar medidas em furos em todas as direções. Alguns equipamentos possuem tecnologia de ponta que resulta de anos de pesquisa, e que demandaria igual tempo para replicar ou melhorar suas características operacionais. No geral, com o conhecimento adquirido ao analisar as variadas tecnologias, foi possível construir um protótipo, ainda que limitado, que poderá futuramente se aplicável em várias áreas da engenharia, principalmente na do desmonte de rochas. Alguns conhecimentos adquiridos não puderam ser adaptados e incorporados ao protótipo devido a vários constrangimentos, nomeadamente, limite de recursos e tempo. Algumas ideias que surgiram, mas que não se materializaram nos trabalhos da presente Tese, serão sugeridas no capítulo “Trabalhos Futuros”.

PARTE II – DESENVOLVIMENTO DO DESVIÓMETRO

4 – DEFINIÇÃO DO DESVIÓMETRO

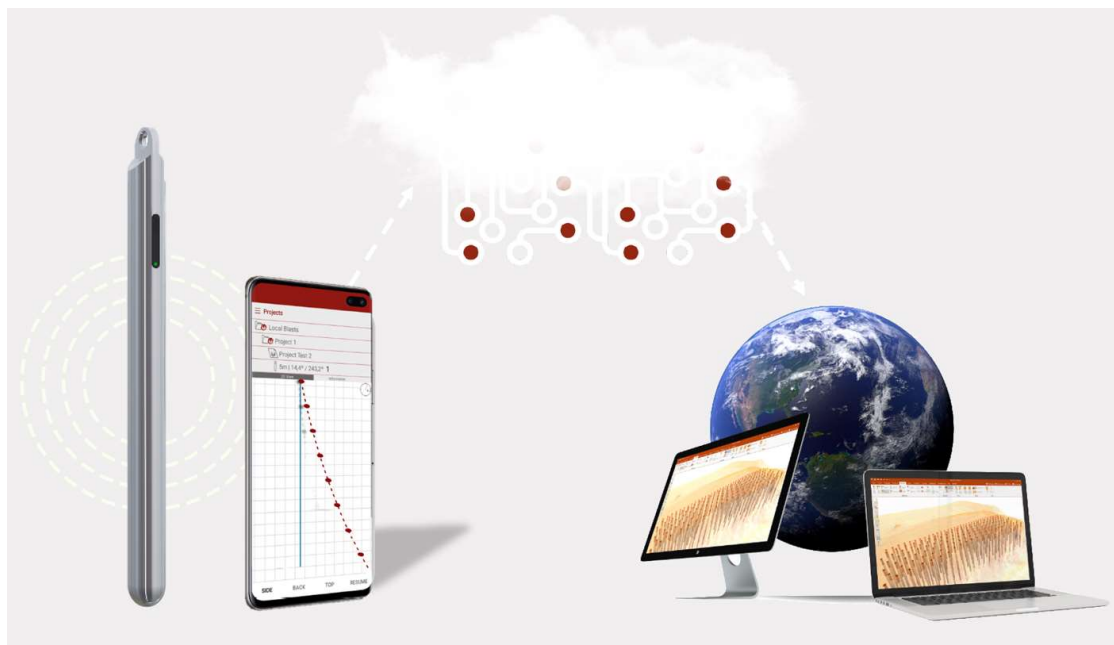


Figura 42 – o Desviómetro: resumo de sua funcionalidade

Decorrente desta investigação, constatou-se a ausência de uma terminologia adequada para definição de equipamentos de medições de desvios de furos de produção em desmonte de rochas. O livro *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field* (1988), de Dunnicliff, talvez seja uma das obras técnicas mais completas sobre equipamentos de medição e observação com aplicação em trabalhos de engenharia. Sendo citado na maioria da literatura sobre instrumentação técnica, este livro detalha dezenas de equipamentos com o objetivo de mensurar, qualificar e quantificar desvios, deslocamentos, tensões e deformações internas de estruturas. Mesmo tendo sido publicado pela primeira vez nos anos 80, este abrangente guia de instrumentação em engenharia continua atual.

A maior parte das designações dos equipamentos descritos no referido livro possuem o sufixo inglês “*meter*” ou em português “metro³⁴”. Como exemplo

³⁴ -*metro* - do grego μέτρον (*métron*): quando usado como sufixo, significa “instrumento para medir” (Dicionário Priberam da Língua Portuguesa, 2020)

podemos citar os termómetros, pluviómetros, piezómetros, extensómetros, inclinómetros, etc. Entretanto, o conceituado autor, e outros de bibliografias consultadas, não fazem referência aos termos “desviômetro”, “desviómetro” ou “*deviometer*”. Com a presente pesquisa, constatamos que os termos “inclinômetro”, “inclinómetro” e “*inclinometer*” aparecem largamente empregues no âmbito das atividades de construção civil, geologia e geomecânica (Krelling, 2006).

Foram realizadas pesquisas técnicas e bibliográficas com as palavras chave “desviômetro”, “desviómetro” e “*deviometer*” em várias fontes. Os resultados maioritariamente remeteram para equipamentos da área da Medicina, que medem desvios em órgãos do corpo humano, notadamente relacionados com dispositivos utilizados no tratamento de estrabismo³⁵, e para equipamentos voltados para o estudos de fenômenos naturais e experimentos nas variadas áreas da Física. Como se explicita nas tabelas 8 e 9 abaixo, 40% dos resultados remeteram para equipamentos usados na medicina (destes, 90% para equipamentos relacionados à estrabismo). 33% resultaram em equipamentos diversos usados em laboratórios e testes de fenômenos da natureza em diversos ramos da física (ondas, ótica, magnetismo, etc.). 7% foram para equipamentos mecânicos (sendo 50% de equipamentos mecânicos dos anos 20 e 30 do século passado, e 50% de mecânica automotiva). 6% da pesquisa resultaram em instrumentos de orientação de voo em aeronaves do século passado, e outros 6% resultaram em outras áreas, como orientação magnética de artefatos balísticos (mísseis e munições de grande porte), equipamentos da indústria têxtil, telemetria, eletrônicos aplicados à informática e instrumento náutico. 20% dos resultados da pesquisa remeteram à títulos e assuntos díspares da engenharia (artes, música, literatura, etc.). No campo da mineração, apenas 2 equipamentos com aferição de desvio de furos foram encontrados na pesquisa. Abordaremos sobre eles mais adiante.

Com o objetivo de certificar se as fontes consultadas possuíam conteúdos principalmente no que se refere ao campo da engenharia e respetivos

³⁵ Distúrbio que afeta o paralelismo entre os dois olhos, que apontam para direções diferentes (Bruna, s.d.)

instrumentos, foram pesquisados equipamentos de observação similares, além de desviômetros, tais como inclinômetros, tiltímetros, piezômetros, dipímetros, como também as suas traduções para a língua inglesa. Todas as fontes consultadas apresentaram mais de um resultado para ao menos um destes equipamentos citados.

Bibliotecas e Portais Científicos Digitais ou Virtuais		
Fonte	Ocorrências	Observações
BDTD ³⁶	zero	
DART-Europe ³⁷	zero	
EBSCOConnect ³⁸	zero	
IET Inspec ³⁹	5	4 física (ondas e ótica) e 1 indústria têxtil
Knovel Engineering Data ⁴⁰	zero	
Kopernio/Web of Science ⁴¹	11	Medicina (sendo 9 para oftalmologia/estrabismo)
Marka/Taylor & Francis/UP ⁴²	zero	
OECDiLibrary ⁴³	zero	
Open Library ⁴⁴	zero	
Portal de Periódicos CAPES ⁴⁵	15	7 física (áreas diversas); 8 medicina (5 estrabismo);
Repositório Aberto FEUP	zero	
ScienceDirect ⁴⁶	37	35 medicina (sendo 33 para oftalmologia/estrabismo) e 2 mecânica de 1930
Scopus Preview ⁴⁷	zero	
SCRIBD ⁴⁸	6	1 medicina (estrabismo), 4 mecânica automotiva e 1 sobre música
Springer Link ⁴⁹	25	11 física (ondas e condutores), 9 medicina (estrabismo) e 5 para áreas diversas
Taylor & Francis Group ⁵⁰	zero	
ZLibrary ⁵¹	7	5 medicina (sendo 4 para oftalmologia/estrabismo), 1 têxtil e 1 mecânica

Tabela 8⁵² – Resultados das pesquisas técnicas e bibliográficas sobre os termos "*desviómetro*", "*desviómetro*" ou "*deviometer*" em bibliotecas e plataformas digitais ou virtuais

³⁶ Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (<https://bdttd.ibict.br/vufind/>)

³⁷ Consórcio de bibliotecas de teses de pesquisa europeias endossado pela Ligue des Bibliothèques Européennes de Recherche (LIBER) (<http://www.dart-europe.eu/basic-search.php>)

³⁸ connect.ebsco.com/s/?language=en_US

³⁹ www.theiet.org/publishing/inspec/

⁴⁰ app.knovel.com/web/index.v

⁴¹ kopernio.com/

⁴² uporto-taylor.marka.pt/

⁴³ Organization for Economic Cooperation and Development, organização econômica intergovernamental com 37 países membros (<https://www.oecd-ilibrary.org/>)

⁴⁴ openlibrary.org/

⁴⁵ Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Fundação vinculada ao Ministério de Educação do Brasil (MEC) (<http://www.periodicos.capes.gov.br/>)

⁴⁶ www.sciencedirect.com/

⁴⁷ www.scopus.com/

⁴⁸ pt.scribd.com/

⁴⁹ link.springer.com/

⁵⁰ www.taylorfrancis.com/

⁵¹ z-lib.org/

⁵² Última atualização: 22/09/2020

Bibliotecas de Instituições de Engenharia		
Fonte	Ocorrências	Observações
CEULP/ULBRA ⁵³	zero	
Colorado School of Mines	21	2 físico-química; 15 medicina (estrabismo); 6 física (várias áreas)
FEUP	zero	
IST ⁵⁴	24	14 física (várias áreas); 8 medicina (estrabismo); 1 indústria têxtil
Montanuniversität Leoben/AUT	8	8 medicina (4 estrabismo)
Universidade de São Paulo	16	2 físico-química; 7 medicina (5 estrabismo); 6 física (várias áreas)
Universidade Federal de Campina Grande	zero	
Universidade Federal de Minas Gerais	zero	
Universidade Federal de Ouro Preto	zero	
Universidade Federal de Pernambuco	zero	
Universidade Federal do Rio Grande do Sul ⁵⁵	27	17 física (várias áreas); 10 medicina (estrabismo);
Outros		
Biblioteca Nacional de Portugal ⁵⁶	20	Títulos e assuntos diversos não relacionados à engenharia (artes, literatura, etc.)
Espacenet Patent Search ⁵⁷	57	3 resultados iguais da patente da fig. 42; 2 resultados para um equipamento descrito na figura 43; 4 medicina (3 estrabismo); 4 mecânica; 27 física (ondas, ótica e magnetismo); 8 aeronáutica (anos 1930); 2 telemetria: 1 armamento; 1 naval; 2 eletrônica/computadores

Tabela 9⁵⁸ – Resultados das pesquisas técnicas e bibliográficas sobre os termos “desviômetro”, “desviómetro” ou “deviometer” em algumas bibliotecas de faculdades de engenharia e outras fontes

Ressalta-se que, com relação as pesquisas realizadas nas bibliotecas e plataformas digitais ou virtuais, como também em algumas instituições de engenharia, os resultados em sua maioria remeteram aos mesmo títulos, notadamente com relação aos trabalhos acadêmicos sobre medicina oftalmológica (estrabismo) e na área da física.

Com relação aos 2 resultados da pesquisa dos termos “desviômetro”, “desviómetro” e “deviometer” que resultaram em equipamentos de mineração, tem-se a relatar o seguinte: o primeiro resultado trata-se de um registro de patente dos final dos anos 70, início dos anos 80, encontrado na base de dados de patentes mundiais da plataforma *Espacenet* da *European Patent Office*, de um equipamento cuja aplicabilidade difere totalmente do desviómetro proposto na presente pesquisa. A denominação do invento é *Digital Mineral Logging*

⁵³ Centro Universitário Luterano de Palmas/Universidade Luterana do Brasil

⁵⁴ Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

⁵⁵ Repositório Digital LUME e SABi+

⁵⁶ Biblioteca Nacional Digital (<http://bndigital.bnportugal.gov.pt/>) e Base Nacional de Dados Bibliográficos (PORBASE) (<http://porbase.bnportugal.pt/ipac20/ipac.jsp?profile=>)

⁵⁷ O *Espacenet* da *European Patent Office* (<https://www.epo.org/>) é uma plataforma digital que contém dados sobre mais de 120 milhões de documentos de patentes em todo o mundo

⁵⁸ Última atualização: 22/09/2020

*System*⁵⁹. Tem na sua composição uma função que possivelmente pode ser descrita como uma versão antiga dos atuais equipamentos de medição de furos, cuja tecnologia, que emprega sensores com inclinômetros e magnetômetros, está obsoleta, além do conjunto do equipamento se encontrar

dependente de cabos e de uma estrutura adaptada a caminhões (Figura 43). A pesquisa teve este equipamento como resultado tendo em vista que o termo “deviometer” pesquisado aparece no texto da descrição do equipamento na documentação do pedido da patente, que, neste caso, pode ser considerado como referência ao sensor inercial (giroscópio ou inclinômetro). O processo desta patente não está mais ativa e já não se encontra vigente por ter expirado o período de 20 anos.

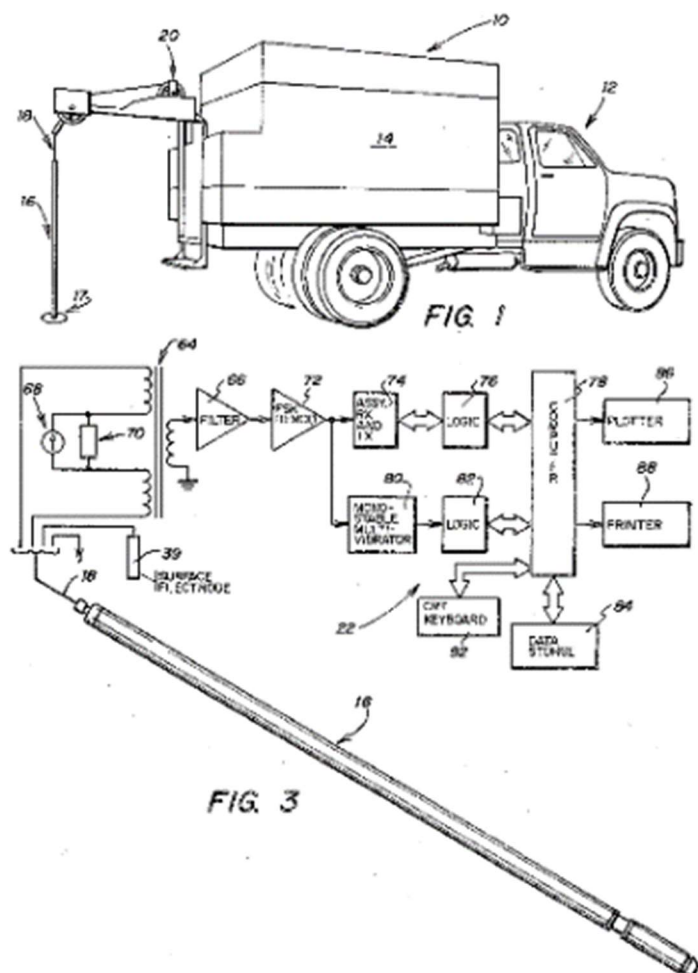


Figura 43 – Um dos resultados da pesquisa do termo “deviometer”, o Digital Mineral Logging System é uma invenção usada em sondagem de rochas, cuja tecnologia dos anos 80 já está obsoleta (West, 1979), o que não o caracteriza como o desviômetro proposto

A pesquisa na base de dados do *Espacenet* também resultou em outro equipamento utilizado em mineração, encontrado em 2 processos de registro de patentes (processos números ZA82866B e CA1188364A) referentes à uma mesma invenção, cujo os requerentes inventores sequer denominaram-o, apenas o definiram como *Method of And Apparatus for Mining Analysis* (Método

⁵⁹ Processo de patente número US4227405A (West, 1979)

e Aparato para Análise de Mineração). O documento ZA82866B refere-se a uma patente na África do Sul que foi concedida, e o documento CA1188364A refere-se à mesma família (mesma invenção) da patente ZA82866B, porém no Canadá. Em ambos os casos estas patentes foram requeridas pelos mesmos inventores, e concedidas, mas não estão ativas nem vigentes por ter expirado o período de 20 anos. A proteção desta patente foi requerida em outros países⁶⁰, mas verificamos que a patente está inativa, exceto os casos do Japão e Austrália, pois não há informação disponível sobre estes 2 países. Entretanto, quanto se pôde verificar, aparentemente estas duas patentes não foram concedidas.

O invento acima referido trata-se de um equipamento obsoleto que servia para captar a presença de fluídos e gases, analisar a litologia da rocha e a direção angular de furo de sondagens em minas subterrâneas de maciços rochosos vinculados à estratos, como depósitos de ouro, urânio e carvão, e assim determinar posição e direção dos estratos, fraturas, veios, cavidades e descontinuidades do maciço rochoso. Este equipamento fisicamente possui uma estrutura mecânica similar ao equipamento descrito no tópico 3.2.1.a, pois possui uma sonda guiada por um sistema de hastes rígidas articuladas, porém elas precisam ser (des)acopladas na medida que a sonda entra ou sai do furo (Figura 44). Além disto, assim como o equipamento da figura 43, acredita-se que este dispositivo apareceu no resultado de pesquisa do termo “*deviometer*” na plataforma de patentes mundial *Espacenet* devido aos inventores, à época, se referirem que o sensor desviómetro referido no invento poder ser um sensor magnético, gravitacional (acelerómetro) ou inercial (Smith & Howard, 1981). Logo, conclui-se que este equipamento possui funcionalidade diferente do desviómetro objeto desta investigação, e cuja operacionalidade esta limitada à minas subterrâneas de depósitos rochosos estratificados, como depósitos de ouro, urânio e carvão, além de possuir uma tecnologia mecânica e sensores ultrapassados.

⁶⁰ Austrália, Alemanha, Estados Unidos, França, Grã-Bretanha, Japão e Suécia

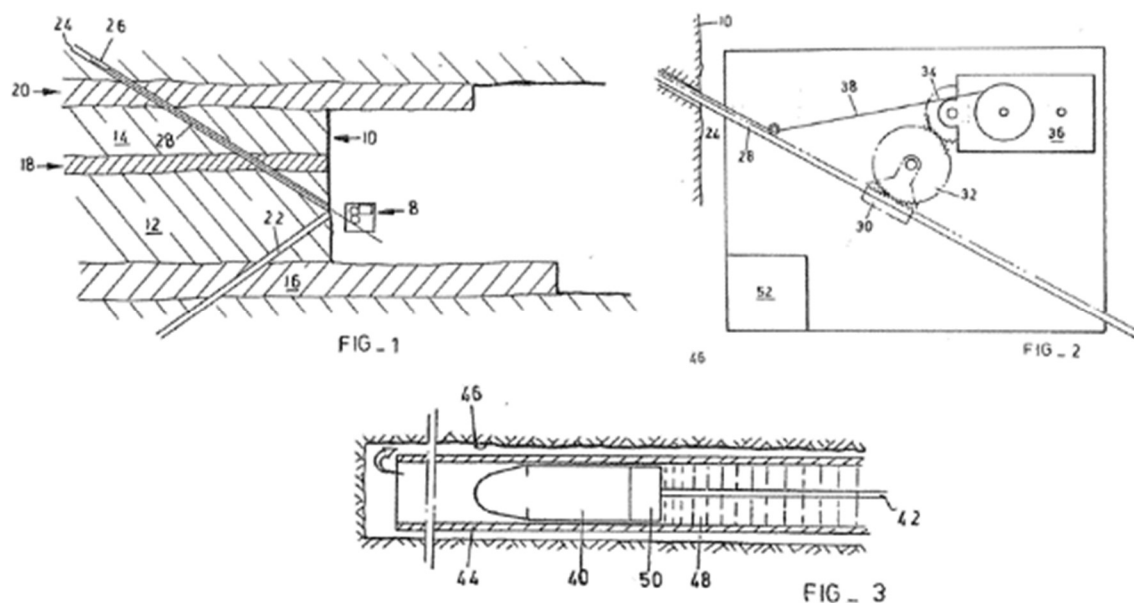


Figura 44 – Desenhos técnicos do pedido de patente referente ao “aparelho para análise de mineração”: fig. 1 vista lateral do aparelho dentro de um furo de sondagem num maciço em ambiente subterrâneo; fig. 2 princípio mecânico do equipamento baseado num sistema de engrenagens; e fig. 3 representação da sonda num furo vertical

O Desviómetro consiste num conjunto de acessórios que foram projetados para serem inseridos em furos decorrentes de perfuração de rochas, trabalhos de geotecnia, geomecânica, sondagens geológicas, poços de mineração e obras civis, em condições climáticas e ambientes adversos. O equipamento compreende uma série de elementos interligados, que são a sonda e a corda, unidos por um conector semipermanente, e um mosquetão com sistema *Screw Lock* conectado à outra ponta da corda e ao cinto de segurança do operador, ou em local seguro, de maneira a evitar a queda do equipamento dentro do furo.

Do ponto de vista técnico, embora exista uma ou outra similaridade operacional entre o desviómetro desenvolvido nesta investigação, inclinómetros, e demais equipamentos de medição de desvio, existe uma notável diferença entre eles. Em termos gerais, um inclinómetro pode ser definido como um instrumento usado para medir a inclinação de um segmento num plano em relação à horizontal ou vertical, ou ainda, em relação ao seu eixo, quer seja radial, longitudinal ou axial. Ou seja, para definir a geometria de um furo no espaço com um inclinómetro, é necessário obter duas medidas por furo, de maneira a reproduzir dois planos ortogonais entre si dispostos num tubo inclinométrico, enquanto que o desviómetro desenvolvido pode ser considerado como um

equipamento que produz resultados de uma única medida, em qualquer direção, realizada no espaço. Além disto, os equipamentos pesquisados, sendo alguns descritos no capítulo 3 e anexo II, possuem limitações operacionais, de medições (limite angulares de faixa ou alcance), e algumas complexidades que tornam inviáveis seus usos em operações simples para medidas de desvio em desmonte, sondagens de rochas ou obras civis.

Assim sendo, com base nesta pesquisa, para, além de desenvolver e apresentar um protótipo, procuramos também introduzir e popularizar no meio técnico e científico sua denominação aqui proposta, ou seja, os termos “desviômetro”, “desviómetro” e “*deviometer*”, cuja designação pode ser definida como equipamento para avaliação geométrica de furos, notadamente para medição de desvios, aplicado no campo da engenharia, nomeadamente em desmonte de rochas, que ao ser guiado ao longo de um furo num único sentido, em intervalos predefinidos, possibilita realizar medidas e determinar a orientação e a inclinação real da geometria de um furo, qualquer que seja sua direção (360° - orientação absoluta).

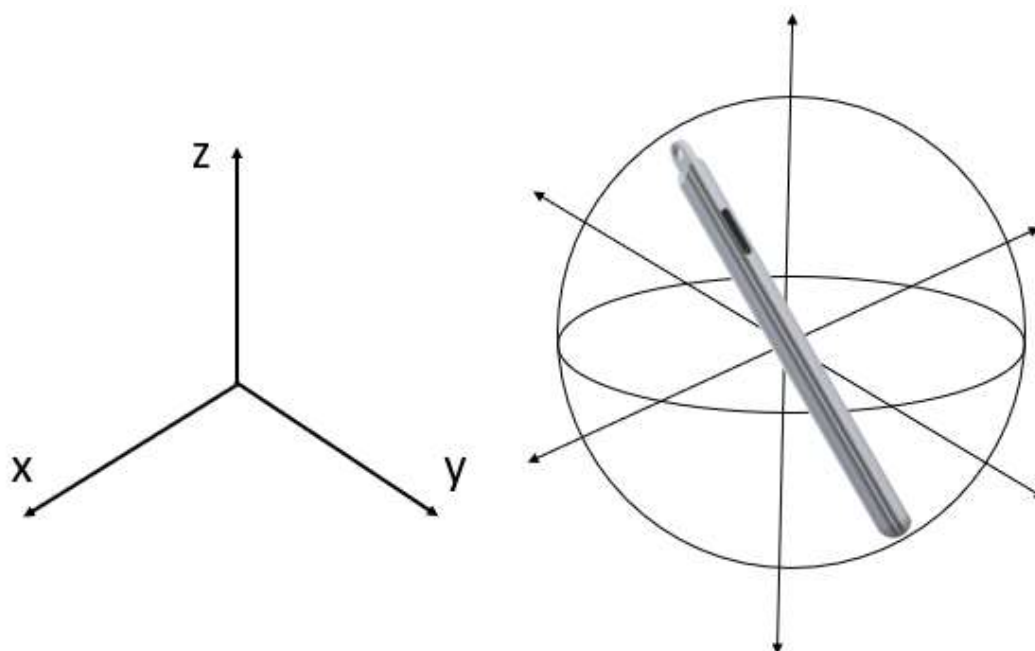


Figura 45 – Esquema operacional de medição do desviômetro: todas as direções e sentido (orientação absoluta 360°)

Podemos resumir as principais características técnicas, cujos detalhes serão descritos nos capítulos posteriores, que tornam o desviômetro desenvolvido como um equipamento inovador, da seguinte forma:

- O desviômetro possui um conjunto de sensores (magnetômetro, acelerômetro e giroscópio) que juntos, compõem o núcleo do equipamento. Estes foram programados para medir ângulos, inclinações e azimute em todas as direções (360°. Orientação absoluta);
- Conexão *Bluetooth* 4.2 que facilita a ativação dos comandos e a transmissão dos dados obtidos;
- Conexão direta com o aplicativo permite a transmissão sem fios dos dados captados para a nuvem, por e-mail ou redes sociais, dando acesso imediato em qualquer lugar do mundo ao engenheiro de mineração responsável pela supervisão do projeto;
- Indicador LED⁶¹ para visualização das condições da sonda;
- Sonda ativada por sensor de movimento e desligada remotamente através da aplicação;
- Sistema de modo “Soneca”, caso ligada e não utilizada;
- Carregamento por cabo USB 2.0 USB-C 3.1, adaptável para ficha residencial e para carro;
- Sistema de auto calibração;
- Sistema de determinação de referência da orientação do furo utilizando a sonda, independentemente do campo magnético e do sensor magnetômetro (bússola);
- Fácil e rápida montagem e acoplamento do cabo, permitindo assim maior agilidade no campo;

⁶¹ *Light Emitting Diode* ou Diodo Emissor de Luz

- Aplicativo desenvolvido para controlar e gerenciar a sonda, receber e editar⁶² projetos *online* ou *offline*, armazenar ou compartilhar as informações recebidas pela sonda;
- Uso de corda como meio de suporte/tração da sonda, com inédito sistema de cores e número de visualização da corda.

As figuras 46 e 47 mostram uns dos inúmeros registros de testes dos protótipos em furo descendentes (*downholes*) e ascendentes (*upholes*), tanto em minas a céu aberto como em minas subterrâneas. Como será demonstrado nos capítulos 8 e 9, o desviômetro foi testado essencialmente em furos descendentes em minas a céu aberto, devido a grande quantidade e fácil acesso que este investigador teve em pedreiras e minas com esta característica visitadas na Europa.



Figura 46 – Alguns dos registros dos vários testes positivos do desviômetro em furos descendentes, em mina subterrânea a pedreira a céu aberto (acervo do autor)

⁶² Com algumas limitações

Todavia, como mostrado na figura 47, o desviômetro funcionou muito bem em furos ascendentes, informação esta baseado no testemunho do Gerente Técnico em Mineração da Forcit Finlândia, Jarkko Manninen⁶³, conforme sua mensagem e imagem enviados pelo aplicativo *WhatsApp*:

“...the guys⁶⁴ in north (Finland) connected the equipment (deviometer) in charging unit⁶⁵ and (they’re) measuring 33m upholes in the tunnel. Works great! (That) wouldn’t be possible with any other device⁶⁶” (sic).



Figura 47 – Registro do uso do desviômetro num furo ascendente de uma obra subterrânea (foto: Jarkko Manninen, Forcit Finlândia)

Em março deste ano estava programada a nossa 3^a ida até a Finlândia e Suécia, para testar, junto com os técnicos da *Forcit International*, o protótipo do desviômetro em minas de rochas com minerais ferromagnéticos e obras subterrâneas. Infelizmente, por conta da pandemia da Covid-19 que se alastrou

⁶³ Engenheiro de Minas com vários anos de experiência: um dos muitos testadores e usuários dos protótipos desenvolvidos

⁶⁴ Equipe Técnica da Forcit

⁶⁵ Unidade de bombeamento de emulsões explosivas

⁶⁶ Nesta última frase ele se refere ao fato de ter utilizado o mesmo desviômetro para medir furos ascendentes e descendentes, tanto em minas a céu aberto quanto em obras subterrâneas

no mesmo período, isto não foi possível. O propósito destes testes seria adquirir dados que serviriam para alimentar esta investigação, quer seja para própria demonstração dos testes realizados em furos ascendentes, realização de estudos estatísticos, matemáticos, ou até mesmo como uma tentativa de validação deste trabalho, como os mostrados nos capítulos 8 e 9.

Entretanto, foram solicitados, via correio eletrónico, os seguintes dados e informações:

- Descrição da mina;
- Descrição da operação (plano de perfuração, pega de fogo, relatório de detonação);
- Ficheiros com os dados coletados pelo desviómetro;
- Fotos e vídeos (se disponível);

Até a conclusão deste trabalho, não obtivemos resposta positiva à nossa solicitação. Além disto, por força de contrato, a empresa *Forcit* não pode disponibilizar os dados do uso do equipamento na mina, sem a devida autorização de seu cliente. De acordo com o CEO da *Forcit International*, Tomi Kouvonen, os responsáveis pela mina e clientes da *Forcit* autorizarão o envio de dados apenas para fins académicos (esta investigação, estudos de caso ou artigos científicos), e desde que sejam respeitados direitos autorais e sigilos industriais. Entretanto, será coletado novos dados para serem compartilhados com este investigador, mas o cliente minerador necessitar ler o resultado e informações produzidas para sua aprovação final e permissão para publicação em todos os meios⁶⁷. Caso as informações sobre este ou outra utilização do desviómetro em furos ascendentes seja disponibilizado após a conclusão deste trabalho, ficará sugerido como trabalho futuro a realização de um estudo de caso ou um artigo científico sobre o tema. Doravante, todos os testes para análise e validação do equipamento foram oriundos de furos descendentes, conforme descritos nos capítulos acima citados.

⁶⁷ Informação enviada por correio eletrónico em 29/09/2020

5 – COMPONENTES DO DESVIÓMETRO: PROJETOS UNITÁRIOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

O conjunto de unidades que constituem o equipamento para avaliação de desvios de furos, que propomos denominar de desviómetro, foi pensado para que sua operação seja rápida, fácil de usar, mantendo a precisão das medidas dentro de parâmetros rigorosos e muito bem definidos, com a transmissão das informações de forma segura, disponíveis para serem enviadas em tempo real a qualquer lugar, com a finalidade de serem incorporadas em projetos de mineração e obras civis. O desenvolvimento do equipamento foi organizado em várias fases⁶⁸. No período de pesquisa, foram investigados os principais elementos necessários para obter um conjunto eficaz do ponto de vista da eletrônica, invólucro (sonda)⁶⁹, sistema de impermeabilização, tecnologia, aplicação para telefone, acessórios e experiência dos utilizadores. Foram as orientações recolhidas na pesquisa que serviram de orientação à fase de desenvolvimento dos vários protótipos criados. Durante a fase de projeto e testes, esses sucessivos protótipos foram testados e projetados até a definição de um equipamento próximo do que podemos considerar ótimo. A seguir, serão apresentadas as características gerais do equipamento, ações levadas a cabo durante a fase de desenvolvimento e explicações dos principais componentes do protótipo a que se chegou.

⁶⁸ Pesquisa, desenvolvimento e testes

⁶⁹ Neste capítulo sempre que se falar em invólucro, o leitor deve ter em mente que se trata apenas da proteção, envoltório ou revestimento dos eletrônicos. A sonda se refere ao conjunto invólucro mais eletrônicos

5.1 – Histórico

O equipamento aqui apresentado foi inicialmente pensado em ser utilizado apenas em monitoramento de barragens, como uma espécie de um novo inclinômetro ou “inclinômetro sem rodas”. Todavia, devido a uma série de fatores no início da investigação, dentre eles, a

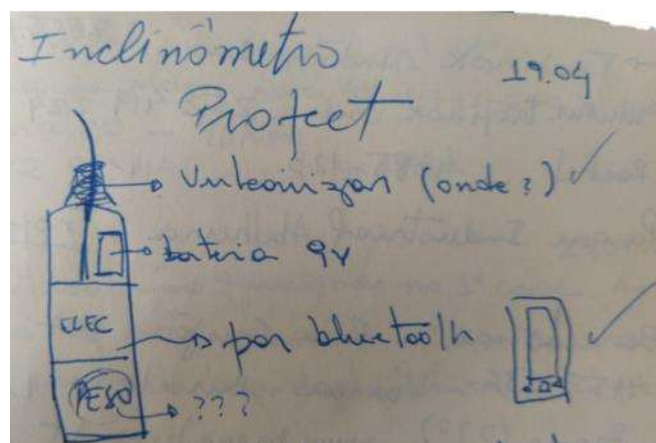


Figura 48 – Primeiro esboço do “inclinômetro sem rodas”: ideia inicial. Abril de 2018 (acervo do autor)

falta de recursos técnico-financeiros, e locais com barragens em funcionamento em Portugal para testes, a pesquisa foi direcionada para o uso do equipamento em minas e pedreiras. Sua utilização em monitoramento de barragens de rejeito restará como trabalho futuro, e sua aplicação poderá ser estendida à outras áreas.



Figura 49 – Protótipos #2 (esq.) e #4 (dir.): únicas tentativas de transmissão de dados por cabo (acervo do autor)

O plano original era que a transmissão dos dados entre a sonda e a unidade controladora fosse realizada por meio de um cabo elétrico. Isto chegou a ser prototipado (fig. 49), contudo, como este método está presente na maioria dos equipamentos já firmados no mercado, como demonstrado no capítulo 3 e anexo II, esta ideia foi descartada. Repetir esta tecnologia não traria nenhuma novidade e atratividade ao protótipo, e por consequência, à investigação. Além disto, testes realizados por este pesquisador e os vários usuários que obtivemos contato

comprovaram que equipamentos que dependem de cabos elétricos como meio de guiar a sonda tornam seu uso mais árduo. Assim, a pesquisa foi direcionada para o desenvolvimento de um dispositivo sem cabos elétricos, onde a transmissão dos dados fosse realizada através de radiofrequência ou tecnologia similar, de maneira a tornar a experiência do usuário mais prática e reduzir tempo de operação em campo. Como veremos mais adiante no tópico 5.4, a corda desenvolvida em substituição do cabo elétrico serve apenas como meio de tração da sonda, tornando mais prático e rápido o uso do desviômetro.

Antes de se chegar ao material adequado para construção da sonda, de maneira que a tornasse resistente e, acima de tudo, barato, foram construídas outros protótipos de sondas, dentre eles, alguns experimentos fracassados derivados do uso de plástico e alumínio, até o aço inoxidável ser escolhido como material ideal e definitivo por suas características ímpares. Segue um breve relato sobre os materiais utilizados nos primeiros protótipos:

Invólucro #1 – Feito de tubo de plástico. Apesar de o plástico ser um material de baixíssimo custo, este tubo foi rapidamente descartado, tendo em vista sua fragilidade, e principalmente, pela tendência mundial de materiais plásticos entrarem em desuso, por este ser um dos “vilões” da vez no tocante à poluição ambiental (Lemos, 2019).



Figura 50 – Da esquerda para a direita: protótipos dos primeiros invólucros nºs 1 a 5 (acervo do autor)

Invólucro #2 – Literalmente um tubo de aspirador de pó adaptado. Foi utilizado apenas em laboratório para testes dos primeiros eletrónicos, sensores, sistema de alimentação (bateria), programação e análise de transmissão dos dados sem fio (figuras 50 e 51). Esta sonda, juntamente com a idéia desta investigação, foram apresentados ao público durante o evento 3ª Jornadas do GEM/FEUP⁷⁰ 2018.

Invólucro #3 – Primeiro protótipo feito em aço inoxidável escovado utilizado apenas para testes de conexão sem fio entre os eletrónicos e a unidade de controle e programação (*smartphones* e PC).



Figura 51 – Protótipo da sonda #1 com o invólucro #2: tubo de aspirador de pó adaptado com o primeiro sistema eletrónico (acervo do autor)

Invólucro #4 – Também em aço inoxidável escovado, foi o primeiro protótipo com sistema de vedação para ser testado em campo (fig. 52). Possuía 02 peças rosqueáveis no topo: um para entrada de cabo elétrico para conexão do sistema eletrónico à uma eventual unidade controladora, que não chegou a ser construída, e outra para encaixe de uma corda entrelaçada (transmissão dos dados sem fio). Este foi o invólucro utilizado no protótipo da sonda #2, testado várias vezes em campo, majoritariamente no CELaMi⁷¹. Foi com este protótipo que começamos a observar os primeiros (e grandes)

problemas que foram objetos de novas pesquisas, replanejamento e desenvolvimento do equipamento: o sistema de vedação inadequado, pois não foi devidamente planeado e dimensionado, tanto no encaixe das peças que

⁷⁰ Grupo de Engenharia de Minas: organização estudantil do Departamento de Engenharia de Minas da FEUP

⁷¹ Campo Experimental em Lavra de Minas, localizado na Pedreira da Madalena, Vila Nova de Gaia/Portugal

compõe o corpo do invólucro, como a peça rosqueável para uso de cabo elétrico para transmissão dos dados (figuras 49 e 52), que permitiram a entrada de água no interior da sonda, causando vários curtos-circuitos nos protótipos do sistema eletrônico; e o sistema de tração sem o cabo elétrico, onde foi utilizado uma corda comum entrelaçada, que não correspondeu aos esforços submetidos (tração e abrasão), além de se desentrelaçar. O estudo sobre o meio de tração adequado encontra-se no tópico 5.4 deste trabalho.



Figura 52 – Invólucro #4 com suas 2 peças para adaptação da sonda para uso com cabo ou corda

Invólucro #5 – Primeiro protótipo fabricado em aço inoxidável AISI 304. Este foi o material utilizado até o protótipo final do desviômetro.

Invólucro #6 – Construída totalmente em alumínio (figuras 53 e 54), foi a partir deste protótipo onde verificou-se que o material utilizado no fabrico da sonda influenciaria em seu percurso dentro de furos com presença de fluídos. Esta sonda flutuava quando testada em furos ou locais que continham água⁷², não chegando ao fundo destes ambientes, devido, por exemplo, à relativa baixa densidade do alumínio⁷³ - 2,70 g/cm³ (Costa, 2006). Para contornar esta situação, seria necessário aumentar as dimensões da sonda, para que, com este material, a sonda conseguisse resistir à uma pressão hidrostática contrária à trajetória do equipamento. Esta opção não foi levada adiante, pois a sonda foi planeada para ter no máximo 40 mm de diâmetro e ±50 cm de comprimento. Outra possível solução para resolver o problema da flutuação seria preencher o interior da sonda com material mais denso, o que o tornaria mais caro. Além disto, um dos problemas observados foi a má qualidade da transmissão de dados via tecnologia *Bluetooth*. Mesmo utilizando um bom sistema de antena e módulo de comunicação *Bluetooth*⁷⁴, era necessário encostar a sonda ao aparelho celular com a aplicação de controle para os dados serem transmitidos. Após pesquisas, verificamos que o alumínio é um material utilizado em blindagens de radiofrequência⁷⁵, sendo este o possível motivo da interferência da capacidade de transmissão de dados da sonda. Ademais, com o alumínio a sonda não resistiu aos primeiros impactos nos testes (fig. 54.b), fazendo assim com que o invólucro em alumínio fosse descartado diante de todo este cenário, e os protótipos voltassem a ser fabricados em aço inoxidável, material este mais resistente, denso, e praticamente sobre o mesmo preço.



Figura 53 –
Invólucro #6

⁷² Além tanques e câmaras, este pesquisador por várias vezes realizou testes de vedação e funcionamento dos protótipos às margens do rio Douro, na cidade do Porto

⁷³ À título de comparação, a densidade do aço inox é igual à 7,85 g/cm³ (Hosford, 2012)

⁷⁴ Ver tópico 5.3.2 - Memória e Comunicação por *Bluetooth*

⁷⁵ Blindagem de radiofrequência é uma técnica muito comum utilizada em salas de exames de imagens por ressonância magnética, para blindar o ambiente de interferências no campo magnético onde estes equipamentos são instalados (Souza, 2018)



Figura 54 – Invólucro #6 em alumínio: a) desmontada; b) deformidade logo no primeiro impacto

5.2 – Mecânica do Invólucro Metálico da Sonda

O funcionamento de um equipamento de medição de desvio de furos consiste basicamente num conjunto de componentes eletrônicos e sensores que combinados, calculam a geometria de um furo. Por serem constituídos por elementos frágeis, os sensores e demais componentes eletrônicos precisam de uma proteção resistente às ações de contato, impacto, atrito e de fluídos, para permanecerem intactos e em funcionamento quando introduzidos através de um furo.

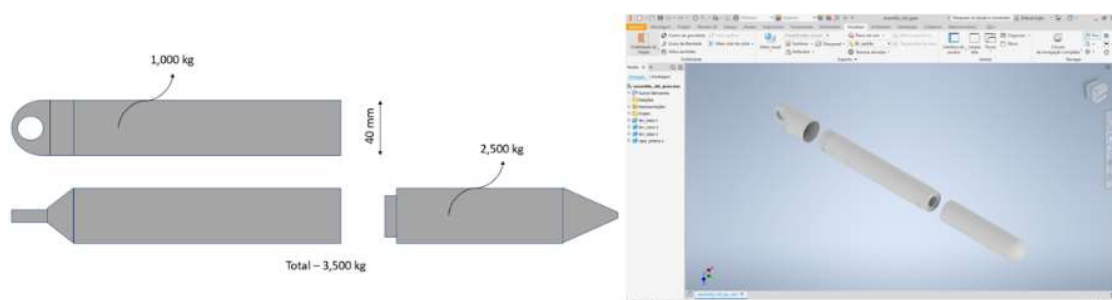


Figura 55 – a) um dos primeiros esquemas do invólucro feito em Power Point, e b) exemplo de uma das versões feitas em ambiente Auto Desk Inventor Profissional (arte do autor)

A figura e tabela a seguir detalham os componentes do invólucro final:

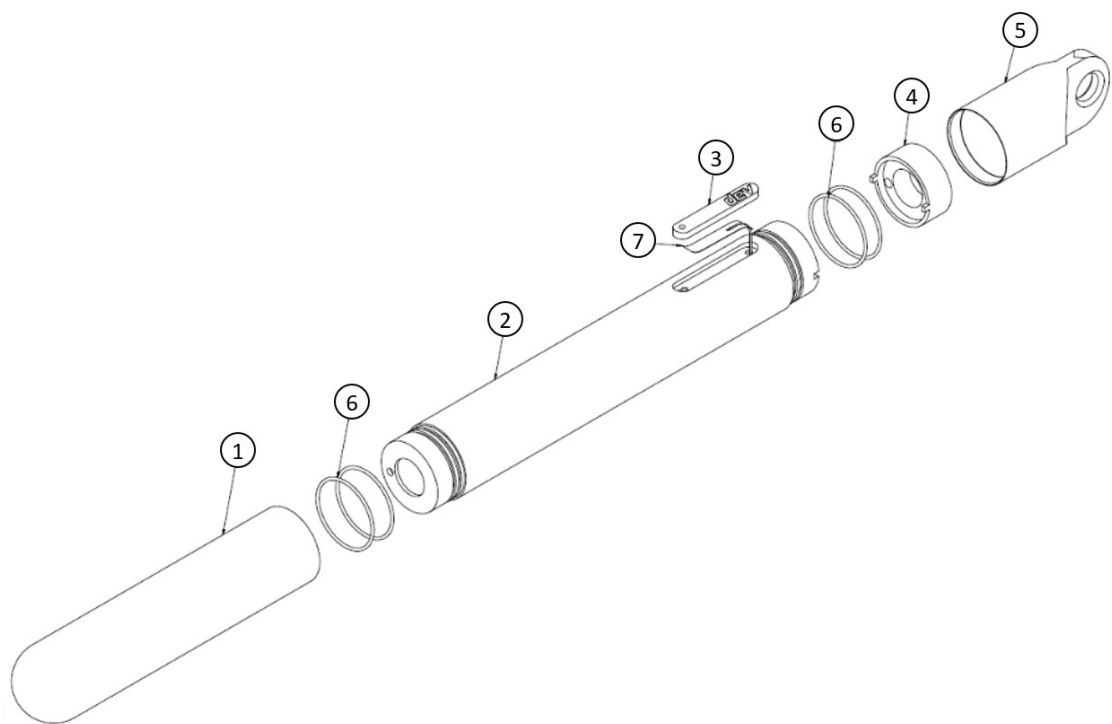


Figura 56 – Detalhamento do invólucro metálico final e seus complementos

1	Ponta Maciça	5	Suporte do Meio de Tração
2	Receptáculo dos Eletrônicos	6	Anéis de Vedação (O-Rings)
3	Capa Plástica de Proteção da Antena	7	Antena Flexível tipo Fita Aderente
4	Sistema de Travamento		

Tabela 10 – Denominação das peças que compões o invólucro do desviómetro

De seguida, vamos apresentar as características físicas do invólucro do desviómetro.

5.2.1 – Material Constituinte: Aço Inox AISI 304

As cápsulas ou sondas da maioria dos principais tipos de equipamentos de medição são construídas em aço inoxidável (popularmente conhecido como aço inox) (Zlatunic, 2018). Outros tipos de sondas utilizadas em mineração também são construídos em aço inox, como por exemplo, os inclinómetros ou as sondas (penetrómetros) estudadas por Silva no campo da geotecnia (2008), bem como alguns exemplos citados no capítulo 3 do presente trabalho. O aço inoxidável possui uma ótima resistência à corrosão e é não magnético. É composto por uma liga de aço constituída em sua maioria por ferro, 10,5% à

11,5% de cromo, carbono, e outros elementos como níquel e molibdênio, a depender do tipo do aço e sua aplicação. Esta composição química cria uma camada passiva sobre a superfície do aço inox, devido a combinação extremamente rápida e instantânea do oxigênio do ar com o cromo da liga, num constante processo de proteção contra a oxidação do ferro (corrosão ou “ferrugem”) (Hosford, 2012). Logo, a capacidade física do aço inox de estar permanentemente “se curando” contra oxidação foi de considerável importância na decisão de construir o invólucro com este material, tendo em vista que o case, devido ao atrito e impactos com a parede e o fundo do furo, estará sempre criando ranhuras e avarias. Assim, esta famosa propriedade de resistência à corrosão confere uma vida mais longa do que outros materiais e elementos, sem perder suas propriedades. Ademais, apesar desta sua principal característica, existem várias outras vantagens do uso do aço inoxidável, tais como (Abinox, 2006 e Faustino, 2009):

- Resistência física (mecânica) igual ou maior que o aço comum;
- Facilidade de limpeza;
- Baixa tensão superficial;
- Aparência higiênica;
- Material inerte (não reage ao contato com outros materiais);
- Alta durabilidade e prazo de validade
- Facilidade de moldagem e soldagem;
- Estabilidade em temperaturas extremas;
- Resistência à temperaturas criogênicas (abaixo de 0 °C);
- Resistência à variações bruscas de temperatura;
- Beleza visual (modernidade, limpeza e brilho);
- Equilibrada relação custo benefício;
- Material reciclável;
- Não magnético.

Existem cinco tipos principais de aços inoxidáveis: ferrítico, martensítico, duplex, endurecível por precipitação e austenítico. Neste último tipo, a liga é composta basicamente por ferro, com teores de cromo, níquel e carbono (baixa quantidade). Conforme estabelecido pela *American Institute of Steel and Iron*

(AISI), a quantidade dos elementos metálicos designam as ligas de aços inoxidáveis austeníticos da seguinte forma:

Designação (AISI nº)	%Cr	%Ni	C (máx %)
302	18	9	0,15
304	19	9,3	0,08
304L	19	10	0,03
308	20	11	0,08
309	23	13,5	0,20
310	25	20,5	0,25

Tabela 11 – Designação dos tipos de aço inox austeníticos determinado pelo sistema AISI, de acordo com a quantidade dos elementos metálicos (Hosford, 2012)

O aço inox AISI 304 foi considerado a melhor opção para desenvolvimento do desviómetro dentre os vários tipos de aço inox existentes, tendo em vista sua ótima relação custo benefício. Ligas de aço AISI 304 são mais conhecidos e amplamente utilizados, o que deixa seu custo mais baixo. Apresentam boas propriedades mecânicas e trabalhabilidade à frio. São indicados para ambientes com variações térmicas e agressivos, como em minas e pedreiras. A liga do aço inox AISI 304 apresenta baixíssimo ou quase nenhum teor de ferrita, tornando-o um elemento não magnético (Abinox, 2006), característica esta de relevante importância no desenvolvimento do desviómetro, por eliminar a possibilidade de auto-interferência no sensor magnetómetro do equipamento.

O invólucro do desviómetro também pode ser manufaturado em aço inoxidável AISI 316, tendo em vista que esta liga possui a mesma matriz do AISI 304, com a adição em aproximadamente 2,5% de molibidênio, permitindo assim que seja utilizado em situações mais suscetíveis à corrosão por pite⁷⁶, particularmente em locais com maresia ou presença de sal, como obras no litoral, praia ou minas de rocha salinas (como minas de potássio, etc.) (Hosford, 2012), e locais com alta exposição química (Ribeiro, et al., 2009).

⁷⁶ Corrosão perfurante, sob tensão, ou dissolução extremamente localizada, que afeta pequenas áreas, gerando assim cavidades, defeitos, sulcos, relevos e poros em uma superfície, em sua maioria em formato de “poços”, que ocorrem em alta velocidade de propagação devido à exposição de um metal em ambientes agressivos (Ribeiro, et al., 2009).

5.2.2 – Configuração Dimensional do Invólucro

5.2.2.a – Formato



Figura 57 – Variações de pontas maciças das sondas experimentadas para superar a tensão superficial e o empuxo de fluídos nos furos

O formato da invólucro foi projetado para uma resposta cinética favorável sob ação da gravidade na sua descida ao fundo do furo, e para possuir peso suficiente para superar a tensão superficial e o empuxo de fluídos que eventualmente estejam ali presentes⁷⁷. Existindo fluído no interior do furo, a descida do equipamento pode ser comprometida em função da densidade e viscosidade do meio, diminuindo sua energia cinética, podendo até se tornar

um obstáculo. Como exemplo citamos o caso do invólucro #6 feito em alumínio (figuras 53 e 54). Para contornar este problema, 5 tipos de pontas foram desenhadas e prototipadas afim de encontrar a melhor forma de vencer as forças atuantes nos fluídos. Foram eles: cônica com ponta arredondada, tronco de cone, plana, forma de projétil e arredondada (figuras 57 e 59).

As pontas total ou parcialmente planas causam uma redução considerável na hidrodinâmica da sonda, tendo em vista o aumento da força perpendicular atuante na direção da área transversal da ponta cilíndrica do involucro quando submetido ao deslocamento em um meio hidrostático (Halliday, Resnick, & Walker, 2011), e devido aos seus elevados coeficientes de arrasto (Rosa, 1999) (tabela 12). Intuitivamente pode-se crer que as pontas em forma cônica e de projétil com formato pontiagudo causam menos arrasto em um meio fluído, o que não é verdade, como mostraremos adiante. A decisão para definir a forma final do desviômetro com ponta maciça e de formato arredondado (fig. 58) foi tomada com base na geometria aproximada do tipo torpedo, cujo corpo cilíndrico possui uma elevada razão comprimento/diâmetro, proporcionando

⁷⁷ Consideramos na investigação um fluído qualquer em repouso, minimamente viscoso por conta da força de arrasto, e de densidade constante.

assim um baixo coeficiente de arraste hidrodinâmico⁷⁸ (Bezerra, Martins, & Andrade, 2017), adaptado ao experimento de Rosa (1999) sobre resistência de fluídos, conforme demonstrado a seguir.

Tendo em vista que a sonda realizará movimentos com direção e sentido próximos da retilidade, foi considerado nesta investigação que esta sofrerá apenas força de arraste⁷⁹ quando sujeita à meios fluídos. A força de arraste (F_a) à que um objeto como o desviômetro é submetido dividi-se em 2 partes⁸⁰: arrasto de atrito ($F_{aatrito}$) e arrasto de forma (F_{aforma}) (Equação 5). O arrasto de atrito é resultado do produto das tensões de viscosidade que atuam na área superficial total de um objeto. A outra fração é o arraste de forma, que é o resultado do produto da pressão que age sobre a superfície total do corpo, e a projeção da área em um plano perpendicular à direção do movimento (área frontal às linhas hidrodinâmicas). Em escoamentos e movimentos em meios fluídos em níveis subsônicos, o arrasto de atrito é superado pelo arrasto de forma numa ordem elevada de grandeza (Rosa, 1999), ou seja, os dois tipo de arraste que compõem a força de arraste total só são consideradas juntas quando se trata de perfis de corpos submetidos à alta velocidade ou quando são veículos que precisam realizar manobras (projéteis balísticos, torpedos, foguetes, submarinos, etc.), situação onde é gerado região de turbulência atrás do objeto. No caso do desviômetro, que estará submetido apenas a velocidades manuais humanas, consideramos apenas o arraste de forma.

$$F_a = F_{aforma} + F_{aatrito} + F_{aonda} \quad \text{Equação 5}$$

$$F_a = F_{aforma} + F_{aatrito} + F_{aonda}$$

$$F_a = F_{aforma}$$

⁷⁸ Ressalta-se que não se tentou replicar a hidrodinâmica de torpedos, e sim utilizar os princípios geométricos que regem o formato deste tipo de objeto, tendo em vista que as condições ambientais, físicas, forças atuantes e hidrocínética a que o desviômetro e torpedos são submetidos são muito diferentes.

⁷⁹ Força resistiva de um meio fluído (Halliday, Resnick, & Walker, 2011).

⁸⁰ Desconsideramos aqui a força de arraste de onda (F_{aonda}), que ocorre quando um objeto se desloca paralelamente próximo da superfície de um fluído, que não é o caso do equipamento desenvolvido (Halliday, Resnick, & Walker, 2011).

Na sua forma adimensional, a força de arraste é expressa pelo coeficiente de arraste. De acordo com Rosa (1999), sua definição é a seguinte:

$$C_a = \frac{F_a}{(\frac{1}{2})\rho v^2 A} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

C_a = Coeficiente de Arraste (adimensional)

F_a = Força de Arraste (N)

ρ = Densidade do Fluido (kg/m³)

v = Velocidade ao que um corpo é submetido (m/s)

A = Área do corpo transversal às linhas hidrodinâmicas (m²)

A representação das relações entre o coeficiente de arraste e suas grandezas físicas é fundamental para entender como o formato final da sonda do desviômetro foi definido. Esta grandeza adimensional depende exclusivamente do formato do objeto, por ser inversamente proporcional à área do corpo transversal ao fluxo das linhas de fluido. O formato de um objeto altera a maneira como o coeficiente de arraste atua sobre ele. Conforme informado por Rosa (1999), os valores do coeficiente de arrasto (C_a) para corpos de formas diversas são:

Formato Aproximado do Objeto	C_a	Fig. 58
Cilíndrico	2,00	a
Cilíndrico com ponta esférica/arredondada	1,10	b
Cilíndrico com ponta esférica/arredondada e traseira delgada	0,15	c

Tabela 12 – Coeficientes de arrasto para objetos com diferentes geometrias (Rosa, 1999)

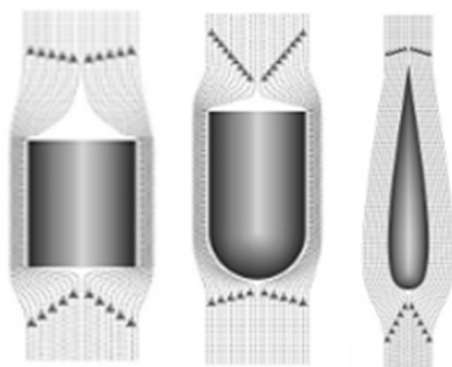


Figura 58 – Formato dos objetos "a", "b" e "c" respectivamente. Imagem adaptada de Helerbrock (s.d.) e Rosa (1999). Ilustração fora de escala

A figura 58 mostra os 3 objetos indicados na Tabela 12. Apesar de os corpos estarem fora de escala, para melhor compreensão deve-se considerar que eles possuem a mesma área frontal e superfície total não delgada. Tomando-se o objeto "a" como referência, ao se arredondar sua frente, de maneira a resultar no formato do objeto "b", o coeficiente de arraste reduz em 45%. Somado a isto, a forma

arredondada da frente dos objetos "b" e "c" possui menos pontos de pressão e distribuição uniforme. Logicamente que a forma exterior ideal seria a do objeto "c", com a traseira delgada. Entretanto, reitera-se que aqui não estamos tratando de corpos submetidos a altas forças de arraste, tal quais são submetidos projéteis, asas de avião ou um nadador em uma correnteza. Logo, no planeamento do desviômetro, desconsideramos o formato do objeto "c", tendo em vista o acima relatado, e considerando a necessidade de introduzir na parte de trás do invólucro um apoio para o meio de tração.

A figura 59 mostra as 3 partes que compõem o formato final do invólucro metálico. São elas: ponta maciça arredondada, receptáculo dos eletrônicos e suporte para o meio de tração.

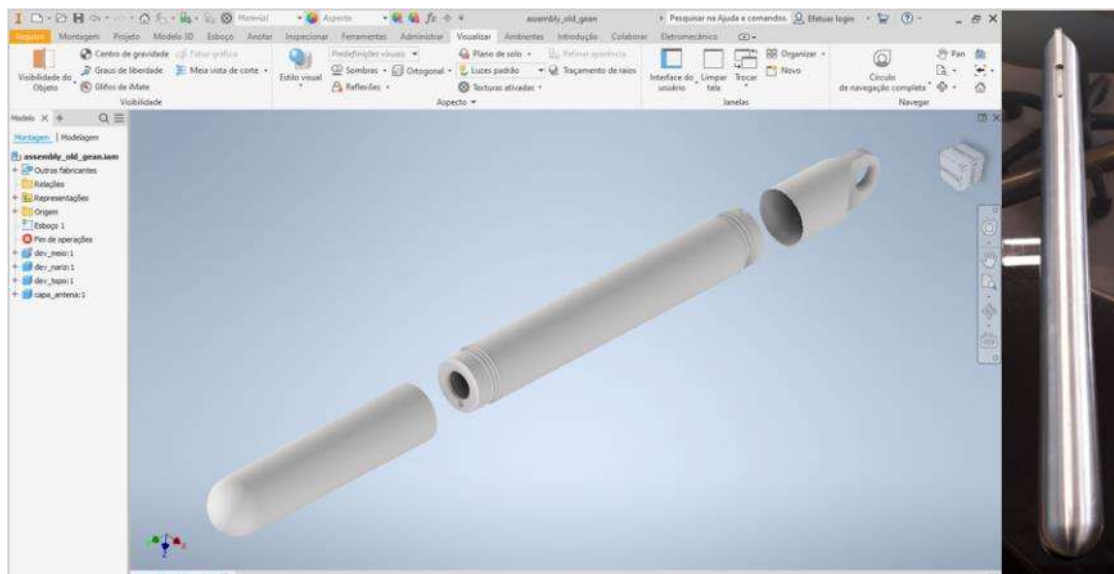


Figura 59 – Formato final do invólucro com ponta cilíndrica baseado no princípio do coeficiente de arrasto e geometria do tipo torpedo, com as 3 partes que o compõem: ponta maciça arredondada, receptáculo dos eletrônicos e suporte para o meio de tração

Soma-se aos fatores geométricos na escolha do formato do invólucro conforme expostos acima, o fator econômico. A ponta maciça em formato arredondado é de fácil maquinação, tornando seu custo de fabricação mais baixo que as pontas projetadas na figura 56. Oferecer um equipamento à baixo custo é um dos princípios desta investigação.

Todos os invólucros foram projetados majoritariamente em ambiente do Auto Desk Inventor Profissional 2020/2021⁸¹. Não obstante, não obtivemos meios de simular as propriedades e comportamento dos protótipos em meios fluídos por ferramentas computacionais ou modelos matemáticos experimentais. Todavia, conforme observado por Sousa (2019) e os diversos autores referenciados por ele em seu trabalho, normalmente quando se investiga força de arrasto e limites hidrodinâmicos sobre corpos imersos, só é necessário a aquisição de parâmetros experimentais ou numéricos quando a geometria, comportamento do corpo e o meio fluído são complexos, o que não se aplica ao desviômetro desenvolvido.

⁸¹ Esta investigação foi realizada com as versões gratuitas para estudantes e pesquisadores, cujo recursos e funções são limitados

Definido o formato do invólucro, passamos a determinar as dimensões ideais da sonda, ou seja, a melhor relação entre o seu comprimento e diâmetro.

5.2.2.b – Dimensões: Comprimento e Diâmetro

A sonda do desviómetro foi planeada para ter as mínimas dimensões possíveis, de maneira a assegurar espaço suficientemente bastante para abrigar o sistema eletrónico (também dimensionado para ser construído com menor geometria possível⁸²), possuir um suporte para o meio de tração (figura 59), e ter densidade⁸³ para, em conjunto com a hidrodinâmica planeada, vencerem a trajetória do interior de um furo que eventualmente esteja preenchidos com água e/ou lama. O diâmetro da sonda foi definido com base em dois parâmetros: diâmetros teóricos de furos e média dos diâmetros de 4 relevantes equipamentos portáteis de medição de desvio de furos, conforme explicado a seguir.

Com relação à diâmetros teóricos de furos, destacamos apenas os autores que consideramos especialistas no assunto em suas respectivas áreas, conforme verificado na vasta literatura técnica sobre perfuração de rochas, sondagens e observação de estruturas. Silva (2009) afirma que a definição de diâmetro teóricos de um furo varia bastante, a depender da sua finalidade. Em perfurações para aplicação de explosivos, vários fatores influenciam na escolha do diâmetro do furo, como por exemplo dimensões dos equipamentos de carregamento e transporte, fragmentação desejada, tipo de explosivo, etc. Ele relacionou os diâmetros de furos em desmonte de rochas de acordo com o uso desejado e tipos de coroas de perfuração, que podem variar entre 27 à 440 mm em minas a céu aberto e obras em geral, e entre 27 à 51 mm em minas subterrâneas e túneis, conforme demonstrado nas tabelas 13 e 14, sendo que para a abertura de seções de galerias menores que 10 m² nestes últimos tipos de obras referidos, utiliza-se perfuratrizes manuais. Desconsideraremos este tipo de equipamento, conforme explicado mais adiante.

⁸² Ver seção 5.3 – Sistema Eletrónico

⁸³ Ver próxima seção

**Valores de Máximos e Mínimos de Diâmetros de Furos em Minas a Céu
Aberto e Obras de Construção – Prof. Silva (2009)**

Ø 27 – 127 mm	Ø 80 – 216 mm	Ø 200 – 440 mm
		
		
		

Tabela 13 – Diâmetro dos furos com base no tipo de coroa e granulometria dos fragmentos de uma pilha. Adaptação de Silva (2009). Imagens das peças: Epiroc (2017). Fora de escala

**Valores de Máximos e Mínimos de Diâmetros de Furos em Seções
de Obras Subterrâneas – Prof. Silva (2009)**

Ø 27 – 40 mm	Ø 35 – 45 mm	Ø 38 – 51 mm
Área da Seção		
< 10 m ²	10 – 30 m ²	> 30 m ²

Tabela 14 – Diâmetro dos furos com base nas áreas de seções de galerias de obras subterrâneas e túneis. Adaptação de Silva (2009)

Bernaola, Castilla e Herrera (2013) afirmam que em furos realizados em rochas pelo método percussivo por martelo de superfície são utilizados geralmente brocas entre 25 à 125 mm. Já para martelo de fundo de furos (DTH), os diâmetros variam entre 80 à 200 mm. De acordo com os referidos autores, estes são os diâmetros ideais pelos dois métodos rotopercussivos, observando suas peculiaridades com relação à profundidade, conforme descrito na seção 2.3.4 do presente trabalho. Já as perfurações rotacionais para sondagens de rochas com extração de testemunhos possuem diâmetro de 50 à 200 mm. Ainda no campo de sondagens de furação à rotação para caracterização geotécnicas de rochas, Fernandes (2011) assume que o diâmetro dos furos desta técnica possuem os seguintes valores: 76, 86, 101 e 116 mm.

Consideramos que a obra *Manual de Perforación y Voladura de Rocas* (2003), de Jimeno, Llera & Urbina seja a fonte mais completa sobre perfuração na atualidade, não desmerecendo os ótimos trabalhos dos demais autores consultados nesta investigação. Baseado neste trabalho, foi possível relacionar de forma detalhada os diâmetros de furos aos métodos de perfuração e suas respectivas aplicações:

Método de Perforação	Martelo de Superfície													
	Martelo de Fundo													
	Rotativa com Tricônico													
Ø (mm)	22	33	38	41	51	64	76	89	127	152	230	300	381	
Aplicação	Perfuratriz Manual							Bancadas Altas/Grandes Produções						
	Bancadas Baixas							Bancadas Médias						

Tabela 15 – Diâmetro teórico dos furos relacionados ao método de perfuração e tipo de aplicação. Adaptado de Jimeno, Llera & Urbina (2003)

Com base nas tabelas 13 a 15, verifica-se que para abertura de furos com diâmetro menor que 41 mm são utilizados perfuratrizes manuais. Este tipo de equipamento é utilizado em pequenas e simples obras, desmonte secundário de maticos, furos de apoio, ventilação ou locais onde não é possível utilizar equipamentos de grande dimensões e complexos. Esta informação foi de suma importância para definição do diâmetro do deviómetro, pois entendemos que furos abertos por marteletes dispensam o uso de equipamentos de aferição de desvio. Logo, desconsideramos projetar o equipamento para aferir furos com dimensões menores que 42 mm.

Em várias seções deste trabalho tomamos como referência alguns equipamentos existentes no mercado. Para corroborar a definição do diâmetro para além dos diâmetros teóricos dos furos, analisamos as dimensões (comprimento *C* e diâmetro *Ø*) de 4 equipamentos de medição de desvio de furos portáteis, sendo os 3 primeiros os mais populares no mercado, e o último equipamento lançado no ano passado, conforme mostrado na tabela abaixo:

Equipamento	Sonda	
	Comprimento (mm)	Ø (mm)
Boretrak® de Barras	709,6	40
Boretrak® de Cabos sem Haste	480	38
Boretrak® de Cabos com Haste	1480	38
Pulsar® Blasthole Probe®	800	57
Robit® Sense	460	38
Média		42,2

Tabela 16 – Comprimento e diâmetro de 4 equipamentos de medição de desvios adotados como referência (Carlson, 2018; Ewer, 2018; e Robit, 2019)

Logo, com base nos especialistas em perfuração de rochas citados, notadamente Silva (2009), Jimeno, Llera & Urbina (2003), e ainda, considerando os diâmetros dos equipamentos listados na tabela 15, cuja média é de 42,2 mm, o diâmetro da sonda do desviômetro ficou definido em 40 mm, limitando assim que com o equipamento desenvolvido seja possível medir furos com diâmetros superiores à 42 mm.

Com relação ao comprimento da sonda do desviômetro, não tomamos como referência nenhum equipamento, pois, conforme se observa na tabela 16 e capítulo 3, esta dimensão das sondas varia de acordo com o modelo, fabricante e aplicação. Não encontramos evidências que comprovem qual o comprimento ideal de uma sonda. Assim, o comprimento da sonda do desviômetro foi projetado com base em 3 parâmetros: 1) no seu diâmetro, conforme definido acima; 2) no peso ideal conforme explicado na próxima seção; 3) e principalmente, na concepção final do sistema eletrônico e seu suporte. Assim, a mínima dimensão linear ótima possível do invólucro é a seguinte:

Peça	Comprimento (mm)	Diâmetro (Ø) mm
Ponta Maciça	187	40
Receptáculo dos Eletrônicos	220	
Suporte do Meio de Tração	85	
Invólucro Totalmente Montado (Partes rosqueadas e encaixadas)	492	

Tabela 17 – Dimensões finais das peças e totalidade do invólucro do desviômetro

O projeto final com todos os detalhes da geometria e dimensões das 3 partes do invólucro (ponta maciça arredondada, receptáculo dos eletrônicos e suporte para o meio de tração) como exposto nesta seção encontram-se no anexo IV.

5.2.3 – Peso da Sonda

Em contrapartida à hidrodinâmica do invólucro que culminou no seu formato final, levou-se consideração seu peso. Tomamos como desafio apresentar uma sonda mais leve possível em comparação aos principais equipamentos existentes no mercado, de maneira a permitir uma melhor experiência em seu uso por apenas um operador, de forma rápida e precisa, cujo peso em conjunto com o formato do invólucro sejam suficientes para vencer a resistência provocada pelos fluídos no furos. O primeiro passo foi verificar o peso dos 4 equipamentos que, mais uma vez, tomaremos como referência (tabelas 16 e 18). Levou-se em conta apenas suas respectivas sondas e meio de tração, dispensando-se as unidade de controle e outros acessórios. Na tabela a seguir é mostrado o peso total do conjunto dos equipamentos, que definimos como a soma do peso da sonda (invólucro mais eletrônicos) mais o peso de 1 metro do meio de tração:

Equipamento	Sonda	Meio de Tração		Conjunto
	Peso (kg)	Tipo	Peso (g/m)	Total (kg/m)
Boretrak® de Barras	3,20	Barras	400	3,600
Boretrak® de Cabos sem Haste	2,50	Cabo	50	2,550
Boretrak® de Cabos com Haste	3,46 ⁸⁴	Cabo	50	3,510
Pulsar© Blasthole Probe®	4,50	Cabo	86	4,586
Robit® Sense	1,057	Cabo	Sem Info	1,057 ⁸⁵
Médias	2,943			3,061

Tabela 18 – Peso de 4 equipamentos de medição de desvios adotados como referências (Carlson, 2018; Ewer, 2018; e Robit, 2019)

⁸⁴ O peso desta sonda pode aumentar, tendo em vista a haste auxiliar ser oca, permitindo assim a aplicação de materiais com densidades diversas em seu interior, consoante apontado na seção 3.2.1.b (Carlson Software Inc., 2018)

⁸⁵ Devido ao seu baixo peso, é necessário adaptar pesos extras em caso de furos com líquido em seu interior. Para mais informações sobre este equipamento, ver seção 3.2.6

Outro fator para definir o peso da sonda do desviómetro foi através de análise de propriedades físicas. Considerando um furo completamente cheio de um fluído, qual deve ser seu comprimento máximo de maneira que o peso da sonda do desviómetro vença esta coluna para chegar ao fundo deste furo, suportando toda carga do meio no qual será submetida? Um equipamento de medição pode ser submetido normalmente à furos e poços preenchidos total ou parcialmente com fluídos densos, como lamas, saumoras, ou fluídos de perfuração, dentre outros. Entretanto, para explicar fisicamente como os cálculos foram feitos, adotamos a água como fluído de referência, por ser um meio de densidade próxima dos fluídos referidos acima, universal e uniforme.

Durante a investigação, os protótipos do desviómetro foram testados em minas e pedreiras cujo comprimento máximo dos furos não ultrapassaram 35 metros, que em sua maioria estavam preenchidos total ou parcialmente com algum tipo de fluído. As sondas dos protótipos testado não tiveram problemas para alcançar todo o comprimento destes furos (com exceção dos 3 casos de ecravamento, que não decorreu devido à líquidos nos furos). Não foi possível coletar amostras para análise de densidade e outras propriedades dos fluídos no qual realizamos os testes. Todavia, conforme explicado, adotamos a água como meio fluído para o planejamento do invólucro. Tomamos como exemplo um furo hipotético qualquer com 100 metros completamente preenchido com água em repouso. O diâmetro do furo não foi levando em consideração, tendo em vista que a pressão hidrostática depende apenas da profundidade, densidade do meio fluído e da aceleração da gravidade, independentemente do volume e formato do recipiente, como comprovado a seguir e pela equação 13 (Curi, 2017):

$$p = \frac{F}{A}$$

Equação 7

Onde:

p = Pressão exercida pela coluna de água (Pa)

F = Força atuante (N)

A = Área (m²)

Considerando que $F = mg$ (Segunda Lei de Newton), onde:

Equação 8

m = Massa (kg)

g = Aceleração da Gravidade ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$)

Temos:

$$p = \frac{mg}{A}$$

A definição de densidade nos diz que:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Equação 9

Onde:

ρ = Densidade do Fluido (kg/m^3)

V = Volume (m^3)

Assim:

$$p = \frac{\rho Vg}{A}$$

$$p = \frac{\rho Ahg}{A}, \text{ considerando que } V = Ah, \text{ onde:}$$

Equação 10

h = Profundidade (m)

Então:

$$p = \frac{\rho Ahg}{A} = \rho gh$$

Equação 11

De acordo com o Teorema de Stevin (1548-1620, *apud* Curi, 2017), a diferença entre as pressões de dois pontos de um fluido em equilíbrio (Δp) é igual à:

$$\Delta p = \rho g \Delta h$$

Equação 12

E finalmente, considerando dois níveis, sendo eles a superfície e uma profundidade h qualquer, para se encontrar uma pressão p abaixo desta superfície com pressão atmosférica p_o , temos (Halliday *et al*, 2011):

$$p = p_o + \rho gh$$

Equação 13

A equação 13 corrobora que a pressão dentro do furo independe de qualquer dimensão horizontal. A partir dela, calculamos a pressão máxima a que a sonda submete-se no fundo do furo hipotético com 100 metros de coluna de água a partir do emboque. Não foi levado em conta o volume do invólucro. Para fins destes cálculos, consideramos apenas o centro de massa da sonda como um ponto qualquer no limite imediatamente acima do fundo do furo, sem apoio (força normal à superfície do fundo do furo), cujo o embocamento encontra-se ao nível do mar, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

$$p_{ff} = p_{atm} + \rho_a g h \quad \text{Equação 14}$$

Onde (Halliday *et al*, 2011):

p_{ff} = Pressão exercida no fundo do furo pela coluna de água (Pa)

p_{atm} = Pressão atmosférica nas CNTP = 10^5 Pa

ρ_a = Densidade da água à 20°C e 1 atm = 10^3 kg/m³

g = Aceleração da Gravidade $\approx 9,8$ m/s²

h = Profundidade teórica = 10^2 m

Assim temos:

$$p_{ff} = 10^5 \text{ Pa} + 10^3 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 10^2 \text{ m}$$

$$p_{ff} = 10^5 \text{ Pa} + 9,8 \times 10^5 \text{ kg/ms}^2 \text{ (Pa)}$$

$$p_{ff} = 1,08 \times 10^6 \text{ Pa ou } 10,8 \text{ bar}$$

Logo, nas condições teóricas e hipotéticas estabelecidas acima, a sonda estará submetida à uma pressão de $1,08 \times 10^6$ Pa (10,8 bar) exercida no fundo do furo pela coluna de água de 100 m. Conhecido a pressão máxima teórica às condições que definimos, cabe fazer uma pequena introdução à outra propriedade física dos fluídos: o empuxo.

Pelo Princípio de Arquimedes⁸⁶, um corpo quando mergulhado em um fluído tende a manter-se em equilíbrio à uma profundidade qualquer, devido às forças exercidas pela pressão do líquido de forma intergral e uniforme em toda superfície deste corpo. Define-se como empuxo (F_e) a força resultante destas

⁸⁶ Matemático, físico, engenheiro e astrônomo grego (287 a.C – 212 a.C)

ações na superfície do objeto, com sentido oposto, vertical, e de intensidade igual ao peso do fluido que ele ocupa (Curi, 2017). A força de empuxo aumenta conforme a profundidade, e por consequência a pressão do meio abaixo da superfície aumenta. Quando a densidade do objeto é maior que a densidade do meio fluido a que este está submetido, e seu peso é superior ao empuxo, o objeto afunda (Halliday *et al*, 2011). Esta é a condição planejada, facilitada pela hidrodinâmica, para que a sonda vença os líquidos eventualmente presentes em furos. Assim, verificamos a densidade mínima que a sonda deve possuir para que esta propriedade seja possível. Continuamos com as condições teóricas já descritas.

Reitera-se que, para fins de planeamento do peso da sonda, estamos considerando uma situação teórica e hipótética, onde o centro de massa da sonda está no limite imediatamente acima do fundo do furo, sem força normal contrária à sua força peso, de maneira a respeitar o equilíbrio com o empuxo, de acordo com o Princípio de Arquimedes, para fins de análise das condições que a sonda será submetida num furo com 100 metros cheio d'água nas CNTP. Assim:

$$P_s = F_e \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$$P_s = \text{Peso da sonda (N) de volume } V_s$$

$$F_e = \text{Força de empuxo (N)}$$

A equação 8 combinada com a equação 9 nos dá a seguinte relação referente à sonda:

$$P_s = \rho_s V_s g \quad \text{Equação 16}$$

$$\text{Com base na equação 7 temos que } F_e = p_{ff} A \quad \text{Equação 17}$$

Assim, combinando as equações 15, 16 e 17 temos:

$$\rho_s V_s g = p_{ff} A$$

Como $V = Ah$ (equação 10), temos:

$$\rho_s V_s g = p_{ff} \frac{V_a}{h}$$

O volume da água deslocada V_a é o mesmo volume V_s da sonda (Halliday *et al*, 2011), então:

$$\rho_s V_s g = p_{ff} \frac{V_a}{h}$$

$$\rho_s = \frac{p_{ff}}{gh}$$

Assim, com base nas condições apresentadas retro teremos:

$$\rho_s = \frac{1,08 \times 10^6 \text{ Pa}}{9,8 \text{ m/s}^2 10^2 \text{ m}} \therefore \rho_s = 1.102 \text{ kg/m}^3$$

Esta é a densidade mínima que a sonda deve possuir para permancer em equilíbrio estático, ou seja, parar de afundar quando totalmente submersa em um furo com 100 metros, à uma pressão de $1,08 \times 10^6 \text{ Pa}$ (10,8 bar).

Como afirmado anteriormente, independentemente do volume da sonda (adotamos aqui que ainda não foram determinadas as dimensões do invólucro), qual a massa mínima que a sonda deve ter para atender as condições físicas e chegar ao fundo do furo teórico descrito? Considerando que o material escolhido para construção da sonda foi o aço inoxidável, conforme apontado no tópico 5.2.1, passamos a verificar a relação entre a densidade teórica com a densidade real da sonda, cujo material constituinte, o aço inox 304, possui densidade igual à 7.850 kg/m^3 (Hosford, 2012), com o obeitivo de achar a relação entre a massa mínima teórica e a massa real, para a sonda projetada com dimensões da seção 5.2.2, tabela 16, de volume V . Logo, a partir da equação 9 temos:

$$V = \frac{m_{ms}}{\rho_s} = \frac{m_s}{\rho_{a304}} \therefore m_{ms} \rho_{a304} = m_s \rho_s$$

$$\frac{m_{ms}}{m_s} = \frac{\rho_s}{\rho_{a304}}$$

Onde:

m_{ms} = Massa mínima teórica da sonda

m_s = Massa real da sonda

ρ_{a304} = Densidade do aço inox 304 = 7.850 kg/m³

ρ_s = Densidade mínima que a sonda deve ter = 1.102 kg/m³, conforme calculado acima

Então:

$$\frac{m_{ms}}{m_s} = \frac{1.102 \text{ kg/m}^3}{7.850 \text{ kg/m}^3}$$

$$\frac{m_{ms}}{m_s} = 0,14 \text{ ou } 14\%$$

Logo, para cumprir a trajetória do emboquilhamento até o fundo de um furo completamente cheio de água, nas condições teóricas impostas, o invólucro deve ter apenas 14% da massa de um involucro contruído em aço inox, qualquer que seja seu volume. Assim, corroboramos com as demonstrações matemáticas e físicas acima que a escolha do aço inox 304 para construção do invólucro possui peso suficiente para, independentemente das dimensões pré-definidas ou que futuramente venham a ser alteradas, cumprir ao objetivo ao qual foi projetado, que é chegar ao fundo de um furo, mesmo estando completamente cheio de um fluido com características físicas similares das da água. Diante das propriedades explicadas neste capítulo, quer sejam o material selecionado, e as dimensões finais projetadas do involucro, o peso (massa) da sonda (invólucro mais eletrônicos) ficou determinado em 2,596 kg. Quando acrescentamos o meio de tração, cujo valor unitário do peso da corda é 48,5 g/m, e o conector corda/sonda tem o peso de 60 g⁸⁷, o peso total do desviômetro, considerando a sonda mais o 1º metro do meio de tração, é igual à 2,705 kg. Estes valores podem ser considerados como valores ideais ao protótipo proposto, tendo em vista que estão bem abaixo da média dos pesos dos principais equipamentos existentes no mercado, que usamos como referência (tabela 17), comprovando assim a proposta de apresentar um

⁸⁷ Para mais detalhes sobre o meio de tração, ver seção 5.4

equipamento mais leve que os demais, e com melhor eficiência. A tabela a seguir detalha o peso do desviômetro por componentes.

Elemento	Componente	Peso (Kg)	Peso/Elementos (Kg)
Sonda	Invólucro	Ponta Maciça	2,097
		Receptáculo dos Eletrônicos	0,191
		Suporte do Meio de Tração	0,150
	Eletrônicos	0,158	2,438
Meio de Tração	Conector sonda/corda	0,060	0,109
	Corda (1 m)	0,049	
Total Conjunto			2,705

Tabela 19 – Peso total e por componentes do desviômetro

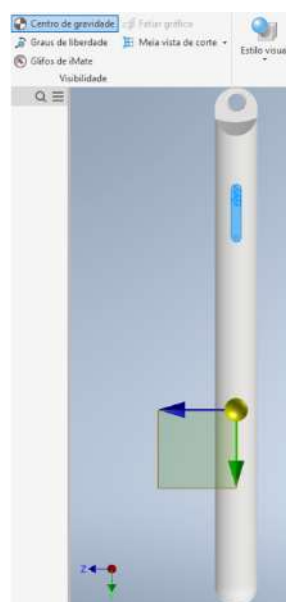


Figura 60 – Centro de gravidade do invólucro determinado automaticamente no Auto Desk Inventor

Observações:

- O peso do conjunto do invólucro ficou concentrado na ponta para que seu centro de gravidade, permitindo assim uma maior estabilidade estática e dinâmica durante a sua trajetória no interior dos furos;
- Ponta maciça pode ser remodelada ou readaptada para aumentar (caso de furos profundos) ou reduzir o peso (caso de *upholes*);

5.3 – Sistema Eletrônico

5.3.1 – Sensores

Os sensores são dispositivos essenciais para o funcionamento do desviômetro, pois têm a importante função de calcular o rumo e a inclinação do furo, informações básicas para descrever sua geometria. O equipamento possui um conjunto de sensores: magnetômetro, acelerômetro e giroscópio que juntos,

compõem o núcleo do aparelho. Estes foram programados para medir ângulos, inclinações e azimute em todas as direções (360° - Orientação absoluta).

De acordo com Raposo (2011), existe uma enorme variedade de sensores disponíveis no mercado de diferentes formas, amplitudes de leitura, resoluções, dimensões, preços, resistência a impactos, aplicações e constituição. De maneira a construir o desviômetro que funcione de forma precisa e exata, foram investigados vários sensores. O escolhido ainda no início do desenvolvimento do equipamento e até hoje utilizado para esta função foi o sensor inercial BNO055 da Bosch, apresentado pela marca como um sensor de orientação inteligente absoluta. Este sensor consiste num conjunto de detetores de orientação absoluta de 9 eixos, que inclui uma fusão de informações de sensores em um único pacote. Este dispositivo é um Sistema em Pacote (SiP⁸⁸), integrando um acelerómetro triaxial de 14 bits, um giroscópio triaxial de 16 bits com uma faixa de $\pm 2.000^\circ$ por segundo, um sensor geomagnético triaxial, e um microcontrolador de 32 bits. Com apenas 5,2 x 3,8 x 1,1 mm, é significativamente pequeno. Com a integração de sensores num único dispositivo, o BNO055 facilita o processo de aquisição de dados, retirando-lhe as complexidades das soluções de múltiplos fornecedores. Opera em temperaturas entre -40°C e +85°C (Bosch Sensortec, 2016).

Componentes:

- Sensor de aceleração;
- Giroscópio;
- Sensor Geomagnético;

⁸⁸ *System in Package*

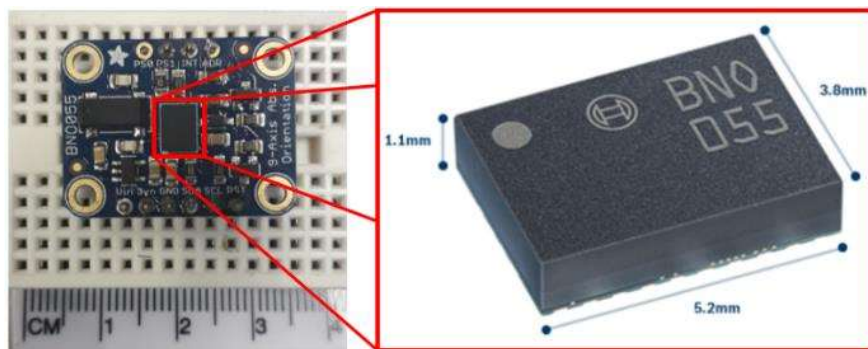


Figura 61 – Três sensores em um único dispositivo: acelerômetro, magnetômetro, giroscópio (Autoria própria adaptado de Bosch Sensortec, 2016)

A precisão dos sensores é muito importante para o perfeito desempenho do equipamento. Para definir um limite de precisão aceitável, foram analisadas as garantias de precisão dos dispositivos de medição de desvio de furos descritos no capítulo 3 e anexo II (13.2). Como exemplo, os dispositivos da Boretrak® têm uma precisão de $0,1^\circ$ (Zlatunic, 2018). A precisão da Blasthole Probe da Pulsar é de $\pm 0,25^\circ$ para a inclinação e $\pm 1^\circ$ para o azimute (Ewer, 2018). Assim, verificou-se que a média de precisão garantidas pelos fabricantes dos equipamentos abordados no capítulo 3 e anexo II (13.2) são:

- Inclinação = $\pm 0,21^\circ$;
- Azimute = $\pm 0,8^\circ$

A informação acima será retomada no final do tópico 5.3.2.

A empresa Bosch, fabricante dos sensores, garante que cada componente funciona com os seguintes valores com relação à faixa (alcance/limite), resolução e precisão média (Bosch, 2016):

- Acelerômetro de Eixo Triplo (*pitch*)
 - Faixa: $\pm 90^\circ$;
 - Resolução: $0,01^\circ$;
 - Precisão Média: $\pm 0,55^\circ$.
- Sensores de Orientação Absoluta – Magnetômetro e Giroscópio (*Roll* e *Yaw*)

- Faixa: 0 a 360°;
- Resolução: 0,1°;
- Precisão Média: $\pm 1,0^\circ$.

Já em relação à média de precisão e frequência de medidas do pacote dos sensores, o fabricante garante o seguinte (Bosch, 2016):

- Precisão de 1°/s numa frequência de 2.000 medições/s;
- Precisão de 0,5°/s numa frequência de 1.000 medições/s;
- Precisão de 0,25°/s numa frequência de 500 medições/s.

De acordo com a Bosch (2016), o acelerómetro e o giroscópio são relativamente menos suscetíveis a perturbações externas, o que faz com que o erro de precisão/deslocamento seja insignificante/mínimo em relação às medidas obtidas por meio destes 02 sensores. No entanto, ainda de acordo com o fabricante, o magnetómetro é suscetível ao campo magnético externo.

De maneira geral, podemos resumir o funcionamento dos sensores do desviómetro e apenas os princípios que os regem da seguinte forma: a solução atual utiliza a combinação dos sensores do BNO055 da Bosch, que nos dá o posicionamento absoluto em quaternions (w,x,y,z). Esses dados são usados para calcular e obter como resposta a inclinação em relação à gravidade com o acelerómetro, que mede a aceleração da gravidade (*pitch*), o azimute para obter a orientação através do campo magnético com o magnetómetro (*yaw*), e a rotação e inclinação sobre o próprio equipamento através da aceleração angular com o giroscópio (*roll*). A combinação dos sensores, dá-nos os dados finais que disponibilizamos ao utilizador: inclinação e orientação (azimute). Uma vez iniciado a aplicação num dispositivo para medir os furos, os sensores utilizam o "*Sensor Manager*" e começam a registrar as informações a cada segundo usando um temporizador. O gerenciador de sensor atualiza uma variável sempre que uma alteração na inclinação ou na posição é detectada. Devido à alta precisão dos sensores, pequenas alterações são detectadas durante cada segundo. No final de cada segundo, uma média é feita com todos os valores, a fim de atenuar os picos de medição. Os dados são então

convertidos em unidades do mundo real (rumo, azimuth e ângulo de inclinação), além do tempo da medição. Quando pressionado o botão "parar" na aplicação instalada no dispositivo de controle (exemplo: *smartphone*)⁸⁹, os sensores e o temporizador são desativados, e todos os valores medidos são salvos no armazenamento na memória interna do processador. O tratamento dos dados (transformação dos quaternions em informações reais de inclinação e orientação) é feito unicamente nos eletrônicos da sonda. A aplicação recebe todos os dados e faz uma seleção dos dados relevantes (relativos aos instantes de tempo que o utilizador efetuou a medição). Neste momento os dados obtidos pelo sensor não sofrem qualquer tratamento.

As principais características que motivaram a escolha deste sensor foram sua precisão e sua resistência a variações extremas de temperatura. A empresa fabricante do sensor garante seu funcionamento a temperaturas entre -40°C e +85°C. Mesmo com a garantia do fabricante de que os sensores funcionam a baixa temperatura, alguns testes foram realizados em ambientes de temperatura extremas como ensaios comprovativos das informações de origem. A figura 62 mostra teste feito em laboratório, onde foi colocado o conjunto de componentes eletrônicos – sensores, Placa de Circuito Interno (PCB⁹⁰) e bateria – à temperatura de -16°C durante 24 horas.

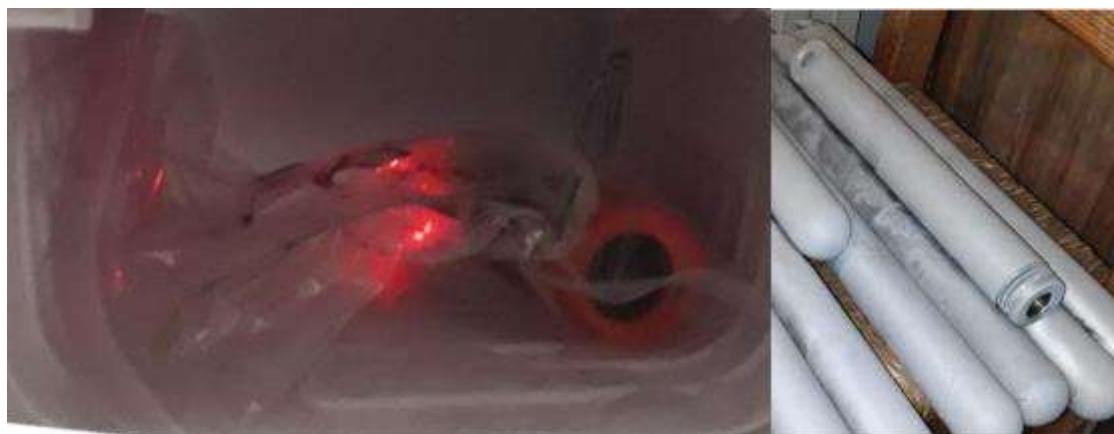


Figura 62 – Registro da exposição dos eletrônicos à uma temperatura de -16° graus pelo período de 24 horas: a) sem o invólucro; b) com invólucro (acervo do autor)

⁸⁹ Mais detalhes no Capítulo 6 - Aplicação

⁹⁰ *Printed Circuit Board* (Axelson, 2015)

Nas primeiras 4 horas, com uso da aplicação desenvolvida⁹¹ em telemóvel, foram registadas medidas em intervalos de 30 minutos. Esta metodologia foi repetida nas últimas 4 horas do ensaio. Em ambos os casos, os componentes eletrónicos funcionaram normalmente, sempre com registos coerentes. Outros testes de campo para verificar a funcionalidade do equipamento em ambientes de baixa temperatura foram realizados em minas da Finlândia entre os dias 11 e 14 de fevereiro de 2019, cuja temperatura média mínima local na época era de $\approx -5^\circ$, e média máxima de $\approx -2^\circ$, sem considerar a temperatura dentro dos furos no qual os protótipos foram testados. Este teste será melhor abordado no capítulo 9.

5.3.2 – Memória e Comunicação por *Bluetooth*

Devido à alta disponibilidade do *Bluetooth* nos dispositivos móveis atuais, este foi o método de comunicação escolhido para controlar, obter e enviar os dados dos furos entre a sonda e a aplicação, e destes para *softwares* de planeamento e gestão de processos produtivos mineiros em qualquer lugar conectado à internet, pois um dos objetivos do desenvolvimento deste equipamento foi a não utilização de cabos para aquisição, troca e/ou envio de dados, quer seja por cabos que conectam sondas à caixa de comandos/controles, ou sondas que são conectadas a PC's ou *Notebooks*, exemplos estes mostrados no capítulo 3. A ligação entre o módulo *Bluetooth* instalado na sonda e os dispositivos móveis foi pensada seguindo o modelo de conectividade descrito por Gaitatzis: o *hub-and-spoke*, onde um dispositivo (no caso a sonda) atua como um *hub* ou "Central", e os dispositivos móveis agem como "Periféricos". Uma Central pode manter várias conexões simultâneas com vários periféricos, mas um periférico pode manter apenas uma conexão de cada vez (Gaitatzis, 2017).

Bluetooth é uma tecnologia de conexão entre vários dispositivos eletrónicos, que permite a transmissão de dados sem fios, porém de baixo alcance, de forma rápida e segura (Alexeenko, 2016). É uma tecnologia de

⁹¹ Mais informações sobre a aplicação no capítulo 6

radiofrequência (Montico, 2010), ou seja, um sinal eletromagnético que se propaga num determinado meio a uma frequência do espectro eletromagnético (Rochol, 2018). O alcance real de um dispositivo *Bluetooth* depende da potência de transmissão do rádio. Com uma potência de transmissão mais alta, significa que é necessário um consumo de mais bateria (Allan, Coleman, & Mistry, 2015). Com base nisto, durante a investigação realizada para a construção do equipamento, surgiu a necessidade da seleção de um modelo *Bluetooth* de baixa energia, ou *Bluetooth Low Energy* (BLE), que, apesar de ter um padrão de curto alcance, possui um alcance operacional típico de 2 a 5 metros, e permite uma transferência de dados rápida e sem erros, aliada a um consumo baixo de bateria (Alexeenko, 2016, Allan, Coleman & Mistry, 2015). Logo, este tipo de tecnologia atende aos requisitos mínimos esperados para o funcionamento do dispositivo objeto da investigação.

O Desviómetro é equipado com um transmissor *Bluetooth* v 4.2 BR/EDR que se conecta a qualquer dispositivo móvel com sistema *Android* 5.0 ou versão superior. O módulo de conexão escolhido para recolha, tratamento e armazenamento de dados por comunicação *Bluetooth* foi o Microcontrolador de 32 bits ESP32 WROOM 32U da Espressif Systems® (2019). o ESP32 é um *System on Chip* (SoC) que, além do microcontrolador, tem módulos de memória não volátil. Ele foi usado neste trabalho devido ao seu módulo de comunicações sem fios, que possibilita sua integração com a tecnologia *Bluetooth* clássica e BLE, além de suportar comunicação WiFi. O fabricante garante que este aparelho eletrónico pode ser direcionado para uma ampla variedade de dispositivos, com baixo consumo de energia para sua detecção. O chip ESP32



Figura 63 – Microcontrolador ESP32 WROOM 32U (Autoria do autor adaptado de Espressif Systems (2019))

possui sistema de suspensão da corrente (inferior a 5 μ A), tornando-o adequado para as aplicações da sonda, já que esta pode ser usada por longas horas em campo, durante as operações de registo de medições em furos, o que requer baixo consumo, por ser alimentado por bateria recarregável com tensão

nominal de 3.7 V e capacidade típica de 3500 mAh. Com as suas pequenas dimensões (18 x 19,20 x 3,2 mm), não houve problemas no desenvolvimento do PCB integrado dos componentes eletrônicos da sonda, visto que esta foi dimensionada para ter 38 mm de diâmetro interno.

Como previsto, a comunicação sem fio entre o sistema eletrônico e a aplicação móvel deixa de ser em tempo real quando a sonda é inserida no furo, devido a perda o sinal de conexão. Entretanto, este problema foi resolvido, tendo em vista que o ESP32 além de trazer um ótimo processador, possui 128Mb (16MB) de memória interna, usada para armazenar os dados das medições enquanto a sonda está percorrendo o interior do furo. Os dados são transferidos de volta para a unidade de controle móvel assim que a sonda se reconecta a ele.

O primeiro protótipo foi programado para gravar 300 medições diferentes à cada segundo⁹². Nesta frequência de medição, a memória disponível permitiu espaço para apenas 5 minutos de medições. Isto foi corrigido considerando que os sensores utilizados têm garantia de precisão de 0,25°/s à uma taxa de 500 medições/s (Bosch, 2016), o que possibilitou a programação do equipamento para funcionar a uma frequência de 20 medidas por segundo dentro da precisão esperada.

Assim, o pacote de sensores aliados a capacidade de memória do microcontrolador, permitiram que o desviômetro opere com uma ótima precisão, ou seja, com um erro médio angular global de 0,3° (precisão média $\pm 0,3^\circ$), conforme comprovado no resultado completo dos testes em laboratório acreditado internacionalmente (anexo V), o que demonstra que o desviômetro opera com uma precisão na faixa da média dos equipamentos apontados no tópico 5.3.1 acima.

⁹² Ver tópico 8.1.4

5.3.3 – Alimentação do Sistema

5.3.3.a – Requisitos Mínimos da Bateria

Para alimentar os sensores e demais componentes do sistema eletrônico do desviômetro, é necessário que a bateria dure tempo suficiente para usar o equipamento no momento de fazer as medições dos furos de um projeto, antes de precisar ser recarregada. Para pleno funcionamento do equipamento, estimou-se que a bateria deveria possuir as seguintes características:

- Alta capacidade de armazenamento;
- Alta capacidade de descarga contínua;
- Baixa temperatura durante o uso;
- Ser recarregável;
- Longa vida;
- Potencial / diferença de tensão $\geq 3,3$ V;
- Menor dimensão possível;

A primeira bateria escolhida para esta função foi a bateria de íões de lítio recarregável 18650.

5.3.3.b – Descrição da Bateria Selecionada

O desviômetro é alimentado por uma bateria protegida recarregável de íões de lítio marca *KeepPower* 18650. Possui alta capacidade de armazenamento de 3.500 mAh (12,95 Wh) e tensão nominal de 3,7 volts, voltagem ligeiramente acima dos 3,3 volts necessários para alimentar o sistema eletrônico, fazendo assim com que a bateria não funcione no limite. Seu peso é de 49,2 g. Possui capacidade de armazenamento de 3.500 mAh. O fabricante garante a operação contínua em cerca de 48h. Funciona em temperaturas entre 0 a 45 °C (carga) e 10 °C a 45 °C quando desprovidos de proteções ou envoltórios (Lin & Li, 2017 e Keppower, 2018). O número 18650 é uma referência universal, que indica as dimensões físicas da célula cilíndrica. Eles são atribuídos a números de cinco dígitos, onde os primeiros dois dígitos são o diâmetro em milímetros,

seguidos pelos três últimos dígitos, que indicam a altura em décimos de milímetros (figura 64) (Michelini, 2017).



Figura 64 – a) e b) esboços com as dimensões de uma bateria de íões de lítio tamanho 18650 c) comparação com uma bateria alcalina AA para escala (Google), e d) bateria selecionada para o desviómetro (acervo do autor)

5.3.3.c – Carregamento

A sonda é carregada através da interface USB-C, compatível com uma grande variedade de carregadores ou adaptadores. Esta utilidade foi pensada de maneira a permitir que o usuário quando na mina, ao notar que a sonda está descarregando, não tenha que se deslocar para o escritório, pois é possível carregar o desviómetro ser alimentada através de um carregador de isqueiro presente em automóveis ou camiões, por exemplo. Para carregá-la a sonda, a ponta maciça e o corpo da sonda devem ser desrosqueadas. A entrada USB-C para conectar o carregador

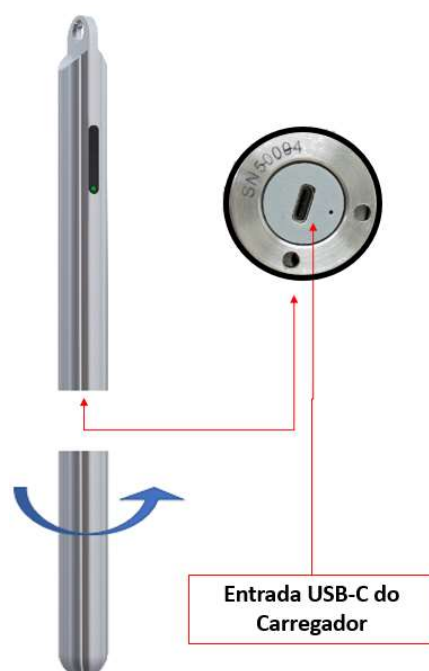


Figura 65 – Porta USB-C para carga da sonda

encontra-se no receptáculo dos eletrônicos, conforme ilustração ao lado (figura 65).

O usuário de tomar cuidado ao rosquear as duas peças após carregamento, para não danificar os anéis de vedação (*O-rings*). As duas peças do desviômetro não podem ser desrosqueadas em local com presença de água por causa da porta USB-C, único local permeável do desviômetro. Antes de rosquear as peças, as áreas de contato, da porta USB-C e as roscar devem permanecer limpos e secos, sem presença de água ou poeira.

5.3.4 – Resumo da Configuração Geral do Sistema Eletrônico

Em seguida, apresentamos um diagrama de blocos com os elementos necessários para efetuar os passos do sistema eletrônico do desviômetro:

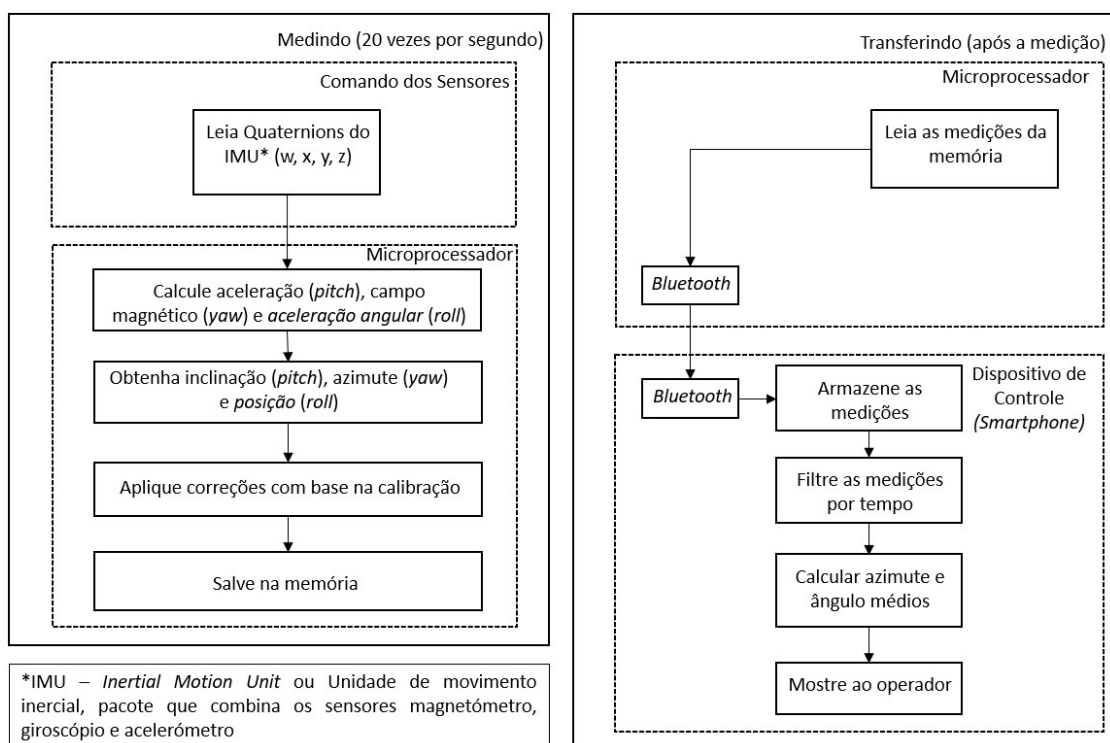


Figura 66 – Diagrama de blocos com os elementos necessários para efetuar os passos do sistema eletrônico do desviômetro

Diante do exposto nas seções acima, o sistema eletrônico apresenta a configuração conforme demonstrado na figura e tabela a seguir:

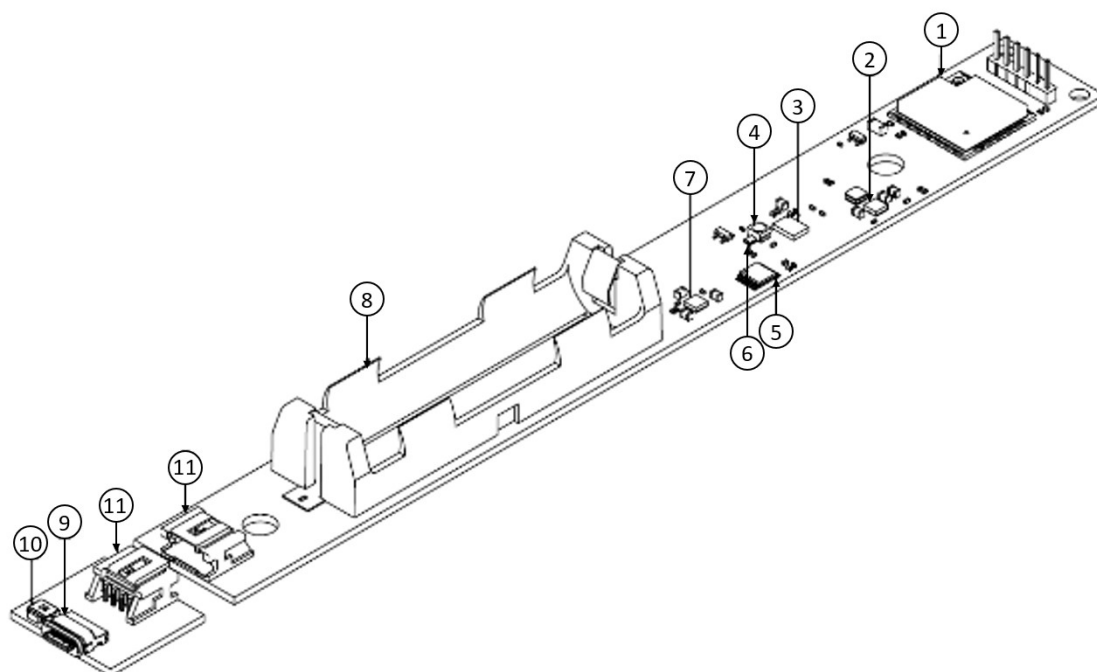


Figura 67 – Detalhamento dos componentes eletrônicos

1	Microprocessador ESP32	7	Gestor de Carga da Bateria BQ24075
2	Conversor de Tensão "Buck Boost" TPS63001	8	Suporte da Bateria de Lítio 18650
3	Sensor Inercial BNO055	9	Porta USB-C
4	Luz de LED RGB	10	Botão de <i>Reset</i>
5	Sensor de Carga de Bateria INA260	11	Conectores Molex
6	Luz de LED Bicolor para Indicação da Carga		

Tabela 20 – Listagem nominal dos componentes eletrônicos

Para que o PCB com os componentes eletrônicos permaneça contido no interior do invólucro, especificamente no compartimento projetado para tal fim (figura 59), de maneira adequada e que não cause algum dano ou interfira na precisão na aquisição dos dados para qual foram concebidos, quer seja por folga ou mal posicionamento, foi necessário desenvolver um suporte interno. Este recipiente foi desenvolvido em plástico e borracha, com o auxílio de uma impressora 3D. Sua configuração final ficou definido da seguinte maneira:

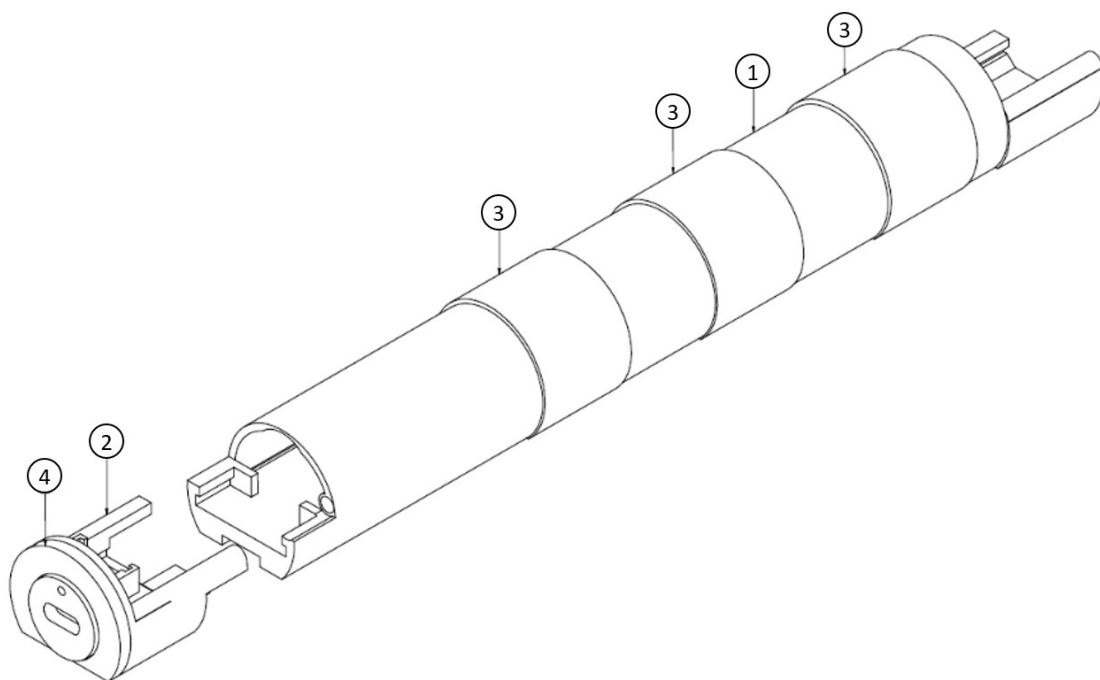


Figura 68 – Suporte interno dos eletrônicos

Onde:

1	Suporte Plástico Principal
2	Suporte da Base da Porta USB-C, Botão de <i>Reset</i> e Conectores
3	Peças de Borracha para Amortecimento Lateral
4	Peça de Borracha para Amortecimento Frontal

Tabela 21 – Identificação dos componentes do suporte interno dos eletrônicos

5.4 – Sistema de Suporte e Tração

5.4.1 – Introdução

A nossa experiência no uso de equipamentos de medições de perfis de furos em desmontes de rocha, bem como através de testemunhos recolhidos junto de utilizadores regulares deste tipo de equipamentos, durante as várias visitas para testes de campo nesta investigação, constatamos um generalizado desconforto destes com o sucessivo e frequente uso de cabos de suspensão de sondas revestidos por capas plásticas. Os protótipos desenvolvidos neste trabalho, que usam cordas não revestidas, têm sido bem recebidos pelos utilizadores ainda que de forma experimental, tendo em vista que, segundo eles, o cabo envolto em plástico após um curto período de uso é desconfortável para as mãos, mesmo mesmo recorrendo ao uso de luvas. No caso de testes realizados em minas da Finlândia, de acordo com os mineiros finlandeses, o

cabo em contato com gelo e neve deixa-o escorregadio. Neste caso, a corda é uma melhor opção precisamente porque é áspera, além de possuir as características apontadas nas seções seguintes. Assim, tudo indica que o aperfeiçoamento futuro de cordas, como meio de suporte de sondas, será um caminho promissor, tendo em conta precisamente as opiniões daqueles que têm prática comparada no terreno do uso de cordas como a que fazem parte do equipamento em desenvolvimento e cabos revestidos com plástico.

5.4.2 – Tipos de Cordas Testadas

O meio de tração necessária para guiar a sonda dentro do furo e removê-la deve ter as características suficientes para suportar o peso da sonda, resistir ao atrito com emboquilhamento do furo, ser resistente à fluidos e temperaturas extremas. Para o pleno funcionamento do equipamento, estimou-se com base nas diretrizes da Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Poliolefinicas (AFIPOL, s. d.), que o meio de tração ideal deveria possuir as seguintes características:

- Boa resistência à tração;
- Carga de trabalho ideal submetida quando em uso;
- Durabilidade;
- Estática: inelástico/não elástico ou com elasticidade mínima;
- Mínima resistência química mínima;
- Peso específico adequado ao tipo de trabalho (kg/m);
- Resistência à abrasão;
- Resistência à flutuação;
- Resistência à ruptura;
- Resistência ao calor;
- Ser do tipo "seco": não ficar pesado em contato com a água, não congelar nem perder suas propriedades em baixas temperaturas;
- Suportar choques e impactos abruptos e intensos;
- Não permitir deformidades;
- Diâmetro entre 8 e 10 mm;
- Resistência à água salgada;

- Resistência às intempéries naturais (raios ultravioleta e umidade);
- Boa resistência a temperaturas extremas;

A corda deve ser de material sintético devido à sua resistência ao apodrecimento, como ocorre com os fios de fibras naturais. Portanto, além da primeira corda comum entrelaçada testada, como apontado na figura 52 da seção 5.1, os tipos de corda sintética escolhidos e testados foram: Poliamida (Náilon ou *Nylon*), *Kevlar* e Poliéster.

Poliamida (Náilon ou *Nylon*)



Figura 69 – Cordas de náilon obtidas e testadas durante o desenvolvimento do desviômetro (acervo do autor)

Vantagens – Corda de fibra sintética excepcionalmente resistente. Tem uma vida útil superior em comparação com outras cordas. Alta resistência à abrasão. Os filamentos lubrificados internamente protegem suas fibras da abrasão causada pelo atrito. Em contato com a água não sofre nenhuma transformação, mantendo-a flexível. Alta resistência quando submetido a grandes choques. Estática.

Desvantagens - Susceptível à degradação causada por raios ultravioleta

e agentes químicos. Médio custo.

Kevlar

Vantagens – Possui resistência igual à do aço. Suporta agentes ácidos e choques elétricos. Possui uma elasticidade muito reduzida (abaixo de 2%), o que o caracteriza como estático. Resistente a temperaturas extremas (decompõem-se a 500 °C). Leve. Alta resistência longitudinal. Alta resistência à quebra, estabilidade à exposição aos raios ultravioleta e alta resistência à flexão. Este tipo de corda não fica pesado em contato com a água, não congela e não perde suas propriedades em baixas temperaturas.



Figura 70 – Corda de Kevlar testada (acervo do autor)

Desvantagens – Custo alto. Baixa resistência transversal, reduzindo assim sua resistência à abrasão.

Poliéster

Vantagens – Baixa densidade linear. Alta resistência à ruptura e baixo coeficiente de elasticidade (estática). Excelente resistência à abrasão, razão e intempéries naturais (Raios UV e umidade). Não flutua.

Todos os tipos de corda experimentados são considerados "cordas secas" porque possuem uma camada de silicone ou *teflon*, que os torna impermeáveis, permitindo assim sua utilização em ambientes com água ou gelo, evitando que a corda fique molhada e mais pesada.

Os principais motivos pela escolha da corda de poliéster durante os testes de avaliação e experimentos são resumidos da seguinte forma:

Material/Tipo	Principais Problemas Encontrados
Corda Comum	Desentrelaçou – Ruptura das Transas – Alta Deformidade
Poliamida	Alta Elasticidade (com o tempo esticaram e/ou deformaram)
Kevlar	Custo elevado – Dificil de Encontrar

Tabela 22 – Principais problemas encontrados com os tipos de tração experimentados e descartados

5.4.3 – Marcos Visuais

Além do ponto de vista operacional, temos a questão do controle do deslocamento e monitoramento da posição da sonda no furo. A sonda por si só não foi programada para medir a profundidade ou comprimento do furo. As ações do utilizador é que permitem obter esse valor com o auxílio da corda, que foi desenvolvida com marcações intercaladas de metro em metro, num inovador e fácil sistema de cores e números para auxiliar na visualização do comprimento do furo e dos intervalos de medições. Nesta seção será tratada a concepção dos marcos. O detalhamento do modo de uso desse sistema está descrito na seção 7.3.

Os marcos são fixados ao longo do comprimento da corda, de metro a metro. Essas marcações devem ser protegidas de forma a resistir ao atrito com a abertura e o interior do furo. As cordas são marcadas com o uso de mangas termo retráteis transparentes de Ø 20 mm com resina. As mangas são cortadas em pedaços de 30 cm, e distribuídas uniformemente ao longo da corda (distância de 1m). Depois que as mangas são superaquecidas, elas se retraem para o diâmetro das cordas. O encolhimento excessivo e a resina prendem

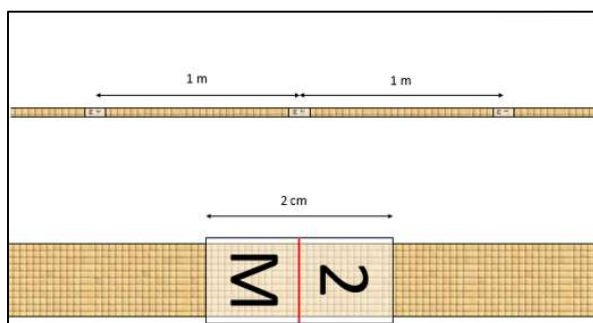


Figura 71 – Primeiro esquema de marcação desenvolvido para corda de kevlar

firmemente as mangas ao longo da corda. A manga termo retrátil transparente é útil para identificação dos números e cores das marcações em cada metro. A figura 71 mostra o primeiro esquema de marcação desenvolvido para corda de kevlar.

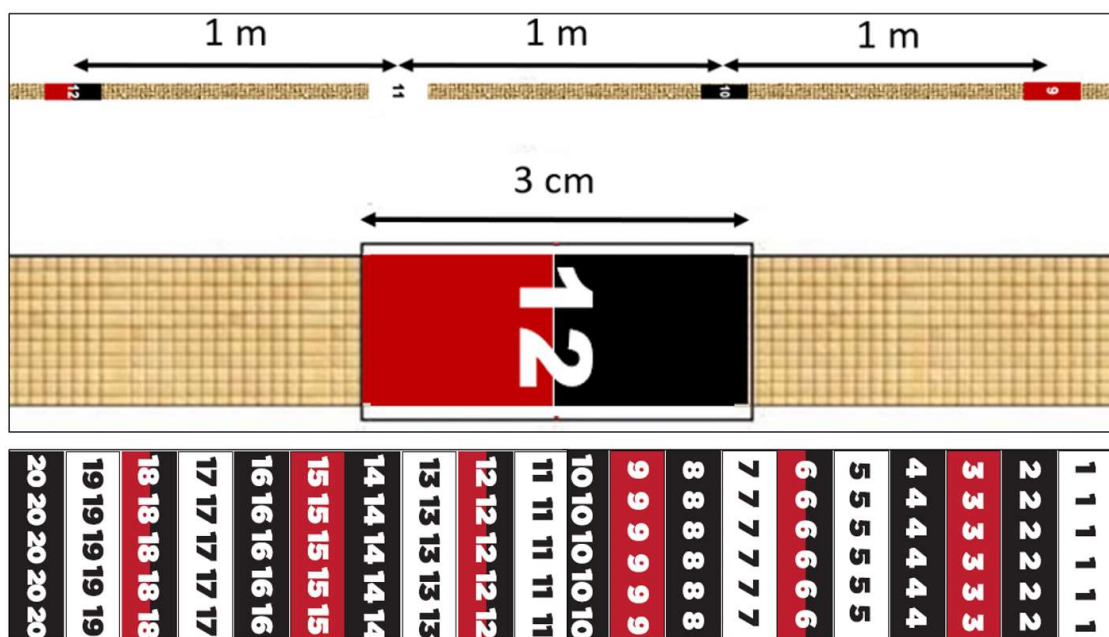


Figura 72 – Configuração final do sistema de marcação com cores e números (fora de escala)

Para marcar a corda com precisão, e para que não haja folga ou erro de distância entre as marcações, deve-se utilizar meios para tal, como máquinas para medir e enrolar cabos e cordas. A imagem a seguir ilustra alguns exemplos desse tipo de máquina:



Figura 73 – Exemplos de máquinas para medir e enrolar cordas (Fonte: Google)

Além disto, é importante que a corda selecionada não apresente elasticidade, para não deformar em sua vida útil, alterando assim a posição das marcações. De acordo com Oliveira (2011) as normas estadunidenses definem que para uma corda estática ser considerada estática, ela deve possuir um coeficiente elástico passivo de menos de 2% para uma carga de 90 kg, e ter um baixo coeficiente de deformação próximo da carga de ruptura. A corda de poliéster selecionada possui resistência à força de ruptura medida máxima de 15 kN, coeficiente de elasticidade de 1,8%, e o peso da sonda é igual à 2,705 kg.

Com estes procedimentos citados acima, as marcações permaneceram fixas em todos os testes realizados. Não houve registro de queda dos marcos onde foram utilizados termo retrátil com resina para fixação e proteção das etiquetas de numeração. Em uma pedreira cujos direitos minerários pertencem ao grupo DST Agregados no norte de Portugal, na freguesia de Gouvães da Serra, concelho de Vila Pouca de Aguiar, os marcos em 2 cordas foram testados massivamente. A metodologia utilizada neste teste foi a seguinte: a sonda foi baixada e levantada com as duas cordas em vários furos com e sem água. Ao todo, as cordas foram baixadas e levantadas mais de 300 vezes em um único dia, sempre as atritando intencionalmente no embocamento do furo. Os



Figura 74 – Um dos registros do teste de fixação dos marcos da corda, com a ajuda de estagiários da O-Pitblast (acervo do autor)

marcos numéricos se comportaram como esperado, resistindo ao manuseio e atrito constantes com a abertura e paredes do furo e permanecendo fixas.

5.4.4 – Meios de Ligação do Sistema de Tração

Para interligar a sonda ao meio de tração e esta ao utilizador ou fixador, pensamos em algo que já existesse no mercado, e que tornasse a experiência de utilizar o desviómetro de maneira rápida, móvel e ágil. Seleccionamos um conector para estabelecer a união entre a sonda e a corda. Quando fechado com uma chave inglesa, este elo rápido torna-se um anel de ancoragem semipermanente. Ele é feito em aço inoxidável AISI 304, com um limite de carga de trabalho de 350 kg e largura externa de 36 mm. Além disto, ele possui as seguintes características (Petzl, 2018):

- Leve (60 g);
- Feito em aço inoxidável AISI 304;
- Resistente à corrosão;
- Limite de carga de trabalho: 350 kg;
- Diâmetro: 7 mm;
- Diâmetro do parafuso: 8 mm;
- Comprimento: 75 mm;
- Largura interna: 18 mm;
- Largura externa: 36 mm;
- Abertura: 10,5 mm;



Figura 75 – Conector semipermanente para unir a sonda ao meio de tração

Para unir o meio de tração ao cinto de segurança do operador ou à um local seguro de maneira a evitar a queda do equipamento no interior do furo, utilizamos um mosquetão forjado em aço, com trava de parafuso, força de ruptura até 25 kN e largura de 60 mm. As demais características desta peça são (Petzl, 2018):

- Construído em alumínio;
- Equipado com sistema de bloqueio manual com parafuso *Screw Lock*
- Mosquetão de segurança em aço forjado com trava de parafuso;
- Força de ruptura até 25 kN;
- Resistente à corrosão;
- Diâmetro: 10 mm;
- Comprimento: 110 mm;
- Largura: 60 mm;
- Abertura: 19 mm.



Figura 76 – Conector para unir o equipamento a um local seguro

Vale ressaltar que as marcações da corda foram feitas tendo como referências o comprimento do invólucro da sonda, as dimensões do suporte para o meio de tração, e as dimensões do conector, pois o metro inicial do conjunto é considerado a partir da ponta maciça da sonda (figura 77). Qualquer mosquetão pode ser utilizado como meio de unir do equipamento com um local de

segurança para evitar a perda da sonda dentro de furos, porém, para união da sonda com o meio de tração deve ser utilizado só e somente só o conector com suas características dimensionais descritas acima, para evitar erro de posicionamento da sonda e registros de sua posição no furo.

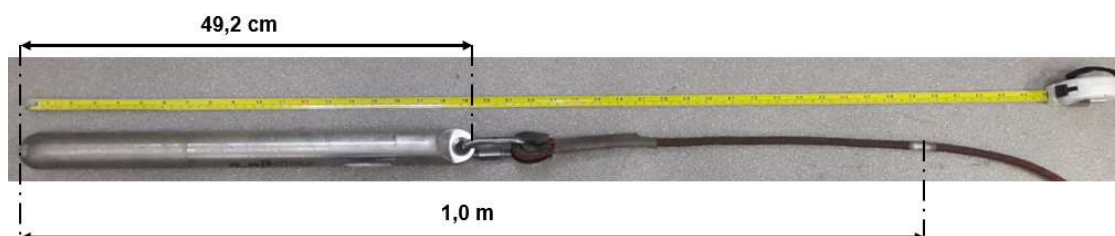


Figura 77 – Imagem ilustrativa da conexão sonda/meio de tração (acervo do autor)



Para proteção das articulações entre os meios de ligação e o meio de tração, devido ao atrito entre estas peças, as pontas da corda devem possuir peças protetoras chamadas "Sapatilhas", como destacado na imagem ao lado.

Figura 78 – Peças em destaque nas pontas da corda chamadas "sapatilhas". (acervo do autor)



Figura 79 – Configuração final do meio de tração (acervo do autor)

6 – APLICAÇÃO

Neste capítulo será abordado o desenvolvimento do aplicativo necessário para operação, medições e coleta de dados do desviômetro, fornecendo assim aos operadores as informações necessárias para seu uso.

6.1 – Introdução

Planeada para não ter qualquer interface física de controle, a sonda é operada exclusivamente através da aplicação móvel, sendo a única ferramenta para controlar, gerenciar e desligar a sonda, iniciar e parar a medição, transferir os dados, e compartilhá-los em tempo real. Além de permitir ao usuário a visualização imediata das saídas gráficas com representação da geometria dos furos, dispensando computadores ou *softwares* adicionais. Ele foi pensado para ter facilidade em sua operação como prioridade, de maneira a ser utilizado de forma rápida e simples, onde o usuário não precisa ter qualificações acadêmicas e técnicas ou habilitações específicas para usá-lo, bastando apenas um treinamento expedito. Seu desenvolvimento permite que com os dados registrados pelos sensores contidos na sonda, estes sejam tratadas a fim de se obter a orientação, inclinação e comprimento de cada medição dos furos, mostrar os resultados para o operador, e permitir que os dados sejam armazenados na memória interna do dispositivo de controle⁹³ (telemóveis, *tablets* ou *smartphones*) e/ou compartilhados por nuvem, correio eletrônico (*e-mail*) ou redes sociais para qualquer lugar do mundo. Também é possível baixar e armazenar diretamente de *softwares* de desmonte de rochas informações do planejamento de uma malha de perfuração. Além disto, a aplicação foi idealizada de maneira a permitir que seus usuários tenham acesso a uma série de informações relativas à medição do desvio do furo, com visualização em tempo real das leituras.

⁹³ Neste capítulo, sempre que for citado “unidade de controle” ou “dispositivo de controle” deve-se levar em conta que se está tratando de telemóveis, *tablets*, *smartphones* ou outro dispositivo portátil que permita o uso do sistema operacional *Android* necessário ao funcionamento do aplicativo

A ideia de operar a sonda e transmitir os dados por aplicação surgiu da observação de que todos equipamentos de medição de furos analisados⁹⁴ apresentam uma unidade de controle específica. Assim, desenvolveu-se na investigação uma aplicação de controle e transmissão de dados para ser usado no sistema operacional *Android*. Também se teve em mente que, criado um aplicativo ao invés de uma unidade de controle física, permitirá ao usuário ter a liberdade de escolher sua própria unidade de controle, quer seja por simples telemóveis, *smartphones* ou *tablets*, robustos ou comuns, e das mais variadas marcas, modelos, modernidade, preços, etc. Este é um dos grandes diferenciais desenvolvidos na investigação em comparação com os equipamentos pesquisados no capítulo 3, tendo em vista que, através de um único dispositivo com a aplicação instalada pode-se controlar várias sondas, como também uma sonda pode ser controlada por vários dispositivos com a aplicação aqui desenvolvida, porém, não ao mesmo tempo.

O desenvolvimento e operação da aplicação teve como base os sistemas operacionais *Android* (baseado em *Linux*, com a colaboração da *Google*) e *iOS* (sistema operacional móvel da *Apple*), sendo consideradas as plataformas operacionais móveis mais populares (Statcounter, 2020). Para a escolha das duas ou apenas uma plataforma para desenvolvimento do aplicativo de controle do desviômetro, além de testes iniciais em ambas, levou-se em consideração análise e pesquisa bibliográfica em fontes especializadas. Em um estudo comparativo entre os sistemas operacionais *Android* e *iOS* realizado por Györödi, Adrian, Zmandara & Györödi (2017), os pesquisadores afirmaram que, apesar de serem os sistemas mais utilizados no mundo, nenhum deles é mais eficiente que outro, devendo-se levar em consideração os recursos que cada um apresenta, ao que se objetiva aplicá-los. Do ponto de vista desta investigação, e considerando-se as necessidades para o desenvolvimento da aplicação do desviômetro, levou-se em consideração as vantagens que o *Android* obtém sobre o *iOS*. Além disto, a escolha pelo sistema operacional *Android* se deu pelo fato de este ser mundialmente conhecido e estar presente na maioria dos equipamentos de comunicação. Conforme demonstrado no sítio

⁹⁴ Capítulo 3

da *internet* Statcounter (2020), atualmente o sistema *Android* possui 74,6% de participação no mercado de sistemas operacionais móveis em todo o mundo, enquanto o sistema *iOS* tem 24,82% deste mercado. Até 2022, 87% dos *smartphones* e *tablets* utilizarão o sistema *Android* (Milijic, 2019).

Com alguma influência baseada no estudo de Asokan (2013), outros fatores foram levados em consideração na escolha do sistema operacional *Android*. Além da facilidade de programação, o sistema *Android* oferece recursos que se figuraram fundamentais para programação, controle e transmissão de dados do desviômetro desenvolvido. São eles:

- Plataforma de código aberto suportada por uma ampla gama de fabricantes de dispositivos móveis;
- Fácil acesso a muitos aplicativos gratuitos que o suportam;
- Multitarefa - capacidade de executar vários aplicativos ao mesmo tempo;
- Possibilidade de fazer com que um dispositivo móvel atue como ponte para oferecer acesso de rede a outros equipamentos, remotamente (*Tethering*);
- Grande capacidade de armazenamento externo;
- Suporte para vários sensores como *Bluetooth*, bússola (magnetômetro), inclinômetro e acelerômetro;
- Facilidade em compartilhar o aplicativo desenvolvido gratuitamente, seja por ficheiros .APK ou em lojas *online* como o *Play Store* da *Google*, por exemplo.

Já o *iOS* é um sistema operacional limitado à dispositivos fornecidos por sua desenvolvedora *Apple* (variantes do iPod, iPhone e iPad), que são produtos caros, incluindo peças e manutenção (Santino, 2018). Apesar de ser um sistema operacional muito estável e seguro para dispositivos móveis, chegamos a conclusão que o *iOS* possui desvantagens relevantes, especificamente no desenvolvimento da aplicação de controle do desviômetro, na forma que ela foi planeada. As linguagens de programação que são desenvolvidas em código único para rodarem em ambos sistemas *Android* e *iOS* são limitadas, e não servem para acessar, por exemplo, o *bluetooth* de um

smartphone, como ocorrido nesta investigação, sendo, neste caso, necessário fazer duas programações distintas, o que demandaria tempo e dificuldade extra fazer outro aplicativo em ambos sistemas. Assim, o desenvolvimento da aplicação com base no sistema iOS não foi levado adiante nesta investigação, porém, recomenda-se pela continuidade da pesquisa nesta plataforma como trabalho futuro.

A aplicação foi projetada no IDE⁹⁵ *Android Studio* 3. O modo de operação do aplicativo foi desenvolvido com poucas interfaces para dados de entrada e de saída, de maneira que permita que o uso do equipamento seja feito de forma rápida e simples. O aplicativo utiliza o código *Java*, que é compatível com a versão *Android* 5.0 (ou superiores), presente em uma vasta gama de dispositivos móveis. Ele ficará disponível para ser baixado através da loja virtual *Google Play*, como também é possível enviar um ficheiro com a extensão *.APK* por correio eletrónico, SMS⁹⁶ ou redes sociais.

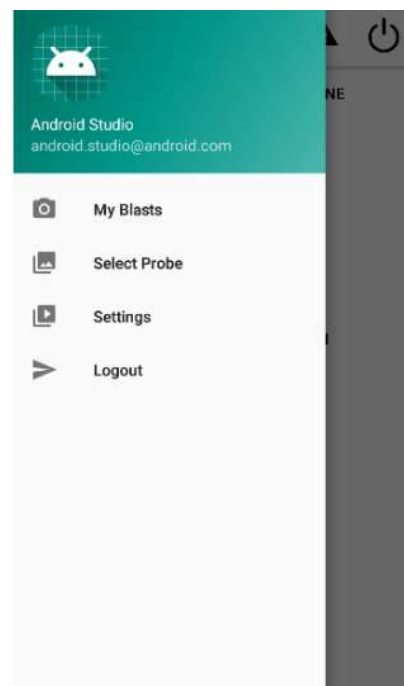


Figura 80 – Ambiente Android Studio: plataforma de desenvolvimento da aplicação

6.2 – Comandos Preparatórios e Configurações

Antes da descrição da funcionalidade da aplicação e para sua melhor compreensão, se faz necessário ressaltar e reiterar algumas informações que entendemos como importantes:

- Considerando que se pretende difundir o desviómetro em todos os países possíveis, a interface da aplicação foi desenvolvida na língua inglesa;

⁹⁵ *Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado

⁹⁶ *Short Message Service*, em português, serviço de mensagens curtas

- O aplicativo só funciona em dispositivos de controles (telemóveis, *tablets* ou *smartphones*) com sistema *Android* 5.0 ou versões superiores;
- Com uma aplicação instalada em um dispositivo de controle é possível manipular mais de uma sonda, entretanto, não é possível controlar todas as sondas ao mesmo tempo;
- A conexão entre a sonda e o dispositivo de controle é feita através de *Bluetooth*. Dois ou mais dispositivos conectados ao mesmo tempo prejudicam a operação. Caso exista mais que uma aplicação em dispositivos diferentes conectadas à sonda, poderá haver problemas de controle e coleta de dados, pois o sistema da sonda está programado para funcionar com uma aplicação por vez. Várias conexões poderão levar ao mal funcionamento, pois a sonda ficará alternando a conexão entre os dispositivos, ou não reconhecerá qual dispositivo está no controle;
- A aplicação irá ativar o *Bluetooth* do dispositivo de controle automaticamente quando iniciada;
- Recomenda-se as seguintes configurações do dispositivo de controle:
 - Desativar o bloqueio automático de tela durante o uso do equipamento;
 - Configurar-lo para permitir notificações de tela apenas do aplicativo desviômetro;
 - Desativar as notificações de outras aplicações durante o uso do desviômetro, de maneira a não atrapalhar a visualização ou sair da aplicação equivocadamente, pois isto pode levar à repetição da medição do furo ou até mesmo a perda dos dados;
 - Colocar o dispositivo em modo avião para não receber chamadas inesperadas que tirem atenção do operador durante o trabalho de campo, e para economizar sua bateria;
 - Desligar o WiFi, para não receber chamadas inesperadas ou ter outras aplicações ativas conflitando com o aplicativo do desviômetro, ou que levem a desatenção do operador durante o trabalho de campo, e para economizar bateria do dispositivo de controle.

6.2.1 – Preparando o Dispositivo de Controle para Uso do Aplicativo

A sonda e o aplicativo instalado no dispositivo de controle precisam ser emparelhados. Nas configurações de *Bluetooth* do dispositivo deve-se procurar pelo número da sonda. A figura ao lado mostra um exemplo.

A programação permite que seja possível vincular um código alfa numérico à cada sonda (função do programador/desenvolvedor, não do usuário). No exemplo ao lado, nomeamos esta sonda de DEV 0001. Entretanto, é possível que o código alfanumérico da sonda esteja disponível, porém a unidade de controle não consiga parear com a sonda. Isto foi intencionalmente programado, para que seja possível gerenciar remotamente as permissões para conexão com a sonda.



Figura 81 – Exemplo de tela da configuração Bluetooth com código da sonda pareada

6.2.1.a – Ícones da Aplicação

Antes de apresentar a aplicação é necessário ter conhecimento prévio de seus ícones, conforme mostrados a seguir:

	Desligar a Sonda		Deletar
	Sonda Conectada/Carregada		Voltar para Tela Anterior
	Sonda Descarregada		Furo sem Dados Reais
	Sonda Desconectada		Aquisição de Dados do Furo Concluído
	Ativar Barra Lateral		Baixar Dados (<i>Download</i>)
	Editar Texto		Carregar Dados (<i>Upload</i>)
	Adicionar Projetos ou Furos		Compartilhar Ficheiros

Tabela 23 – Ícones da Aplicação

6.2.1.b – Conectando com a Sonda

A aplicação inicia com a tela “*Projects*” (Figura 82.a). O botão ☰ deve ser clicado para ativar a barra lateral, e em seguida clica-se na opção “*Select Probe*” (Figura 82.b).

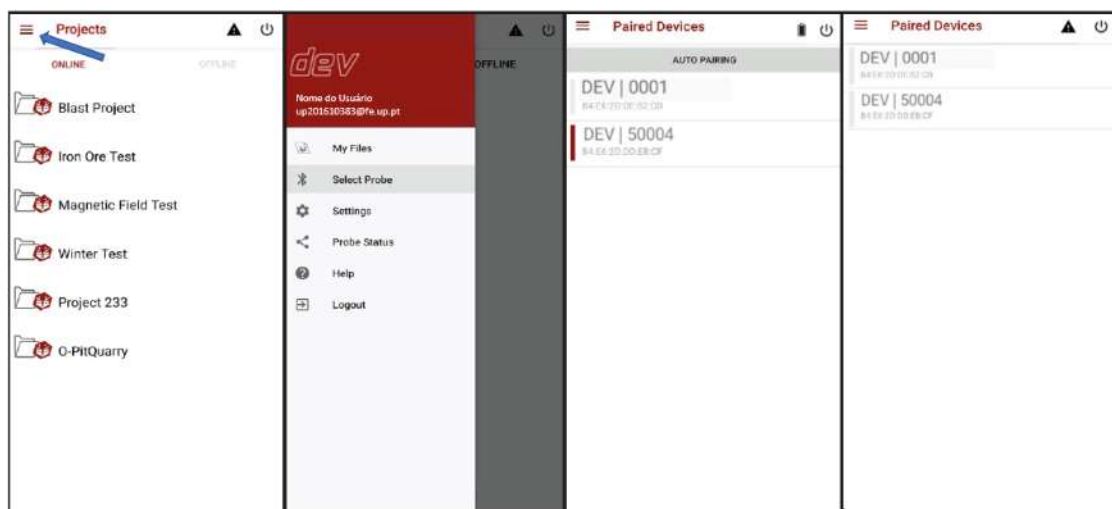


Figura 82 – a) tela “*Projects*”; b) barra lateral; c) sondas pareadas e selecionada; d) sondas desconectadas

A tela “*Paired Devices*” será mostrada com a(s) sonda(s) pareadas e disponíveis. O usuário deve clicar no código alfanumérico da sonda que será utilizada no campo. A barra ao lado do código da sonda selecionada ficará vermelha (figura 82.c), indicando que ela está pronta para uso. O ícone 🔌 deverá aparecer no canto superior direito da tela quando a sonda estiver conectada com a unidade de controle (figura 82.c). Caso a sonda esteja desconectada da unidade de controle, o ícone ⚠️ aparecerá, e as barras ao lado do código da sonda ficarão cinzas (figura 82.d). Observa-se que na figura 82.c o aplicativo mostra a informação “*AUTO PARING*” e na figura 82.d esta informação não aparece. Isto é possível caso o usuário opte que a unidade de controle e a sonda se conectem quando ambos se detectarem. Esta função pode ser ajustada nas configurações da unidade de controle ou da aplicação⁹⁷.

⁹⁷ Mais informações sobre isto na seção 6.2.5

6.2.2 – Projetos

É possível através da aplicação baixar projetos com os parâmetros geométricos da perfuração ou criá-los na própria aplicação, porém com certa limitação, não sendo possível criar planos com a complexidade apenas permissível em *softwares* para tal fim. Ao clicar no botão ☰ na parte superior esquerda do

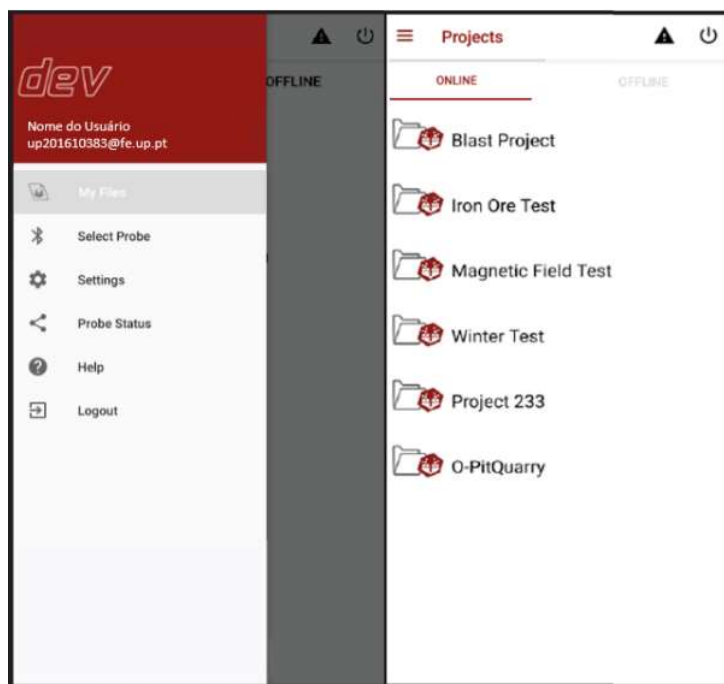


Figura 83 – Interface dos projetos com os parâmetros geométricos dos furos

aplicativo, a barra lateral será ativada. Escolhe-se a opção “*My Files*”, onde o usuário será direcionado para os projetos com os parâmetros dos furos (figura 83). Nesta interface é possível trabalhar com os projetos de maneira *online* ou *offline*, dependendo de conexão local com a internet.

6.2.2.a – Projetos Online

Na interface “*Projects – Online*” é possível visualizar uma ou mais pastas, onde cada uma destas contém um ou mais projetos com dados da geometria dos furos planeados (figura 84.a). Os dados contidos nesta interface são gerados em *softwares* de *design* de desmonte de rochas ou em *softwares* compatíveis. Ao clicar sobre uma pasta, aparecerá a tela “*Blasts*” com um ou vários planeamentos de perfuração (figura 84.b). Neste último caso, é possível rolar a tela para cima e para baixo para visualizar todos os projetos. A figura 84 mostra um exemplo para um projeto fictício “*Blast Project*”:

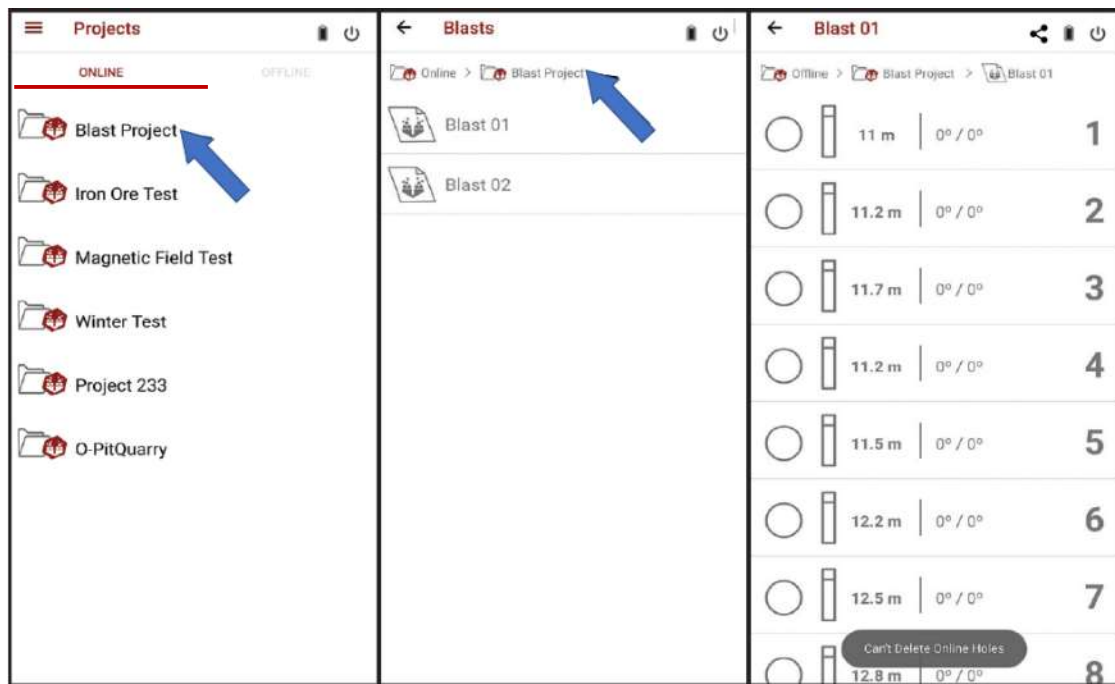


Figura 84 – Interfaces a) "Projects - Online", b) planos de perfuração e c) mensagem informando não ser possível deletar furos na interface "Online"

Por questões de programação, os nomes dos ficheiros não podem ser alterados na interface da aplicação "Online", como também não é possível deletar ou adicionar furos nesta interface (figura 84.c). Todos os dados dos furos planejados na interface "Online" são alterados automaticamente quando o projeto é modificado através de plataformas de planejamento de furos (softwares), desde que a unidade de controle que contém a aplicação esteja conectada com a internet. Entretanto, o contrário não se aplica. Na interface "Online" não é possível alterar os dados teóricos dos furos (*Planned Values* – figura 85). É possível modificar os dados dos furos na aplicação apenas para fins específicos quando o desviómetro está sendo operado. Os dados planejados que forem alterados pela aplicação ficarão salvos no dispositivo de

controle, mas desta forma os dados originais não serão alterados nas plataformas de planejamento de furos no qual foram criados.

Para baixar um planejamento com os parâmetros de um furo para a memória do

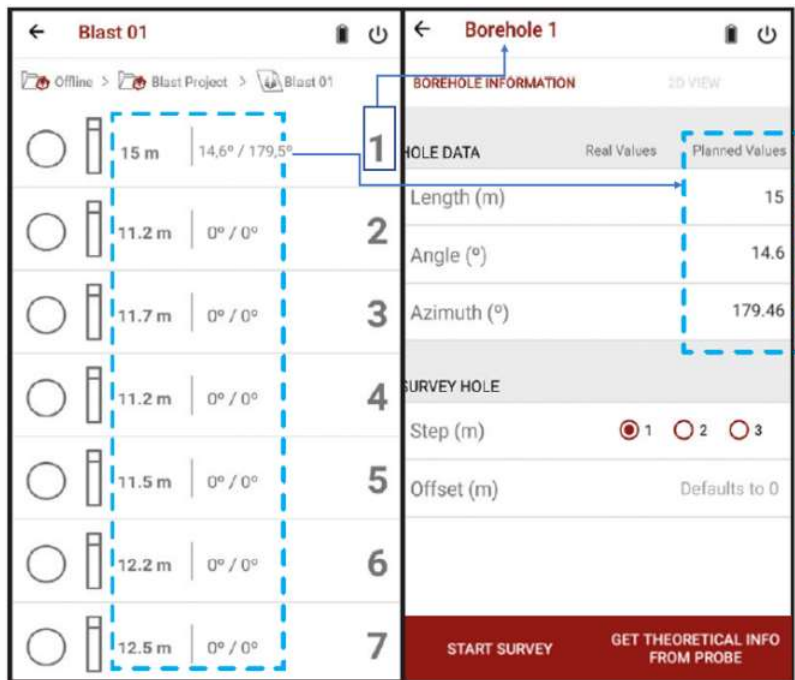


Figura 85 – Dados teóricos dos furos (Planned Values) em destaque

dispositivo de controle, pressiona-se o plano desejado e arrasta-se para a esquerda (figuras 86 a e b). O ícone  para baixar os dados aparecerá no canto direito. Ao clicar neste ícone, aparecerá uma mensagem para confirmação desta ação, conforme mostrado na figura 86.c. Validado este comando, os dados serão baixados e estarão armazenados no dispositivo e disponíveis na interface "Offline". Na figura 86, mostramos o exemplo com o projeto "Blast 01":

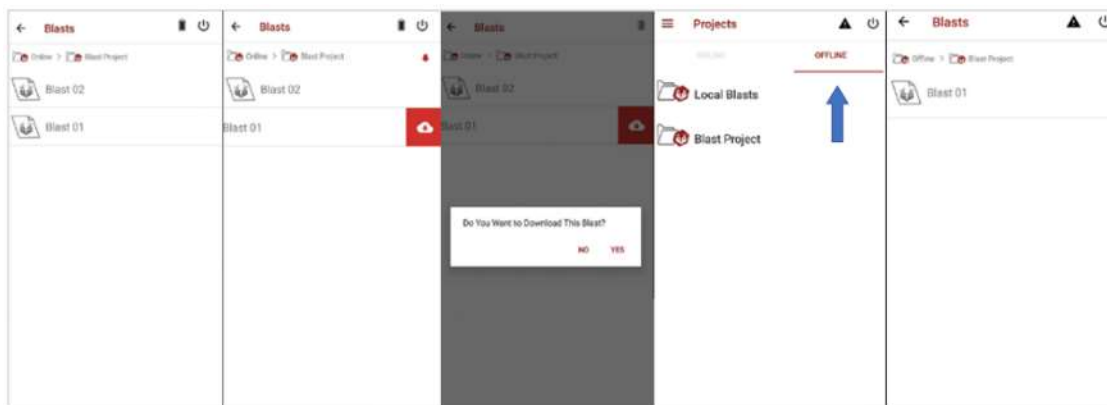


Figura 86 – Como baixar um projeto para interface "Offline": a) escolha do projeto, b) arrastar o ícone para esquerda, c) confirmação, d) aparecerá o ficheiro e, e) o projeto selecionado estará pronto

Chamamos atenção para observar os conteúdos das imagens 84 a 86: a pasta “*Blast Project*” com ficheiro no qual o planeamento dos furos estava contido (*Blast 01*) migrará automaticamente para a interface “*Offline*” (figuras 86 d e e). Isto acontece devido a programação da aplicação, que transfere automaticamente à pasta no qual um ou mais ficheiros forem baixados. No exemplo da figura 84, na interface “*Online*”, continha várias pastas, dentre elas a pasta “*Blast Project*”, onde estão os planos “*Blast 01*” e “*Blast 02*” armazenados em nuvem. Entretanto, ao baixar o ficheiro “*Blast 01*” para o armazenamento interno do dispositivo de controle, apenas este ficheiro e a pasta que estava contido são mostrados. Caso o plano “*Blast 02*” ou qualquer outro plano que estiverem disponíveis na interface “*Online*” forem baixados para a interface “*Offline*”, elas irão para a mesma denominação da pasta.

6.2.2.b – Projetos *Offline*

Na interface “*Projects – Offline*” é possível trabalhar com os ficheiros e projetos baixados da interface “*Online*” ou então criar projetos. Nesta interface é possível utilizar a aplicação em locais onde não há conexão com internet. Diferente da interface “*Online*”, aqui é possível fazer vários tipos de edição nos projetos, e quando conectado, subir as novas informações criadas.

Para ascender à interface “*Offline*”, basta arrastar a tela inicial “*Projects*” para o lado esquerdo, ou clicar no nome “*Offline*”. A interface ativa terá o nome destacado em vermelho (Figura 87).

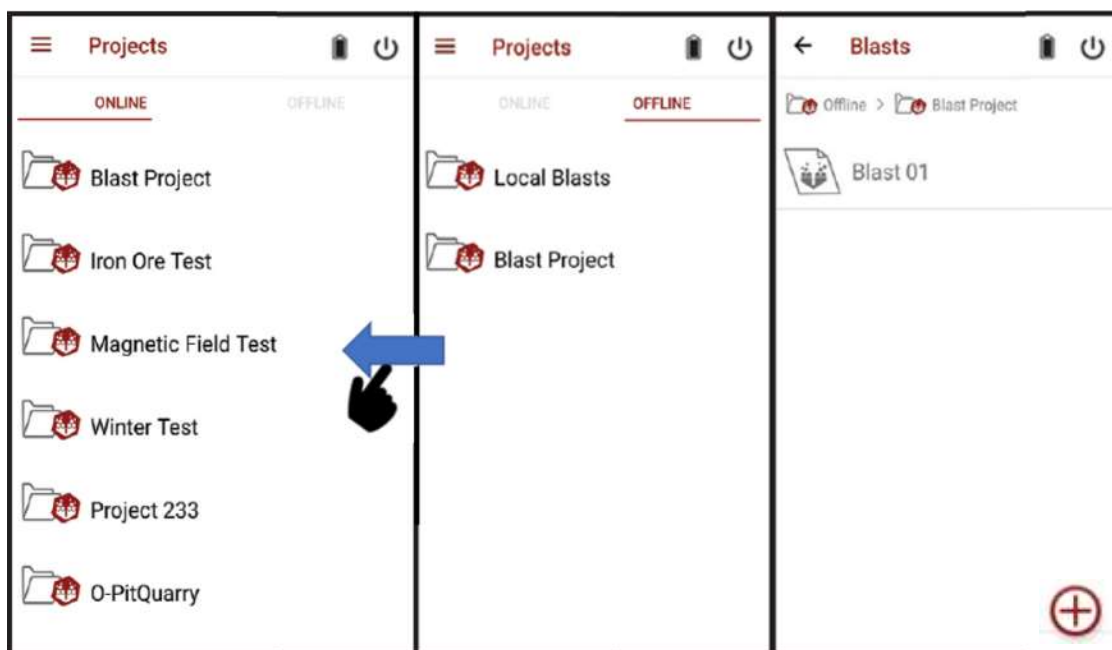


Figura 87 – Como mudar da interface “online” para a “offline”: a) tela “online”, b) mudar para tela “offline” com as pastas salvas, e c) ficheiro com projeto armazenado na memória do telefone

Na interface “Offline” é possível adicionar um ou mais projetos. Para isso, escolhe-se uma pasta (figura 87.b) e em seguida clica-se no ícone para adicionar projetos ⊕ (figura 87.c). Após clicar no ícone, uma caixa de texto aparecerá para ser adicionado o nome do projeto (obrigatório), local (opcional) e números de furos (obrigatório). Após preencher esses dados, o novo projeto aparecerá no final da lista de projetos da pasta escolhida. A figura abaixo mostra a sequência de telas após clicar em ⊕:

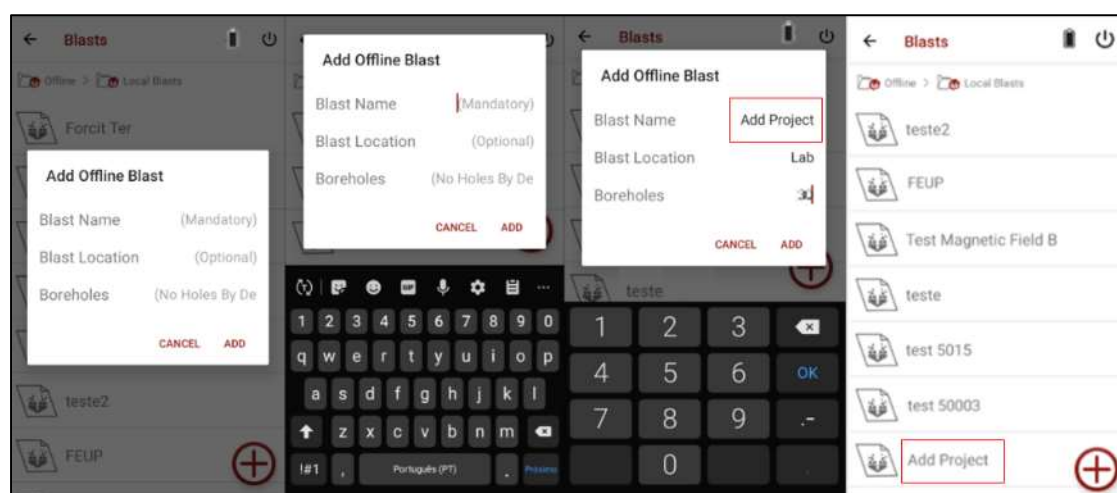


Figura 88 – Sequencial de imagens explicativas para adicionar um projeto offline

É possível renomear um ficheiro contendo um planeamento de furos em caso de erro ou por opção. Para isso, o usuário deve arrastar o local com o ficheiro que deseja renomear para o lado esquerdo, clicar no ícone de edição ✎, digitar o novo nome do projeto e por fim clicar em “Rename” (Figura 89).

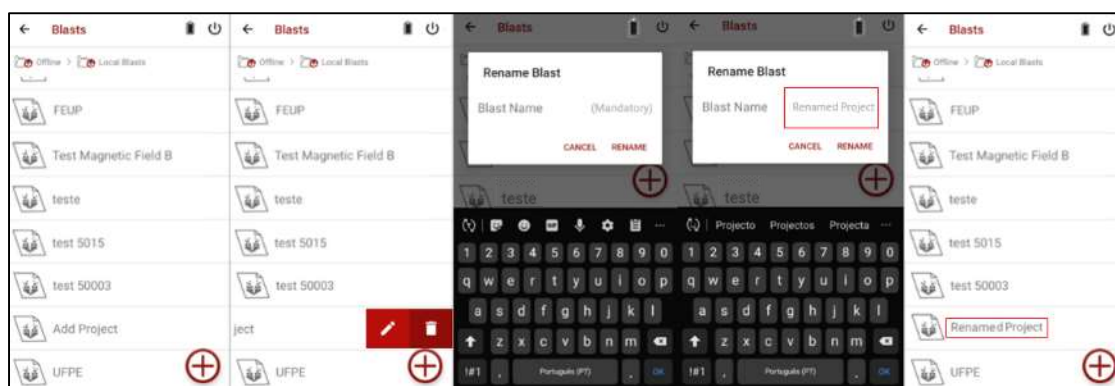


Figura 89 – Renomeando um projeto

Para excluir um projeto de geometria de furos, o usuário deve pressionar no planeamento desejado, arrastá-lo para a esquerda, e clicar no ícone de deletar 🗑 no canto direito para apagar o projeto. Aparecerá uma mensagem para confirmar a exclusão definitiva do projeto selecionado da memória da unidade de controle (Figura 90).

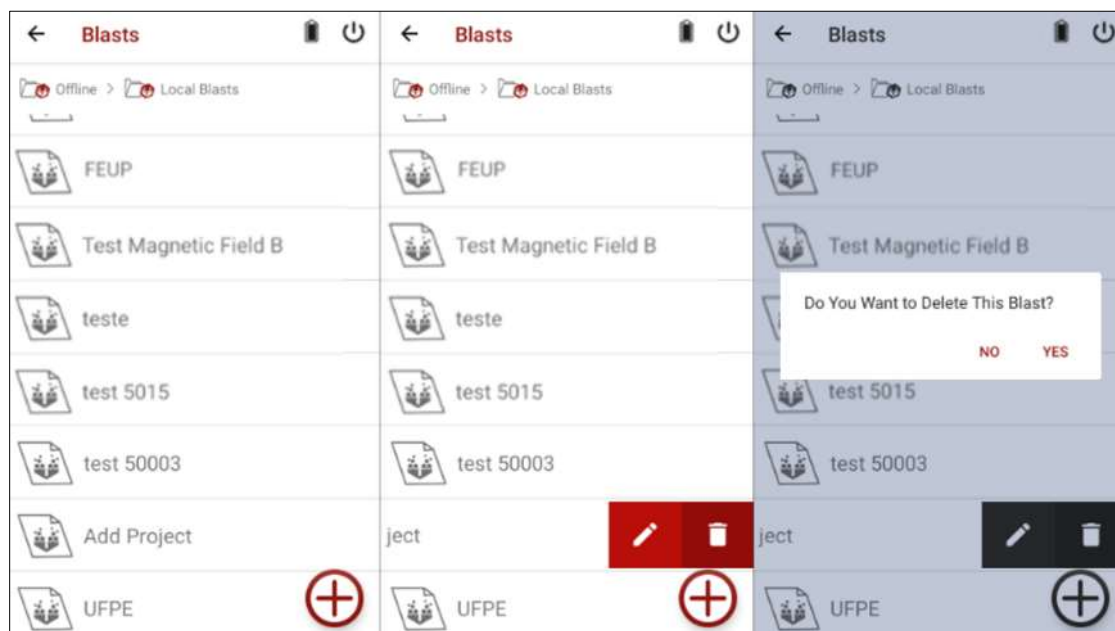


Figura 90 – Apagando um projeto de furos: a) escolher o projeto, b) arrastar o link do projeto para a esquerda e clicar no botão de deletar e c) confirmar esta ação

É importante ter a certeza antes de apagar um projeto de furos, principalmente se os dados reais da geometria da perfuração já tenham sido levantados em campo e armazenados. Os dados serão permanentemente perdidos. Deve-se verificar se os dados estão salvos em nuvem ou compartilhados antes de deletá-los.

Nos projetos baixados da interface “Online” e por consequência, disponíveis na interface “Offline”, como também criados nesta última interface, é possível adicionar mais furos antes, durante ou depois de utilizar o desviômetro. Para isso o utilizador deve escolher um projeto e clicar nele. Na tela com os dados dos furos, o ícone ⊕ continuará ativo, porém, nesta interface ele é utilizado para adicionar furos (figura 91). É necessário adicionar um furo por vez (figura 91.c). Entretanto, caso a medição dos furos não tenha iniciado em campo, e o usuário queira adicionar muitos furos, como por exemplo, 50 furos, ao invés de adicionar um por um para não perder tempo, ele pode optar por excluir o projeto e criar um com maior número de furos.

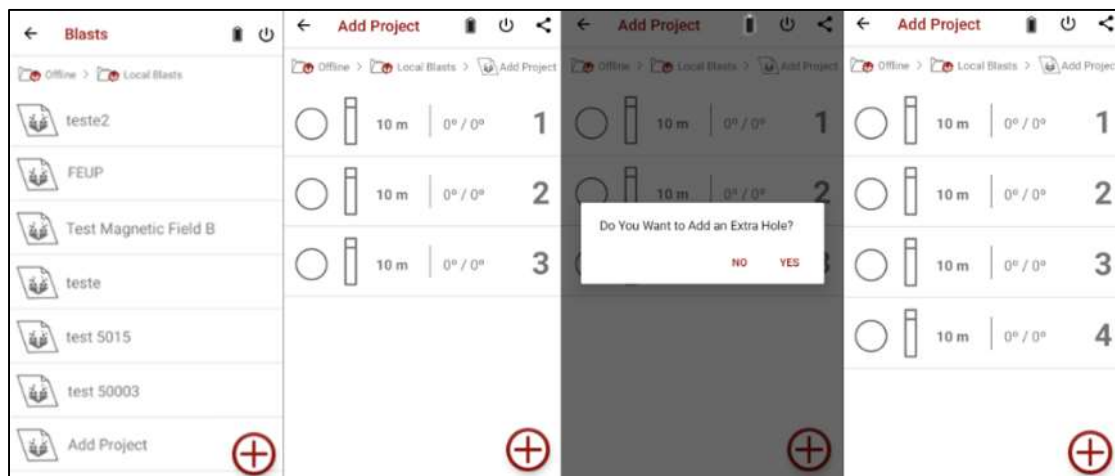


Figura 91 – Adicionando furos a um projeto offline: a) e b) projeto criado inicialmente com 3 furos, e c) e d) após adicionar 1 furo

Para excluir um furo é necessário arrastar totalmente a linha do furo a ser apagado da esquerda para a direita. Aparecerá na tela uma mensagem para confirmar a ação de deletar o furo selecionado. Em caso positivo, o utilizador confirma na tecla em “YES” (figura 92).

Na figura 92 é possível observar que, neste exemplo, após o furo 3 ou qualquer outro furo seja deletado, a aplicação não irá renumerar a lista de furos automaticamente. Isto foi intencionalmente desenvolvido, pois entendemos que o furo 3 fisicamente ainda existe, e que, como explicado na seção 6.2.2.a – Projetos *Online*, a aplicação não foi desenvolvida com objetivo de editar planejamentos de furos de forma complexa.

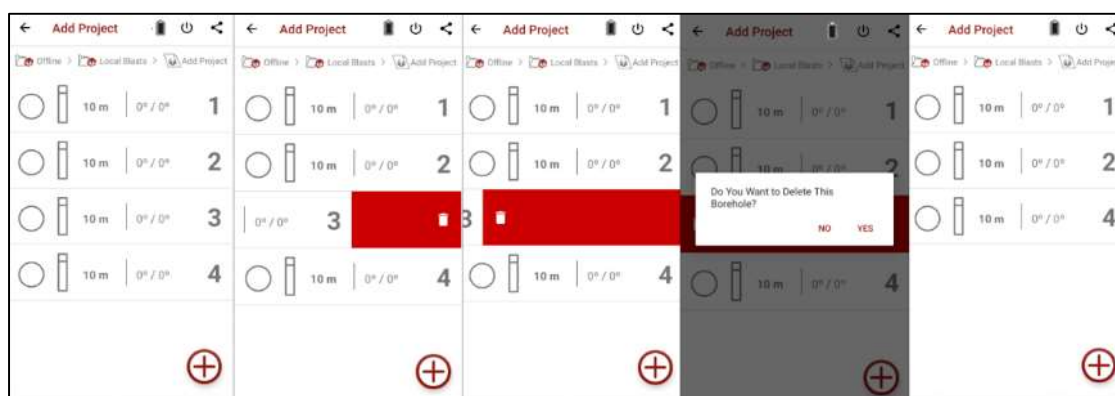


Figura 92 – Sequência de como apagar um furo

Entendemos que um furo deve ser apagado na aplicação quando fisicamente ele for perfurado erroneamente, esteja obstruído, ou que exista algum motivo ou impedimento que não seja possível medi-lo com o desviômetro. Desta forma, a opção de apagar fará com que a aplicação elimine um furo não desejado na interface, diminuindo assim a lista de furos.

6.2.3 – Interface com os Parâmetros Teóricos dos Furos

Esta interface serve para configurar os parâmetros geométricos dos furos teóricos. Para iniciar, o plano com furos que se pretende trabalhar deve ser selecionado. Neste exemplo, usaremos o projeto hipotético nomeado como “UFPE” (fig. 93).

Como este projeto foi criado na configuração “*Offline*”, os furos aparecerão com as seguintes informações (fig. 93.b):

- Comprimento do furo – 10 m;
- Ângulo de Inclinação do Furo – 0°;
- Azimute (Direção do Furo) – 0°.

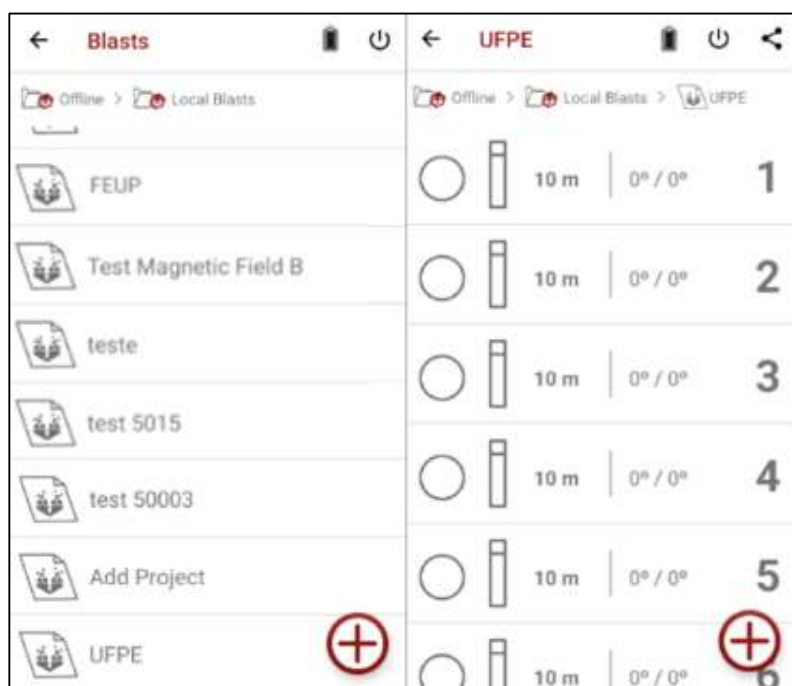


Figura 93 – a) tela dos projetos e b) lista de furos do projeto exemplo nomeado “UFPE” e suas características

Isto acontece porque caso não seja inserido manualmente ou baixado nenhum dado, a aplicação foi programada para iniciar com ângulo e azimuth “zerados”. Já com relação ao comprimento do furo, o valor de 10 metros foi determinado nas

configurações do aplicativo⁹⁸, que pode ser modificado sempre que o usuário desejar. Caso se opere o equipamento “Online” ou os dados desta interface sejam baixados para os projetos da interface “Offline”, os valores planejados do comprimento, inclinação e azimuth aparecerão como mostrado no exemplo do furo 1 da figura 85 da secção 6.2.2.a – Projetos Online.

Quando o usuário clica na área com as informações unitárias do furo na aplicação (fig. 93.b), a interface com as informações do furo selecionado (*Borehole Information*) e configurações da medição (*Survey Hole*) é ativada (figura 94.a). Como explicado acima, os valores planejados (*Planned Values*) apresentados nesta tela são valores automáticos. Caso o utilizador pretenda modificá-los manualmente, deve clicar no número do valor planejado que deseja alterar. A figura a seguir apresenta uma demonstração desta função, começando pela mudança no valor do comprimento teórico (figura 94.a). Ao clicar no número 10, uma caixa de texto e o teclado numérico aparecerão (Figura 94.b). O mesmo passo para alterar os valores planejados de ângulo e azimuth devem ser repetidos (figura 94.c). Ao regressar à lista de furos, os dados alterados e salvos serão mostrados (figura 94 d e e).

⁹⁸ Ver secção 6.2.5 – Demais Funcionalidades: Configurações

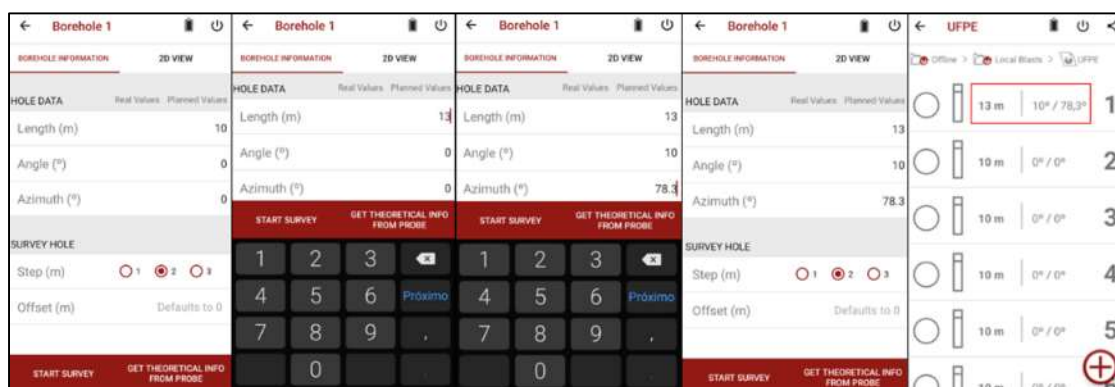


Figura 94 – Editando furos teóricos: a) dados automáticos, b) clicar no número para abrir caixa de texto e teclado numérico, c) repetir passo para as informações desejadas, d) e e) valores teóricos modificados

6.2.4 – Definindo os Parâmetros Teóricos dos Furos na Aplicação Utilizando a Sonda

Como já abordado, o desviômetro é uma ferramenta eletrônica baseada em um conjunto de sensores, dentre eles o magnetômetro. Esta bússola está alinhada com o campo geomagnético da Terra para definir a direção do azimuth do furo em relação ao polo magnético terrestre. Entretanto, é possível que seja planeado, por alguma razão, que a referência ou gabarito teórico do azimuth não seja o norte magnético, e sim outro ponto físico qualquer definido em projeto. Isto pode ocorrer em minas subterrâneas, pois é comum as empresas criarem seu próprio sistema de referência para orientação de furos, galerias e túneis, ou em algumas operações mineiras e obras civis próximos de linhas de transmissão ou minas com depósitos ferromagnéticos. Por experiência própria, passamos por situação similar de redefinir a orientação teórica dos furos em testes realizados no norte da Finlândia, em local muito próximo do polo magnético.

Diante das situações descritas, o desviômetro foi desenvolvida com uma funcionalidade inovadora e bastante útil para registrar ou editar furos teóricos usando sua própria sonda. Este método foi projetado para ser utilizado no campo. Esta metodologia serve para incluir ou modificar os valores da inclinação e azimuth, independente de os dados dos furos terem sido baixados do modo “Online”⁹⁹ ou criados no modo “Offline”. Para esta funcionalidade, o

⁹⁹ Esta função não irá modificar os dados originais na plataforma de otimização de desmonte, ao menos que estes dados, após alterados na aplicação do desviômetro, sejam carregados para a plataforma de *design*, conforme descrito na seção 6.2.2.a – Projetos Online

usuário deve proceder com os seguintes passos: posicionar a sonda fixamente no emboque do furo, na direção e inclinação desejadas¹⁰⁰ (figura 95.b). Na aplicação, clicar na função “*Get Theoretical Info from Probe*” (figura 95.c). Ao clicar neste botão, os valores da inclinação e azimuth mudarão instantaneamente através dos dados captados pelos sensores e posição da sonda (figura 95.d). Ao final da ação, os novos valores teóricos de inclinação e azimuth ficarão registrados na aplicação (figura 95.e).

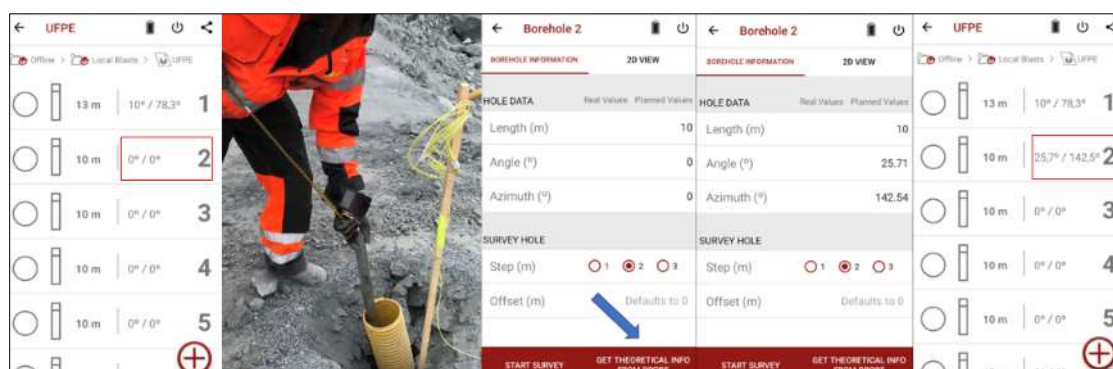


Figura 95 – Tomando valores teóricos a partir da sonda: a) informação do furo 2 com valores de inclinação e azimuth automáticos; b) posicionando a sonda no emboque do furo (acervo do autor); c) Botão “Get Theoretical Info from Probe”; d) e e) valores teóricos modificados

6.2.5 – Demais Funcionalidades: Configurações

Ao premir o botão  em qualquer interface que ela estiver disponível, será ativada a barra lateral. Lá estará disponível a função “*Settings*”, que serve para configurar a aplicação e/ou a sonda (figura 96).

¹⁰⁰ Nesta etapa recomenda-se utilizar niveladores e/ou bússolas manuais como auxílio

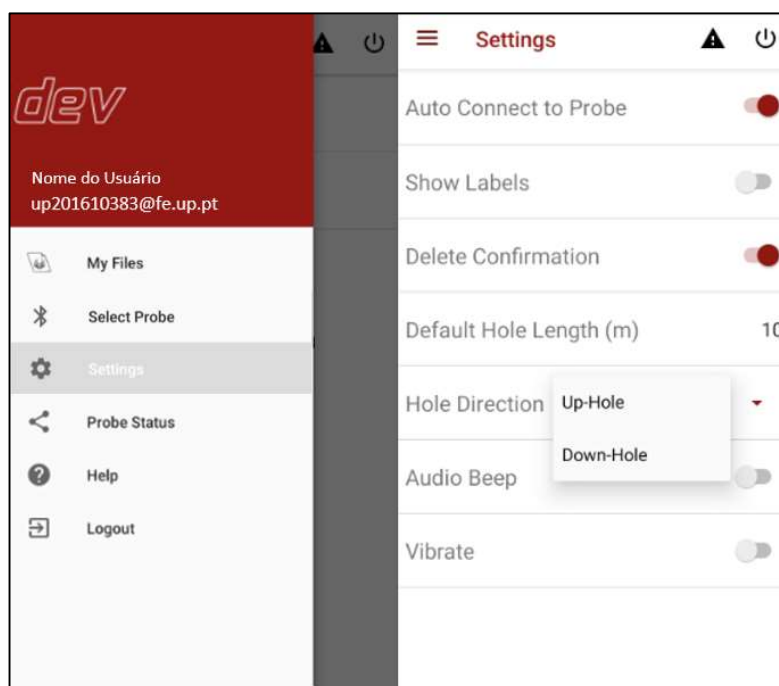


Figura 96 – Demais funcionalidades para configuração da aplicação e da sonda

A descrição destas funcionalidades são as seguintes:

Auto Connect to Probe – Uma vez que a aplicação reconheça a sonda, após ser pareada com o dispositivo de controle, sempre que a sonda e o dispositivo estiverem ligados e dentro do campo de alcance do *Bluetooth*, eles se conectarão automaticamente;

Show Labels – Como informado neste capítulo e ao longo da presente tese, é possível baixar e armazenar diretamente de *softwares* de desmonte de rochas os parâmetros geométricos dos furos de um planeamento de desmonte. A maioria das plataformas de otimizações de desmonte permitem rotular os furos por números ou por códigos alfanuméricos. Esta

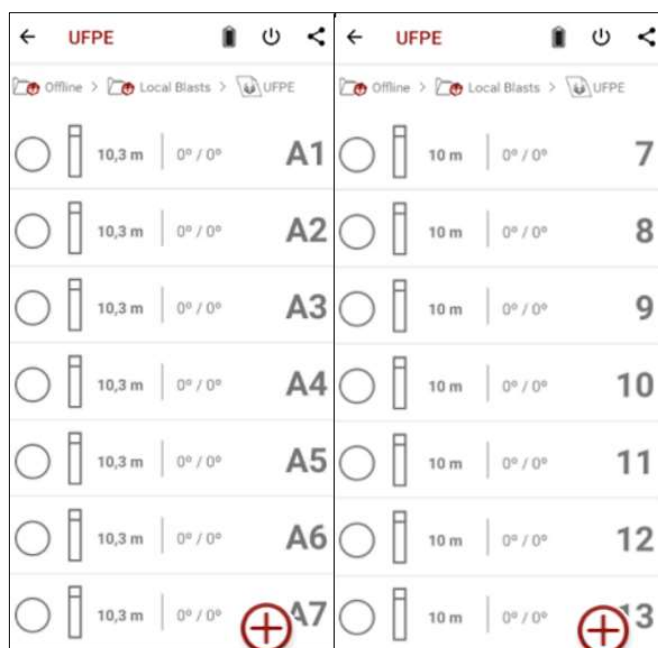


Figura 97 – Rótulos dos furos: a) por identificação alfanumérica, e b) por sequência numérica

função “*Show Label*” do aplicativo do desviómetro permite que, ao baixar um projeto “*Online*”, caso os furos estejam identificados com códigos alfanuméricos, como no exemplo da imagem acima (figura 97), seja possível optar por manter seu código/nome de origem, ou que eles sejam mostrados numa sequência numérica, respeitando as limitações de edição da interface “*online*” descritas na secção 6.2.2.a. Quando esta função é ativada, ela mostra a identificação (rótulo) de origem dos furos.

Delete Confirmation – Permitir ou bloquear a tela de notificação antes de um furo ou projetos serem definitivamente deletados (figuras 90 e 92 – secção 6.2.2.b). Ao seleccionar esta opção, sempre que um elemento for deletado na aplicação, a tela de questionamento e confirmação da ação aparecerá.

Default Hole Length (m) – Como explicado na secção 6.2.3, esta função configura o valor do comprimento teórico do furo, sempre que a função “*Offline*” for ativada, e desde de que não tenha inserido manualmente ou baixado nenhum valor. Nos exemplos desta tese, o comprimento teórico do furo foi definido como 10 metros (figuras 91 a 93 e 95).

Hole Direction – Aqui o utilizador opta por fazer a verificação do perfil do furo no sentido emboquilhamento/fundo do furo (*Down-Hole*) ou o sentido inverso (*Up-Hole*). Esta função será detalhada no próximo capítulo.

Audio Beep e Vibrate – A primeira função ativa uma sinal sonoro. A segunda faz com que o dispositivo de controle vibre. Ambas funcionam a cada vez que a tomada de uma medida do perfil do furo for tomada, como será mostrado no próximo capítulo (função “*Measure*”).

7 – MODO DE UTILIZAÇÃO DO DESVIÓMETRO

7.1 – Funcionamento da Sonda

Ao contrário dos dispositivos de medição de furos apresentados no capítulo 3, o desviómetro não possui botões ou chaves físicos para ser ligado ou desligado. Para ligar/ativar a sonda basta fazer um movimento brusco com ela. Este movimento fará com que todos os componentes do sistema sejam ativados, fazendo com que os sensores inerciais (acelerómetro e giroscópio) enviem um comando para que o microprocessador entre em modo de operação, iniciando o equipamento. O LED mostrará uma luz vermelha, indicando que o equipamento está ligado. A luz do LED serve para indicar informações sobre o estado da sonda. Além da luz vermelha, existem as luzes indicativas verde, que informa que a sonda está calibrada e pronta para uso, e azul, que indica que a sonda está coletando dados. A luz azul se acenderá quando o operador clica, na aplicação, na função “*Start Survey*”, conforme será explicado na próxima seção. Enquanto a sonda estiver coletando dados, a luz azul ficará acesa. Quando a sonda volta a conectar-se com o *smartphone* e o operador clica em “END”, a luz de LED volta a ficar verde.

Após a sonda ser ligada, o algoritmo aguardará por mais informações, conforme descrito:

- **Vermelho** – Ligado, não conectado ao dispositivo de comando.
- **Verde** – Ligado, conectado ao dispositivo de comando, calibrado e pronto para uso. Aguardando comando;
- **Azul** – Ligado, sendo operado pela aplicação no dispositivo de comando /Tomando medidas;



Figura 98 – Informações visuais das luzes de LED

As demais indicações do sistema de luzes de LED da sonda são as seguintes:

- Se nenhuma das luzes estiverem acesas, significa que a sonda está desligada ou descarregada;
- O dispositivo foi desenvolvido com um modo de suspensão, no qual o processador entra em módulo “*deep sleep*¹⁰¹”, os sensores em módulo de economia de energia, e o sistema *Bluetooth* é desligado. Desta maneira:
 - A sonda irá se desligar automaticamente após 30 segundos se:
 - Com a luz acesa na cor vermelha, sem que seja feito o processo de calibração, não se conecte com nenhuma unidade de controle ou não seja dado nenhum comando;
 - Com a luz na cor verde, se a sonda não estiver conectada com nenhum dispositivo, ou ainda, se não receber nenhum comando da aplicação.
 - A sonda se desligará automaticamente após 5 minutos se a luz LED acesa na cor vermelha ou verde, com a sonda conectada à unidade de controle, após iniciado alguma operação que não seja o “*Start Survey*”, e não houver mais nenhum comando;
- A sonda não se desligará automaticamente quando a luz LED estiver na cor azul. Apenas clicando-se no botão de desligar  na aplicação, ou após finalizar a sondagem num furo e clicando em “END”, que faz com que a programação entenda que a sonda voltou à condição do item anterior (luz verde);

¹⁰¹ Designação do fabricante (Bosch Sensortec GmbH, 2016)

Em todas as condições a sonda pode ser desligada clicando no botão na aplicação;

7.2 – Usando o Aplicativo para Aferir os Parâmetros Geométrico dos Furos

Tanto na interface “online” como na interface “offline” do aplicativo é possível aferir a trajetória real do furo executado, desde que observando as peculiaridades de cada interface, como descrito na seção 6.2.2 do capítulo anterior.

The screenshot shows the 'Borehole 1' application interface. At the top, there is a back arrow, the title 'Borehole 1', and a power button icon. Below this is a tabbed interface with 'BOREHOLE INFORMATION' selected and '2D VIEW' as an option. Under 'BOREHOLE INFORMATION', there is a 'HOLE DATA' section with a sub-header 'Real Values' and 'Planned Values'. The data includes: Length (m) set to 10, Angle (°) set to 0, and Azimuth (°) set to 0. Below this is the 'SURVEY HOLE' section, which includes a 'Step (m)' field with three radio button options: 1, 2, and 3. Option 2 is selected. There is also an 'Offset (m)' field with the text 'Defaults to 0'. At the bottom, there are two buttons: 'START SURVEY' and 'GET THEORETICAL INFO FROM PROBE'.

A aferição da geometria do furo pode ser iniciada a partir de qualquer furo no campo como sua numeração análoga na aplicação. Não é necessário seguir a sequência numérica do plano. Entretanto, neste exemplo, para demonstrar como utilizar a aplicação no campo, iniciaremos medição pelo furo 1. Para começar, o usuário deve clicar na linha do furo correspondente na aplicação para ativar a interface com suas informações (*Borehole Information*) e configurações da medição (*Survey Hole*) (figuras 93 e 94 – seção 6.2.3 e figura 100).

Figura 99 – Interface com dados do furo (Borehole) 1

Antes de iniciar o perfilamento do furo, é necessário escolher o intervalo de medições (passo ou “Step”): 1, 2 ou 3 metros (figura 100). A escolha do sentido de aferição da geometria do furo¹⁰² tem bastante relevância no uso do desviômetro. A depender da escolha, as seguintes metodologias devem ser adotadas em campo:

¹⁰² Seção 6.2.5

Perfilamento a partir do fundo do furo ao emboquilhamento (*Up-Hole*) –

Na aplicação o intervalo das medições deve ser escolhido (1, 2 ou 3 metros). Em seguida, a função “Start Survey” deve ser ativada. Só, e somente só quando clicado na função “Start Survey” com a sonda e o dispositivo de controle ativados (ícone  ativado), a sonda deve ser totalmente baixada ao fundo do furo. Quando a sonda tocar fundo do furo (situação em que o ícone mudará para ) e a corda marcar uma profundidade que não seja um múltiplo do intervalo selecionado, ou seja, a marcação da corda no intervalo selecionado não está alinhada com o emboque do furo, significa que esta diferença é o *offset*¹⁰³. Ele deve ser medido preferencialmente com uma trena, e seu valor em metros deve ser registrado no local indicado na aplicação (figura 101).

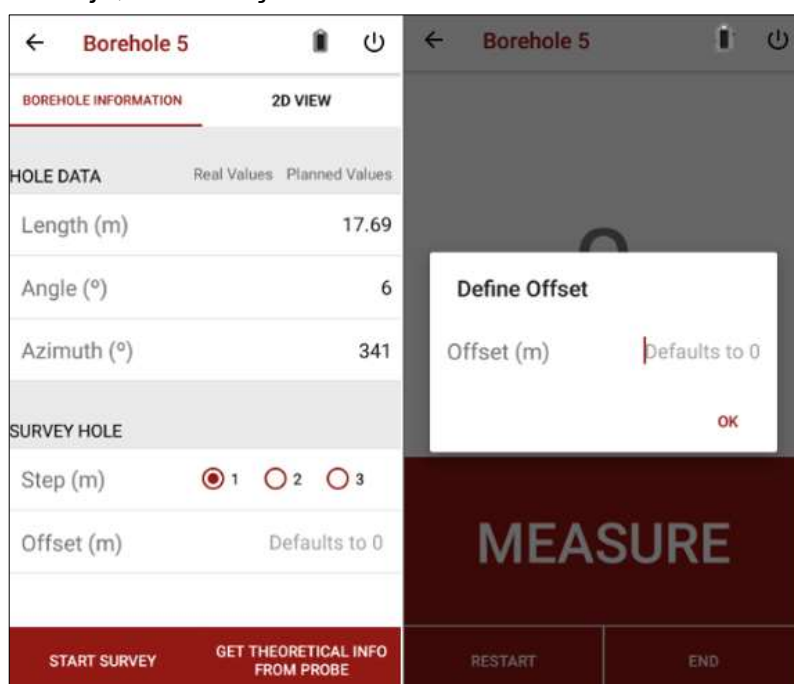


Figura 100 – Registro do offset na aplicação

Perfilagem a partir do emboquilhamento ao fundo do furo (*Down-Hole*) –

Nesta situação, o *offset* deve ser definido ao final das medidas da geometria do furo. Ao clicar no botão “END” quando a sonda tocar o fundo do furo, visualiza-se o valor do *offset* na corda, preferencialmente com auxílio de uma trena. Só é possível registrar este valor após a sonda voltar a se conectar com a aplicação, ou seja, quando o ícone  mudar para . Por medida de segurança, a aplicação foi desenvolvida de modo a não ser possível confirmar o registro

¹⁰³ *Offset* – Condição em que o furo tem um tamanho que não seja o múltiplo do intervalo adotado. A posição da primeira medida e as medidas restantes serão diferentes. Esta diferença é geralmente chamada *offset*, enquanto as outras medidas serão iguais ao intervalo adotado (Miranda & Leite, 2018). Esta metodologia está pormenorizada na seção a seguir.

do valor do *offset* até a sonda voltar a se conectar com o dispositivo de controle ao sair do furo.

Finalmente, para utilizar o desviômetro para o objetivo com o qual ele foi desenvolvido, ou seja, medir o perfil geométrico do furo, observando as condições de sentido da aferição explicadas acima, deve-se clicar em “*Start Survey*” (fig. 101.a). Assim a aplicação mudará para a interface de medir os furos (fig. 102.a). A sonda deve ser elevada (ou baixada) no intervalo de medições (passo ou “*step*”) selecionado n vezes, a depender do tamanho do furo, até a boca do furo, e coleta dos dados nestas n paradas. Para cada intervalo selecionado, a corda (meio de tração) deve ser utilizada a corda como auxílio para verificar a posição da sonda no furo¹⁰⁴. Por exemplo: se o intervalo de medições selecionado for 1 m, e o furo possuir 10 m de comprimento, a sonda será movimentada 10 vezes ($n = 10$)¹⁰⁵. Na aplicação deve-se proceder conforme o exemplo da figura 102, no qual apresentamos a sequência da tomada de apenas duas medidas de um furo partindo do emboquilhamento (zero). Para cada intervalo (“*step*”) selecionado, a aplicação tomará a seguinte sequência¹⁰⁶:

MEASURE – Aciona os sensores para registro da posição, orientação, inclinação e instante de medição para propósitos de sincronização quando da transferência para a aplicação móvel;

WAIT – Intervalo de 3 segundos intencionalmente programado na aplicação para que a sonda se estabilize, e os sensores detectem as várias pequenas alterações durante cada segundo, observando a frequência de 20 medições por segundo para garantir uma precisão menor que $\pm 0,25^\circ$. No final de cada segundo, uma média é feita com todos os valores, a fim de atenuar os picos de medição;

¹⁰⁴ Mais detalhes na seção a seguir

¹⁰⁵ Ver equação 18 da seção 7.3

¹⁰⁶ O funcionamento dos sensores se encontra no tópico 5.3.1

PULL (ou PUSH) – Informação de que a aplicação já tomou as medidas naquele ponto do furo, e que o operador deve movimentar a sonda para o próximo ponto, ou encerrar a medição (**END**);

END - Os sensores e o temporizador são desativados, e todos os valores medidos são salvos no armazenamento interno do dispositivo.

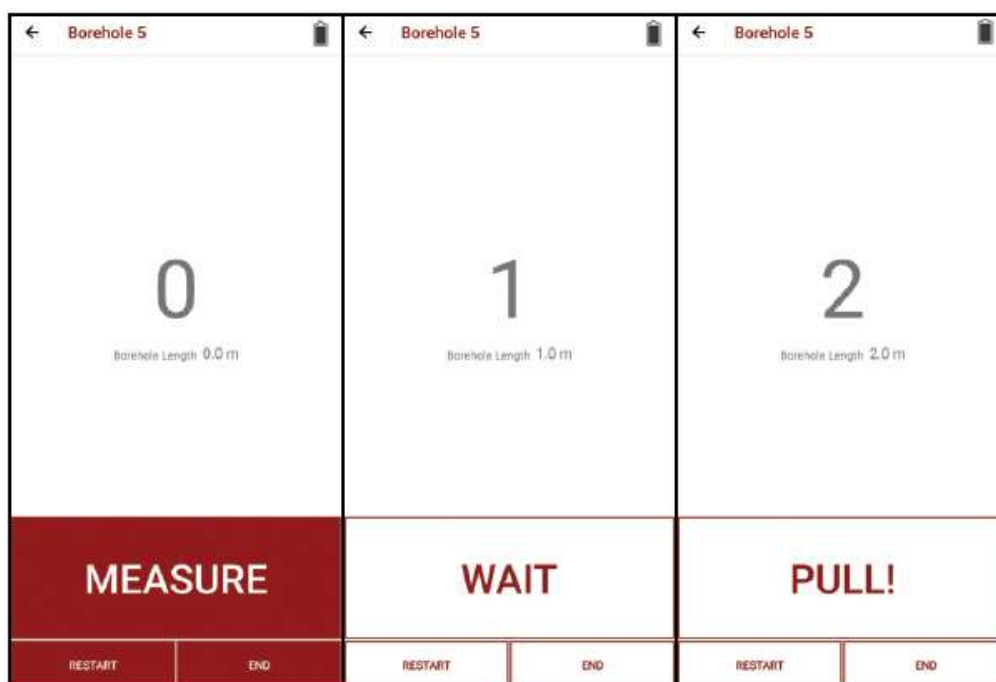


Figura 101 – Interfaces das medições do furo

Outras funções opcionais que auxiliam durante a aferição do furo são:

RESTART – Permite recomeçar toda a medição da geometria do furo, sem que os dados dos demais furos de um projeto restem prejudicados;

UNDO – Permite deletar (desfazer) apenas o último passo/intervalo de uma medição do furo e refazê-la.

Durante a aferição, esta interface da aplicação também mostra o comprimento do furo, o sentido selecionado (*Up-Hole* ou *Down-Hole*) e a etapa escolhida.

Após clicar no botão “END”, a tela da aplicação deve ser movida para a esquerda, onde será possível visualizar o resultado do perfil geométrico real do furo. Ao clicar nos botões “SIDE”, “BACK”, “TOP” e “RESUME” é possível ver as características geométricas do furo (figura 103).

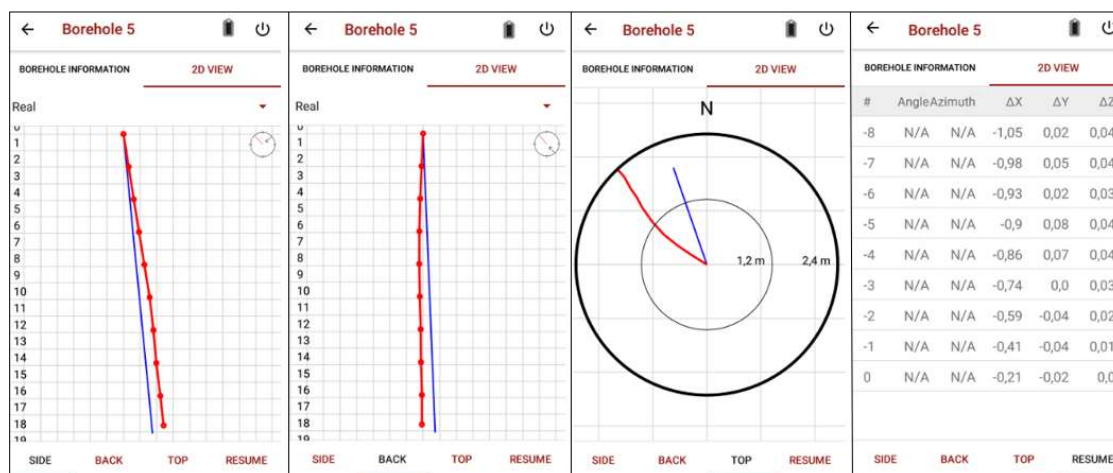


Figura 102 – Saídas gráficas com representação da geometria dos furos após sondagem: em azul geometria planejada, e em vermelho, condições reais

7.3 – Meio de Tração: Sistema de Marcação e Registro do Offset



Figura 103 – Acima, conector semipermanente de 75 mm para acoplar a corda à sonda, e abaixo mosquetão 11 cm para conectar ao cinto de segurança do operador ou outro local seguro

Como já abordado na seção 5.4, apenas com os sensores da sonda do desviômetro por si só não é possível determinar o comprimento do furo. Para isto são necessárias ações visuais do usuário. Logo, um meio de tração foi desenvolvido para auxiliar na obtenção mais exata possível do valor da profundidade do furo. Este acessório deve ser acoplado à sonda através do conector semipermanente de 75 mm como mostrado na imagem ao lado (fig. 104). Já o mosquetão Screw Lock 11 cm deve ser conectado ao cinto de

segurança do operador, ou em local seguro, de maneira que evite a queda do equipamento dentro do furo.

O meio de tração possui um sistema de marcações intercaladas de metro em metro, num inovador e fácil sistema de cores e números para auxiliar na visualização do comprimento do furo e dos intervalos de medições. O sistema consiste na seguinte forma (tabela 24 e figura 105):

- Escolhendo intervalos de medições do furo (*step*) de 1 em 1 metro na aplicação – Todas as marcações na corda devem ser utilizadas, independentemente da cor;
- Escolhendo intervalos de medições do furo (*step*) de 2 em 2 metros na aplicação – Apenas as marcações com os números pares e/ou as marcações na cor preta na corda devem ser utilizada;
- Escolhendo intervalos de medições do furo (*step*) de 3 em 3 metros na aplicação – Apenas marcações cujas numerações são múltiplas de 3 e/ou as marcações na cor vermelha na corda devem ser utilizadas;
- Os números que são ao mesmo tempo pares e múltiplos de 3 estão com marcação vermelha e preta (6, 12, 18 e assim por diante).

	Intervalos de Medição (<i>Steps</i>)	Cor
1 1 1 1	Intervalo de medição de 1 em 1 m	Todas
8 8 8 8	Intervalos de medição de 2 em 2 metros	Preto
15 15 15	Intervalos de medição de 3 em 3 metros	Vermelho
18 18 18	Marcações onde os números são pares e múltiplos de 3	Rubro-negro

Tabela 24 – Representação e identificação do sistema de cores e números do meio de tração do desviômetro



Figura 104 – Esquema de cores e números do meio de tração

Como mostrado na imagem ao lado, é necessário selecionar no aplicativo o intervalo de medição (*step*) a ser usado durante a introdução da sonda no furo. O intervalo desejado deve ser entre 1, 2 ou 3 metros.

Modo de uso no campo – O comprimento (ou profundidade) do furo está diretamente ligado ao número de medidas que o utilizador recolhe, ao passo (*step*) escolhido, e ao *offset* inserido na aplicação. Como informado nas seções anteriores, a sonda deve ser deslocada no interior do furo na direção escolhida nas configurações do aplicativo (*Up-Hole* ou *Down-hole*) até o marcador da corda alinhar com o emboque do furo. Este procedimento deve ser repetido marcação por marcação, ignorando-se os marcadores que não estão em uso. Por exemplo, se o intervalo de profundidade selecionado for 1 m, todos os marcadores devem ser considerados. Em caso intervalo selecionado for 2 m, somente os marcadores pretos devem ser usados. E no caso de o intervalo de 3 m ter sido selecionado na aplicação, considera-se apenas os marcadores vermelhos. Independente do sistema de cores, todas as marcações estão numeradas.

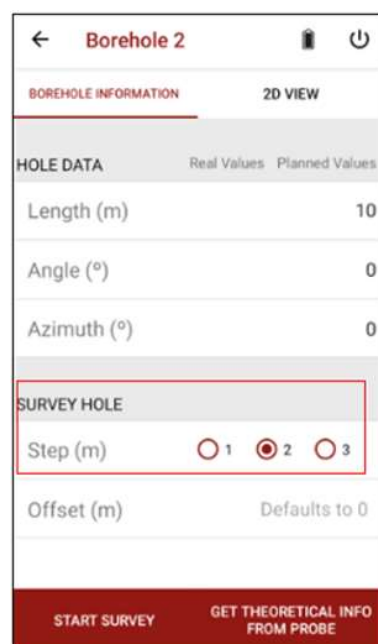


Figura 105 – Destaque das opções de escolha do intervalo de medição no aplicativo

A distância utilizada como intervalo entre uma medição e outra na corda foram adotadas em valores inteiros entre um e três. É comum que os furos perfurados não tenham comprimentos em números inteiros. Nestes casos, quando a sonda está inserida no interior do furo, e há uma diferença entre a marcação adotada da corda (*step*) excedente à linha horizontal do emboquilhamento, ou seja, fora do furo, à esta diferença chamamos de *offset* (Miranda & Leite, 2018).

Assim, podemos representar o *offset* da seguinte forma: usando como exemplo um usuário que escolheu um sentido da aferição qualquer, como mostrado na seção anterior, e o passo (intervalo de medições) de 3 m. O *offset* registrado com a corda e trena foi 1,5 m. Foram registradas 10 medidas ao longo do trajeto da sonda no interior do furo. A fórmula para o cálculo do comprimento (ou profundidade) do furo é:

$$L = (n * \Delta z) - \text{offset} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

L = Comprimento do Furo (m)

n = Número de medidas ou paradas por furo

Δz = Intervalo de medição ou passo (*step*) adotado = 1, 2 ou 3 m

Assim, o comprimento do furo do exemplo acima é:

$$L = (10 * 3 \text{ m}) - 1,5 \text{ m}$$

$$L = 28,5 \text{ m}$$

Logo, com base no exposto acima, o *offset* é expresso como:

$$\text{offset} = (n * \Delta z) - L \quad \text{Equação 19}$$

A figura a seguir ilustra um esquema destes procedimentos, juntamente com a representação do *offset*:

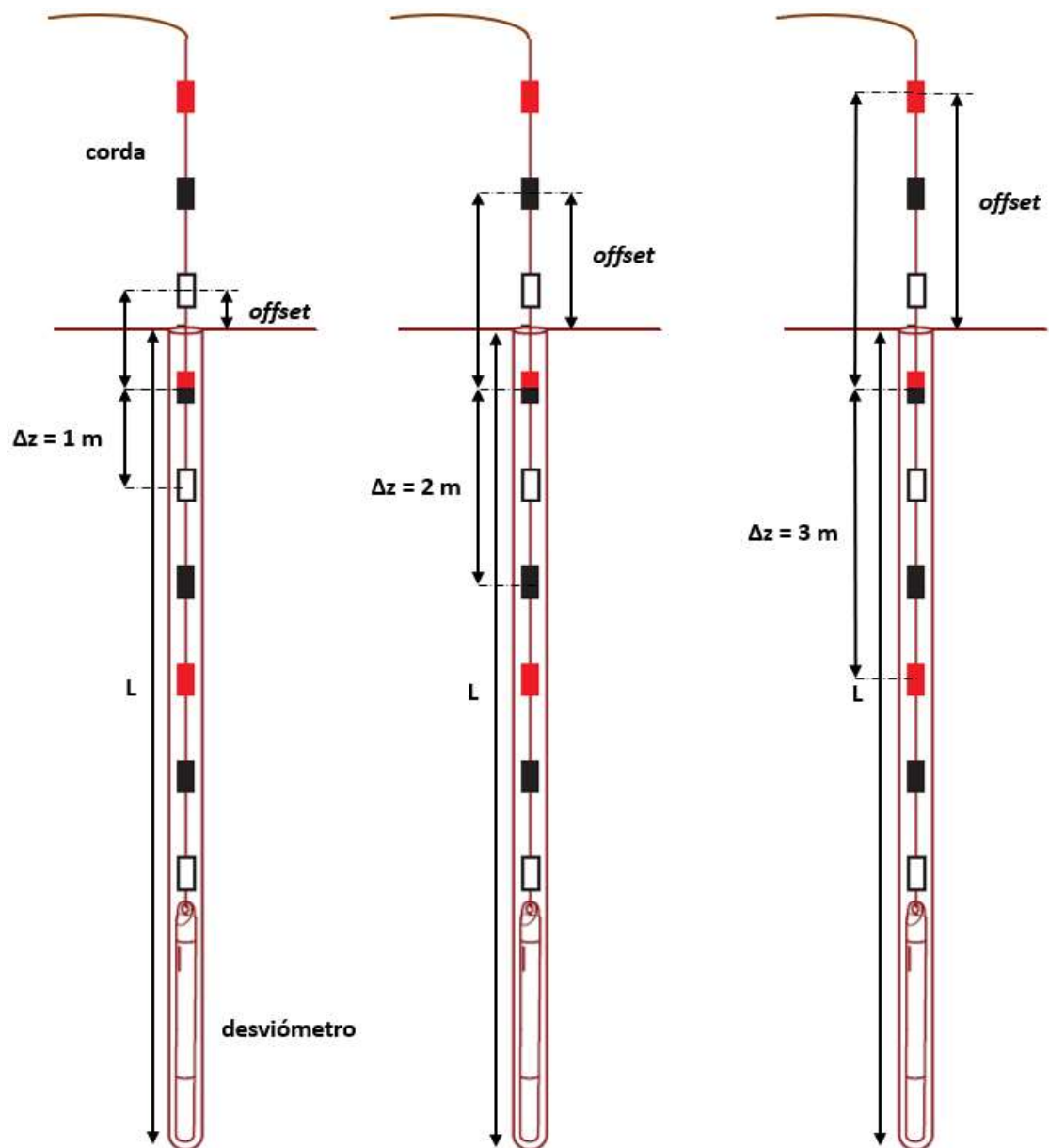


Figura 106 – Procedimento de visualização do offset com a corda para cada intervalo de medição selecionado (steps): a) 1 m, b) 2 m, e c) 3 m (imagem ilustrativa fora de escala)

7.4 – Resumo

Diante do exposto neste capítulo, de maneira geral, o modo de operação do desviômetro (conjunto aplicação/sonda/meio de tração) deve ser realizada resumidamente da seguinte maneira, furo por furo:

- Escolha do sentido da medição no furo emboque ao fundo do furo ou fundo do furo ao emboque);
- Escolha do intervalo de medição (1, 2 ou 3 m);

- Medição do *offset* (preferencialmente com uso de trena);
- Inserção do valor do *offset*;
- Introdução da sonda no interior do poço (a partir daqui, considera-se como exemplo o sentido da medição como do fundo do furo ao emboque);
- Registro da primeira medida no fundo do furo para coleta dos dados desta posição;
- Elevação da sonda até que a marcação da corda do intervalo de medição selecionado (1, 2 ou 3 m) se alinhe com o emboquilhamento do furo para novo registro e coleta de dados desta posição;
- Elevação da sonda no intervalo selecionado n vezes, a depender do tamanho do furo, até o emboque do furo, e coleta dos dados nestas n paradas;
- Fora do furo, os registros da aplicação com os dados coletados pela sonda são combinados, obtendo-se assim as informações necessárias do furo: comprimento, ângulo e azimuth.

8 – TRATAMENTO DOS DADOS

8.1 – Aferição do Furo de Forma Contínua: Tentativa pelo Método de Euler

A ideia principal por trás desta metodologia foi tentar validar a funcionalidade do desviómetro pelo método de Euler, com base nas informações geradas pelo sensor acelerómetro, a fim de reproduzir a geometria do furo de maneira continuada, ou seja, sem que o operador do desviómetro necessitasse realizar paradas com a sonda ao longo do furo, em intervalos pré-estabelecidos. Realizou-se um estudo de caso, utilizando-se em campo um equipamento tradicional (Boretrak® de cabos) e o primeiro protótipo funcional do desviómetro. Para a validação do protótipo, tomou-se a medida de vários furos através das 2 (duas) ferramentas, confrontando-se os resultados das medições de desvios de furos feitos com ambos os dispositivos. Esta foi a primeira e única tentativa de comprovar matematicamente o potencial de usar os sensores aliados a um método numérico tradicional para análise do desvio de furos de forma continuada.



Figura 107 – Primeiro protótipo funcional utilizado em teste de campo para validar a operacionalidade do equipamento pelo método de Euler

8.1.1 – O Método de Euler

A fim de corrigir problemas numéricos com o formato abaixo, Euler propôs uma solução baseada no conhecimento prévio sobre o comportamento da função (Butcher, 2003):

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0 \quad \text{Equação 20}$$

A partir de um ponto conhecido, a próxima iteração é abordada pela seguinte equação:

$$y(t_1) \approx y_1 = y_0 + hf(t_0, y_0) \quad \text{Equação 11}$$

Onde h é o tamanho do passo usado para cada medida.

A imagem abaixo (figura 108) mostra a solução real para um exemplo genérico e a aproximação de Euler para passos diferentes (10 e 100 passos). Pode-se observar que, para os valores mais elevados do número de passos, a solução é mais próxima do real, ou seja, quanto menor o tamanho do passo, menor o erro, e quanto maior o número de passos, menor serão as distâncias de avaliação. O método de Euler é de primeira ordem, com erro diretamente proporcional à amplitude do passo.

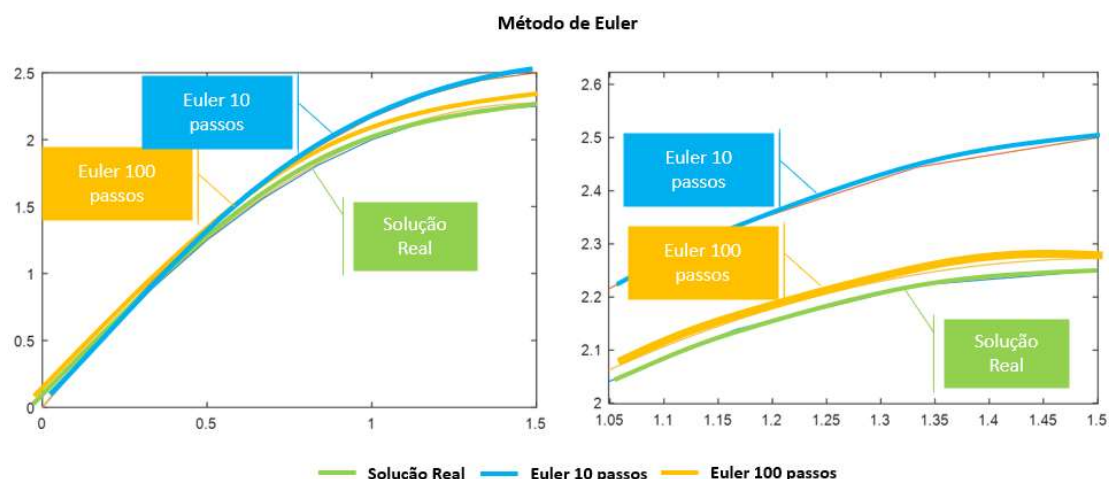


Figura 108 – Exemplo do método de Euler. Dados genéricos de unidade qualquer

8.1.2 – Procedimento de Campo

O teste foi realizado na pedreira da Madalena, na cidade de Vila Nova de Gaia – Portugal, pertencente à empresa Solusel, Lda. Foram usados para este teste, 8 furos permanentes existentes numa bancada desta pedreira, que faz parte do denominado Campo Experimental em Lavra de Minas (CELaMi), fruto de uma parceria entre a Solusel e a FEUP. Este teste teve lugar da seguinte forma:

- Varrimento (digitalização ou *scanning*) da face livre da bancada; com Drone;
- Registro da posição dos furos;
- Medição do perfil dos furos com um Boretrak® de cabos;
- Medição do perfil do furo com o protótipo desenvolvido (Figura 110)
 - Introdução do protótipo até o fundo do furo;
 - Medição do *offset*;
 - Registro da primeira medida no fundo do furo;
 - Elevação da sonda até o emboquilhamento do furo, realizando paragens de metro em metro para registros de dados com a aplicação instalada no telemóvel;
 - Sonda e a aplicação no telefone estabelecem contacto para combinação das informações – tempo, ângulo e azimuth.



Figura 109 – Procedimento de campo: a) montagem da sonda; b) introdução da sonda no furo; c) medição do offset e; d) registro da medição

8.1.3 – Análise dos Dados e Resultados

Nesta abordagem, com o intuito de descrever a geometria do furo, foram encontradas algumas restrições usando a metodologia de Euler devido às limitações da taxa de amostragem (Figura 111). Foram obtidas cerca de 300 amostras/segundo, número insuficiente para se obter o deslocamento da sonda (posição) através da aceleração, aplicando o método de Euler 2 vezes: a 1ª iteração ocorre para achar a velocidade da sonda a partir da captação das acelerações locais e pontuais pelo acelerómetro, e a 2ª iteração a partir da velocidade para obter o deslocamento (posição).

É possível observar no gráfico abaixo (figura 111) a discrepância entre os resultados bidimensionais obtidos pelo equipamento tradicional (formato em verde) e os obtidos pelo desviômetro programado através do método de Euler, para definir a geometria do furo de forma continuada (formato em azul). O formato bidimensional do furo destacado em laranja, é resultado da obtenção dos dados do protótipo do desviômetro por rotação vetorial, método que será abordado no tópico a seguir.

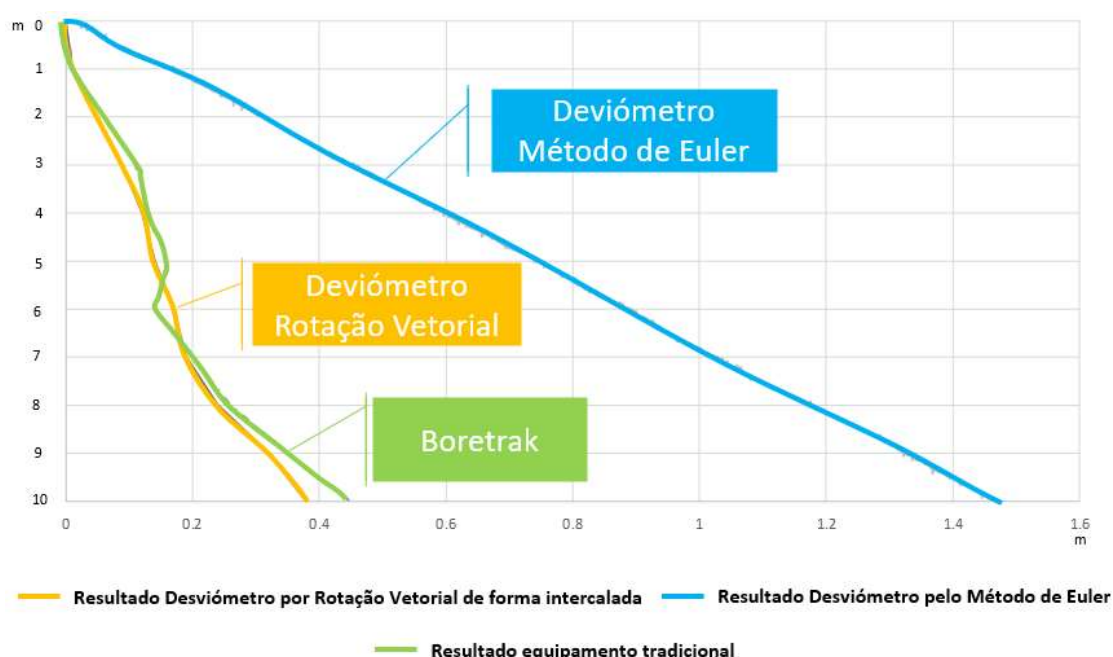


Figura 110 – Comparação da geometria de um furo resultante: pela metodologia de Euler (azul), pelo Boretrak® de cabos (verde) e pelo método usual (laranja)

8.1.4 – Considerações sobre o Método Adotado

Usando a metodologia de Euler, não foi possível reconstruir a geometria do furo baseado apenas nos dados fornecidos pelo sensor acelerômetro. As 300 amostras por segundo obtidas foram insuficientes. Logo, concluímos com este teste, que seria necessário aumentar a taxa de amostragem para se obter melhores resultados, o que demonstrou não ser possível realizar-se, tendo em vista as limitações de memória para armazenamento dos dados, como abordado no tópico 5.3.2. Neste teste, tendo em vista o aproveitamento indevido e a não utilização do potencial dos sensores utilizados, não foi possível obter uma melhor solução. No entanto, como será demonstrado a seguir, os

resultados obtidos usando a direção e a inclinação do protótipo foram extremamente interessantes do ponto de vista experimental.

8.2 – Aferição do Furo de Forma Intercalada: Transformação dos Dados por Rotação Vetorial

Com a tentativa infrutífera de reproduzir o formato de furos pelo método de Euler, focamos o desenvolvimento do desviômetro para fornecer a geometria de furos de forma intercalada, utilizando todas as informações provenientes do pacote de sensores (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro), através de outro método matemático: a transformação dos dados por rotação vetorial. Como será exemplificado a seguir, adotamos a metodologia do trabalho de Miranda & Leite (2018), que, conforme informado no capítulo 1, serviu como embrião da presente investigação.

Para fins do tratamento dos dados, consideramos que a posição do emboquilhamento de cada furo na bancada é a coordenada (0,0,0). O desviômetro será definido neste exemplo como sendo o vetor u . Logo:

$$u = (0, 0, -1) \times \Delta z \quad \text{Equação 22}$$

Neste exemplo, utilizando transformação linear, são aplicadas duas rotações ao vetor u : uma rotação no eixo x para obter a inclinação do furo e outra no eixo z para obter o azimute. A rotação no eixo z se faz no sentido negativo ao azimute desejado, uma vez que o azimute cresce no sentido inverso à rotação do eixo z . O processo é descrito abaixo:

- Primeira rotação:

$$R^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \text{Equação 23}$$

- Segunda rotação:

$$R^2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Equação 24

Onde:

θ = Inclinação;

- α = Azimute.

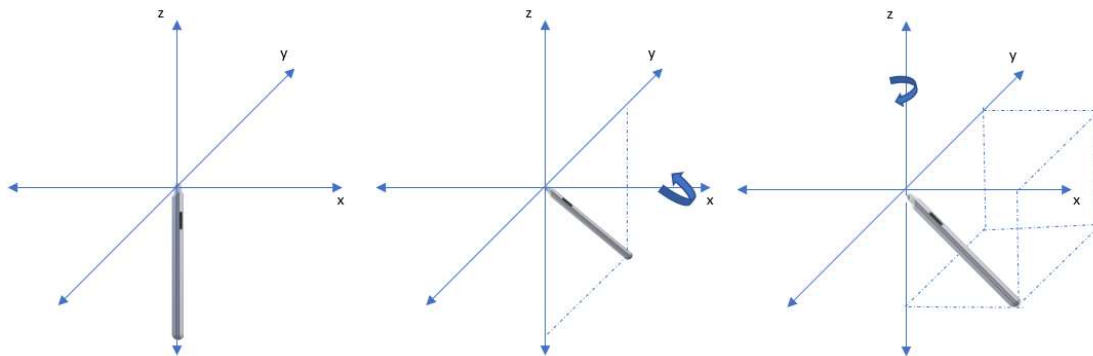


Figura 111 – a) desviômetro representado como vetor u iniciado no ponto $(0,0,0)$; b) representação da primeira rotação, e; c) representação da segunda rotação vetorial. Esquema fora de escala

Como resultado, um ponto será encontrado no espaço e adicionado à lista de pontos na programação da seguinte forma:

$$\text{Novo Ponto} = \text{Último ponto dentro da lista} + R^1 \times R^2 \times u'$$

Equação 25

O “novo ponto” é adicionado à lista de pontos reais na programação. Esta tarefa é repetida até o comando de cessar as medições, formando assim a geometria do furo.

Esta é a metodologia que rege a aquisição dos dados e funcionamento do desviômetro. Pode ser considerada simples do ponto de vista matemático, porém, sua programação é complexa para obtenção do resultado dos dados em 360° absoluto.

O resultado desta explanação, juntamente com o diagrama de blocos dos passos descritos no tópico 5.3.4 da presente tese, resultam nas informações mostradas ao usuário do desviômetro, conforme imagem abaixo:



Figura 112 – Exemplo dos dados com duas rotações apresentados na aplicação do desviômetro

Para fins de comparação, utilizando os mesmos dados do experimento de campo descrito na seção 8.1.2, é possível observar na imagem abaixo que os resultados das inclinações medidas pelo equipamento tradicional e pelo protótipo do desviômetro foram visualmente similares, quando utilizado a rotação vetorial.

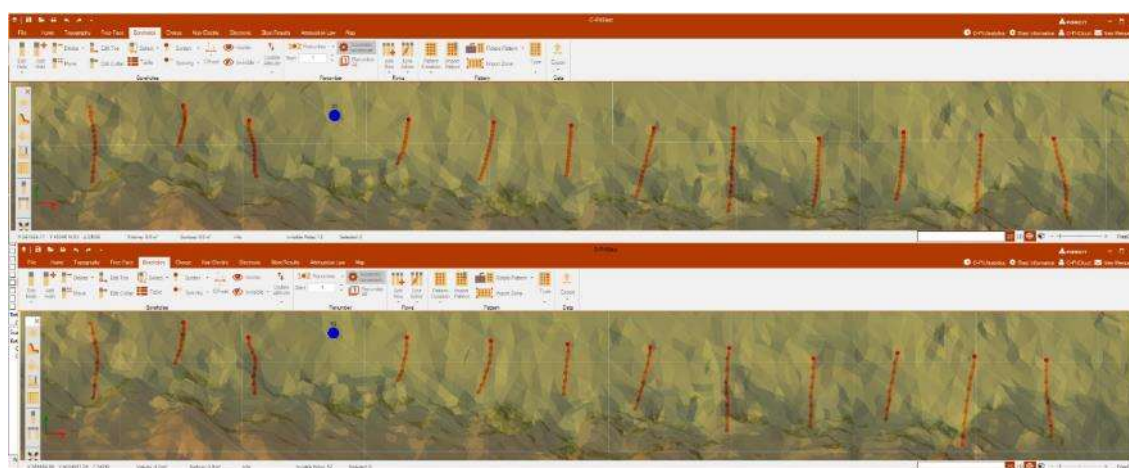


Figura 113 – Comparação das medições de direção e inclinação feitas pelos 2 dispositivos, utilizando o software O-Pitblast: acima resultado do equipamento tradicional. Abaixo, resultado do desviômetro pelo método de rotação vetorial

Explicado o método matemático que rege a funcionalidade do desviômetro, passa-se à validação desta metodologia.

PARTE III – VALIDAÇÃO

9 – VALIDAÇÃO

Neste capítulo comprovaremos a funcionalidade e precisão do desviómetro desenvolvido nesta investigação. Será mostrado a metodologia para validação através de uma análise estatística dos resultados do novo sistema desenvolvido na investigação, comparando-o com os resultados obtidos por dois dos principais equipamentos de medição de desvio de furos existentes no mercado: Blasthole Probe® da Pulsar© e o Boretrak® de cabos. Desta forma pretendemos comprovar mais uma vez sua precisão.

9.1 – Procedimento de Campo

A primeira parte consiste na captação de dados em campo. Os testes foram conduzidos em conjunto com uma equipe da empresa Forcit Explosives© em 3 diferentes minas na Finlândia. Todos os testes foram realizados com o protótipo do desviómetro e com os 2 equipamentos tradicionais do mercado, Blasthole Probe® da Pulsar© e o Boretrak® de cabos, todos devidamente calibrados, onde, a partir de agora, serão identificados respectivamente como Equipamento Tradicional 1 (ET1) e Equipamento Tradicional 2 (ET2). O Desviómetro será identificado como Dev. O objetivo foi comparar os dados resultantes dos 3 equipamentos.

O procedimento do teste consistiu na medição de 1 furo 20 vezes, e 4 furos medidos 5 vezes cada, com cada ferramenta.

Furo	Nº de Medidas	Dispositivo de Medição
1	20	ET1 / ET2 / Dev
2	5	ET1 / ET2 / Dev
3	5	ET1 / ET2 / Dev
4	5	ET1 / ET2 / Dev
5	5	ET1 / ET2 / Dev

Tabela 25 – Procedimento das medições

O procedimento de campo prosseguiu da seguinte forma:

- Registro das posições dos furos;
- Medidas dos perfis dos furos com os dispositivos ET1 e ET2;
- Medição do perfil do furo com o protótipo desenvolvido de acordo com o seguinte procedimento:
 - Introdução do protótipo até o fundo do furo;
 - Medição do *offset*;
 - Registro da primeira medida no fundo do furo;
 - Elevação da sonda até o emboque do furo, realizando paradas de 2 em 2 metros, registrando essas paradas com o aplicativo instalado em telemóvel;
 - Sonda e aplicativo no telefone se conectam para combinação das informações – tempo, ângulo e azimuth.



Figura 114 – Alguns registros dos testes: a) e b) com o protótipo; c) e d) com o Blasthole Pulsar® (acervo do autor)

Logo após os procedimentos de campo, seja com a tecnologia do protótipo ou com os outros dispositivos, os operadores obtiveram as informações da real inclinação, azimuth e profundidade do poço. Com essas informações e com softwares de design de desmonte de rochas, onde neste caso foi utilizado o *software* O-Pitblast®, foi possível analisar e comparar visualmente os seguintes dados obtidos pelos equipamentos:

- Perfis críticos: distância mínima dos furos da primeira linha à frente livre;
- Afastamento crítico;
- Riscos de projeções (*flyrocks*);
- Valores (quantificação) dos desvios;
- Ângulo real: foi possível ver e comparar se o furo planejado e o real tinham o mesmo ângulo;
- Locais com possibilidades de geração de repés.

Todas as características observadas acima resultaram dos dados obtidos pelos 3 equipamentos, e que indicaram visualmente sua igualdade, faltando apenas comprovar a similaridade estatisticamente.

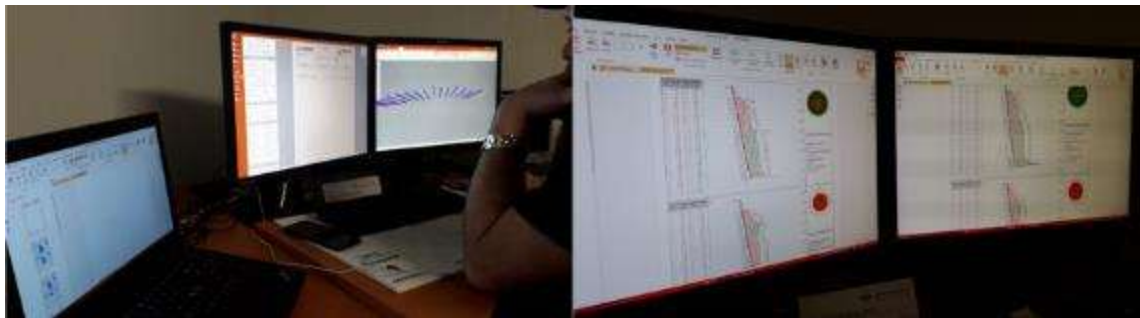


Figura 115 – Análise e comparação visual dos dados obtidos pelos equipamentos na plataforma O-Pitblast® (acervo do autor)

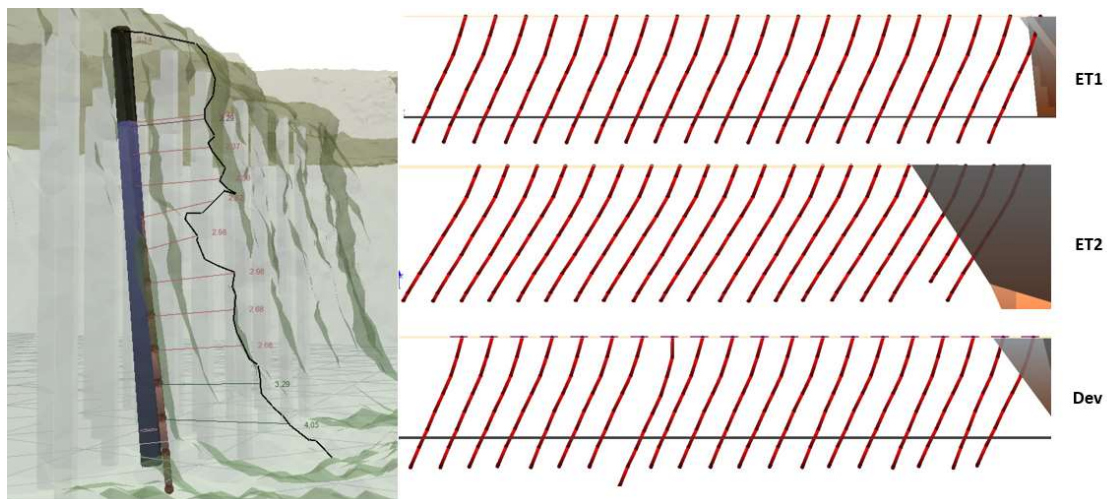


Figura 116 – Resultados dos testes de campo: comparação visual entre os dados dos equipamentos

9.2 – Análise Estatística

Para comparar os resultados obtidos, foi feita uma análise de resíduos (Vibration Control using an iPhone - Accuracy, Validation and Potentialities, 2018). O primeiro passo foi aplicar um teste paramétrico para comparação entre duas ou mais amostras, onde, para este caso, foi escolhido o ANOVA¹⁰⁷ (M. S. Laureano, 2013). Mas antes disto, foram analisados os *boxplots*¹⁰⁸ para os resíduos do ângulo e azimuth dos dados dos 3 dispositivos:

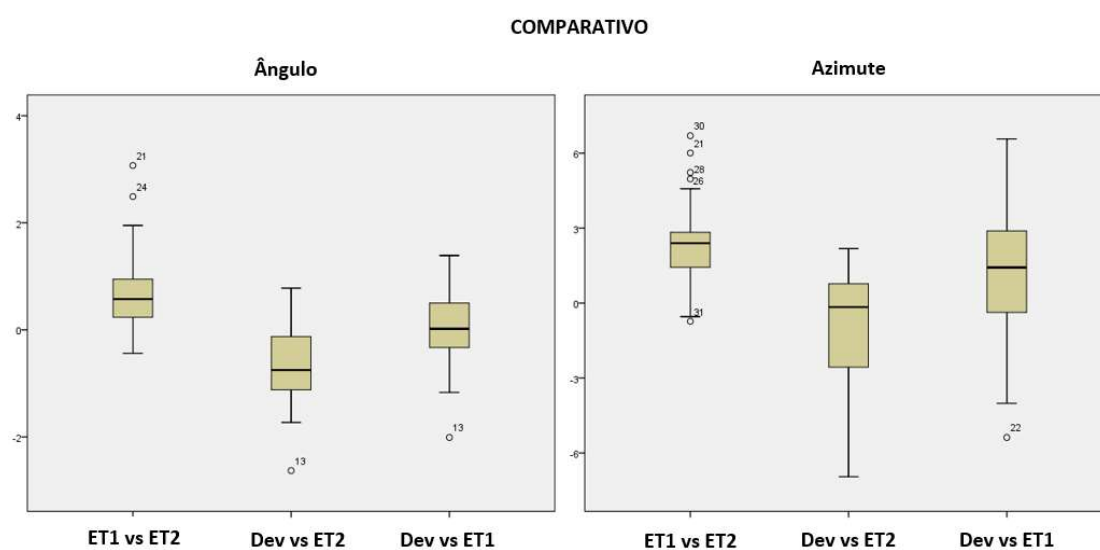


Figura 117 – Boxplots de resíduos em todos os dispositivos

Através da imagem acima, é possível identificar a presença de *outliers*. Depois de verificá-los usando a análise de 3 sigmas (Gama *et al*, 2017), os *outliers* foram removidos e novos *boxplots* foram gerados:

¹⁰⁷ Análise de Variância

¹⁰⁸ Ou Caixa de Bigodes. Tendo em vista que a maioria dos autores das referências consultadas utilizarem o termo “*boxplot*”, o autor decidiu prosseguir com a palavra anglófona

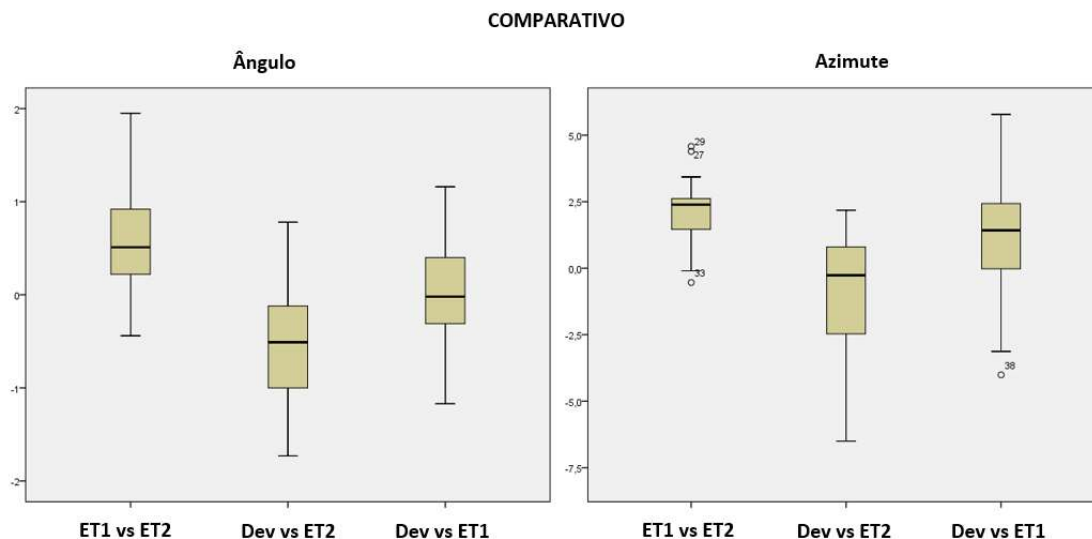


Figura 118 – Boxplot após remoção dos outliers

A análise visual não é conclusiva, então a análise ANOVA foi aplicada. Para usar esta análise é obrigatório verificar a normalidade dos dados e a homogeneidade da variância. O teste de normalidade foi feito (Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk), e o histograma e o Q-Q plot foram analisados. Os resultados são mostrados abaixo:

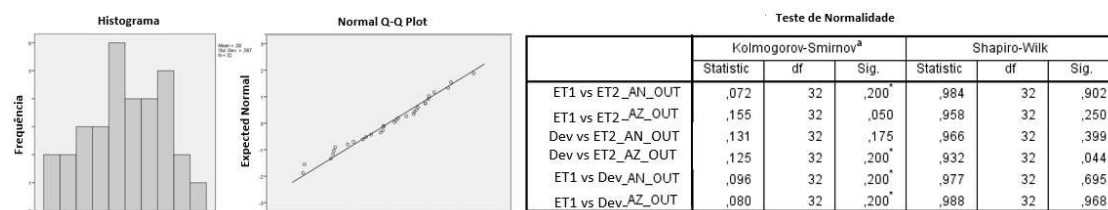


Figura 119 – Teste de Normalidade: Ângulo (AN) e Azimute (AZ)

Os resultados dos testes demonstraram a normalidade dos dados (para um nível usual de significância). Em seguida, tentou-se avaliar a homogeneidade da variância:

Resíduo do Ângulo				Resíduo do Azimute			
Estatística de Levene	df1	df2	Sig.	Estatística de Levene	df1	df2	Sig.
0,513	2	113	0,600	7,836	2	113	0,001

Tabela 26 – Teste da homogeneidade da variância

Foi possível concluir que a variância do resíduo do ângulo é homogênea (*p-value* maiores que 0,05), mas a variância do resíduo do azimuth não. É concebível usar não apenas o teste de hipóteses, mas todos os dados disponíveis para tirar essa conclusão (Moreira, Macedo, Costa, & Moutinho,

2011). Avaliando o gráfico de tendência Q-Q normal para o resíduo dois a dois, é possível concluir que nenhuma tendência clara é observada:

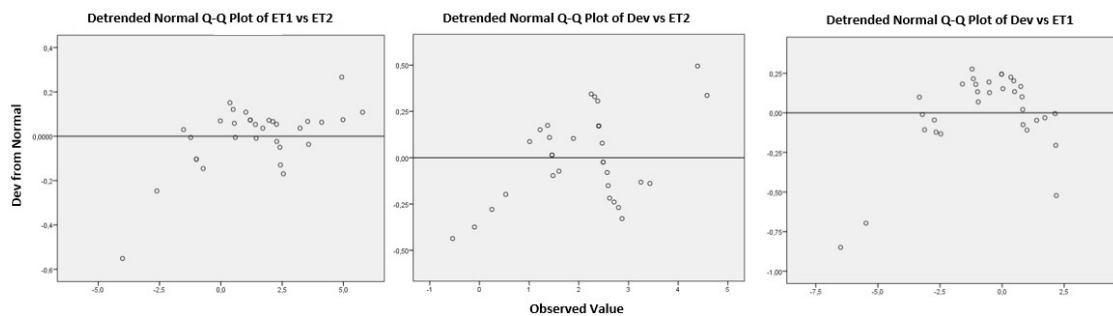


Figura 120 – Gráfico Q-Q para o par de dados

Após verificar a normalidade dos dados e a homogeneidade da variância, foi possível concluir que a ANOVA era adequada para ser utilizada. Os resultados indicam que os dados não vieram da mesma amostra para resíduos de ângulo e azimute:

ANOVA										
Resíduo do Ângulo						Resíduo do Azimute				
	Soma dos Quadrados	df	Quadrado da Média	F	Sig.	Soma dos Quadrados	df	Quadrado da Média	F	Sig.
Entre Grupos	26,203	2	13,101	36,246	0,000	211,394	2	105,697	22,387	0,000
Dentro dos Grupos	40,844	113	0,361			524,060	111	4,721		
Total	67,047	115				735,454	113			

Tabela 27 – Teste ANOVA para amostras

Esta situação significa que os dados são diferentes, e uma nova análise foi necessária. O próximo passo foi comparar os dados dois a dois, a fim de identificar se algum par de dados vem da mesma amostra. Foi realizada uma exploração descritiva:

				Statistic	Std. Error					Statistic	Std. Error
ET1 vs ET2	Mean			,5784	,09760	ET1 vs ET2	Mean			2,0766	,20000
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	,3794	,7775		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	1,6687	2,4845
	5% Trimmed Mean			,5682			5% Trimmed Mean			2,0776	
	Median			,5750			Median			2,3900	
	Variance			,305			Variance			1,280	
Dev vs ET2	Mean			-,5819	,10993	Dev vs ET2	Mean			-,7003	,37610
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	-,8061	-,3577		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	-,14674	,0667
	5% Trimmed Mean			-,5979			5% Trimmed Mean			-,5590	
	Median			-,7500			Median			-,2650	
	Variance			,387			Variance			4,526	
Dev vs ET1	Mean			-,0044	,10375	Dev vs ET1	Mean			1,3766	,39225
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	-,2160	,2072		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	Upper Bound	,5766	2,1766
	5% Trimmed Mean			,0017			5% Trimmed Mean			1,4187	
	Median			,0050			Median			1,4250	
	Variance			,344			Variance			4,924	

Tabela 28 – Análise descritiva dos dados

Para validar (estatisticamente) que os dados do novo dispositivo são idênticos aos dois dispositivos tradicionais, duas condições devem ser validadas: a distribuição normal dos resíduos e o zero dentro do intervalo de confiança para média (Miranda, 2016). Como mostrado na figura 119, foi possível aceitar a normalidade dos dados, como também foi possível verificar que quando os resíduos de ângulo e azimuth de ambos os dispositivos tradicionais são comparados, o zero estava fora da faixa do intervalo de confiança. Isso foi evidência suficiente para concluir que os dispositivos tradicionais apresentaram resultados diferentes. O novo sistema apresentou valores idênticos para o ângulo quando comparado com o equipamento tradicional 1 e azimuth idêntico quando comparado com o equipamento 2. O erro de ângulo quando comparado com o ET1 foi menor que o erro de ângulo entre os dispositivos tradicionais e o erro de azimuth quando comparado com o ET2 foi menor que o erro de azimuth entre os dois dispositivos tradicionais. Um resumo é apresentado na tabela abaixo:

Resíduo do	Dev	ET2	ET1	Resíduo do	Dev	ET2	ET1
Ângulo				Azimuth			
Dev	0,00°	0,36°	0,00°	Dev	0,00°	0,36°	0,00°
ET2	0,36°	0,00°	0,30°	ET1	0,36°	0,00°	0,30°
ET1	0,00°	0,38°	0,00°	ET2	0,00°	0,38°	0,00°

Tabela 29 – Resumo dos resíduos: análise de ângulo e azimuth

Verifica-se que o protótipo teve um comportamento semelhante quando comparado aos dispositivos tradicionais, e apresentou as mesmas medidas de ângulo que o ET1, e as mesmas medidas de azimuth que o dispositivo ET2. O erro em comparação com os dois dispositivos tradicionais foi menor que o erro entre ambos os dispositivos. Os gráficos e tabelas acima mostraram informações de parte dos dados, mas todos os dados apresentaram comportamento semelhante. Foi possível concluir que, estatisticamente, as medições do novo sistema são confiáveis e têm um nível de precisão suficientemente bom se comparado aos dois dispositivos tradicionais disponíveis no mercado. A seguir, é possível ver um resumo de todos os resíduos:

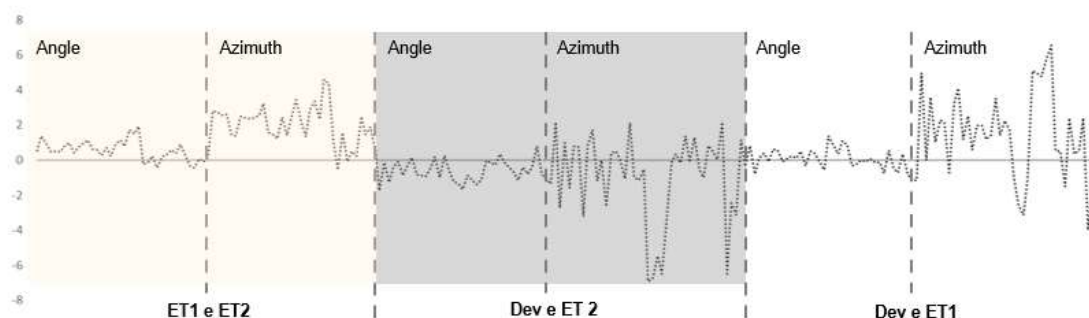


Figura 121 – Resumo de todos os resíduos

9.3 – Considerações sobre o Método Adotado

A análise estatística dos dados dos testes de campo provou que o protótipo resultado da investigação, quando comparado com dois dos tradicionais equipamentos disponíveis no mercado, foi capaz de medir desvios de furos com um ótimo nível de confiança. A análise de resíduos dos resultados para validação dos dados das diversas fontes comprova a validade do novo equipamento. Os testes de normalidade para análise estatística dos resíduos comprovaram que foi possível inferir que o resultado dos dados obtidos pelo equipamento possui média residual nula e um pequeno erro residual. Assim, verificou-se que os resultados foram muito satisfatórios, uma vez que, após seguir uma estratégia de teste muito rigorosa, houve provas estatísticas de que os dados foram iguais.

PARTE IV – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

10 – CONCLUSÃO

Lamentavelmente, devido à uma série de fatores negativos durante o período da investigação, dentre elas, o período de contingência de atividades devido à pandemia gerada pelo novo corona vírus SARS-CoV-2 e a doença do Covid-19, não foi possível testar o protótipo do desviómetro nas várias áreas da engenharia que não apenas no desmonte de rochas. Entretanto, concluímos que, no geral, a investigação resultou positivamente com o objetivo que foi proposto no Projeto de Investigação: idealizar, planejar, desenvolver e construir um equipamento assente em alta tecnologia, que pode ser submetido ao mercado a baixo custo, se comparado com todos os equipamentos afins existentes no mercado e que foram objetos de análise, fazendo com que o desviómetro seja acessível a mais empreendedores de pequenas e médias empresas, e ainda, permitir a avaliação de furos de forma precisa e rápida, permitindo ao operador uma experiência prática e fácil, com um equipamento resistente. A acurácia e eficácia do desviómetro foi comprovada matemática, estatística e oficialmente por entidade acreditada internacionalmente (anexo V), através das metodologias adotadas e comparação com os resultados dos equipamentos similares mais prestigiados no mercado mundial. Ainda com relação aos equipamentos examinados e descritos no capítulo 3, acreditamos que construímos algo totalmente diferenciado destes dispositivos, quer seja por seu custo final, ou por sua praticidade operacional.

Os ótimos resultados obtidos não configuram na cessação do desenvolvimento. O desviómetro possui algumas limitações, não do ponto de vista da aferição de desvios, mas da oportunidade de incrementar, desenvolver e testá-lo com base nos conhecimentos adquiridos ao longo da investigação, o que o tornaria ainda mais ímpar, mas que não foi adiante por conta de limite de recursos e tempo. As ideias que surgiram, e algumas melhorias e testes que poderiam ser realizados, mas que não se materializaram nos trabalhos da presente Tese, estão sugeridas no capítulo a seguir.

11 – TRABALHOS FUTUROS

O tempo, e principalmente, o alto aporte financeiro necessários para a realização desta pesquisa, não permitiram dar seguimento às várias inovações e ideias que foram surgindo ao longo da investigação e desenvolvimento do desviómetro. Somado a estes infortúnios, tivemos também talvez o maior dos problemas da sociedade mundial encontrados no século XXI: a pandemia do Covid-19. Como já afirmado ao longo deste trabalho, a necessidade de isolamento social quase que universal por um longo prazo de tempo fez com que vários trabalhos de campo e pesquisas laboratoriais fossem interrompidas. Assim, deixaremos como ideias para trabalhos posteriores as seguintes recomendações¹⁰⁹, organizadas com os respectivos capítulos, seções e/ou assuntos da presente tese:

I – Sobre Erro de Desvio (Seção 2.3)

- Propor modelagem ou parâmetros para definição matemática dos limites aceitáveis do desvio de perfuração em minerações a céu aberto e em obras subterrâneas, furos de sondagens e outras áreas da engenharia, tendo em vista carência desta informação. Constatamos dificuldade em encontrar literatura técnica sobre o assunto.

II – Desenvolvimento de Novos Recursos para o Desviómetro (Capítulo 5)

II.a – Peso da Sonda (Seção 5.2.3)

- Desenvolvimento de adaptadores na ponta da sonda para torná-lo mais pesado para furos profundos descendentes (*Downholes*), com materiais mais densos ou formato mais longo, como também construir uma ponta com a mínima dimensão possível (ex. formato de uma simples tampa) ou do mesmo tamanho, desde que construído com material de pouca

¹⁰⁹ Desde de que não violem propriedades intelectuais ou não configurem engenharia reversa

densidade ou oco, para facilitar o seu deslocamento em furos ascendentes (*Upholes*);

II.b – Sensores (Seção 5.3.1)

- Utilizar os dados coletados pelo sensor magnetômetro para registro e coleta de informações sobre a intensidade do campo magnético local;
- Sensor de detecção de presença de água, de maneira a que a sonda emita um sinal sonoro juntamente com a aplicação, e esta última ainda emita um sinal visual (ex. ícone na tela do dispositivo de controle);
- Sensores de detecção de pH do fluido, aferição da pressão hidrostática, pontual e média, condutividade elétrica e temperatura no fluido no interior do furo;
- Adaptação de sensor de posicionamento global (GPS) na sonda para identificação e registro da posição dos furos;
- Opção de ligar e desligar o magnetômetro para anular interferência de campos magnéticos com grande intensidade.

II.c – Memória, Comunicação e Transmissão dos Dados (Seção 5.3.2)

- Pesquisa e utilização da tecnologia de identificação por radiofrequência RFID¹¹⁰;
- Expansão a memória com cartões tipo Micro USB, que a cada ano aumentam sua capacidade. Com isto é possível aumentar o número de frequência de medidas por segundo, aumentando assim a precisão do equipamento devido a maior quantidade de informações colhidas pelos sensores num menor espaço de tempo;

¹¹⁰ *Radio Frequency Identification*

- Utilizar a comunicação *WiFi* suportado pelo microprocessador para melhorar a taxa de transmissão de dados.

II.d – Alimentação da Sonda (Seção 5.3.3)

- Carregamento por indução: carga da bateria da sonda sem fio, por proximidade.

II.e – Configuração do Sistema Eletrónico (Seção 5.3.4)

- Desenvolvimento de um suporte interno do sistema eletrónico universal, de tamanho e configuração única, de maneira que os vários tipos de invólucros da sonda do desviómetro que porventura venham a ser desenvolvidos, sejam projetados com base neste suporte, e não o contrário.

III – Aplicação (Capítulo 6)

- Desenvolver e tornar possível a utilização da aplicação em ambiente do sistema operacional iOS.

IV – Modo de Utilização (Capítulo 7)

- Programar os sensores e a aplicação para registrar cada intervalo do furo por detecção de movimento, sem a necessidade de apertar botões ou utilizar manualmente o dispositivo de controle: os sensores detectariam uma parada brusca ou parada por 3 segundos e estabilização da sonda para registro e armazenamento da última leitura estável¹¹¹;

¹¹¹ Desde que esta função não conflite com a recomendação nº V desta seção: tomada de medidas de forma contínua

V – Tratamento dos Dados (Capítulo 8)

- Novo modelo matemático ou aproveitamento e melhoria do modelo atual, para programar a sonda de maneira que ela colete os dados da geometria do furo de forma contínua e automática, sem necessidade de paradas intercaladas para tomada de medidas.

VI – Objetos de Investigações, Melhorias, Alterações, Testes e Validações Eventuais (Capítulos 4 e 9)

- Além de aplicações em desmonte de rochas em minas a céu aberto, pedreiras e minas subterrâneas, testar, e eventualmente, validar o desviômetro em:
 - Perfurações de pesquisas geológicas (sondagens);
 - Perfurações para fundações de estruturas;
 - Auscultação de Barragens de Terra;
 - Trabalhos de engenharia em geral;
 - Geotecnia.
- Realização de um estudo de caso ou um artigo científico sobre o uso do desviômetro em furos ascendentes;
- Utilização de óculos de realidade aumentada para visualização *in loco* dos furos;
- Uso do desviômetro sem intervenção humana: uso com auxílio de drones de maneira programada ou controlada remotamente;
- Permitir a personalização para necessidades específicas (múltiplas funções), de acordo com os sensores atuais e os acima sugeridos;

12 – BIBLIOGRAFIA

- Abinox. (2006). *ABC do Aço Inox & Noções Básicas sobre Aços Inoxidáveis*. Obtido em 25 de setembro de 2018, de Associação Brasileira do Aço Inoxidável: <https://www.abinox.org.br/site/biblioteca-tecnica.php?cat=artigos-tecnicos>
- AFIPOL. (s. d.). *Manual Prático de Cordas*. São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Poliolefinicas.
- Alexeenko, P. (2016). MobileVJ: A mobile app for a novel wearable human sensing system. Porto, Porto. Obtido em 15 de outubro de 2019, de <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/85754>
- Allan, A., Coleman, D., & Mistry, S. (2015). *Make: Bluetooth - Bluetooth LE Projects for Arduino, Raspberry Pi and Smartphones*. San Francisco: Maker Media.
- Arias, V. H. (15 de fevereiro de 2020). *Vicente Huélamo Arias*. Obtido de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/in/vicente-huelamo-arias-137a8778/>
- Asokan, M. (2013). Android vs iOS - An Analysis. *International Journal of Computer Engineering & Technology*, 4(1).
- Australian Drilling Industry Training Committee Limited. (2015). *The Drilling Manual*. Boca Raton: CRC Press.
- Axelson, J. (2015). *USB Complete: The Developer's Guide* (Fifth ed.). Madison: Lakeview Research LLC.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.
- Bezerra, T. R., Martins, M. A., & Andrade, T. H. (2017). Análises de Sensibilidade do Arrasto Gerado em um Veículo Autônomo Submarino. *Anais do 9º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. Maceió. Obtido em 13 de setembro de 2018, de http://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais9/
- Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Boldrini, J. L., Costa, S. I., & Figueiredo, V. L. (1980). *Álgebra Linear* (3ª ed.). São Paulo: Harbra.

- Bosch Sensortec GmbH. (2016). BNO055 - Intelligent 9-Axis Absolute Orientation Sensor. *BNO055: Datasheet*. Reutlingen, Baden-Württemberg, Alemanha.
- Brown, E. T., Green, S. J., & Sinha, K. P. (1981). The Influence of Rock Anisotropy on Hole Deviation in Rotary Drilling— A Review. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(5), p. 387 à 401.
- Bruna, M. V. (s.d.). *Doenças e Sintomas: Estrabismo*. Obtido em 21 de setembro de 2020, de Drauzio Varella: <https://drauziovarella.uol.com.br/doencas-e-sintomas/estrabismo/#:~:text=Estrabismo%20%C3%A9%20um%20dist%C3%BArbio%20que,nos%20adultos%20por%20diferentes%20raz%C3%B5es>.
- Bulant, P., Eisner, L., Pšenčík, I., & Le Calvez, J. (2007). Importance of Borehole Deviation Surveys for Monitoring of Hydraulic. *Geophysical Prospecting*, pp. 891-899.
- Butcher, J. C. (2003). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. New York: John Wiley & Sons.
- Carlson Software Inc. (2017). *Acquisition From Renishaw Increases Carlson's Focus on Ore, Quarry, and Blasting Industries*. Obtido em 20 de outubro de 2019, de Carlson Break New Ground: <https://www.carlsonsw.com/archives/acquisition-from-renishaw-increases-carlsons-focus-on-ore-quarry-and-blasting-industries/>
- Carlson Software Inc. (2018). *Rodded Boretrak Borehole Deviation Survey System User Manual*. Maysville, KY, USA.
- Carlson Software Inc. (2018). *Cabled Boretrak Borehole Deviation Survey System User Manual*. Maysville, KY, USA.
- Central Cultura de Comunicação. (05 de agosto de 2019). Na região de Guarapuava, 94% das empresas de extração mineral fiscalizadas não possuem registro no Crea-PR. *Central Cultura de Comunicação*. Obtido em 12 de agosto de 2019, de <https://www.centralcultura.com.br/na-regiao-de-guarapuava-94-das-empresas-de-extracao-mineral-fiscalizadas-nao-possuem-registro-no-crea-pr#>
- Century Geophysical LLC. (2015). 9702 Natural Gamma/Deviation Logging Tool - Product Description. Tulsa, Oklahoma.

- Century Geophysical LLC. (2019). *Century Geophysical LLC*. Obtido em 27 de março de 2019, de <https://www.century-geo.com/>
- Coelho, A. S. (17 de janeiro de 2017). *Instrumentação Geotécnica em Barragens de Terra e Enrocamento*. Obtido em 25 de agosto de 2019, de <https://www.linkedin.com/pulse/instrumenta%C3%A7%C3%A3o-geot%C3%A9cnica-em-barragens-de-terra-e-santos-coelho/>
- Cook, A. (22 de abril de 2005). Optical Instrument for Drilling Applications Launched. *Creamer Media's Mining Weekly*. Obtido em setembro de 2018, de http://www.miningweekly.com/article/optical-instrument-for-drilling-applications-launched-2005-04-22/rep_id:3650
- COPPE/UFRJ. (01 de agosto de 2017). Monitoramento Remoto de Barragens. *Inthemine*. Obtido em 17 de setembro de 2018, de <http://inthemine.com.br/site/monitoramento-remoto-de-barragens/>
- Costa, L. S. (2006). *Caracterização Química da Bauxita*. Rio de Janeiro: CETEM.
- Couceiro, P. (2013). *Análisis Espectral de los Fenómenos Sísmicos Asociados a las Voladuras Subacuáticas*. Master Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- Couceiro, P., Lopez Cano, M., & Jafa, A. (2018). La Voladura como Estrategia de Optimización - Un Método Simplificado. Em J. S. Azpilicueta (Ed.), *Libro de Comunicaciones del XIV Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales 2018*. Sevilla: Asociación Nacional de Ingenieros de Minas.
- Cruz, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto*. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos/FAPESP.
- Curi, A. (2017). *Lavra de Minas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Devico AS. (2017). *Devico Survey Instruments*. Obtido em abril de 2019, de Devico: <https://www.devico.com/>
- Devico AS. (2017). *Introdution to DCD - Directional Core Drilling*. Folheto, Melhus.
- Devico AS. (2019). *DeviFlexRapid Continuous High Speed Non-Magnetic Survey*. Folheto.

- Devico AS. (2019). *DeviGyro Continuous High Speed Non-Magnetic Survey*. Folheto.
- Devico AS. (2019). *DeviShot Magnetic Single/MultiShot*. Folheto.
- DGEG. (05 de agosto de 2020). *Estatística de Minas e Pedreiras*. Obtido em 02 de setembro de 2020, de Direção-Geral de Energia e Geologia: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/>
- DGSI Slope Indicator. (2019). *Digitilt AT System*. Obtido em 10 de dezembro de 2019, de DGSI Slope Indicator: <https://durhamgeo.com/product/digitilt-at-system/>
- DGSI Slope Indicator. (2019). *Digitilt Classic Inclinomometer System*. Obtido em 13 de dezembro de 2019, de DGSI Slope Indicator: <https://durhamgeo.com/product/digitilt-classic-inclinometer-system/>
- Dicionário Priberam da Língua Portuguesa. (2020). *"-metro"(suf.)*. Obtido em 21 de março de 2020, de Dicionário Priberam da Língua Portuguesa: <https://dicionario.priberam.org/-metro>
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field*. New York: Wiley-Interscience.
- Epiroc. (2017). *Ferramentas de Perfuração de Rocha: Secoroc Powerbit, Secoroc COP M8 Down-the-hole Hammer e Three Clever Cones*. Obtido em 15 de agosto de 2018, de Epiroc: <https://www.epiroc.com/pt-br/products/rock-drilling-tools>
- Espressif Systems. (08 de outubro de 2019). *Espressif*. Obtido de Espressif: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp-wroom-32/overview>
- Ewer, M. (07 de julho de 2018). *Pulsar Measuring Systems LTD*. Obtido de <http://www.pulsarmeasuring.co.uk/>
- Export Pro Inc. (2018). Obtido em 19 de fevereiro de 2020, de Export Pro Inc.: <https://www.exportpro.com/pages.php?id=11>
- Faustino, G. F. (2009). *Análise Econômica do Alumínio*. Projeto de Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Minas, Recife.
- Faustino, G. F., & Miranda, V. G. (2019). Borehole Deviation Control Using Electronics: An Euler's Approach. Em M. L. Dinis, J. Figueiredo, & R.

- Sousa (Ed.), *Book of Abstracts of the 1st Symposium on Mining Engineering and Geo-Resources* (p. 77 à 79). Porto: FEUP Edições.
- Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica* (Vol. 2). Porto: FEUP Edições.
- Fernberg, H. (2008). *Surface Drilling - The Master of Productivity*. UK: Atlas Copco.
- Ferreira, A. H. (2013). *Análise Eletromecânica de um Giroscópio MEMS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.
- Gaitatzis, T. (2017). *Bluetooth Low Energy in iOS Swift* (1st ed.). BackupBrain Publishing. Obtido em 15 de outubro de 2019, de https://backupbrain.co/static/samples/Bluetooth_Low_Energy_for_iOS_Swift_Free_Chapter.pdf
- Gama, J., Carvalho, A., Faceli, K., Lorena, A., & Oliveira, M. (2017). *Extração de Conhecimento de Dados*. Lisboa: Sílabo, Lda.
- GDP from Mining*. (22 de fevereiro de 2020). Obtido de Trading Economics: <https://tradingeconomics.com/country-list/gdp-from-mining>
- Giles, E., & Roller, E. (2012). Flyrock Elimination Program Part 2: Profilers and Boretracks. *ISEE: International Society of Explosives Engineers*.
- Giraudi, A., Cardu, M., & Kecojevic, V. (2009). An Assessment of Blasting Vibrations: A Case Study on Quarry Operation. *American Journal of Environmental Sciences*, 468-474.
- Gleeson, D. (agosto de 2019). Explosives & Blasting. *International Mining*, 32-42.
- Goetz, J. F. (1993). Dipmeters: Part 4. Wireline Methods. Em D. Morton-Thompson, & A. M. Woods (Edits.), *Development Geology Reference Manual* (Vol. 10). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Győrödi, R., Adrian, V. G., Zmandara, D., & Győrödi, C. (janeiro de 2017). A Comparative Study between Applications Developed for Android and iOS. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(11).

- Hall, K., Worsey, T., & Rouse, N. (setembro/outubro de 2018). Methods to Quantify Drilling Accuracy. *The Journal of Explosives Engineering*.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). *Fundamentos de Física 2 - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (4ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Hardrockdrills. (30 de agosto de 2018). Borehole Drilling Machines. *How Drilling Tools Selection Impacts Borehole Quality*. Shanghai, China. Obtido em 03 de novembro de 2018, de <http://hardrockdrills.blogspot.com/>
- Harris, J. E. (março/abril de 1999). Drill Accuracy. *The Journal of Explosives Engineering*, 16(2), 18-20.
- Helerbrock, R. (s.d.). *Forças de Arraste*. Obtido em novembro de 2020, de Brasil Escola: <https://brasilecola.uol.com.br>
- Hendricks, C., Scoble, M., & Boudreault, F. (fevereiro de 1994). A Study of Blasthole Drilling Accuracy: Monitoring Instrumentation and Practice. *CIM Bulletin*, 87, 60-66.
- Holmberg, R., Lee, J., & Person, P.-A. (1994). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press, Inc.
- Holmvall, L. (2001). Cost Savings in Surface Drilling: Construction and Quarries. *The Journal of Explosives Engineering - Vol 11 - Nº 6*.
- Hosford, W. (2012). *Iron and Steel*. New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Hustrulid, W. (1999). *Blast Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Instituto Minere. (2020). *Curso Planejamento de Lavra: Otimização, Design de Mina e Gestão de Operações*. Obtido em 03 de março de 2020, de Instituto Minere: https://institutominere.com.br/curso-planejamento-de-lavra-otimizacao-design-de-mina-e-gestao-de?utm_source=Instituto+Minere&utm_campaign=7ff99f592e-EMAIL_CAMPAIGN_2019_08_07_06_51_COPY_01&utm_medium=email&utm_term=0_9536c60a90-7ff99f592e-4980831
- Interfels GmbH. (s.d.). Interfels Method Statement Mobile Probe Extensometer INCREX Measurements.
- Jimeno, C. L. (2017). *Manual de Perforación, Explosivos y Voladura*.

- Jimeno, C. L., Guezala, R. A., Jimeno, L. E., & Bermúdez, P. G. (2013). *Manual de Perforación de Túneles*. Madrid.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Jimeno, C., Llera, J., & Urbina, F. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid: Ingeopress.
- Kajastie, N. (Ed.). (março de 2015). Taking the Field. *GeoDrilling International*, 34.
- Kangwa, S., & Sinkala, T. (2004). Hole Deviations in Mining Operations: Types, Sources and Effects. *The Journal of Explosives Engineering*, 20(3).
- Keppower. (2018). *Test Report*. Shenzhen, China: Keppower Technology Co. Ltd.
- Krelling, P. L. (2006). *Concepção de um Inclinômetro Foto-Mecânico para Controle Geodésico de Estruturas*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciencias Geodésicas, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Setor de Ciencias da Terra, Curitiba. Obtido em 20 de março de 2019, de <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7361>
- Laberge, R., & Vujosevic, S. (2003). *Building PDA Databases for Wireless and Mobile Development*. (C. Long, Ed.) Indianapolis, Indiana, USA: Wiley Publishing, Inc.
- Leite, A. (2016). *Conceitos Básicos de QAQC para Mineração*. Belo Horizonte: Instituto Minere.
- Leite, F. S. (2013). *Desarrollo de una Herramienta de diseño de Túneles*.
- Lemos, S. (07 de junho de 2019). Plásticos são Considerados Vilões do Meio Ambiente. *Jornal da USP*. Obtido em 30 de setembro de 2020, de <https://jornal.usp.br/atualidades/plasticos-sao-considerados-viloes-do-meio-ambiente/>
- Lin, D., & Li, S. (2017). *Material Safety Data Sheet (MSDS)*. Shenzhen, China: Keppower Technology Co.,Ltd.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & Garcia Bermudes, P. (2017). *Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras*. Madrid: ETSI Minas y Energía - Universidade Politécnica de Madrid.

- Luthi, S. M. (2001). *Geological Well Logs - Their Use in Reservoir Modeling*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lutz Jr., R. (2000). Partnering in Blasthole Drilling. *ISEE - International Society of Explosives Engineers*.
- Luz, A. B., & Salvador, L. M. (2009). *Manual de Agregados para Construção Civil*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- M. S. Laureano, R. (2013). *Testes de Hipóteses com o SPSS*. Lisboa: Edições Sílabo, LDA.
- Machado, W. G. (2007). *Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo.
- Martin, P. L. (2004). Drill and Blast Optimization at the Sparkhule Limestone Quarry. *ISEE: International Society of Explosives Engineers*.
- Maxam. (22 de setembro de 2018). *Maxam*. Fonte: LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/maxam/>
- Michellini, A. (2017). *Baterias Recarregáveis para Equipamentos Portáteis* (1ª ed.). Cotia: S.T.A - Sistemas e Tecnologia Aplicada Ind. Com. Ltda.
- Milijic, M. (15 de novembro de 2019). Crazy Android vs iOS Market Share Discoveries in 2020. *Leftronic*. Obtido em 28 de agosto de 2020, de <https://leftronic.com/android-vs-ios-market-share/#:~:text=Google%20Android%20and%20Apple%20iOS,%25%20in%202022%2C%20forecasts%20suggest.&text=Between%202012%20and%202019%2C%20the,Android%20devices%20around%20the%20world>
- MineMagazine. (2018). Capitalising on the Commodities Boom. *Mine Magazine*, May 2018(Issue 68).
- Mining & Construction. (03 de agosto de 2011). A Better Way to Presplit. *Mining & Construction*. Obtido em 03 de outubro de 2018, de <https://miningandconstruction.com/mining/abetterwaytopresplit-2-322/>
- Miranda, V. G. (2016). Validação de Modelos: Uma Análise Residual. FEUP: Programa Doutoral em Engenharia de Minas e Geo-Recursos.

- Miranda, V. G. (2017). *Desenvolvimento de Simulador de Desmonte de Rocha à Céu Aberto com Recurso à Explosivos: Principais Algoritmos*. Projeto de Investigação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia de Minas, Porto.
- Miranda, V. G., Leite, F. S., & Faustino, G. F. (2017). Blast Pattern Expansion - A Numerical Approach. Em R. Holmberg (Ed.), *Ninth EFEE World Conference on Explosives and Blasting* (p. 51 à 59). Leicester, Grã-Bretanha: European Federation of Explosives Engineers.
- Miranda, V. G., Leite, F. S., Faustino, G. F., Brito, P., Sobral, R., & Kouvonen, T. (2019). A New Tool for Hole Deviation Control - A Statistical Analysis. *EFEE 10th World Conference on Explosives and Blasting, 1*, 397-406. (R. Holmberg, Ed.) Leicester, UK.
- Miranda, V., & Leite, F. (2018). The use of 3D accelerometers and gyro sensors in smartphones to measure the blasthole deviation in non-magnetic rock. Em H. Schunnesson, & D. Johansson, *12th International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting* (pp. 211-221). Lulea, Sweden: Lulea University of Technology, Sweden - Division of Mining and Rock Engineering.
- Miranda, V., & Leite, F. (janeiro de 2018). Vibration Control using an iPhone - Accuracy, Validation and Potentialities. *Proceeding of the Forty-Fourth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*.
- Montico, M. (2010). *Guia Avançado de Redes Wireless* (Vol. 2). São Paulo: Digerati Books.
- Moore, P. (novembro de 2017). Rock Tools: Metres per Bit. *International Mining*, 42-47.
- Moreira, A., Macedo, P., Costa, M., & Moutinho, V. (2011). *Exercícios de Estatística Com Recurso ao SPSS*. Lisboa: Sílabo, Lda.
- Oliveira, M. (26 de agosto de 2011). Tipos de Cordas de Escalada: Estáticas e Elásticas (Dinâmicas). *Trilhas e Aventuras*. Obtido em 03 de agosto de 2018, de <https://www.trilhaseaventuras.com.br/tipos-cordas-escalada-estaticas-elasticas-dinamicas/>
- Oliveira, T. (2019). Um Cientista da Perfuração e Desmonte de Rochas. *In the Mine*, 22-25.

- Orive, J., Laredo, R., Domingo, J., & Sadek, J. (2017). Innovation in up-hole deviation measurements in sublevel stoping mines. *EFEE: European Federation of Explosives Engineers*, 397-404.
- Orpen, J. (2007). Introducing the borehole surveying benchmarking project. *Institute of Mine Surveyors of South Africa*, 507-512.
- OSMRE. (24 de abril de 2017). *Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement - U.S. Department of the Interior*. Obtido em 29 de setembro de 2018, de <https://www.osmre.gov/resources/blasting/btm/Module4.pdf>
- Petzl. (2018). Maillon Rapid nº 5. *Technical Notice Maillons Rapids*. França: Petzel International. Obtido em agosto de 2018, de Technical Notice Maillons Rapides: <https://www.petzl.com/INT/en/Sport/Packs-And-Accessories/MAILLON-RAPIDE-N%C2%B0-5>
- Pöppelreiter, M., García-Carballido, C., & Kraaijveld, M. (2010). Borehole Image Log Technology: Application Across the Exploration and Production Life Cycle. Em *Dipmeter and Borehole Image Log Technology*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Price, D. (14 de outubro de 2018). *Drilling Engineering: Effective Dip Angle in a Deviated Hole*. Obtido em 04 de novembro de 2018, de Netwas Group Oil: <https://www.netwasgroup.us/engineering-4/effective-dip-angle-in-a-deviated-hole.html>
- Quaglio, O. A. (2003). *Otimização da Perfuração e da Segurança nos Desmontes de Agregados Através dos Sistemas Laser Profile e Boretrak*. Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação/Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto.
- Raposo, E. M. (2011). *Observação de Deslocamentos em Obras Geotécnicas*. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia), Lisboa.
- Reflex. (2018). *Reflex Gyro Sprint-IQ™ - Brochure*. Perth, Austrália.
- Reflex. (2018). Reflex - Company Overview. *Reflex Intelligence on Demand*. Perth, Austrália.
- Reflex. (10 de outubro de 2019). *Reflex Intelligence on Demand*. Obtido de Reflex: <https://reflexnow.com/about-reflex/>

- Reflex Now. (2017). *Reflex EZ-Gyro Rota-Lock Overshot™*. Obtido em 12 de novembro de 2019, de You Tube: https://www.youtube.com/watch?v=kmKPi_2rDWs
- Reflex. (s.d.). Reflex Maxibor II: Optical Borehole Survey System. Obtido em setembro de 2018, de <http://www.infomine.com/suppliers/PublicDoc/InternationalDirectional/ReflexMaxiborII.pdf>
- Renishaw plc. (30 de janeiro de 2013). *News from Renishaw - Renishaw completes acquisition of laser measurement specialist*. Wotton-under-Edge, Gloucestershire, United Kingdom.
- Ribeiro, R. B., Codaro, E. N., Hein, L. R., Rosa, J. L., Mariotto, S. F., & Meraz, E. A. (2009). Análise Morfológica da Corrosão por Pites em Aço Inoxidável Austenítico AISI 310S Submetido à Exposição de Névoa Salina. *Revista Matéria*, 14, pp. 957 - 964. Obtido em outubro de 2018, de www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11065/11065
- RL, & GV. (2011). *DeviFlex - Vertical Survey*. Manual do Usuário, Devico AS.
- Robit. (setembro de 2019). Robit Media. *Catalogue Robit® Sense Systems - M Sense*. Lempäälä, Finlândia. Obtido em 14 de janeiro de 2020, de <https://www.robitgroup.com/media/catalogues/>
- Rochol, J. (2018). *Sistemas de Comunicação sem Fio: Conceitos e Aplicações*. Porto Alegre: Bookman.
- Rosa, E. S. (1999). *Determinação do Arrasto Total de um Perfil Aerodinâmico Bi-Dimensional*. Apostila Didática de Experiência, Faculdade de Engenharia Mecânica/Unicamp, EM-847 Laboratório de Calor e Fluidos I - Departamento de Energia. Obtido em 10 de outubro de 2018, de <http://www.fem.unicamp.br/~em712/em847.html>
- Rosa, I. B. (2015). *Avaliação de Trajetória de Furos de Sondagem em Maciços Rochosos na Mina de S11D - Carajás, PA*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Nucleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto.
- Sandhaus, B., & McClure, R. (2012). Flyrock Elimination Program Part 3: 3D Bench Photogrammetry. *ISEE: International Society of Explosives Engineers*.
- Santino, R. (02 de novembro de 2018). Entenda por que a Apple não se importa se você acha o iPhone muito caro. *Olhar Digital*. Obtido em 28 de agosto

de 2020, de <https://olhardigital.com.br/noticia/entenda-por-que-a-apple-nao-se-importa-se-voce-acha-o-iphone-muito-caro/79628>

Scovira, D. S. (2012). Flyrock Elimination Program Part 1: Corporate Initiative. *ISEE - International Society of Explosives Engineers*.

Silva, S. E. (Novembro de 2008). *Sistema de Comunicação por Rádio-Frequência para Ponta CPTu*. Dissertação, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Departamento Electrónica Industrial e de Computadores, Guimarães. Obtido em agosto de 2018

Silva, V. C. (2009). *Curso de Operações Mineiras*. Ouro Preto, MG, Brasil: Deptº de Eng. de Minas - Escola de Minas - UFOP.

Singh, S. P. (1996). The Influence of Geology on Blasthole Deviation. *The International Society of Explosives Engineers (ISEE)*.

Sinkala, T. (1986). Phenomena of Rock Dependent Drill Hole Deviations. A Field Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*.

Smith, G. L., & Howard, D. (1981). *Method of and Apparatus for Mining Analysis*. Processos de Registro de Patente nº CA1188364A e ZA82866B, Granted to Grathnail Development Company Limited. Obtido em 24 de setembro de 2020, de <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/025575205/publication/CA1188364A?q=CA1188364A>

Soil Instruments. (2017). *C19-1 Horizontal Digital Inclinometer System*. Datasheet, Uckfield.

Soil Instruments. (2017). *Soil Instruments Digital Inclinometer Pro*. Obtido em 05 de outubro de 2019, de YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=KTKWmJ9rODw&feature=emb_title

Soil Instruments. (2019). *Inclination*. Obtido em 04 de outubro de 2019, de Soil Instruments: <https://soilinstruments.com/products/inclination/>

Sousa, J. N. (2019). *Análises Hidrodinâmica e Geométrica, via CFD, do Escoamento ao Redor de um Veículo Autônomo Submarino*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Centro de Tecnologia.

South African Technology and Services. (2017). *International Mining*, 42-52.

- Souza, R. N. (2018). *Utilização de Alumínio para Blindagem de Campo Magnético de 60 Hz em Sala de Exames de Imagem por Ressonância Magnética*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas. Obtido em outubro de 2020, de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/334055>
- Statcounter. (agosto de 2020). *Mobile Operating System Market Share Worldwide*. Obtido de Statcounter GlobalStats: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>
- Stockholm Precision Tools. (2019). *Mineração*. Obtido em 01 de maio de 2020, de SPT Stockholm Precision Tools: <https://sptab.com/pt-br/mineracao/>
- Tabacniks, M. H. (2009). *Conceitos Básicos da Teoria de Erros*. São Paulo: Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
- West, J. B. (1979). *Digital Mineral Logging System*. Processo de Registro de Patente nº US4227405A, Century Geophysical Corporation. Obtido em 21 de setembro de 2020, de <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/021839150/publication/US4227405A?q=deviometer>
- Williamson, H. (2000). Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling. *SPE Drilling & Completion*, 15(04). doi:<https://doi.org/10.2118/67616-PA>
- Zlatunic, Z. (2018). *Cabled Boretrak - Datasheet*. Maysville, KY, USA: Carlson Software Inc.
- Zlatunic, Z. (2018). *Rodded Boretrak - Datasheet*. Maysville, KY, USA: Carlson Software Inc.
- Zlatunic, Z. (2018). *Rodded Boretrak and Cabled Boretrak - Brochure*. Maysville, KY, USA: Carlson Software Inc.

13 – ANEXOS

13.1 – Anexo I - Programa de Cátedra entre a Maxam e *Universidad Politécnica de Madrid*

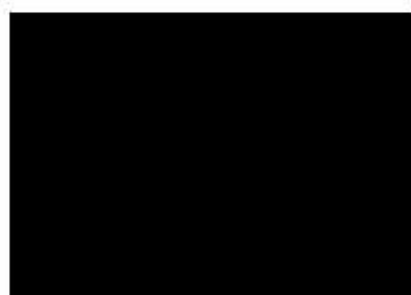


13.2 – Anexo II - Comparativo das Principais Características Técnicas de Equipamentos de Medição

	Fabricante	Equipamento	Precisão		Down	Up	Alcance/Limite	Condução	Sensibilidade Magnética	Transmissão dos Dados		Funcionalidades		Preço
			Inclinação	Azimute						Sonda/UC	UC/Gestor	Vantagens	Desvantagens	
Dispositivos para Medição de Desvios	Carlson®	Rodded Boretrak®	0,20"	NA	Sim	Sim	Inclinação: 0° a 45° (Down) 135° a 180° (Uphole)	Barras	Não	Cabo Bluetooth	Cabo USB Wi-Fi	Pode ser usado em todo tipo de mina; Furos ascendentes e descendentes;	Alcance limitado da medição da inclinação com relação vertical Azimute precisa de um gabarito/baliza manual; Base da estrutura das barras "atrapalha" as medições em pisos irregulares; Peso e estrutura do conjunto dificulta operação em campo;	\$ 8 000,00 \$ 13 000,00
		Cabled Boretrak®	0,20"	±1"	Sim	Não	Inclinação: ±40° Azimute: 0 a 360°	Cabo	Sim	Cabo	Cabo	A sonda possui um mecanismo de orientação à olho nu em caso interferência magnética;	Transferência sonda/CDU demora 3 min para cada furo de 30 m; Alcance limitado à 40" com a vertical; Sistema de calibração complexo e demorado; Utilização limitada à furos descendentes (downholes).	\$ 10 000,00
	Century LLC	Natural Gamma/Deviation Tool 9702	±0,5°	±2,0°	Sim	Não	Inclinação: 0° a 45° Azimute: 0 a 360°	Cabo	Sim	Cabo	Cabo	Furos profundos (2.500 e 4.000 psi); Equipamentos adaptáveis, permitindo junção de vários modelos e aplicações. Multifuncional; Pode ser usado em todo tipo de mina;	Sensível à interferências magnéticas; Seu uso em desmonte de rochas com explosivos não compensa economicamente (custo x benefício); Total aproveitamento do equipamento apenas em minas de U, K e Th;	
		Dipmeter Model 9412	±0,5°	±2,0°	Sim	Não	Inclinação: 0° a 90° Azimute: 0 a 360°	Cabo	Sim	Cabo	Cabo	Ampla coleta de dados de hidrocarbonetos, C, Fe, U, K e Th; Coleta de dados de desvio e deformações; Determina mergulho e direção das camadas da rocha; Tomada das medidas quase que continuamente	Sensibilidade magnética; Não compensa, técnica e economicamente, seu uso em desmonte de rochas com explosivos; Total aproveitamento do equipamento apenas em petróleo e gás;	
	Devico AS	DeviFlex Rapid	± 0,20"	± 0,01"	Sim	Não	Inclinação: -90° a +90° Azimute: 0 a 360°	Combinação Barras/ Cabo ou Haste	Não	Combinação Cabo + conexão sem fio (Não informado)	Cabo USB Cartão de Memória	Medição contínua; Exibição da profundidade (posição) da sonda no PDA; Equipamento de alta precisão devido ao sistema mecânico, incluindo mola com sensores;	A precisão depende de estruturas externas Melhor aproveitamento do equipamento em furos profundos de sondagens; Necessário configurações na sonda e aplicação para mudança de Vert/Horiz.	
		DeviGyro™	± 0,1°	± 0,1°	Sim	Não	Inclinação: -90° a +90° Azimute: 0 a 360°	Combinação Barras/ Cabo ou Haste	Sim	Combinação Cabo + conexão sem fio (Não informado)	Não informado	Pequeno dispositivo que pode ser inserido em várias sondas; Equipamento de alta precisão devido ao sistema mecânico; Possibilidade de medição contínua ou em intervalo; Ampla utilização em mineração e geotecnia	Sensível à interferências magnéticas; Utilização limitada à furos descendentes (downholes); Necessita de referência externa para definição do azimute	
		DeviShot™	± 0,1°	± 0,5°	Sim	Sim	-90° a +90° (Up) -90° a +90° (Down)	Barras Cabo	Sim	Cabo Bluetooth	Cabo USB Cartão de Memória	Mede temperatura do furo; Sonda em estrutura de titânio	Sensibilidade magnética;	
	Pulsar®	Blasthole Probe®	± 0,25°	± 1°	Sim	Não	Sem informação	Cabo	Sim	Cabo	Cabo	Detecta presença de água	Sistema de apoio tipo guincho portátil torna a medição demorada; Transferência de dados apenas por cabo;	
	Reflex™	Survey Instruments	± 0,30°	± 1°	Sim	Não	Sem informação	Cabo	Não	Cabo	Cabo USB WiFi	Furos profundos (3.000 m com água ou 6.000 psi); Possibilidade de medição contínua ou em intervalo; UC indica a velocidade da sonda (em m/min)	Não compensa, técnica e economicamente, seu uso em desmonte de rochas com explosivos; Equipamento demanda vários kits e adaptadores; Montagem de uma sonda é complexa;	
		Gyro™	± 0,20°	± 0,50°	Sim	Não	Sem informação	Cabo	Não	Bluetooth	USB, WiFi	Mede temperatura do furo		
		Maxibor®	± 0,06°	± 0,06°	Sim	Sim	Todas direções (360°)	Barras/Haste Cabo	Não	Infravermelho	Cabo Cabo USB	Equipamento de alta precisão devido ao sistema óptico; Sonda é adaptável para ser guiada por hastes ou cabo	Necessita de referência externa para definição do azimute; Custo elevado para uso em mina ou obras simples	\$ 60 000,00
	Robit®	M Sense	±0,5°	± 1°	Sim	Não	Sem informação	Cabo	Sim	Cabo USB e cabo ethernet	USB, Ethernet Cartão SIM WiFi	Sonda compacta; Magnetômetro pode ser ligado/desligado	UC (tablet) com dimensões elevadas e pesado; App desenhada para sistema Windows, não usual para estes equipamentos; Sonda leve, implicando em uso de pesos para vencer furo inundado	
	SPT	Core Retriever™	± 0,05°	± 0,50°	Sim	Não	Sem informação	Haste	Não	Sem fio (NI)	Não informado	Coleta testemunho de sondagem; Medição contínua;		
		GyroLogic™	± 0,05°	± 0,50°	Sim	Não	-85° a +85°	NI	Não	Sem fio (NI)	Não informado	Medição contínua;	Ao que tudo indica, não é possível aferir upholes com estes equipamentos;	
		GyroMaster™	± 0,05°	± 0,50°	Sim	Não	-90° a +90°	Haste	Não	Bluetooth	Bluetooth, Wifi email e USB	Medição em intervalos ou contínua de alta velocidade;	Sem informações suficientes para verificar desvantagens.	
		MagCruiser™	± 0,15°	± 0,9°	Sim	Sim	-90° a +90°	Haste	Sim	Bluetooth	Não informado	Adaptável para perfurações direcionais		
Inclinômetros	DGSi	Digitilt AT	± 0,003°	NA	Sim	Sim	-30° a +30°	Cabo	Não	Sonda/Carretel - Cabo Carretel/UC - Bluetooth	Internet Cabo USB	Registra intervalo dos furos por detecção de movimento (sem mãos); mochila projetada sob medida para transporte do equipamento	APP suportado por apenas 3 modelos de Tablets com Android; Sonda dependente de tubo inclinométrico para não sofrer rotação; Necessário 2 medições do furo para definir a trajetória espaço; Unidade de controle grande e pesada. Dados apenas por cabo.	
		Digitilt Classic	± 0,01°		Sim	Não	-53° a +53°	Cabo	Não	Cabo	Cabo USB			
	Soil	C17- Pro Vertical	± 0,01°		Sim	Não	-24° a +24°			Sonda/Carretel: Cabo Carretel/UC:	Bluetooth, Wifi email e USB	Sondas são feitas em aço inoxidável AISI 316; Cabo de Kevlar com conjunto marcaadores do cabo e tampa para boca do furo melhora precisão e controle de profundidade; Conjunto leve, compacto e fácil de operar	Sonda dependente de tubo inclinométrico para não sofrer rotação; Necessário 2 medições do furo para definir a trajetória espaço; Necessário um equipamento específico para cada direção [Vert., Horiz. e Incl.];	
		C19-1 Horizontal	± 0,005°		Não	Não	-10° a +10°	Cabo	Não					
		Inclined 30°	± 0,005°		Sim	Não	-12° a +12°							
		Inclined 60°	± 0,007°		Sim	Não	-21° a +21°							
*Sem as barras (Price Blast on the Carlson Rodded Boretrak)														
**Com 36 metros de barras (Anexo II)														
***Anexo III														

13.3 – Anexo III - Orçamento dos 2 Principais Equipamentos de Medição de Furos (2019)

[REDACTED]	Orçamento / Estimate	Data / Date	Moeda / Currency
	OR 2019/ [REDACTED]	2019-07-25	USD
	Original	Válido até / Valid until	2019-07-25



Cliente / Client
General Quotation
Morada / Address
NIF / Tax Reg. Nr.

Página / Page 1 / 1

Código / Code	Descrição / Description	Qtd. / Qt.	Unl. / Un.	Preço un. / Un. Price	IVA / VAT	% Desc. / Discount	Valor sem Iva / Net amount
[REDACTED]	[REDACTED]	1,00	[REDACTED]	[REDACTED]	0 % (*)	0 %	[REDACTED]
12	[REDACTED]	1,00	un	[REDACTED]	0 % (*)		[REDACTED]
13	36m System Rod Set For Rodded Boretrak	1,00		5.000,00	0 % (*)		5.000,00
5	Cabled Boretrak Complete 35m System	1,00	un	10.000,00	0 % (*)		10.000,00
38	[REDACTED]	1,00	un	[REDACTED]	0 % (*)		[REDACTED]
6	[REDACTED]	1,00	un	[REDACTED]	0 % (*)		[REDACTED]

Taxa / Tax	Base / Incidence	Valor / Amount
0 %	[REDACTED]	0,00

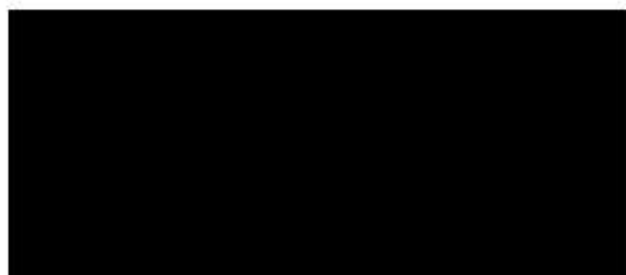
Total IVA / VAT 0,00

Descontos de linha / Item Discounts 0,00

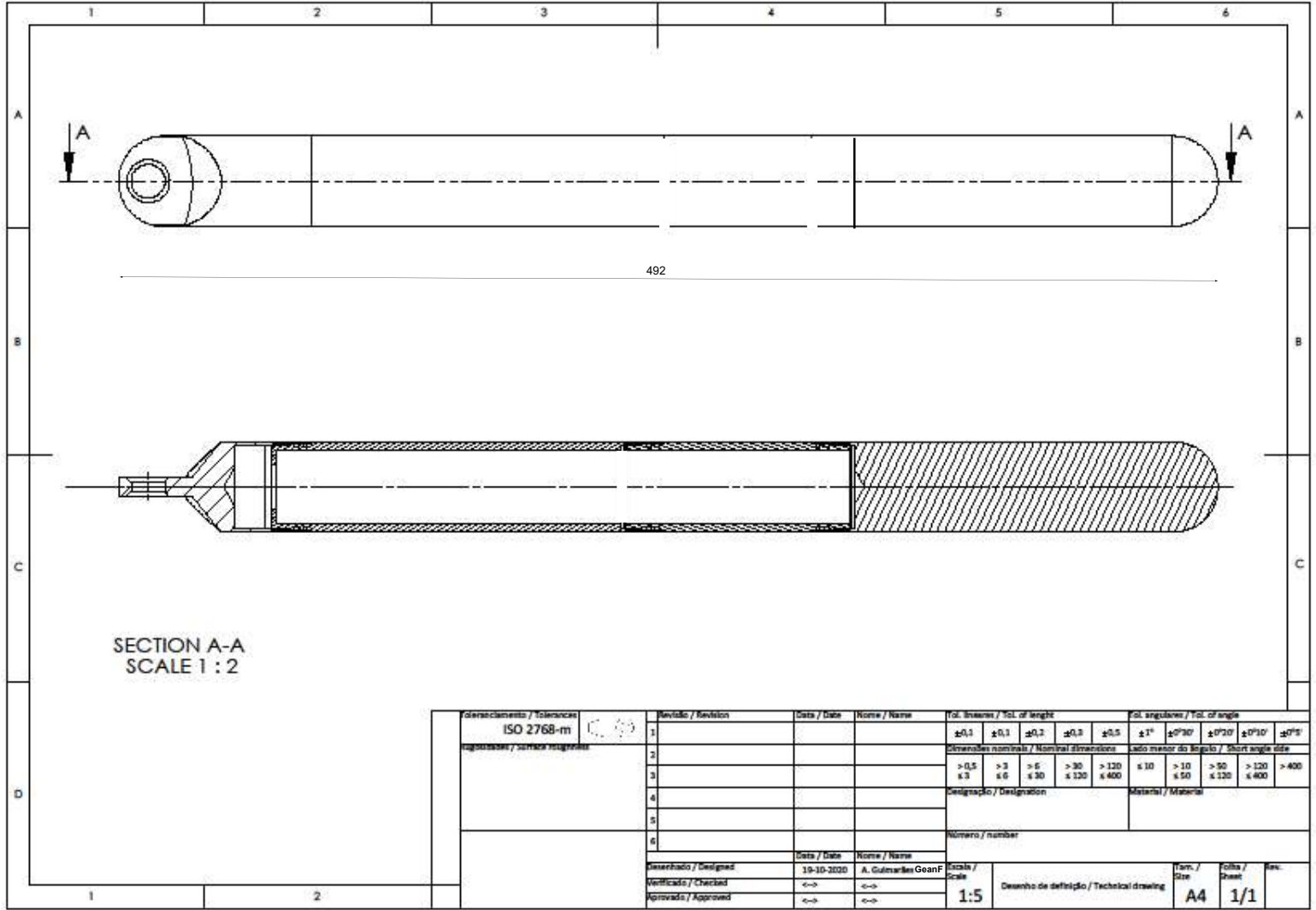
Total Líquido / Net Total [REDACTED]

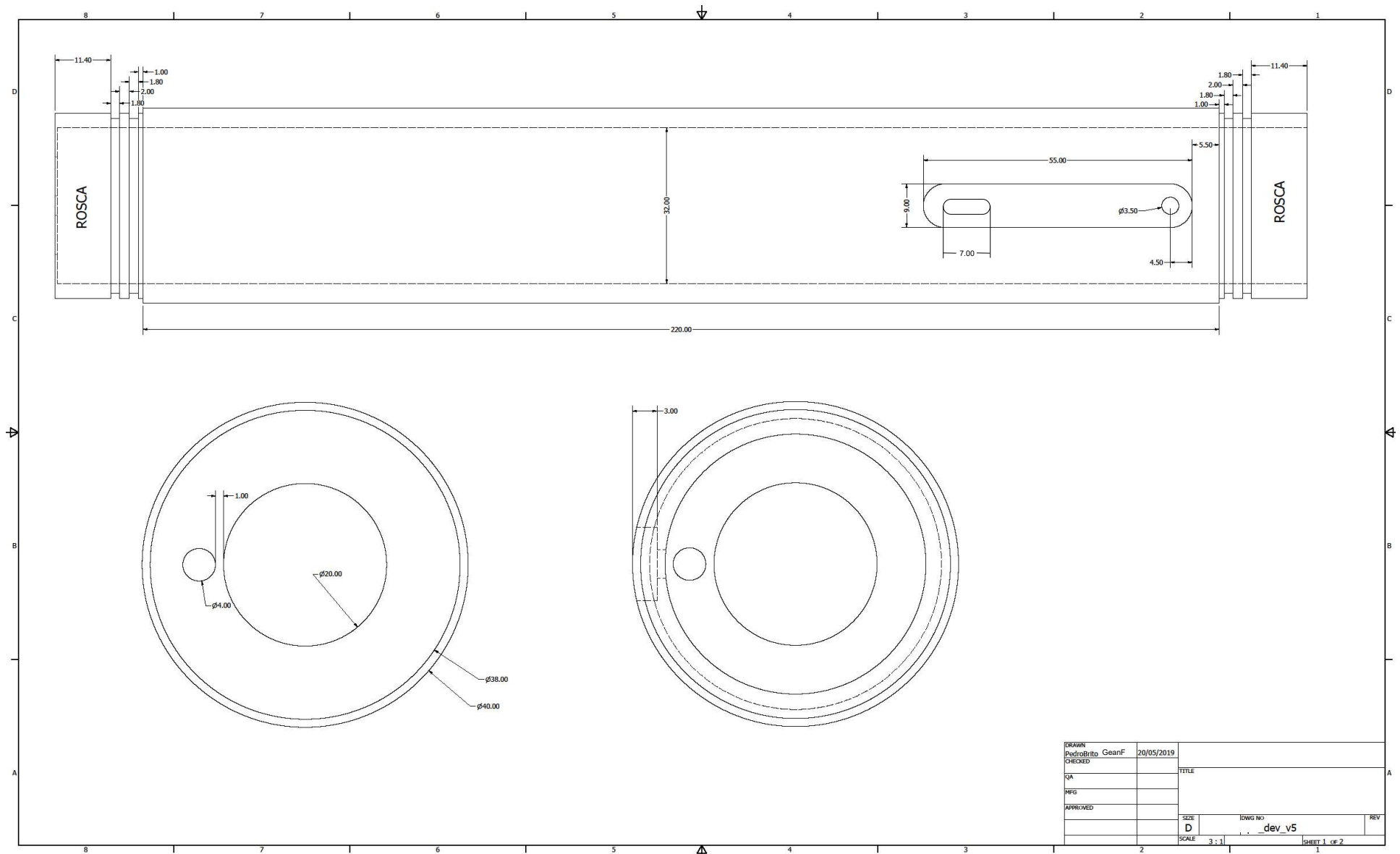
Total IVA em EUR / Total VAT in EUR 0,00

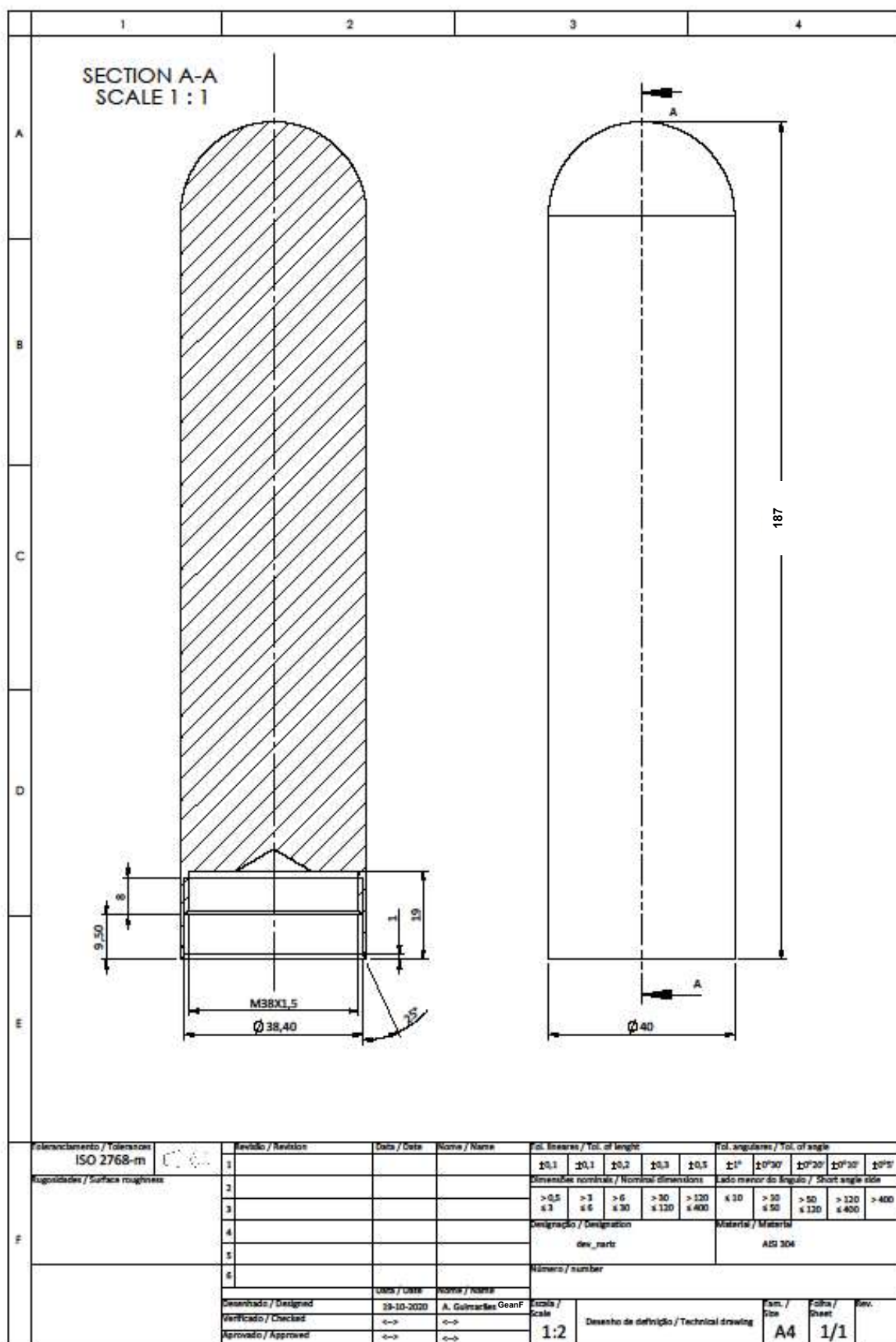
Total [REDACTED]



13.4 – Anexo IV - Projetos e Detalhamentos Técnicos do Invólucro do Desviômetro







Digitally signed by
LABNETHC/China
Date: 2020.03.31
10:38:23 +0800
Reason: Documento
aprovado
eletronicamente

IPAC
www.ipac.ac.cn
4006
150101 17029
17029



Certificado de calibração

Página 1 de 2

Indicação:	Digital
Intervalo de indicação:	$\pm 180^\circ$
Resolução:	$0,1^\circ$
(do dispositivo atador)	

Humididade relativa: 53,5 %hr

PC-M-DMDM 070 Ed. B Rev. 00

Gerador angular, com o nº Ident. LD103, rastreado ao Labmetro (Espanha)

Não foram identificadas condições relevantes que afetem os resultados.

Encontram-se apresentados na página seguinte

*A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão $k=2$, a qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de expansão de aproximadamente 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA 4/02.

Responsible pela Validação

[Signature]

Luise Pais

Singapore

Sara Leonarcsu (Responsável Técnico):

0014064207

Informasi lebih lanjut hubungi:

<http://www.college-hug.pt>
 Rua da Liberdade, 228 - 4415-451 Góp - Portugal
 Tel: +351 252 421 000

O SPAC é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo do SPAC e do TLAC para a criação, administração e transações. SPAC é o signatário do SPAC para a criação, administração e transações. SPAC é o signatário do SPAC para a criação, administração e transações.



Certificado de calibração

Certificado nº. CDBM021/20

Página 2 de 2

Determinação do erro no sentido

Valor de referência	Valor do equipamento	Erro	K	Incerteza expandida
0,0°	0,7°	0,7°	2,00	±0,068°
5,0°	4,7°	-0,3°	2,00	±0,068°
15,0°	14,8°	-0,1°	2,32	±0,10°
45,0°	45,1°	0,1°	2,00	±0,068°
90,0°	90,2°	0,2°	2,00	±0,068°
125,0°	125,0°	0,0°	2,00	±0,068°
180,0°	179,2°	-0,8°	2,00	±0,068°
0,0°	0,7°	0,7°	2,00	±0,068°

Determinação do erro no sentido

Valor de referência	Valor do equipamento	Erro	K	Incerteza expandida
0,0°	0,7°	0,7°	2,00	±0,068°
5,0°	5,6°	0,6°	2,00	±0,068°
15,0°	15,8°	0,8°	2,32	±0,10°
45,0°	45,8°	0,8°	2,00	±0,068°
90,0°	91,0°	1,0°	2,00	±0,068°
125,0°	125,8°	0,8°	2,00	±0,068°
180,0°	179,2°	-0,8°	2,00	±0,068°
0,0°	0,7°	0,7°	2,00	±0,068°

Observações: O equipamento do cliente foi colocado na vertical e feito o zero no gerador, foi retirada a parte de fora metálica.

Calibrado por

Luísa Pais

Responsável pela Validação

Sara Leonor (Responsável Técnico)

CDBM021/20

www.metrologia.isq.pt
Rua do Prof. Carlos Mota, 33 • Telefone: 21 421 4220 • Fax: 21 421 4221 • Email: metrologia@isq.pt

<http://www.metrologia.isq.pt>
Rua do Prof. Carlos Mota, 33 • Telefone: 21 421 4220 • Fax: 21 421 4221 • Email: metrologia@isq.pt

O IPAC é signatário da Acordo de Reconhecimento Mútuo da ISO e do ILAC para testes, calibração e inspeção. IPAC é signatário da ISO 9001, sendo ILAC MRA para testes, calibração e inspeção. Este documento só pode ser reproduzido na íntegra, sempre quando autorizado pelo IPAC. This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.