



**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE**

CONTROLE DE DESVIO POR ACELERÓMETRO

HELSIMASIO SABALO ERNESTO NGOLA

**Dissertação realizada no âmbito do
Programa de Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente**

Porto, 2022

(Página intencionalmente em branco)

**UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE**

CONTROLE DE DESVIO POR ACELERÓMETRO

HELSIMASIO SABALO ERNESTO NGOLA

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para obtenção do título de Grau de Mestre em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente, realizado na Faculdade de Engenharia do Porto no Departamento de Engenharia de Minas.

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

Coorientador: **Doutor Vinícius Miranda**, Cofundador e Diretor da IT da O-pitBlast.

Porto, 2022

FOLHA APROVAÇÃO

DEDICATÓRIA

Em especial memoria da minha falecida irmã Zaulena Quilombo Ernesto Ngola, aos meus pais Macedo Sabalo Ngola e Rosa Nzanji Ngalambole Ernesto, aos meus irmãos Maria Ernesto Ngola, Leonildo Luís Ernesto Ngola, Oliveira Ernesto Ngola, Hélder Neves Ernesto Ngola e António Tunguno Ernesto Ngola.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer o soberano senhor Jeová por ouvir as minhas orações, me amparar quando estive nos piores momentos da minha vida e por guiar os meus passos para eu poder almejar os meus objetivos.

Eu quero agradecer aos meus pais Macedo Sabalo Ngola e Rosa Nzanji Ngalambole Ernesto a quem eu devo tudo que eu almejei, os meus Engenheiros e Mestres da minha vida, aos meus irmãos Zaulena Quilombo Ernesto Ngola, Maria Ernesto Ngola, Lurdes Ngola, Leonildo Luís Ernesto Ngola, Oliveira Ernesto Ngola, Hélder Neves Ernesto Ngola, Delfina Ndonbaz Ngola e António Tunguno Ernesto Ngola, pela motivação, encorajamento, força e suporte incondicional.

Quero agradecer as minhas avós Zaulena Tomás e Antónica Ngalambole, as minhas tias Domingas Ngola, Anita Ngola, Sónia Oliveira e Marta Nunda, aos meus tios Ernesto Tomás Ngola, Luís António Raimundo Ngalambole, aos meus primos Tídio Mateus, Nataniel Ngola Muhongo, Segredo Neves, Baião Navio, Domingos Navio, Zélia Viera, Delfina Viera, Emília Viera, António Viera, Francisco Viera, Zaulena Viera, Rosa Viera, e também gostaria de agradecer a família Ngola em geral.

Quero também agradecer os meus amigos Moisés Luís, Fernandes Mbande, Jerson Jericota, Acácio Quipinga, Mubarak Adam, Robson Araújo, Robson Lima, Rafael Guimarães, Orlando Alexandre, a Eun-Jin Kim aos meus instrutores bíblicos Joaquim Canhanga, Justin Edward e Edson Simões.

Ao meu orientador Doutor José Manuel Soutelo Soeiro de Carvalho, pela paciência, profissionalismo, pelo tempo, pela motivação, diretrizes e a maneira como lidou comigo para ultrapassar as dificuldades que encontrei durante o desenvolvimento e conclusão da tese.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, um agradecimento especial aos professores do Departamento de Minas, pela paciência e ensinamentos durante o meu percurso académico.

À O-pitBlast, a companhia que disponibilizou o desviómetro para a obtenção e tratamento dos resultados, as Engenheiras e Mestres Andressa Almeida e Bianca Saraiva pela disponibilidade, explicação de alguns termos relacionados com o equipamento, pelo treinamento da minha primeira interação com a sonda Desviometro.

RESUMO

A perfuração de rochas é um dos fatores crucial e determinantes para o estudo de formações rochosas através de sondagem, e para o desmonte com explosivos de rochas em pedreiras e minas. O cálculo dos desvios de um furo de pesquisa ou exploração para a obtenção seu perfil geométrico, é, por isso, um fator muito importante para os estudos geofísicos e geotécnicos no desmonte de rochas em pedreiras e minas.

Este trabalho propõe uma experiência laboratorial para a avaliação do rigor de equipamentos, aplicações informáticas e procedimentos utilizados na indústria para a medição geométrica desses furos. Foi construído um simulacro de furo, com geometria perfeitamente conhecida, e sobre ele foram feitos vários testes de medição, variando as condições operatórias.

Procedeu-se a uma análise dos resultados. Essa experiência foi implementada sobre o desviómetro DEV, da empresa O-pitBlast.

Palavras-Chaves: Desviómetro, Perfuração, Geometria, Perfilagem, Sonda, Desvio, Erros.

ABSTRACT

Rock drilling is one of the crucial and determining factors for the study of rock formations through drilling, and for dismantling it with rock explosives in quarries and mines. The calculation of the deviations of a research hole or exploration to obtain its geometric profile is therefore a very important factor for geophysical and geotechnical studies in the dismantling of rocks in quarries and mines.

This work proposes a laboratory experience for the evaluation of the rigor of equipment, computer applications and procedures used in the industry for the geometric measurement of these holes. A drill was constructed, with perfectly known geometry, and several measurement tests were performed on it, varying the operating conditions.

The results were analyzed. This experiment was implemented on the DEV Deviometer of the company O-pitBlast.

Keywords: Deviometer, Drilling, Geometry, Profiling, Probe, Deviation, Errors.

ÍNDICE

1.0 Introdução	9
1.1 Identificação do problema de estudo	10
1.2 Objetivos	10
1.3 Metodologia	10
1.4 Justificativa	11
1.5 Estrutura e organização da tese.....	11
2.0 Estado de arte.....	12
2.1 Perfuração e desvio de perfuração	12
2.2 Métodos de perfuração.....	13
2.3 Método percussivo	13
2.4 Método rotativo.....	13
2.4.1 Coluna de perfuração	14
2.4.2 Brocas de perfuração.....	15
2.4.3 Fluidos de perfuração.....	16
2.4.4 Principais funções dos fluidos de perfuração.....	17
2.5 Características dos furos	20
2.6 Ciclo de perfuração	21
2.7 Erros da perfuração	22
2.8 Erro de desvio	23
2.8.1 Erro de posição do emboquilhamento.....	25
2.8.2 Erro angular de inclinação e orientação.....	25
2.8.3 Erro de curvatura.....	25
2.8.4 Erro de comprimento	26
2.8.5 Erros das características geomecânicas da rocha.....	27
2.9 Problemas do desvio de furo.....	28
2.10 Medição de desvio de furos	28
2.11 Equipamento para a medição do desvio.....	29
3.0 Instalação experimental e ensaios.....	32
3.1 Montagem da instalação de teste	32
3.1 Cálculo das coordenadas do furo de pesquisa.....	33
3.2 Recolha de dados na instalação da tese.....	37
3.2.1 Exemplos de operação	38

3.2.2 Medições em descida ou downhole nos intervalos de 1, 2 e 3m	38
3.2.2 Medições em descida ou downhole nos intervalos de 1, 2 e 3m	39
3.2.3 Medições de subida ou uphole nos intervalos de 1, 2 e 3m	41
3.4 Estudo e descrição dos erros do aparelho	43
3.4.1 Introdução do erro de amostragem	44
3.4.2 Intervalo de medição de menos de 1, 2 e 3m no método downhole	44
3.4.3 Intervalo de medição com mais de 1, 2 e 3m no método downhole	48
3.4.4 Intervalo de medição de menos de 1, 2 e 3m no método uphole	50
3.4.5 Intervalo de medição com mais de 1, 2 e 3m no método uphole	52
4.0 Introdução dos erros de operação	56
4.1 Estudo da trajetórias descritas por aceleração e atitude	56
4.2 Trajetórias descritas na variação de intervalo no método downhole	56
4.2.1 Trajetórias descritas na variação de intervalo no método uphole	58
4.3 Trajetórias descritas do método downhole com paragem da sonda	60
4.3.1 Correção das trajetórias descritas do método downhole	63
4.4 Trajetórias descritas do método uphole com paragem da sonda	64
4.4.1 Correção das trajetórias descritas do método uphole	66
4.5 Comparação de cordada com o afastamento do desviometro	67
4.5.1 Comparação de cordada e a variação do erros	68
4.5.2 Comparação do furo referência sem modificação de passos descendentes	71
4.5.3 Comparação do furo referência sem modificação de passos ascendentes	75
Conclusões	81
Referências bibliográficas	83
Anexo dos ensaios de laboratório realizados	86

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1. Diagrama da metodologia.....	11
Figura 2. Exemplo de um equipamento de perfuração com martelo de fundo de furo.....	12
Figura 3. Colunas de perfuração, A-drill collars, B-heavy weight drill pipes, C-drill pipes. (http://www.otiservices.in/drill.html ; http://www.betteroiltools.com/pro.php?id=8 ; http://cnjslxgroup.en.made-in-china.com/).....	14
Figura 4. Exemplos de brocas de perfuração (Adaptado de http://www.biznessuae.com/products/Industrial_Goods_And_Services__Mining_And_Drilling-2.htm ; http://www.pdcbitcn.com/index-en.html ; http://www.creightonrock.com/).....	15
Figura 5. Composição de um fluido a base de água (Gatlin, 1960).....	19
Figura 6. Composição de um fluido a base de óleo (Gatlin, 1960).....	19
Figura 7. Representação do ciclo de perfuração. Ilustração adotada (Gonçalves T., 2017).	21
Figura 8. Principais erros das operações de perfuração (Kerber et al., 2007).....	23
Figura 9. Encurvamento da haste quando a broca de perfuração passa de um meio mais brando a um de maior competência. Ilustração do autor adaptado de Hardrockdrills (2018).	26
Figura 10. Desvio de furo causado pela transição da rocha (Frank G., 2021).	27
Figura 11. Representação do equipamento para a medição de desvio.	29
Figura 12. Esquema de orientação absoluta 360° utilizado no desviômetro (Frank G., 2021).	29
Figura 13. Representação da corda com marcos visuais de profundidade e meio tração usada no desviômetro (Frank G., 2021).....	30
Figura 14. Representação da instalação de teste no Departamento Engenharia de Minas (FEUP).	33
Figura 15. Representação da instalação de teste na vista de cima.	33
Figura 16. Sistema de coordenadas adotado para o desvio do tubo.....	33
Figura 17. Representação do sistema adotado para o cálculo das coordenadas do tubo.....	34
Figura 18. Representação do perfil modular e do perfil real do furo.	36
Figura 19. Representação do cálculo da distância do desviômetro (Ilustração adotada no cálculo da condição dos relatórios O-pitBlast).	38
Figura 20. Perfil obtido a 1m de passo com o método Downhole, com media de azimuth de 338,1°, media angular de 10,1°, uma diferença de desvio de 21,1m.....	39
Figura 21. Perfil obtido a 2m de passo com o método Downhole, com media de azimuth de 50,56°, media angular de 11,53°, e uma diferença de desvio de 9,99m.	40
Figura 22. Perfil obtido a 3m de passo com o método Downhole, com media de azimuth de 351,47°, media angular de 13,59°, uma diferença de desvio de 11,62m.....	40
Figura 23. Perfil obtido a 1m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 2,8°, media angular de 10,2°, uma diferença de desvio de 27,9m.....	41
Figura 24. Perfil obtido a 2m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 245,82°, media angular de 9,44°, uma diferença de desvio de 9,68m.....	42
Figura 25. Perfil obtido a 3m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 23,54°, media angular de 7,47°, uma diferença de desvio de 10,86m.....	42
Figura 26. Medição feita com 0,50cm de intervalo de medição, com media de azimuth de 34,3°, media angular de 10,4°, e uma diferença de desvio de 29,1m.	44
Figura 27. Menos de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 147,3°, media angular de 9,75°, uma diferença de desvio de 10,83m.....	46
Figura 28. Menos de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 40,82°, media angular de 10,99°, uma diferença de desvio de 11,56m.....	47
Figura 29. Menos de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 11,62°, media angular de 12,75°, uma diferença de desvio de 11,72m.....	47
Figura 30. Mais de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 279,29°, media angular de 10,94°, e uma diferença de desvio de 10,31m.....	48

Figura 31. Mais de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 73.67°, media angular de 11.3°, uma diferença de desvio de 10.63m.....	49
Figura 32. Mais de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 353,95°, media angular de 13,22°, uma diferença de desvio de 12,28m.....	49
Figura 33. Menos de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 339.76°, media angular de 9.88°, e uma diferença de desvio de 9.61m.....	50
Figura 34. Menos de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 355,35°, media angular de 10,27°, uma diferença de desvio de 9,76m.....	51
Figura 35. Menos de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 348,12°, media angular de 7,45°, uma diferença de desvio de 10,9m.....	52
Figura 36. Mais de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 98,89°, media angular de 9,69°, uma diferença de desvio de 8,7m.....	52
Figura 37. Mais de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 59,24°, media angular de 8,81°, uma diferença de desvio de 9,8m.....	53
Figura 38. Mais de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 26,72°, media angular de 7,48°, uma diferença de desvio de 10,79m.....	54
Figura 39. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 74°, media angular de 11,2°, diferenças de desvio 4,1m, passos de medidas 1,2 e 3m.....	56
Figura 40. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 357,61°, media angular de 12,97°, diferenças de desvio 10m, passos de medidas 2,3 e 1m.....	57
Figura 41. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 14,25°, media angular de 12,51°, diferenças de desvio 19,27m, passos de medidas 3,1 e 2m.....	58
Figura 42. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 32,05°, media angular de 11,47°, diferenças de desvio 1,18m, passos de medidas 1,2 e 3m.....	58
Figura 43. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 281,93°, media angular de 8,99°, diferenças de desvio 10,04m, passos de medidas 2, 3 e 1m.....	59
Figura 44. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 11,45°, media angular de 7,9°, diferenças de desvio 19,69m, passos de medidas 3, 1 e 2m.....	60
Figura 45. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 64°, media angular de 7,6°, diferenças de desvio 21,8m e intervalo de 1m.....	61
Figura 46. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 60,59°, media angular de 6,91°, diferenças de desvio 9,72m e intervalo de 2m.....	62
Figura 47. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 58,92°, media angular de 9,69°, diferenças de desvio 10,45m e intervalo de 3m.....	62
Figura 48. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 68,7°, media angular de 7,68°, diferenças de desvio 19,25m e intervalo de 1m.....	64
Figura 49. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 185,71°, media angular de 7,16°, diferenças de desvio 9,82m e intervalo de 2m.....	65
Figura 50. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 21,46°, media angular de 5,95°, diferenças de desvio 10,9m e intervalo de 3m.....	65
Figura 51. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 1m método Descendente e Ascendente.....	68
Figura 52. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 1m do método Descendente e Ascendente.....	68
Figura 53. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 2m método Descendente e Ascendente.....	69
Figura 54. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 2m do método Descendente e Ascendente.....	69
Figura 55. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 3m método Descendente e Ascendente.....	70

Figura 56. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 3m do método Descendente e Ascendente.....	70
Figura 57. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 1m no método Downhole.	71
Figura 58. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 1m.	71
Figura 59. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 2m no método Downhole.	72
Figura 60. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 2m.	73
Figura 61. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 3m no método Downhole.	74
Figura 62. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 3m.	74
Figura 63. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 1m no método Uphole.....	75
Figura 64. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 1m.	75
Figura 65. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 2m no método Uphole.....	76
Figura 66. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 2m.	77
Figura 67. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 3m no método Uphole.....	78
Figura 68. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 3m.	78

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 1. Aditivos adicionados nos fluidos de perfuração (Gatlin, 1960).....	18
Tabela 2. Cálculos das coordenadas do furo de pesquisa assumindo que a base é igual a base do triângulo..	34
Tabela 3. Determinação do perfil de referência para o furo dos pontos interpolados com modificação de passos.	35
Tabela 4. Resultados da medição da distância horizontal à vertical da boca do furo.	36
Tabela 5. Resultados obtidos a 1m de passo com o método Downhole.....	39
Tabela 6. Resultados obtidos a 2m de passo com o método Downhole.....	40
Tabela 7. Resultados obtidos a 3m de passo com o método Downhole.....	41
Tabela 8. Resultados obtidos a 1m de passo com o método Uphole.	41
Tabela 9. Resultados obtidos a 2m de passo com o método Uphole.	42
Tabela 10. Resultados obtidos a 3m de passo com o método Uphole.	43
Tabela 11. Resultados obtidos com 0,50cm de intervalo de medição.	45
Tabela 12. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.	46
Tabela 13. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.	47
Tabela 14. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.	48
Tabela 15. Resultados obtidos com mais de 1m de intervalo de medição.	48
Tabela 16. Resultados obtidos com mais de 2m de intervalo de medição.	49
Tabela 17. Resultados obtidos com mais de 3m de intervalo de medição.	50
Tabela 18. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.	50
Tabela 19. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.	51
Tabela 20. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.	52
Tabela 21. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.	53
Tabela 22. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.	54
Tabela 23. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.	54
Tabela 24. Resultados obtidos numa variação dos passos de 1,2 e 3m.....	57
Tabela 25. Resultados obtidos numa variação dos passos de 2,3 e 1m.....	57
Tabela 26. Resultados obtidos numa variação dos passos de 3,1 e 2m.....	58
Tabela 27. Resultados obtidos numa variação de passos de 1, 2 e 3m.	59
Tabela 28. Resultados obtidos numa variação de passos de 2,3 e 1m.	59
Tabela 29. Resultados obtidos numa variação de passos de 3,1 e 2m.	60
Tabela 30. Resultados obtidos no intervalo de 1m.	61
Tabela 31. Resultados obtidos no intervalo de 2m.	62
Tabela 32. Resultados obtidos no intervalo de 3m.	63
Tabela 33. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 1m.....	63
Tabela 34. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 2m.....	63
Tabela 35. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 3m.....	63
Tabela 36. Resultados obtidos no intervalo de 1m.	64
Tabela 37. Resultados obtidos no intervalo de 2m.	65
Tabela 38. Resultados obtidos no intervalo de 3m.	66
Tabela 39. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 1m.....	66
Tabela 40. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 2m.....	66
Tabela 41. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 3m.....	66
Tabela 42. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 1m.	72
Tabela 43. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 2m.	73
Tabela 44. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 3m.	75
Tabela 45. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 1m.	76
Tabela 46. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 2m.	77
Tabela 47. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 3m.	79

1.0 INTRODUÇÃO

Este projeto consiste no estudo do Controle de Desvio em furos de sondagem e produção utilizando o desviômetro, um equipamento de perfilagem criado pela O-pitBlast, que descreve a inclinação, azimute e a direção dos furos de perfuração de pesquisa de uma mina subterrânea ou a céu aberto.

A trajetória de um furo de perfuração é um assunto que desperta muito interesse na área das Engenharias de Minas, geológica, geotécnica assim como na área de Engenharia Civil. Atualmente a utilização e avaliação dos métodos modernos para a sondagem de um furo de pesquisa geofísica juntam-se aos métodos tradicionais da área de prospecção geofísica do subsolo, que leva a indústria maior demanda de resultados mais parecidos com a área de estudo com custos razoáveis em menos tempo.

Uma pesquisa geológica é feita através de alguns parâmetros, como a capacidade do método escolhido para obter as informações desejadas, o prazo disponível para a execução dos trabalhos de investigação, que pode ser um fator determinante na escolha do método, o custo total das investigações e a relação custo que benefício de todo o processo. Um método tradicional para se investigar a geologia de subsuperfície é a perfuração de poços, de diferentes diâmetros, direções, inclinações e profundidades, mas todos com o mesmo propósito, a obtenção de testemunhos da sondagem.

Este é um método geralmente pesado e lento, fornecendo informações detalhadas, porém localizadas. Os levantamentos geofísicos, embora algumas vezes passíveis de grandes incertezas na interpretação, proporcionam um meio relativamente rápido e barato de se obter informações geológicas distribuídas numa área maior. A utilização de vários sensores pode fornecer uma gama de dados de diferentes naturezas e propósitos, ampliando as informações para melhorias da interpretação de dados e consequentemente maior confiabilidade do modelo geológico a ser gerado.

Na exploração de recursos de subsuperfície, os métodos geofísicos são capazes de detetar e delinear características locais de interesse potencial que não poderiam ser descobertos por nenhum programa de perfuração realista. O levantamento geofísico não dispensa a necessidade de perfurações testemunhadas, mas quando corretamente aplicado, pode maximizar e aperfeiçoar os programas de exploração (Kearey et al, 2002).

A perfilagem geofísica apresenta uma série de vantagens quando comparada aos métodos tradicionais, podendo ser usada para correção dos dados da perfuração, no registro de várias propriedades da rocha num aumento das ferramentas de perfilagem, com utilização de diferentes sensores, realiza amostragens em grande detalhe, apresenta um custo reduzido quando comparada com testemunhos, requer um tempo de execução e processamento de dados bastante reduzido e permite a utilização de modernos *softwares* para interpretação, apresenta um registro contínuo e sem limite de profundidade, define contatos geológicos, é reproduzível e serve de base para correlações entre perfis (Girão Nery, 2004).

Na indústria Mineira a perfilagem geofísica é utilizada em larga escala, fornece importantes propriedades in situ de rochas-reservatório, atualmente a amostragem direta só é realizada de forma pontual para eventuais confirmações litológicas.

Por outro lado, a realização de sondagens fornece um conhecimento muito mais preciso e detalhado, mas muito mais caro. A adequada interpretação de uma sondagem exige um bom conhecimento da sua posição espacial, e não apenas da profundidade do testemunho.

No desmonte de rocha com explosivos, a correta perfuração dos furos de desmonte condiciona todo o resultado da pega de fogo, nomeadamente por causar variações na densidade energética transmitida ao maciço. A definição da frente de desmonte, e todas as dificuldades associadas, por exemplo repés, projeções, formação da pilha, depende também da geometria dos furos.

A motivação desta dissertação é propor uma estratégia de teste para equipamentos de medição de geometria das perfurações (“desviómetro”). Para isso foi construído um simulacro de um furo nas escadas no Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia do Porto. Esse furo foi depois medido várias vezes com um desviómetro, da empresa O-pitBlast. A comparação entre as medições feitas pelo equipamento e a geometria conhecida do furo permitirá então julgar do rigor deste e da sua operação.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO

O processo de perfilagem geométrica de um furo de pesquisa é uma operação que exige um bom manuseamento da sonda escolhida para obtenção do perfil com a maior resolução sobre a subsuperfície do furo de sondagem.

É importante verificar o rigor e precisão do desviómetro quando se calcula o desvio e se constrói a perfilagem geométrica do furo pesquisa. É difícil, se não impossível medir diretamente a geometria de um furo real, visto que o acesso está condicionado a um ponto. O conhecimento da geometria é então feito a partir da descrição da trajetória espacial (tridimensional) de um equipamento de medida, ancorada apenas num ponto conhecido e medida pelo equipamento que se quer aferir, num círculo vicioso que se pretende quebrar.

Propõe-se um programa de teste sobre um furo em laboratório, que permita comparar a geometria efetiva com a geometria medida.

1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos do estudo são:

- Fazer o estudo de um furo de perfuração em trajeto conhecido, utilizando o desviómetro da O-pitBlast.
- Estudar a possibilidade de utilização dos sensores de aceleração em conjunto com o sensor de atitude

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos mencionados acima, utilizou-se as seguintes metodologias:

- Identificação do problema de estudo: apresentação dos problemas apresentados pelos sensores para a obtenção das coordenadas.
- Estado de arte: fez-se uma análise ampla de publicações de trabalhos onde foi utilizado o desviómetro em furos de pesquisa e sondagem, feitos por pesquisadores, académicos e cientistas.
- Montagem da Instalação de Teste: para aquisição dos resultados e continuação do trabalho de pesquisa foi necessário a montagem de uma instalação de teste para a simulação com o desviómetro de várias sequências de colheitas de dados adotadas.

- **Recolha e Análise dos Resultados:** A recolha de dados com o desviómetro foi feita com métodos da O-pitBlast, a análise dos resultados também se baseou nos resultados obtidos com sequências de colheita de resultados recomendados, se adotou algumas mudanças de parâmetros de colheita para se comprara os resultados dos métodos recomendados.

O diagrama da metodologia é demonstrado em baixo:

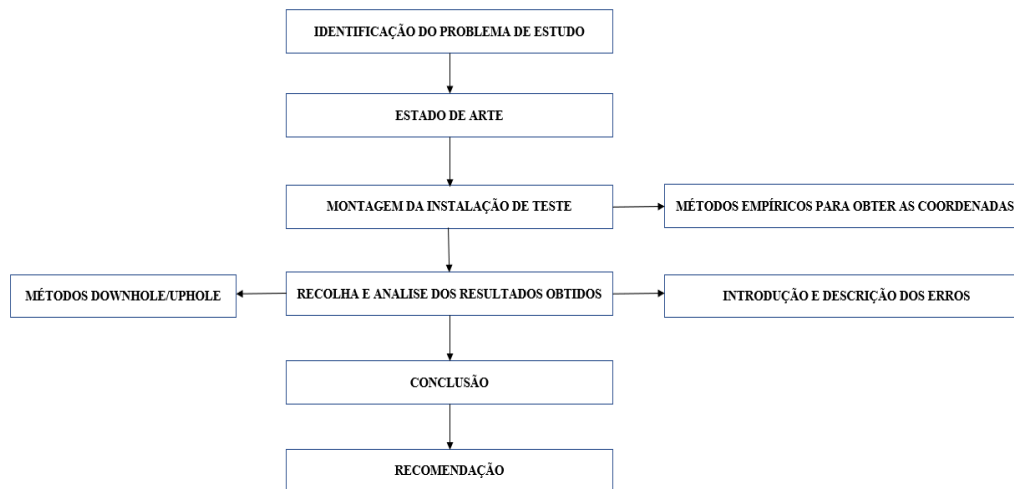


Figura 1. Diagrama da metodologia.

1.4 JUSTIFICATIVA

O estudo significativo das formações geológicas está baseado no estudo geofísico do subsolo o que faz a perfuração uma fase importante e significativa para a furacão da superfície para adquirir as informações de estudo. A justificação para este trabalho de pesquisa está focado na importância de verificar o rigor de medição e implementação do sensor acelerómetro para a sonda desviómetro poder descrever o trajeto e atitude a medida que o equipamento sobe e desce a longo do furo, visto que o equipamento foi projetado para a medição de desvio de furos de pedra e de minas que não ultrapassem os 10 metros de profundidade devido a altura das bancadas que funciona como um fator de segurança para as praças.

1.5 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA TESE

1. **Capítulo 1-**Introdução apresentação do problema de estudo, a motivação, a metodologia e a justificação do trabalho.
2. **Capítulo 2-**Estado de arte, descrevi o método de perfuração, as variantes do método de perfuração, os tipos de fluidos usados para perfurar, os problemas de desvio do furo, descrição do equipamento para medir os desvios do furo desviómetro.
3. **Capítulo 3:** Construção da instalação de teste, a recolha de coordenadas com métodos empíricos, a recolha de resultados com os métodos *Downhole* e *Uphole* e análise dos resultados.
4. **Capítulo 4:** Introdução dos erros, comparação do afastamento do tubo e do equipamento e a comparação analítica para ambos métodos com o trajeto do tubo
5. **Capítulo 5:** Conclusão do trabalho de pesquisa e recomendações.

2.0 ESTADO DE ARTE

2.1 PERFURAÇÃO E DESVIO DE PERFURAÇÃO

A perfuração é uma operação de desmonte de rocha que tem sofrido uma evolução ao longo dos tempos. Antigamente a perfuração da rocha, para pegadas de fogo, era uma operação realizada através de martelos pneumáticos, carregados pelos operadores, que como é se possível imaginar, eram bastante ineficientes e perigosos, sendo que a perfuração era uma atividade que ocupava grande parte do tempo disponível para realização do projeto.

Com a evolução da tecnologia, a operação de perfuração, na engenharia de mineração, que engloba a perfuração em bancadas, teve um grande avanço, levando a processos mais rápidos, eficientes e seguros, fundamentalmente devido ao aparecimento das perfuradoras. As perfuradoras são equipamentos, geralmente sobre lagartas, para facilitar a sua aderência e estabilidade no solo, mas podendo ser observado também sobre rodas, que apresentam braços frontais, geralmente entre um e quatro, onde podem ser colocados martelos de perfuração, que poderão realizar a furação simultaneamente.

O aparecimento de perfuradoras levou a redução da mão-de-obra envolvida na operação de perfuração, deixou de ser necessário que os operadores carregassem e segurassem os martelos de perfuração, evitando grandes vibrações provocadas pela atividade que os operadores estavam expostos antigamente. No caso da realização de furos em desmontes ou de pesquisa em bancada, os equipamentos de perfuração apenas possuem um braço, versátil em termos das possibilidades de movimento para a sua colocação em posição ótima, pré-definida em projeto, para a direção e inclinação dos furos a realizar.

Deste braço fazem parte, para além do martelo de perfuração, capaz de produção de movimentos de rotação e percussão que serão transmitidos à coluna de aço e perfuração respetiva, um carrocel de armazenamento de hastes de perfuração que serão usadas como extensões que permitem realizar furos com os comprimentos desejados.



Figura 2. Exemplo de um equipamento de perfuração com martelo de fundo de furo.

2.2 MÉTODOS DE PERFURAÇÃO

Existem dois métodos de perfuração:

- Método percussivo.
- Método rotativo.

2.3 MÉTODO PERCUSSIVO

O método percussivo é designado por perfuração a cabo (cable tool drilling), o avanço do poço é feito golpeando sucessivamente a rocha com uma broca sustentada por um cabo de aço, causando a sua fragmentação por esmagamento. Para limpeza do poço, após vários golpes retira-se a broca e os cuttings gerados no interior do poço são retirados através da descida de uma ferramenta denominada por caçamba. A caçamba, um tubo equipado com uma válvula de retenção no fundo, é reciprocada até que se preencha o seu interior com o material do poço. Este material é descartado na superfície e depois de mais algumas descidas da caçamba, a perfuração é reiniciada, e o processo vai se repetindo.

Atualmente quase já não se usa este método, com exceção de alguns casos especiais em que apresenta vantagens. Tem baixos custos com equipamentos e operação, incluindo a dtm (desmontagem, transporte e montagem) e a locação, e apresenta dano desprezível à formação. Tem como maiores desvantagens taxas de penetração muito baixas quando comparadas com o método rotativo à medida que se aumenta a profundidade, dificuldade na obtenção de amostras para carotagem e deficiências no controlo do influxo de fluidos das formações para o poço.

2.4 MÉTODO ROTATIVO

O método consiste em descer no poço, animada de um movimento de rotação, uma coluna de perfuração que possui em sua extremidade uma broca de aço. A perfuração é realizada atravessando a formação através do movimento combinado da rotação da broca e do peso sobre ela, ao comprimir a rocha e causando a sua fragmentação.

O objetivo principal de trazer para à superfície os cuttings gerados durante a perfuração, bombeia-se por dentro da coluna de perfuração um fluido, denominado de fluido de perfuração, que através de orifícios na extremidade da broca retorna à superfície pelo espaço anular existente entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, transportando consigo os cuttings. À medida que a rocha vai sendo fragmentada e os cuttings gerados removidos continuamente da circulação do fluido, dá-se o avanço do poço. O peso aplicado sobre a broca é resultante da constituição da própria coluna de perfuração, ao serem colocados os drill collars em cima desta. A rotação pode ser transmitida diretamente à broca ou através do giro da coluna de perfuração.

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço de diâmetro inferior ao da broca é descida e cimentada no poço. O anular entre a coluna de revestimento e a parede do poço é cimentado, permitindo o avanço da perfuração em segurança. Após a cimentação do revestimento, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo em sua extremidade uma broca de diâmetro menor do que a do revestimento. Reinicia-se a perfuração e ao ser atingida determinada profundidade, retira-se novamente a coluna de perfuração, desce-se e cimenta-se outro revestimento. Este processo repete-se até ser atingida a profundidade final de perfuração. As diversas fases de perfuração de um poço de petróleo pelo método rotativo são caracterizadas pelos diferentes diâmetros das brocas. O sistema de fluidos de perfuração é geralmente conhecido como sistema de lamas, por isso ao

longo deste trabalho o termo lama de perfuração será usado com o mesmo significado que fluido de perfuração.

2.4.1 COLUNA DE PERFURAÇÃO

A perfuração rotativa é um processo que exige uma grande quantidade de energia. Parte desta energia é transmitida mecanicamente à broca em forma de rotação e a outra em forma de peso, sendo este o princípio da perfuração (Bourgoyne et al,1986).

O peso transmitido à broca resulta em grande parte da constituição da coluna de perfuração e é um dos principais critérios para o seu dimensionamento. Está, a coluna de perfuração, é também responsável por transmitir a rotação a broca e servir de conduta para a circulação do fluido de perfuração pelo poço. É assim constituída pelo conjunto broca e tubos de perfuração. Os tubos de perfuração têm uma caixa (*tool-joints*), numa das extremidades e um pino rosqueado na outra, que permitem que sejam conectados uns aos outros.

Existem basicamente três tipos de tubos de perfuração:

- Os comandos ou *drill collars*,
- Os tubos pesados ou *heavy weight drill pipes* (HW).
- Os tubos de perfuração ou *drill pipes*.

Os *drill collars* são os primeiros a serem colocados em cima da broca. São tubos de aço bastante pesados cuja função principal é fornecer carga compressiva em forma de peso sobre a broca, e permitem que os tubos mais leves permaneçam sobre tensão durante a perfuração. Têm paredes mais espessas em relação aos restantes tubos e são fabricados em material também mais resistente.

Os *heavy weight drill pipes*, comumente designados por HW são os tubos colocados acima dos *drill collars*. Possuem conexões semelhantes, mas são mais leves. Os HW têm como principal função formar uma transição de rigidez mais amena na coluna de perfuração, entre os *drill collars* e os *drill pipes* e têm como particularidade, o reforço bastante comum, presente no meio da coluna.

Os *drill pipes* são os tubos colocados acima dos HW. Têm como função fornecer à coluna de perfuração o comprimento desejado. São tubos com menos rigidez que os demais e possuem também conexões semelhantes.



Figura 3. Colunas de perfuração, A-drill collars, B-heavy weight drill pipes, C-drill pipes.
(<http://www.otiservices.in/drill.html>; <http://www.betteroiltools.com/pro.php?id=8>;
<http://cnjslxgroup.en.made-in-china.com/>).

A coluna de perfuração é um elemento que está sujeito a vários esforços dinâmicos tais como flexão, torção, força normal e força cisalhante, sendo que as suas rigidezes estruturais, bem como as forças de reação resultantes da interação entre a coluna e a formação, são responsáveis pela trajetória do poço (Ribeiro, 2000).

Para além dos tubos descritos, as colunas de perfuração, dependendo do tipo de perfuração e das necessidades de cada poço, são equipadas com alguns acessórios, como:

- Estabilizadores: são tubos que possuem em seu corpo lâminas de tungstênio soldadas, ou camisas acopladas, para evitar que os drill collars inclinem em direção às paredes do poço durante a perfuração;
- Substitutos: são pequenos tubos usados para conexão de brocas e de tubos com diferentes roscas e diâmetros;
- Amortecedores de choque: são tubos especiais que minimizam as vibrações e impactos sobre a broca e a coluna;
- Percussores: são utilizados para dar pancadas na coluna de perfuração, quando ocorrem prisões;
- Alargadores: são ferramentas que permitem aumentar o diâmetro de um poço já perfurado.

2.4.2 BROCAS DE PERFURAÇÃO

A broca de perfuração, combinada com o peso transferido e o movimento rotativo, é a peça responsável pela fragmentação da rocha. É a ferramenta mais básica usada por um engenheiro de perfuração, e a seleção da melhor opção e das melhores condições de operação são um dos problemas mais básicos que este enfrenta (Bourgoyne et al, 1986).



Figura 4. Exemplos de brocas de perfuração (Adaptado de http://www.biznessuae.com/products/Industrial_Goods_And_Services__Mining_And_Drilling-2.htm; <http://www.pdcbitcn.com/index-en.html>; <http://www.creightonrock.com/>).

Atualmente são fabricadas e encontra-se disponível uma grande variedade de brocas para diferentes formações e situações encontradas durante a perfuração. De modo geral as brocas de perfuração são constituídas pelo corpo, estrutura cortante que pode ser de aço, carbureto de tungstênio, diamante natural ou diamante sintético, e jatos ou canais preferenciais que permitem o escoamento do fluido de perfuração e a limpeza do fundo do poço à medida que a furação avança. A estrutura cortante é que determina a aplicação da broca, seja para formações mais duras ou mais brandas.

As brocas de perfuração são classificadas de acordo com o seu design, em função da mobilidade das suas partes em:

- Brocas sem partes móveis (*drag bits*);
 - Brocas com partes móveis (*rolling cutter bits*) (Bourgoyne et al, 1986).
1. Brocas sem partes móveis consistem em elementos de corte integrados num só corpo, e giram como uma unidade à medida que a coluna de perfuração gira. O seu mecanismo de perfuração é semelhante ao que se faz quando se lavra a terra com um arado por exemplo, ou seja, ocorre uma raspagem do fundo do poço acompanhada da ação da força normal devido ao peso sobre a broca. Nesta classe de brocas incluem-se as brocas integrais de lâmina de aço, as brocas de diamantes naturais e brocas com diamantes artificiais, as chamadas brocas de *Polycrystalline Diamond Compact* (PDC). As brocas de lâmina de aço, como sofrem muito desgaste e têm baixa eficiência em formações mais profundas, o seu tempo de vida é curto e por isso quase já não se utilizam. As brocas diamantadas consistem em uma face com diamantes impregnados numa matriz de carboneto de tungstênio. Apresentam um campo de aplicação mais amplo, particularmente em formações duras/abrasivas, e possuem parâmetros de projeto tais como a forma da coroa, tamanho e densidade/distribuição dos diamantes sobre a coroa, caminho de fluxo de fluido e cascalhos gerados, que praticamente ditam o seu desempenho para determinado tipo de formação. O tamanho e o número de diamantes dependem da dureza da rocha a perfurar. As brocas PDC surgem como uma alternativa para a perfuração em formações não abrasivas brandas, semiduras e firmes. A estrutura de corte é formada por pastilhas montadas sobre bases cilíndricas, instaladas no corpo da broca. Possuem uma camada diamantada fina composta por cristais de diamante e cobalto e um suporte de carboneto de tungstênio e cobalto (Bourgoyne et al, 1986).
 2. Brocas com partes móveis possuem dois ou mais cones integrados com elementos cortantes, e cada cone gira em torno do seu próprio eixo à medida que a broca gira. A broca mais comum nesta classe é formada por uma estrutura de três cones e por isso é comumente denominada de tricone. O tricone é constituído por três peças soldadas e cada uma delas dispõe de uma haste, onde são encaixados os cones. Os cones por sua vez são revestidos de dentes de aço (saliências) ou insertos de carbureto de tungstênio que desempenham o corte.

2.4.3 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Os fluidos de perfuração são de vital importância na perfuração de poços de petróleo e pode mesmo dizer-se que o sucesso em perfurar um poço depende significativamente da performance do fluido que é usado. Fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e gases, em função das necessidades do poço e são geralmente constituídas por uma fase dispersante e outra dispersa.

Segundo o Instituto Americano de Petróleo (API, 1991), o termo fluido de perfuração designa o fluido circulante usado para tornar viável a ação de perfuração. Os fluidos de perfuração são a única componente do processo de abertura de um poço que permanece em contacto com este ao longo de toda operação de perfuração. A sua importância é imensa porque, além das suas funções principais eles ainda devem apresentar características especiais que garantam uma perfuração rápida e segura (Gatlin, 1960). Os fluidos devem ser projetados e formulados para uma performance eficiente sob a evolução das condições do poço e a sua tecnologia envolve tanto ciências como geologia, química, física, bem como habilidades de aplicação de engenharia.

2.4.4 PRINCIPAIS FUNÇÕES DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Um sistema de fluidos de perfuração devidamente concebido e projetado executa várias funções essenciais durante o processo de perfuração de um poço, tais como (*Drilling Fluid processing Handbook, Gulf Professional Publishing, 2005; Gatlin, 1960*):

- Remover e transportar os *cuttings* do poço até à superfície, bem como garantir a suspensão dos mesmos durante a interrupção da circulação;
- Suportar e estabilizar as paredes do poço;
- Revestir as paredes do poço com um reboco impermeável que atue como um selo sobre as formações permeáveis;
- Arrefecer e lubrificar a broca e a coluna de perfuração;
- Impedir ou minimizar os danos às formações de produção;
- Permitir a obtenção de máxima informação possível sobre as formações atravessadas.

A maior parte do tempo das operações de perfuração rotativa, a broca e a coluna de perfuração rodam a velocidades relativamente elevadas, gerando uma quantidade considerável de calor, causada pelas forças de fricção desta rotação. Uma vez que este calor não deve ser totalmente dissipado para as formações, deve ser conduzido para fora do poço. O calor gerado por fricção na broca e em outros pontos de contacto entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, é absorvido pelo fluido de perfuração e dissipado quando este chega à superfície, ou seja, à medida que o fluido circula arrefece a coluna de perfuração e a broca, reduzindo a fricção entre o material e a formação.

A capacidade do fluido de perfuração para absorver o calor depende do seu calor específico e do volume de circulação. Os requisitos normais de circulação, como os enunciados pelas outras funções, são adequados para esta finalidade, por isso, normalmente não é dada atenção especial à mesma, com exceção de situações raras onde as pressões são elevadas e a temperatura dos fluidos excede os gradientes geotérmicos previamente estimados, tornando-se necessário melhorar o arrefecimento superficial (Gatlin, 1960).

Para evitar a má lubrificação da broca e da coluna de perfuração, que podem causar torque excessivo e reduzir o tempo de vida útil da broca, os fluidos de perfuração também fornecem um nível de lubricidade para auxiliar o movimento do *drill pipe* e do *bottom hole assembly* (BHA).

Para além das funções principais descritas, os fluidos de perfuração também possuem outras funções como (Thomas, 2001):

- Transmitir potência hidráulica à broca;
- Suportar parte do peso da coluna de perfuração;
- Maximizar as taxas de penetração, já que esta, para além das propriedades mecânicas também é influenciada pela velocidade de remoção dos detritos de perfuração e redução do diferencial hidrostático;
- Minimizar a corrosão da coluna de perfuração, revestimento e equipamento de superfície.

Os fluidos de perfuração têm uma fluvariabilidade natural que auxilia no suporte de parte do peso da coluna de perfuração. O grau de fluvariabilidade é proporcional à densidade do fluido, assim, um aumento na densidade do fluido provoca um aumento no fator de fluvariabilidade e reduz a carga sobre o equipamento de sustentação na superfície. Contudo a densidade do fluido de perfuração nunca é alterada com o objetivo

de aumentar a fluatubilidade. A importância desta função particular torna-se mais relevante com o aumento da profundidade.

O fluido de perfuração é classificado em função da sua composição (Thomas, 2001). A classificação anual de sistemas de fluidos *World Oil*, o principal critério baseia-se no contribuinte principal da fase contínua ou dispersante. Os fluidos são classificados de acordo com a sua fase contínua em fluidos à base de água (doce ou salgada), fluidos à base de óleo, fluidos à base de ar e fluidos de base sintética. A natureza das fases dispersante e dispersa, bem como os componentes básicos e as suas quantidades definem não apenas o tipo de fluido, mas também as suas características e propriedades.

Tanto a água como o óleo só por si são fluidos que apresentam resultados satisfatórios em alguns casos de perfuração, mas as funções que estes devem geralmente executar durante a perfuração requerem propriedades que não podem ser obtidas a partir de líquidos simples (Gatlin, 1960).

Consequentemente o fluido típico de perfuração consiste de:

1. Uma fase dispersante ou contínua (fase aquosa ou orgânica), cuja função principal é fornecer o meio de dispersão para os materiais coloidais;
2. Uma fase dispersa, (formadora de gel, tais como sólidos coloidais e/ou líquidos emulsionados que proporcionem viscosidade, tixotropia e reboco desejados), cuja complexidade depende da natureza dos produtos dispersos, requisitos e funções necessárias;
3. Outros sólidos inertes dispersantes tais como materiais de aumento de peso, areia e *cuttings*;
4. Vários produtos químicos necessários para controlar as propriedades dentro dos limites desejados.

A química dos fluidos de perfuração é bastante complexa e infelizmente é incompletamente compreendida (Gatlin, 1960). Em contrapartida a maior parte dos fluidos de perfuração são coloides ou emulsões e são as componentes formadoras de gel que recebem maior atenção.

Tabela 1. Aditivos adicionados nos fluidos de perfuração (Gatlin, 1960).

Aditivos	Características
Soda caustica, potassa caustica e cal hidratada	Alcalinizantes e controladores de pH
Lignosulfonatos, taninos, lignitos e fosfatos	Dispersantes, inibidores físicos
Amido	Redutores de filtrado
Soda caustica, cal e cloreto de sódio	Floculantes
Polímeros de uso geral	Viscosificantes, desfloculantes ou redutores de filtrado
Surfactantes de cálcio, magnésio, cloreto de potássio e sódio	Emulsificantes da água e redutores de tensão
Baritina (Sulfato de Bário) e Hematita	Adensante pode controlar a densidade do fluido

Um fluido à base de água considera principalmente a natureza da água (sendo esta a fase contínua) e os aditivos empregues no seu preparo. São os fluidos de perfuração mais comumente usados. Para a seleção do tipo de água a usar pesam fatores como: disponibilidade, custo de transporte e de tratamento, tipo de formações geológicas a serem perfuradas, aditivos equipamentos e técnicas usadas na avaliação das formações.



Figura 5. Composição de um fluido a base de água (Gatlin, 1960).

A água doce como praticamente não afeta o desempenho dos aditivos empregues no preparo dos fluidos, não precisa de pré-tratamento químico. No caso de se usar um fluido à base de água salgada, esta pode ser natural como a água do mar, ou pode ser obtida pela adição de sais como NaCl, KCl ou CaCl₂. Na perfuração de camadas rochosas superficiais, como é o caso do topo do poço, podem-se usar fluidos não-inibidos (fluidos tratados para reduzir a atividades das argilas), uma vez que são rochas praticamente inertes ao contacto com a água, não sendo por isso necessário demasiado tratamento químico. Os fluidos inibidos são utilizados na perfuração de rochas de elevado grau de atividade na presença de água doce (Bourgoyne et al, 1986).

Os fluidos à base de água têm como vantagens menores impactos ambientais, baixo custo, incluindo o descarte, estabilidade térmica, biodegradabilidade e facilidade no bombeio, tratamento e deteção de *kicks*.

Os fluidos à base de óleo são emulsões invertidas de água, ou soluções salinas em óleo, estabilizadas através do uso de emulsificantes, caracterizados por uma fase contínua oleosa, geralmente composta de hidrocarbonetos líquidos. Pequenas gotículas de água ou de solução aquosa constituem a fase descontínua desses fluidos. Alguns sólidos coloidais, de natureza inorgânica e/ou orgânica, podem compor a fase dispersa (Gatlin, 1960, Bourgoyne et al, 1986).



Figura 6. Composição de um fluido a base de óleo (Gatlin, 1960).

Estes fluidos são formulados com diesel, óleo mineral, ou parafinas lineares de baixa toxicidade (refinadas a partir do petróleo bruto). Devido ao alto custo inicial e maior grau de poluição, os fluidos à base de óleo são empregues com menor frequência do que os fluidos à base de água.

Têm como vantagem a mínima contaminação de zonas potencialmente produtivas e foram desenvolvidos para fins especiais, tais como:

- Perfuração de formações que hidratam e colapsam quando em contato com a água, como é o caso de algumas argilas, arenitos e xistos;
- Perfuração de formações com baixa pressão de poros ou de fratura;
- Perfuração de poços de alta pressão e alta temperatura (HPHT), quando outros tipos de sistemas de lamas são ineficientes, oferecendo assim uma boa estabilidade de temperaturas;
- Em outras situações, tais como prevenção de corrosão e trabalho de reparação na produção de poços.

Outras desvantagens deste tipo de fluidos são: dificuldades na detecção de gás no poço devido a sua solubilidade na fase contínua, e dificuldade no combate à perda de circulação. É ainda importante salientar que a descarga de *cuttings* e resíduos de fluidos à base de óleo não é permitida na maior parte das áreas de perfuração *offshore* e por isso devem ser processados e enviados para a costa para eliminação.

Perfuração a ar ou gás é um termo genérico aplicado quando o ar ou o gás são usados como fluido circulante na perfuração rotativa. A perfuração com ar utiliza apenas ar comprimido ou nitrogénio, tendo aplicação limitada a formações que não produzem elevadas quantidades de água, nem contenham hidrocarbonetos, e que sejam estáveis.

Os fluidos à base de gás formam uma névoa ("*mist*") com baixos níveis de água, ou espuma com níveis mais elevados de água e adição de surfactantes ou espumantes. A perfuração com névoa é empregue quando são encontradas formações que produzem água em quantidade suficiente para comprometer a perfuração com ar ou em zonas onde ocorrem perdas de circulação severas. A espuma é uma dispersão de gás em estado líquido, constituída por um filme delgado de uma fase líquida, estabilizada através de um tensoativo específico, um espumante (Gatlin, 1960).

O emprego da espuma como fluido circulante é justificado quando se necessita de uma eficiência elevada de transporte dos *cuttings*, uma vez que este apresenta alta viscosidade.

Os requisitos ambientais têm sido a principal força motriz no desenvolvimento de sistemas de fluidos de perfuração durante os últimos 10 anos e prevê-se que dominem as tendências futuras. A procura e utilização de fluidos à base de sintéticos cresceu rapidamente, devido a necessidade crescente de reduzir o impacto ambiental das operações de perfuração *offshore*, sem sacrificar a relação custo-eficácia dos sistemas de fluidos à base de óleo. Os fluidos à base de sintéticos são semelhantes aos fluidos a base de óleo, com exceção de que a fase contínua é constituída por um fluido biodegradável de baixa toxicidade.

Segundo Gatlin (1960), proporcionam um desempenho de perfuração excecional, facilmente igualado ao dos fluidos à base de óleo e têm provado ser económicos em várias aplicações porque:

- Ajudam a maximizar a taxa de penetração e têm menos tempo improdutivo de lama;
- Aumentam a lubricidade em poços direcionais e horizontais;
- Minimizam os problemas de estabilidade, tais como os problemas causados pelos xistos reativos;
- Possuem alto desempenho da força gel (quebram com a mínima pressão inicial);
- Possuem densidades de circulação equivalente significativamente mais baixas (ECDS);
- Reduzem a perda de fluido durante a perfuração, colocação do revestimento e cimentação. Infelizmente, tendem a ser a opção mais cara, sendo apenas utilizados em situações especiais.

2.5 CARACTERÍSTICAS DOS FUROS

Os furos são geralmente caracterizados por quatro parâmetros:

1. Diâmetro dos furos depende da finalidade do mesmo. Em furos para detonações, há vários fatores que influem na escolha do diâmetro, como o tamanho desejado do material fragmentado; o tipo de

explosivo a ser utilizado, a vibração admissível do terreno durante a detonação etc. Em grandes pedreiras e outras explorações, furos de grande diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por m³ ou tonelada de rocha escavada. Na abertura de túneis as dimensões dos equipamentos de perfuração são determinadas pelo tamanho da seção do túnel. Em trabalhos menores, o diâmetro do furo pode também ser determinado pelo tamanho do equipamento disponível para perfuração, carregamento e transporte.

2. Profundidade dos furos determina a escolha do equipamento de perfuração. Em espaços confinados somente ferramentas de perfuração curtas poderão ser usadas. No caso de maiores profundidades (50 a 70 m ou mais) utiliza-se perfuração de fundo de furo, ao invés de martelo de superfície, já que o método de fundo de furo proporciona mais eficiência de transmissão energética e remoção dos detritos de rocha a essa profundidade. Quando utilizamos martelos DTH a energia é em princípio transmitida da mesma forma com a vantagem de que o pistão da perfuratriz trabalha diretamente sobre a broca.
3. Rectilindade do furo de uma perfuração varia, dependendo do tipo e natureza da rocha, do diâmetro e da profundidade do furo, do método e das condições do equipamento utilizado, da experiência do operador. Na perfuração horizontal ou inclinada, o peso da coluna de perfuração pode concorrer para o desvio do furo. Ao perfurar furos profundos para detonação, o furo deve ser tão reto quanto possível para que os explosivos, sejam distribuídos corretamente, para se obter o resultado desejado. Para compensar o desvio dos furos às vezes é necessário furar com menor espaçamento o que resulta em maior custo. Um problema particular causado por um furo com desvio é a possibilidade de encontrar-se com um outro já perfurado, causando a detonação de cargas por “simpatia”. A uma grande probabilidade do equipamento se prender é grande e a detonação não ser executada adequadamente. O alinhamento pode ser afetado pelo desalinhamento da lança e pelo cuidado durante o emboque do furo.
4. Estabilidade do furo em perfuração é que o furo permaneça aberto enquanto estiver a ser carregado com explosivos. Em certas condições, por exemplo, quando a perfuração é em material solto ou rocha (que tendem a desmoronar e tapar o furo), torna-se essencial estabilizar-se o furo com tubos ou mangueiras de revestimento.

2.6 CICLO DE PERFURAÇÃO

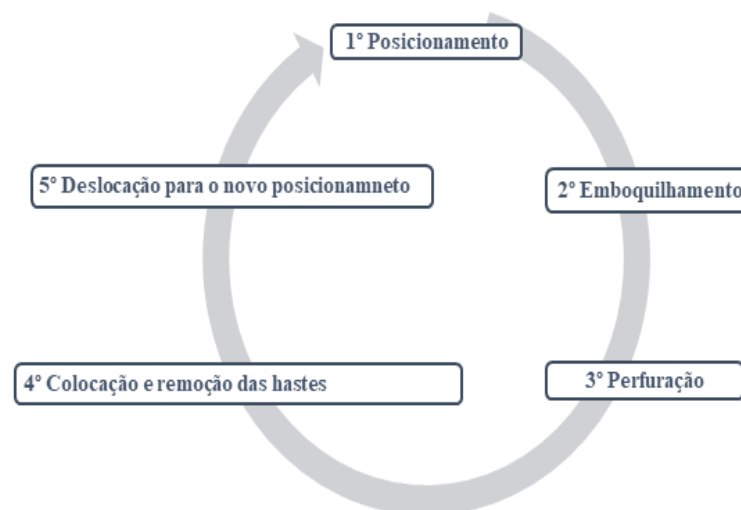


Figura 7. Representação do ciclo de perfuração. Ilustração adotada (Gonçalves T., 2017).

1. Posicionamento da perfuradora consiste na sua colocação no local pretendido tendo em conta a marcação prévia da pega de fogo e respeitando a direção e inclinação estabelecidas para cada furo projetado.
2. Emboquilhamento do *bit* de perfuração, é a colocação do *bit* na extremidade da coluna de perfuração e procede-se ao seu acionamento no local exato para realizar a furação do maciço rochoso que constituirá o terceiro etapa do ciclo de perfuração.
3. Perfuração é a etapa normalmente mais de morosa do ciclo, esta etapa deve ser especialmente controlada, para evitar erros e desvios no final da realização dos furos. Caracteriza-se pela rotação e percussão das ferramentas de furação com o objetivo de desgastar a rocha. Deve ser mantida uma especial atenção na parte inicial da realização do furo, onde existe material muito fragmentado que frequentemente provoca desgaste excessivo do material de perfuração, desvios na condução do *bit*, ou encravamento da coluna de perfuração.
4. Colocação de hastes no topo da coluna de modo a poder atingir a profundidade pretendida.
5. Reposicionamento, no final do ciclo de perfuração, identifica-se como última, mas pode ser considerada a primeira etapa, é necessário deslocar a perfuradora até a nova posição para realização do novo furo.

2.7 ERROS DA PERFURAÇÃO

Durante a perfuração ocorrem desvios da furação, em virtude de diversos fatores:

- O uso inadequado dos equipamentos;
- As condicionantes geológicas do terreno, refletidas especialmente por materiais de diferentes durezas ou outras circunstâncias como existência de fraturas, zonas de cisalhamento e diferentes estratos.

Esses desvios geram problemas, durante a detonação dos explosivos no desmonte, podendo provocar excesso de vibrações no terreno e ultra lançamentos que podem ser perigosos para: operadores, equipamentos e vizinhança da pedreira.

Os principais erros que podem ocorrer durante a perfuração compreendem (Kerber et al., 2007):

1. Desvios do furo para a frente da bancada;
2. Desvio para trás da frente da bancada;
3. Desvio na inclinação ou azimute do furo;
4. Comprimento errado do furo;
5. Perdas de furo.

Os desvios da furação que ocorrem para a frente da bancada podem diminuir sensivelmente o afastamento projetado, o que pode acarretar ultra lançamento. Quando o desvio ocorre para trás da bancada, a tendência é aumentar o afastamento, criando áreas ausentes ao efeito da energia dos explosivos naqueles furos, podendo ocasionar formação de repes (saliências rochosas no pé da bancada), fragmentação inadequada e excesso de vibrações no terreno. Desvios laterais modificam a relação de espaçamento planeado, resultando em problemas na fragmentação do material. Erros na inclinação ou azimute do furo podem levar à perfuração inadequada do comprimento de um furo e modificar as relações de afastamento entre furos projetadas no plano de fogo. Quando ocorre um aumento da subfuração, a tendência é gerar uma maior vibração no terreno devido ao confinamento dos explosivos. Ao contrário, caso o furo não atinja a profundidade pretendida, poderão surgir repes na praça de trabalho.

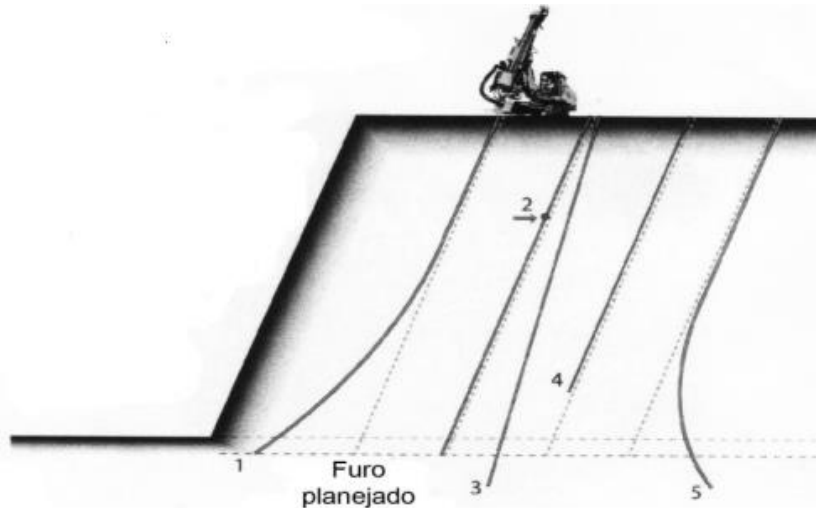


Figura 8. Principais erros das operações de perfuração (Kerber et al., 2007).

É muito comum encontrar furos destinados a desmontes com explosivos com geometria diferente da que foi planejada ao desenhar as pegas de fogo. O processo de perfuração é passível de conter erros, principalmente quando há uma clara componente humana na sua execução. Define-se desvio de perfuração a diferença entre a posição espacial do furo efetuado com relação ao furo projetado.

No estudo de Kangwa & Sinkala (2004), afirma-se que esta anormalidade ao qual o furo é submetido em relação à sua trajetória originalmente prevista, pode ser considerada como um desvio, se for realizada de maneira não intencional. As razões 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 dos *bits*, erros operacionais e até sabotagens (Raposo, 2011).

Segundo Harris, J. E., no artigo Drill Accuracy (1999), 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, mais de 50% do erro da geometria dos furos realizados, quando comparada com a de projeto, é devida à subjetividade e eventual falta de experiência do operador da máquina de perfuração.

A diferença entre a geometria do projeto e a realidade do furo realizado, pode ser classificada em várias tipologias, cada uma com sua própria causa.

Destacam-se as 5 principais causas de imprecisão de furos:

- Erro de posição do emboque (*collar*);
- Erro do ângulo de ataque do furo;
- Erro de curvatura (deflexão) (Sinkala, 1986);
- Erro de comprimento e erros decorrentes de anisotropias de caráter geológico/estrutural do maciço rochoso (características Geomecânica) (Brown, Green & Sinha, 1981).

2.8 ERRO DE DESVIO

É de realçar que a maior parte das medições na engenharia são relativas, verifica-se a variação de uma grandeza física executada, comparando-a com a grandeza teórica ou planejada (Raposo, 2011). O erro define-se como a diferença entre o valor medido e o valor de origem, que por estarem relacionados, são

erros relativos não constantes (adaptado de Tabacniks, 2009). A continuação será usada essa definição de erro como padrão. Conforme afirma Tabacniks (2009), e pelos estudos realizados neste trabalho com os mais variados tipos de equipamentos, as leituras de erros de desvio medidos por equipamentos na 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 adequado. Não há nas várias bibliografias consultadas uma afirmação comum que indique um desvio de furo ideal ou aceitável com relação à sua inclinação ou direção. 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 apontam a um valor consensual. Bulant et al (2007), referem que várias empresas e técnicos da prospeção geofísica costumam adotar a precisão do desvio angular de um poço vertical médio como sendo de $5,0^\circ$. Mas os mesmos autores estimam de maneira conservadora que, para furos profundos de prospeção, os valores de desvio devem estar dentro da faixa de $2,0^\circ$. Williamson (2000) também de forma conservadora considera o valor tolerável de desvio do mesmo tipo de furos na faixa de $0,5^\circ$. Vamos enfatizar 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 os valores ótimos de desvio.

No campo de perfuração de rochas para desmonte com recursos a explosivos, não há muita literatura técnica sobre o assunto. No campo de minas (Silva, 2009), considera que desvios de 50 mm em uma perfuração de 3 m ($0,95^\circ$), podem acarretar resultados ruins. Rosa (2015) apresenta uma descrição, tem muita descrição sobre de furos horizontais, verticais ou inclinados apresentam uma precisão de $\pm 2,0^\circ$, independente de onde o furo é executado. Os estudos que correlacionam os parâmetros do furo e desvios admissíveis foram desenvolvidos por (Quaglio, 2003).

Onde:

- $E (E_1, E_2, E_3)$ = Desvio Admissível (cm)
- H = Profundidade do furo (m)
- $\varnothing$ = Diâmetro do furo (cm)

1. Desvio de Emboque ou Emboquilhamento

$$E_1 = \frac{1}{2} \varnothing \quad \text{Equação 1}$$

2. Desvio de Alinhamento (inclinação e orientação)

$$E_2 = |H| \quad \text{Equação 2}$$

3. Desvio de Deflexão ou de Curvatura

$$E_3 = 0,6H^{3/2} \text{ (furos horizontais)} \quad \text{Equação 3}$$

$$E_3 = 0,2H^{3/2} \text{ (furos verticais ou inclinados até } 1:20) \quad \text{Equação 4}$$

Não se pode estimar categoricamente o desvio de perfuração ideal de forma quantitativa, mas de maneira qualitativa, o desvio ideal é aquele que pode ser previamente identificado com os variados instrumentos de observação 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 de forma programada (Giles & Roller, 2012).

2.8.1 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.

As causas dos desvios de perfuração associadas à posição do embocamento são:

- Erro humano:
 - a) Experiência do operador.
 - b) Levantamento ou comunicação incorreta entre o operador de fogo e o perfurador.
- Topografia do local da perfuração:
 - a) Qualidade do equipamento.
 - b) Configuração inadequada.
 - c) Desgaste do equipamento.
- Configuração da plataforma de perfuração e sua posição.
- Estabilizadores (localização, número e folgas).

2.8.2 ERRO ANGULAR DE INCLINAÇÃO E ORIENTAÇÃO

O desvio relacionado ao ângulo projetado pode ser causado quando a haste não está estabilizada no ângulo correto antes do início da perfuração (Leite, 2013). O desvio no ângulo ocorre quando o furo é iniciado com inclinação diferente da que foi definida no plano de perfuração. Este erro pode ser induzido logo no processo de emboquilhamento.

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 de perfuração e sua posição;
- Erro humano;
- Qualidade ou configuração inadequada do equipamento.

2.8.3 ERRO DE CURVATURA

Este erro consiste na tendência de a 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).

Os principais fatores contribuem para este tipo de erro são:

- Comprimento do furo (quanto mais comprido o furo, maior será o desvio);
- 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;

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*.



Figura 9. Encurvamento da haste quando a broca de perfuração passa de um meio mais brando a um de maior competência. Ilustração do autor adaptado de Hardrockdrills (2018).

2.8.4 ERRO DE COMPRIMENTO

O erro de comprimento consiste em o furo ter sua distância entre o emboquilhamento e o fundo do furo não executada de maneira planejada, de maneira que o furo fica com dimensão díspar da determinada na pega de fogo, seja para mais ou para menos. Segundo Jimeno et al (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, 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 de ser um erro 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 (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 (método Roto percussivo).
- 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).

2.8.5 ERROS DAS CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DA ROCHA

As características geomecânicas do maciço rochoso a ser perfurado têm um impacto significativo na trajetória do furo. A pesquisa de (Brown et al, 1981), sobre a estrutura da rocha como fator único que está fora de controle. O desvio da trajetória é predominantemente uma consequência da interação broca/maciço rochoso. Sendo o único fator que o operador não pode controlar. O desvio começa quando a broca atravessa a transição da rocha (Singh, 1996). A Figura 11 é um exemplo de um furo desviado após atravessar a zona de uma junta de uma rocha, o furo está representado com traços amarelos e a junta é realçada com coloração castanho- avermelhada.



Figura 10. Desvio de furo causado pela transição da rocha (Frank G., 2021).

Quando o furo atravessa a junta, fica quase paralelo a ela. Ao longo da junta, o furo continuou na mesma trajetória, que termina exatamente no fundo de um furo adjacente. O resultado do desvio apresenta cargas exorbitantes localizadas nas bases dos dois furos, que no momento da detonação irão gerar uma

cavidade e uma superfície de talude de bancada negativa, como observado na face inferior, à direita da bancada.

2.9 PROBLEMAS DO DESVIO DE FURO

Muitas operações de desmonte de rochas com o uso de explosivos, têm a necessidade de proteger o ambiente circundante. O desvio do furo pode originar vibrações, ruído, ultras lançamentos e outros problemas que podem ser evitados se houver cautela nos procedimentos e na análise da detonação (Hall et al, 2018).

2.10 MEDIÇÃO DE DESVIO DE FUROS

A medição precisa 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).

Existe uma diversidade de equipamentos que permitem a modelação de perfis de furos, que fornecem informações importantes para os engenheiros responsáveis pela implementação de pegadas de fogo, a fim de evitar problemas de segurança. 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. Pode-se inferir nestas zonas do maciço com o devido redimensionamento das cargas de explosivos, ou recorrer-se ao uso de espaçadores.

Ao fazer um controlo dos furos realizados, é possível minimizar as zonas de segurança e reduzir a movimentação das máquinas antes da detonação, otimizando os deslocamentos de pessoas e equipamentos. De igual modo, ao serem identificados afastamentos críticos de valor exagerado, poderão ser gerados blocos de grande dimensão que necessariamente irão interferir nos processos subsequentes de carga, transporte e transformação.

Existem muitos 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), refere que em algumas explorações são utilizadas lanternas 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 existe o desvio. Esta técnica rudimentar apenas informa que existe um desvio dentro do furo, mas não é possível identificar qual sentido, direção e ângulo de inclinação que o desvio seguiu. O método de observação por espelho é outra forma de examinar os furos ao ar livre, 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 para o 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. A distância entre a corda e a parede, em conjunto com a profundidade do prumo, permitem o cálculo da inclinação através de fórmulas de trigonometria simples.

A grande desvantagem deste método é a dependência de luz e da inclinação solar. Tendo em conta o diâmetro do furo poderá não haver espaço suficiente, para que o prumo fique suspenso livremente, condição necessária para se obter uma medida precisa. Considera-se atualmente que melhores opções são os instrumentos de alta precisão para avaliação de desvios de furos.

2.11 EQUIPAMENTO PARA A MEDIÇÃO DO DESVIO

O desviômetro é um equipamento que engloba um conjunto de acessórios e que foi projetado para ser introduzido no furo após o término da perfuração da zona de interesse, nas áreas da Geomecânica, Geotecnia, sondagens Geológicas, furos e poços de Mineração e por último em construção Civil. O equipamento inclui uma maga de elementos interligados, uma corda e uma sonda, que estão ligados por um conector semipermanente, um mosquetão com sistema de trava de parafuso ligados às extremidades da corda e ao cinto de segurança do operador, ou num local seguro, de forma a evitar a queda do equipamento dentro do furo e garantir a segurança do mesmo durante a colheita de dados (Frank G., 2021).



Figura 11. Representação do equipamento para a medição de desvio.

O desviômetro apresenta características operacionais semelhantes a outros tipos de sondas existentes na área de pesquisa e perfilagem de furos de perfuração. O desviômetro é um equipamento que apresenta resultados de uma única medida, em qualquer direção, realizada no espaço, cuja designação pode ser definida como equipamento para avaliação geométrica de furos, nomeadamente para medição de desvios. Usado nos domínios das Engenharias e no desmonte de rochas, ao ser guiado ao longo de um furo num único sentido, em intervalos predefinidos, permite realizar medidas e determinar a orientação e a inclinação real da geometria de um furo, qualquer que seja sua direção.

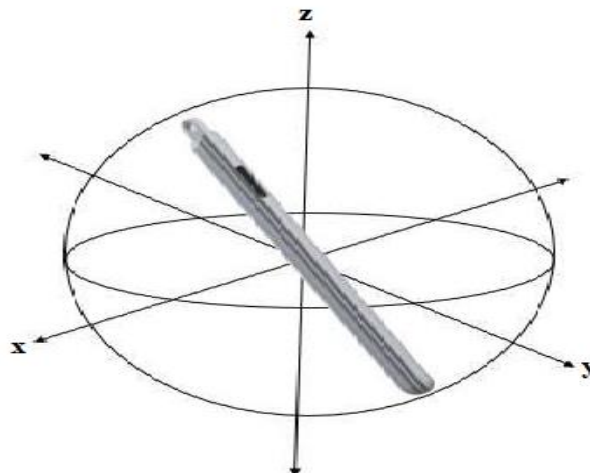


Figura 12. Esquema de orientação absoluta 360° utilizado no desviômetro (Frank G., 2021).

As principais características técnicas e o método de desenvolvimento fazem com que o desviômetro seja um equipamento inovador; abaixo estão mencionados alguns detalhes sobre o equipamento de estudo:

- O equipamento dispõe de um conjunto de sensores (magnetômetro, acelerômetro e giroscópio) que compõem o núcleo do equipamento. Estes foram projetados para medir ângulos, inclinações e azimute em todas as direções (orientação absoluta a 360°);
- Transmissão de dados por Bluetooth 4.2 que facilita a conexão e ativação dos comandos e a transmissão dos dados obtidos;
- Ligação direta com o aplicativo que permite a transmissão sem fios dos dados obtidos para as nuvens, e-mail ou redes sociais, possibilitando o acesso imediato dos resultados em qualquer lugar do mundo ao Engenheiro de mineração responsável pela supervisão do projeto;
- Indicador *LED* 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*, compatível para ficha residencial e para viaturas, 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;
- Aplicativo desenvolvido para controlar e gerir a sonda, receber e editar projetos *online* ou *offline*, armazenar ou partilhar as informações recebidas pela sonda;
- Uso de corda como meio de suporte/tração da sonda, com prático sistema de cores e números para visualização do comprimento da cordada.



Figura 13. Representação da corda com marcos visuais de profundidade e meio tração usada no desviômetro (Frank G., 2021).

É usada uma corda com marcas visuais de profundidade, como meio de tração para guiar o desviômetro dentro do furo de pesquisa, também para facilitar a colheita dos resultados ao longo do furo, a segurança do equipamento, a segurança do operador, e remover a sonda após a conclusão do trabalho.

O perfil geométrico do furo é descrito como a trajetória de um ponto material (o circuito de sensores) suportado por um segmento de reta (o invólucro físico da sonda). Com alguma simplificação pode dizer-se que a sonda materializa a reta tangente à trajetória no ponto de medição. Assim a atitude espacial da sonda permite-nos conhecer a primeira derivada da trajetória. Uma integração numérica de primeira ordem, em rigor um método de Euler, faz então a reconstituição da trajetória, sendo o ponto inicial a boca do furo ou o fundo de furo e o passo de integração, aproximadamente constante, a distância entre duas medições consecutivas. Note-se que o comprimento da cordada é medido segundo a hipotenusa, quando deveria ser medido segundo o cateto adjacente. Isso faz com que o passo de integração varie com a atitude, e dificulte a compatibilização dos diferentes perfis.

A trajetória, e consequentemente, o perfil geométrico, é reconstituído por uma sucessão de pontos no espaço a três dimensões, conectados por segmentos de reta, na forma de uma linha quebrada. Optou-se por não fazer qualquer tentativa de ajuste por uma função de maior complexidade. Assim, para poder comparar perfis, decidiu-se fazer o cálculo de pontos a cotas semelhantes (de meio em meio metro) por meio de interpolações lineares entre os pontos conhecidos.

De acordo com (Frank G., 2021), (Miranda et al, 2018), o desviómetro possui o sensor BNO055 onde estão inseridos os sensores do acelerómetro, giroscópio e geomagnético, mas só os dois últimos são utilizados, para medir ângulos, orientações, inclinações e azimute em todas as direções.

RESUMO DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo fez-se uma descrição da perfuração que é o primeiro passo para sondagem de um furo de pesquisa, mencionaram-se alguns equipamentos utilizados na operação de perfuração. Para além dos métodos de perfuração descritos neste capítulo também se descreveu a utilização das colunas de perfuração, os tipos de brocas usadas em perfuração, e a parte que trona qualquer processo de perfuração seguro e viável os fluidos de perfuração utilizados para evitar o desgaste da broca, o avanço e limpeza do furo. Sobre as características que um furo deve apresentar, o ciclo usado para tornar uma operação de perfuração bem-sucedida, para qualquer processo de produção acontece sempre um erro e no processo de furação de um furo também acontecem erros, por causa de alguns desvios durante a operação que são fatores importantes que devemos ter em conta para a produção de um furo de pesquisa. No final deste capítulo fez-se uma descrição do equipamento capaz de medir desvios de perfuração o desviómetro ou simplesmente DEV.

3.0 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E ENSAIOS

3.1 MONTAGEM DA INSTALAÇÃO DE TESTE

Para a realização dos testes de laboratório foi necessário a construção de uma instalação de teste para o desenvolvimento do trabalho, consistindo de um simulacro realista de um furo de produção de pedreira.

Esse simulacro deveria respeitar um conjunto de especificações:

1. Ser subvertical;
2. Com diâmetro próximo dos diâmetros correntes de perfuração e que comportasse o desviómetro, entre 70 mm e 150 mm;
3. Com comprimento na ordem dos furos comuns de produção em pedreiras, 10 m a 20 m;
4. Com acesso fácil à boca do furo, para poder fazer os lançamentos do desviómetro;
5. Com acesso a todo o comprimento do furo, para poder fazer alterações à sua configuração geométrica;
6. Possibilidade de variações de direção e inclinação, permitindo definir uma trajetória descendente, subvertical, mas com variações de atitude segundo as três componentes;
7. Transparente às ondas rádio usadas na comunicação a curta distância, como o Bluetooth e outros protocolos semelhantes;
8. Montagem estável e com alguma rigidez estrutural, para garantir reprodutibilidade;
9. Protegido de ações de vandalismo ou acesso indevido.

Para o local de instalação foram consideradas várias hipóteses, desde a montagem de um andaime autónomo com um “poço” interior, montagem de um andaime arrimado à parede de uma nave industrial com grande pé-direito, estrutura suspensa num vão interior.

Escolhemos fazer a instalação de testes nas escadas traseiras do Departamento de Engenharia de Minas, que nos permitiu

- Um comprimento de furo de cerca de 19 m;
- Possibilitar a mudança de direção do tubo e aumentar assim a semelhança com um furo real de perfuração;
- Estabilizar o tubo por fixação com braçadeiras ao corrimão, evitando a sua deformação por ação humana ou pela passagem do desviómetro. Para deixar o tubo de plástico estável na zona de teste recorreu-se de abraçadeiras para segurar o mesmo no corrimão das escadas e a uma fita métrica para saber exatamente o comprimento do tubo. As abraçadeiras também ajudaram para não mudar de atitude do tubo e do equipamento à medida que os testes foram realizados.

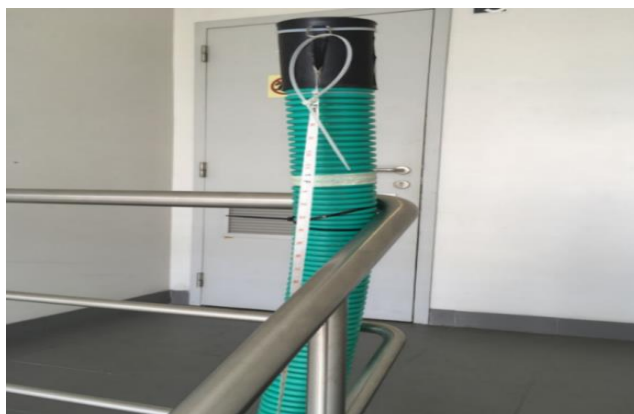


Figura 14. Representação da instalação de teste no Departamento Engenharia de Minas (FEUP).

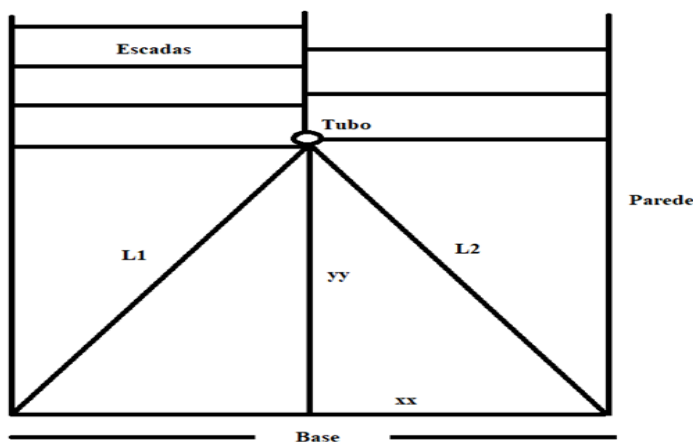


Figura 15. Representação da instalação de teste na vista de cima.

3.1 CÁLCULO DAS COORDENADAS DO FURO DE PESQUISA

Na primeira fase para os cálculos das coordenadas do furo de pesquisa, com a ajuda do meu orientador fizemos as medições das distâncias desde o último piso ate o piso 0, para a obtenção dos valores de base b , $L1$ e $L2$ usando como referência as paredes do edifício. Utilizou se o teorema de Pitágoras que traduz a relação matemática entres os lados de um triângulo retângulo.

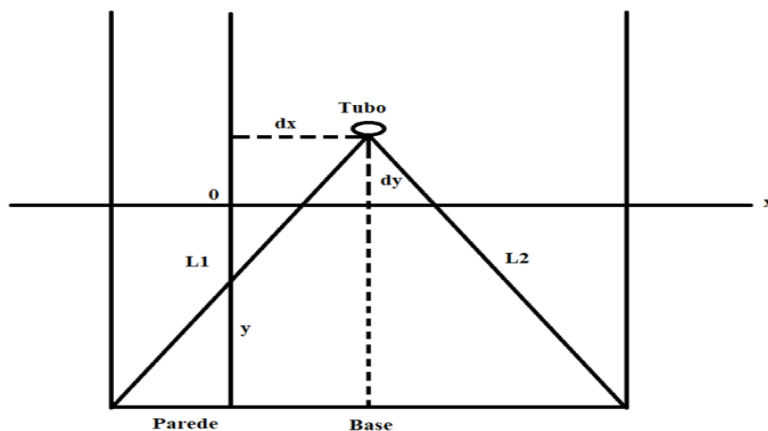


Figura 16. Sistema de coordenadas adotado para o desvio do tubo.

A base b é constante ao longo da caixa de escada e vale 2,46 m. As laterais L1 e L2 foram medidas com uma fita métrica. Em alguns pontos não foi possível usar está configuração de medidas, mas procedeu-se de modo semelhante. O sistema de coordenadas adotado foi desenhado na Figura 17, com a origem (0) coincidente com a boca do tubo.

Para implementar os pontos notáveis do tubo, foi calculada a altura de cada triângulo, usado como coordenadas YY ao referencial da parede, e coordenadas XX a distância a parede foi obtida calculando a base do triângulo do lado direito.

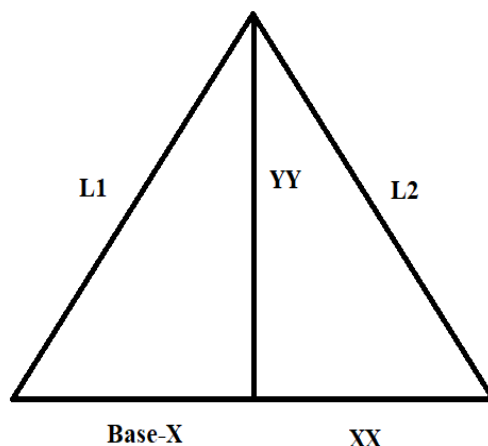


Figura 17. Representação do sistema adotado para o cálculo das coordenadas do tubo.

Formulas utilizadas para o cálculo das coordenadas:

$$y^2+x^2=d^2$$

Equação 5

$$A = \frac{x*y}{2}$$

Equação 6

$$P = x + y + z$$

Equação 7

$$AH = (S*(S-L1)*(S-L2)*(S-Base))^{1/2}$$

Equação 8

Onde;

- P é o perímetro do triângulo;
- S é a metade do perímetro;
- XX é coordenada de x axiais;
- YY é coordenada de y axiais;
- L1 e L2 são as coordenadas de z axiais;
- AH é a área do triângulo calculada através da fórmula de Herão;
- A é a área do triângulo.

Tabela 2. Cálculos das coordenadas do furo de pesquisa assumindo que a base é igual a base do triângulo.

Cota	L1	L2	Base	Y ² +X ²	XX	YY	A	P	S	AH
0	1,96	1,91	2,46	3,64	1,19	1,49	1,83	6,33	3,16	1,83
3	2,57	2,57	2,46	6,60	1,23	2,25	2,77	7,6	3,8	2,77
6	3,64	3,7	2,46	13,69	1,319	3,45	4,25	9,8	4,9	4,25
10	3,24	3,26	2,46	10,62	1,25	3,00	3,70	8,96	4,48	3,70
14	4,4	4,43	2,46	19,62	1,283	4,23	5,21	11,29	5,64	5,21
18	3,08	3,12	2,46	9,73	1,280	2,84	3,49	8,66	4,33	3,49

Tabela 3. Determinação do perfil de referência para o furo dos pontos interpolados com modificação de passos.

Resultados dos pontos interpolados			
Perfil modular do Tubo			
ZZ	YY	XX	Módulo (xOy)
0	0	0	0
0,5	0	0	0
1	0	0,019	0,019
1,5	0	0,019	0,019
2	0	0,207	0,207
2,5	0	0,207	0,207
3	0	0,46	0,46
3,5	0	0,46	0,46
4	0	0,67	0,67
4,5	0	0,67	0,67
5	0	1,23	1,23
5,5	0	1,23	1,23
6	0	1,6	1,6
6,5	0	1,6	1,6
7	0	1,74	1,74
7,5	0	1,74	1,74
8	0	1,7	1,7
8,5	0	1,7	1,7
9	0	1,6	1,6
9,5	0	1,6	1,6
10	0	1,36	1,36
10,5	0	1,36	1,36
11	0	1,13	1,13
11,5	0	1,13	1,13
12	0	0,91	0,91
12,5	0	0,91	0,91
13	0	0,9	0,9
13,5	0	0,9	0,9
14	0	0,88	0,88
14,5	0	0,88	0,88
15	0	0,84	0,84
15,5	0	0,84	0,84
16	0	0,92	0,92
16,5	0	0,92	0,92
17	0	1,3	1,3
17,5	0	1,3	1,3
18	0	1,39	1,39
18,5	0	1,39	1,39

A montagem do tubo sugeriu-nos, no entanto, um modelo simplificado para o furo, entendido como suportado por um plano vertical definido pelo vão da escada. A sua descrição foi assim simplificada, consistindo apenas na medição da distância horizontal à vertical da boca, materializada por um fio de prumo.

O resultado dessa medição está na tabela que se segue, e é o que foi utilizado na discussão dos resultados.

Tabela 4. Resultados da medição da distância horizontal à vertical da boca do furo.

z	Afastamento do tubo	Angulo do tubo
0	0	0
1	0,019	88,9
2	0,207	79,2
3	0,46	71,5
4	0,67	72,2
5	1,23	72,4
6	1,6	61,7
7	1,74	56,5
8	1,7	83,6
9	1,6	87,5
10	1,36	79,5
11	1,13	78,4
12	0,91	76,5
13	0,9	85,4
14	0,88	88,8
15	0,84	85,6
16	0,92	88,7
17	1,3	72,6
18	1,39	81,7
19	1,5	89

A Figura 18 representa os perfis do furo quando a mudança de passo de 0,5 e quando não a mudança do passo. Como podemos observar similaridades em ambas figuras pode concluir-se que a mudança do passo não alterou muito os resultados do perfil original do furo.

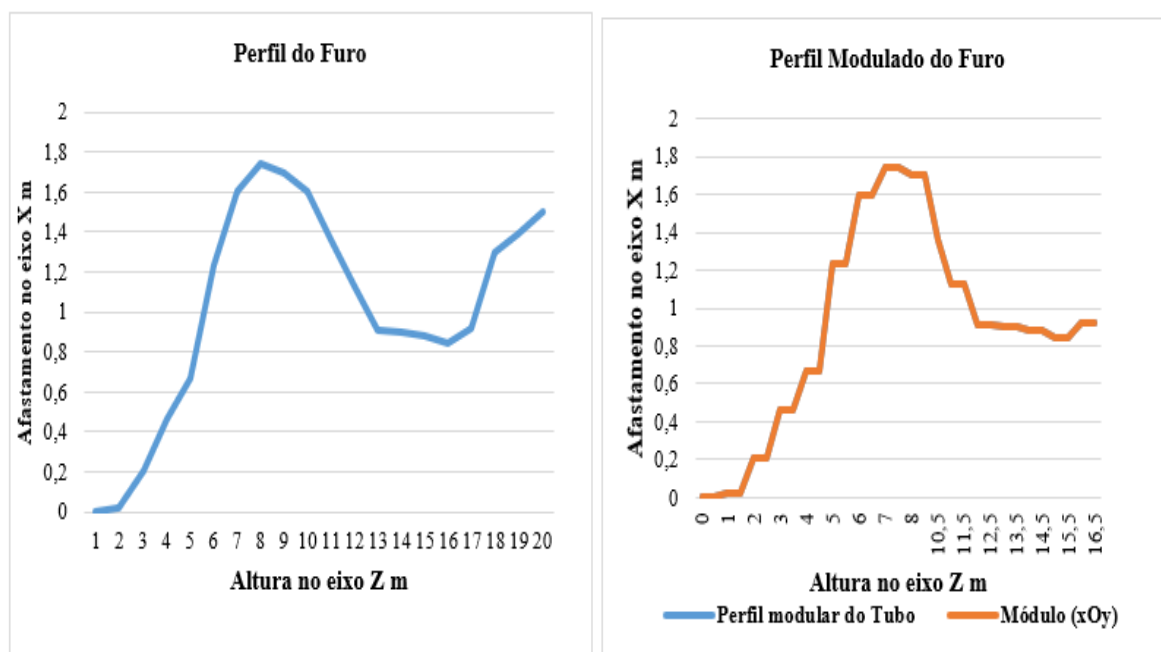


Figura 18. Representação do perfil modular e do perfil real do furo.

3.2 RECOLHA DE DADOS NA INSTALAÇÃO DA TESE

A perfilagem geométrica consiste na obtenção de um conjunto de pontos num espaço tridimensional orientado, suficientes para descrever a geometria do furo de forma adequada. Entre os pontos medidos supõe-se que o furo tem um comportamento retilíneo. O furo é assim descrito como uma linha quebrada de segmentos retilíneos, num espaço tridimensional. O furo pode ser representado por uma função suavizada, ajustada aos pontos conhecidos. O número de pontos medidos condiciona o rigor da descrição, mas é limitado pela qualidade do furo. Lembremo-nos que, sobretudo os furos de produção em mina são concebidos como segmentos de reta, pelo que dois pontos seriam suficientes.

As coordenadas dos pontos do perfil são definidas e obtidas da seguinte forma:

- A origem das coordenadas é a boca do furo;
- O eixo ZZ usa a vertical do lugar, com a direção positiva “para baixo”;
- A cota (coordenada ZZ) é obtida a partir do comprimento acumulado das “cordadas”, o comprimento da corda lançada no furo entre duas medições; este comprimento corresponde à hipotenusa do triângulo retângulo em que a coordenada ZZ é o cateto oposto, na designação tradicional destes;
- As coordenadas xx e yy, medidas no plano horizontal, usam como referência o norte magnético, dado pelo sensor de campo magnético; São obtidas utilizando o sensor de atitude, partindo do princípio que a atitude do sensor (medida com o sensor de atitude) não muda durante uma cordada.

Para recolha de dados na instalação de teste se utilizou-se a sonda desviómetro. Esta técnica de obtenção do perfil geométrico do furo de pesquisa consiste na descida e subida da sonda, através de uma corda com marcadores visuais de profundidade é feito o sentido ascendente e descendente do equipamento, uma tração de segurança é utilizada para garantir a segurança do equipamento e do operador.

Os métodos recomendados para a perfilagem do furo de pesquisa são:

- Método *Downhole* (descendente ou em descida): definido como a medição descendente do equipamento ao longo do furo de pesquisa usando um intervalo de medida desejado (normalmente 0,5, 1, 2 e 3m), para obter o perfil geométrico; a corda com marcos visuais é parada a cada intervalo definido, sendo feita a recolha das coordenadas, azimuth e inclinação do furo; depois deste registo, a corda é descida novamente até ao próximo ponto de recolha; este procedimento é repetido até a sonda atingir o fundo do furo.
- Método *Uphole* (ascendente ou em subida): é o procedimento inverso do método *Downhole*, é definido como ascensão do equipamento no fundo do furo de pesquisa usando um intervalo de medida desejado (0,5, 1, 2 e 3m), para obter o perfil geométrico; a corda com marcos visuais é parada no intervalo definido, onde é feita a recolha das coordenadas, azimuth e inclinação do furo; depois de feito este registo, a corda é puxada novamente até ao próximo ponto; este procedimento para obtenção de resultados é repetido até a sonda chegar ao topo do furo.

Os dois sentidos podem ser utilizados para se fazer as medições e descrever o desvio do furo, de *Downhole*-descendente ou *Uphole*-ascendente, ambas técnicas de perfilagem geométrica podem ser utilizadas pelo operador e apresentam vantagens e desvantagens. Como a sonda é operada de forma manual e desce através de uma corda com marcas visuais, no método descendente regista-se menos tempo de descida, comparado com o método ascendente onde a sonda deve ser calibrada para obter os resultados antes de chegar no fundo do furo. Comparando a estabilidade e precisão de leituras ambos métodos apresentam quase os mesmos resultados.

3.2.1 EXEMPLOS DE OPERAÇÃO

Nestes exemplos de operação foram feitas colheitas de medições em descida e em subida, usando vários intervalos de medição, e com os cuidados operatórios usuais.

Os resultados são apresentados na forma gráfica, com duas vistas do perfil do furo, uma de frente, em que o eixo horizontal do gráfico coincide com a direção YY do sistema de coordenadas e outra de lado em que esse eixo coincide com a direção XX. Em ambas o eixo vertical coincide com a direção ZZ. A quadrícula é métrica. Os traços pretos materializam os eixos correspondentes do sistema de coordenadas e o seu cruzamento a origem. A linha tracejada a azul é furo planejado. A linha vermelha é a representação do furo real, sendo os pontos os locais de medição. Já nas figuras temos a vista de lado que é a representação gráfica do furo no plano horizontal e a vista de trás que é a representação gráfica do furo no plano vertical.

As medições são também apresentadas na forma de tabela, que para cada medição são apresentados os valores da atitude e as coordenadas que indicam variações entre as medidas real e planejadas.

Onde:

- ΔX é o último ponto real do furo que corresponde a linha vermelha;
- ΔY é o último ponto do furo programado que corresponde a linha azul.
- ΔZ é a distância atual da inclinação/desvio entre o projetado e o real de cada ponto de medição.
- Ângulo é a interseção do ΔZ e ΔX medido em graus;
- Azimute é a medida de direção horizontal em graus.

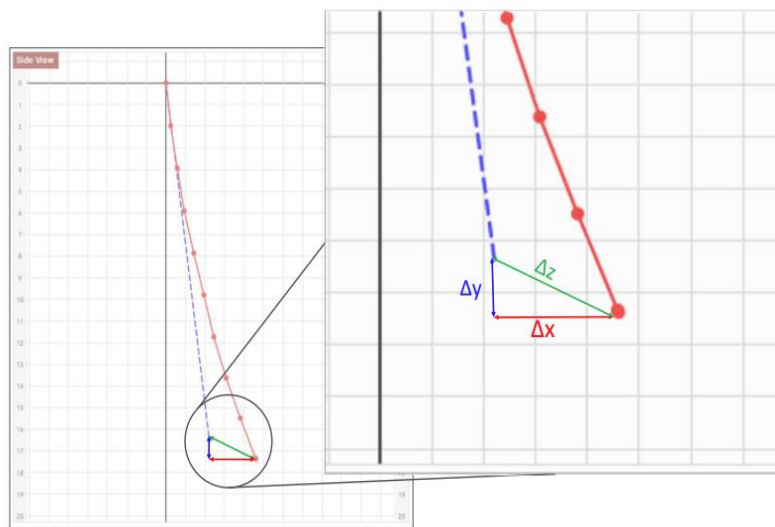


Figura 19. Representação do cálculo da distância do desviômetro (Ilustração adotada no cálculo da condição dos relatórios O-pitBlast).

3.2.2 MEDIÇÕES EM DESCIDA OU DOWNHOLE NOS INTERVALOS DE 1, 2 E 3m

Um primeiro conjunto de ensaios explorou a densidade de amostragem, fazendo sucessivas medições do furo cumprindo os protocolos e sendo rigoroso na escolha da posição das marcas de corda. Foram testadas medições de 1, 2 e 3 metros, quer em descida quer em subida.

3.2.2 MEDIÇÕES EM DESCIDA OU DOWNHOLE NOS INTERVALOS DE 1, 2 E 3m

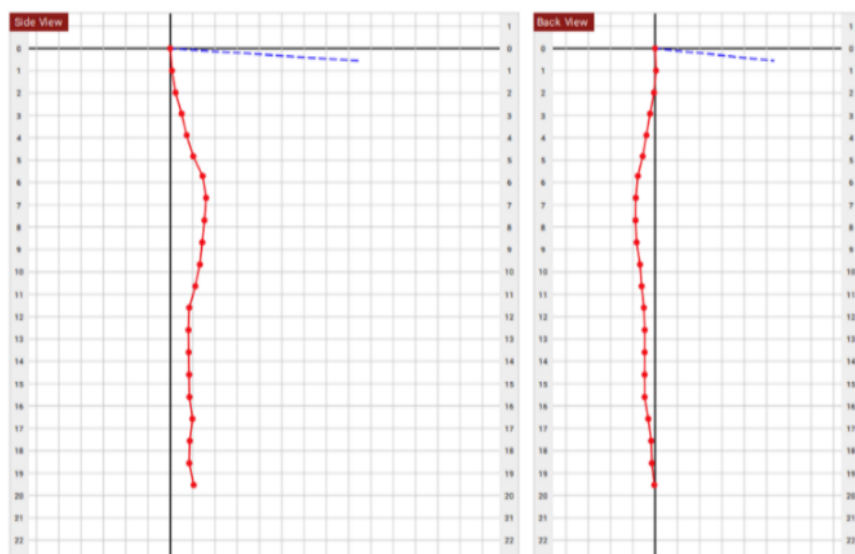


Figura 20. Perfil obtido a 1m de passo com o método Downhole, com media de azimute de 338,1°, media angular de 10,1°, uma diferença de desvio de 21,1m.

Tabela 5. Resultados obtidos a 1m de passo com o método Downhole.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	4,81	336,91	-0,03288	0,077134	-0,99648
2	10,78	280,37	-0,21687	0,110802	-1,97883
3	18,81	275,19	-0,53798	0,139969	-2,92542
4	16,34	272,34	-0,81908	0,151456	-3,88503
5	19,62	278,88	-1,15083	0,203289	-4,82697
6	28,42	281,09	-1,61788	0,294834	-5,70646
7	10,29	278,25	-1,79466	0,320466	-6,69037
8	4,38	137,63	-1,74319	0,264043	-7,68745
9	6,21	103,14	-1,63785	0,239452	-8,68158
10	10,73	73,08	-1,45973	0,293637	-9,6641
11	12,46	108,48	-1,2551	0,225248	-10,6405
12	16,95	108,65	-0,97887	0,132018	-11,5971
13	2,95	75,12	-0,92913	0,145234	-12,5958
14	0,7	284,08	-0,94098	0,148206	-13,5957
15	1,04	304,64	-0,95591	0,158523	-14,5955
16	0,66	313,81	-0,96423	0,166497	-15,5955
17	12,32	359,02	-0,96788	0,379837	-16,5724
18	10,1	82,15	-0,79415	0,403789	-17,557
19	2,05	74,56	-0,75967	0,413312	-18,5563
20	13,11	338,23	-0,8438	0,623957	-19,5302

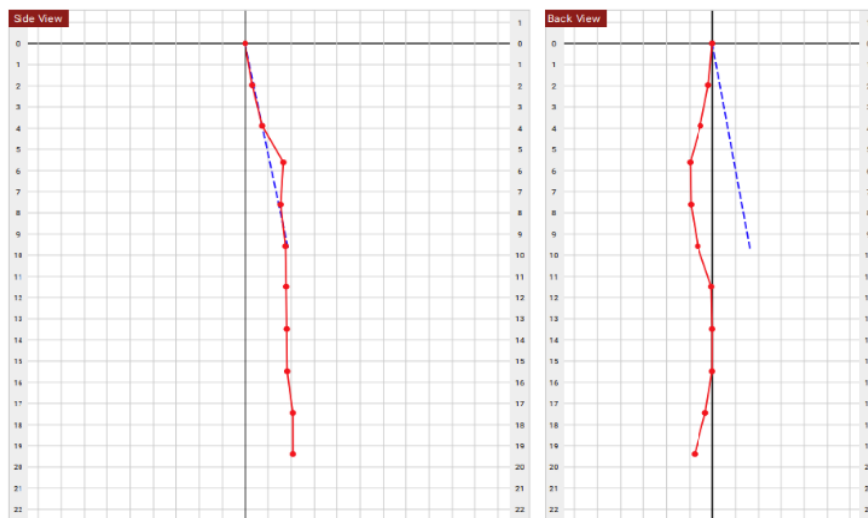


Figura 21. Perfil obtido a 2m de passo com o método Downhole, com media de azimuth de 50,56°, media angular de 11,53°, e uma diferença de desvio de 9,99m.

Tabela 6. Resultados obtidos a 2m de passo com o método Downhole.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	10,5	29,11	0,177311	0,318434	-1,96651
2	16,08	19,1	0,358576	0,841896	-3,88826
3	30,49	31,89	0,894672	1,703506	-5,6117
4	3,51	221,47	0,813585	1,611757	-7,60795
5	10,51	113,29	1,148673	1,467515	-9,57439
6	17,42	145,62	1,486773	0,973362	-11,4827
7	1,37	114,98	1,530117	0,953169	-13,4821
8	0,53	47,09	1,543667	0,965765	-15,482
9	11,19	7,25	1,592649	1,350788	-17,444
10	13,66	328,41	1,34523	1,753118	-19,3874

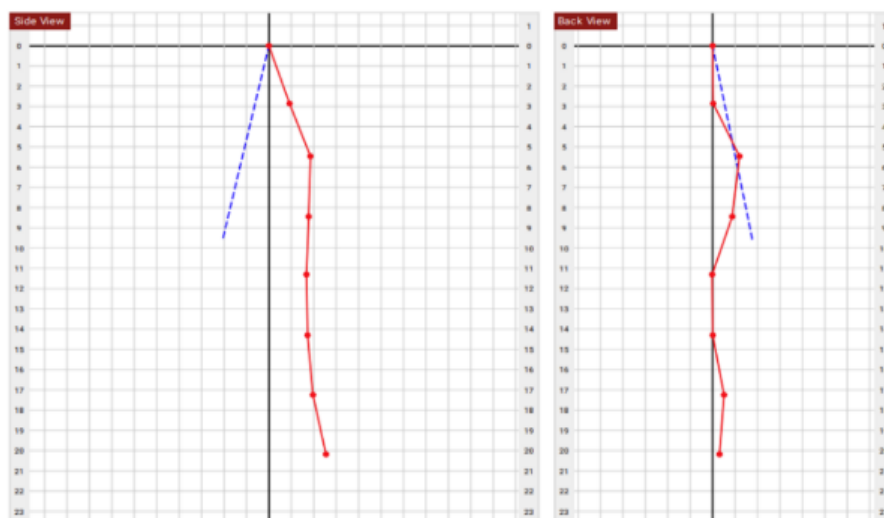


Figura 22. Perfil obtido a 3m de passo com o método Downhole, com media de azimuth de 351,47°, media angular de 13,59°, uma diferença de desvio de 11,62m.

Tabela 7. Resultados obtidos a 3m de passo com o método Downhole.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	17,89	354,96	-0,08096	0,918008	-2,85494
2	29,86	44,79	0,971329	1,978041	-5,45668
3	6,34	249,64	0,660741	1,862781	-8,43833
4	17,44	257,01	-0,21537	1,660676	-11,3004
5	1,05	21,15	-0,19554	1,711947	-14,2999
6	10,7	57,6	0,274755	2,010403	-17,2478
7	11,85	334,21	0,006728	2,565091	-20,1838

3.2.3 MEDIÇÕES DE SUBIDA OU UPHOLE NOS INTERVALOS DE 1, 2 E 3m



Figura 23. Perfil obtido a 1m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 2,8°, media angular de 10,2°, uma diferença de desvio de 27,9m.

Tabela 8. Resultados obtidos a 1m de passo com o método Uphole.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,18	269,59	-0,09028	-6,46E-04	-0,99592
2	11,72	238,89	-0,2642	-0,1056	-1,97507
3	19	73,53	0,048012	-0,0133	-2,92059
4	14,26	63,83	0,269084	0,095341	-3,88977
5	18,62	67,48	0,564027	0,217631	-4,83743
6	27,87	70,68	1,005169	0,372289	-5,72144
7	8,65	57,03	1,131347	0,454136	-6,71007
8	3,63	327,83	1,097637	0,507729	-7,70806
9	5,51	275,82	1,002112	0,517465	-8,70344
10	10,36	230,93	0,862494	0,404122	-9,68714
11	12,64	259,44	0,647376	0,364019	-10,6629
12	16,34	253,49	0,377639	0,284069	-11,6225
13	4,66	177,83	0,380715	0,202884	-12,6192
14	1,13	172,41	0,38332	0,183336	-13,619
15	0,63	96,7	0,39424	0,182053	-14,619
16	1,49	339,69	0,385214	0,206439	-15,6186
17	13,03	20,42	0,463878	0,417732	-16,5929
18	9,01	68,25	0,609336	0,475764	-17,5805
19	10,04	333,77	0,532284	0,632148	-18,5652

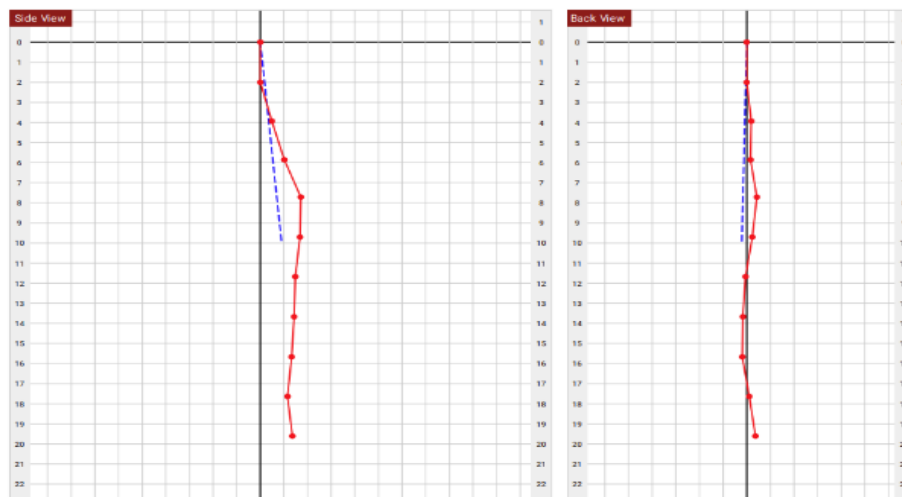


Figura 24. Perfil obtido a 2m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 245,82°, media angular de 9,44°, uma diferença de desvio de 9,68m.

Tabela 9. Resultados obtidos a 2m de passo com o método Uphole.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	0	0	0	0	-2
2	15,22	304,26	-0,43395	0,295578	-3,92985
3	15,31	279,33	-0,95505	0,381191	-5,85887
4	22	303,76	-1,57792	0,79754	-7,71324
5	5,58	182,8	-1,58742	0,603301	-9,70376
6	10,1	158,08	-1,45649	0,277924	-11,6728
7	3,56	168,41	-1,43154	0,156268	-13,6689
8	3,05	115,4	-1,33541	0,110623	-15,6661
9	9,88	43,72	-1,09823	0,358641	-17,6364
10	9,67	334,45	-1,24313	0,661736	-19,608

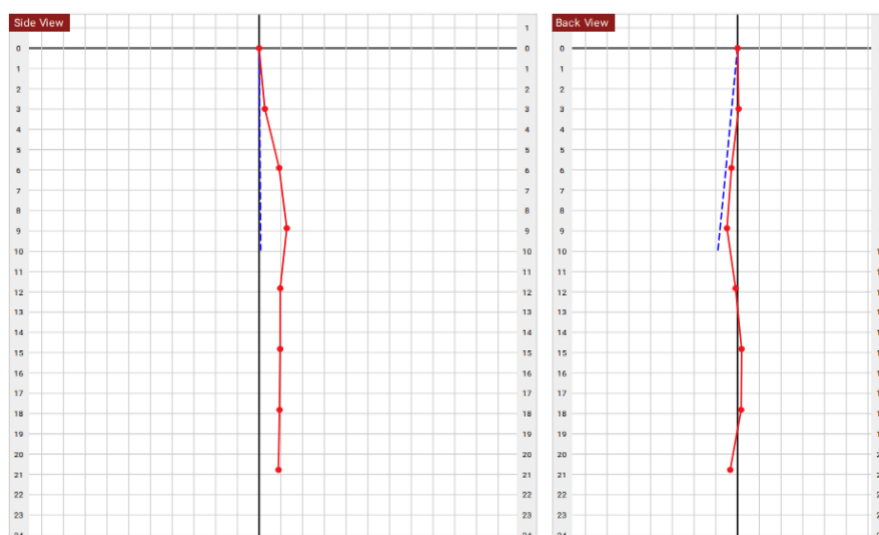


Figura 25. Perfil obtido a 3m de passo com o método Uphole, com media de azimuth de 23,54°, media angular de 7,47°, uma diferença de desvio de 10,86m.

Tabela 10. Resultados obtidos a 3m de passo com o método Uphole.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,13	59,41	0,230916	0,136509	-2,98798
2	14,24	22,24	0,510221	0,819562	-5,89581
3	7,78	17,71	0,633759	1,206425	-8,86819
4	9,57	175,55	0,672457	0,709172	-11,8264
5	5,24	139,81	0,849266	0,499873	-14,8139
6	0,66	265,91	0,814797	0,497409	-17,8137
7	9,66	313,2	0,447831	0,842012	-20,7712

A recolha de dados na instalação de teste foi feita com sonda desviómetro, adotando os métodos proposto, realizaram-se algumas colheitas experimentais na zona de teste para evitar erros durante os testes de laboratório, posteriormente efetuou-se a recolha de dados com bastante precisão e rigor.

3.4 ESTUDO E DESCRIÇÃO DOS ERROS DO APARELHO

Os resultados obtidos pelo desviómetro no ato de colheita de dados no fundo do furo não podem ser aceites como uma verdade absoluta para a perfilagem do furo de pesquisa em estudo, visto que durante a medição existem imperfeições que dão origem a erros no resultado das medições.

Esses erros podem essencialmente ser devidos a:

1. Imperfeições no sistema de medição
 - a. Ao nível da precisão (resolução, exatidão e repetibilidade) dos sensores;
 - b. Alinhamento entre o invólucro e os sensores;
 - c. Calibração dos sensores, sobretudo do sensor de campo magnético,
 - d. Estabilidade física da corda de suspensão e medição, e rigor do seu sistema de marcação.
2. Erros de operação
 - a. Rigor no cumprimento do protocolo de medição;
 - b. Incorreções no posicionamento das marcas de cordada;
 - c. Enganos de registo;
 - d. Instabilidade no momento da medição;
 - e. Não paralelismo da sonda com o eixo do furo (por encravamento ou obstrução deste).
3. Erros de amostragem, associados quer à insuficiência desta quer à maneira como os valores são obtidos, pelo que poderão ser considerados quer como erros de operação quer como da própria medição.
4. Influência das condições de contexto, sobretudo associados ao tipo de rocha, ao campo magnético e à inundação do furo.

No prosseguimento do objetivo do presente trabalho verifica-se a impossibilidade de atuar ao nível dos erros 1 e 4 dada a incapacidade de avaliar ou calibrar o próprio sistema de medição e de modificar o contexto. Assim todo o trabalho se desenvolveu no sentido de avaliar a possibilidade e as consequências dos erros de operação e amostragem.

Segundo o vocabulário internacional de metrologia (VIM, 2012), o erro de medição é definido como a diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência e tradicionalmente o erro possui

duas componentes, a componente aleatória e a componente sistemática. O erro é parte integral de uma medição e a partir disso deve-se sempre tentar buscar quais são as fontes que propiciam o erro e como essas contribuições podem ser reduzidas. Uma forma de conhecer o erro que o instrumento de medição apresenta é através da chamada calibração. A calibração compara os resultados apresentados pelo instrumento de medição com um padrão de referência. A diferença entre essas duas medidas é declarada em um certificado de calibração assim como a incerteza de medição associada.

Foi definido um programa de ensaios para estudar em primeiro lugar as consequências da densidade de amostragem que pode ser associada à resolução do procedimento, em seguida o rigor de operação que pode ser associada à exatidão, finalmente à coerência da medição, associada à repetibilidade.

3.4.1 INTRODUÇÃO DO ERRO DE AMOSTRAGEM

Nesta fase de recolha de dados adaptou-se em acrescentar alguns erros durante a fase de recolha de dados, para ambos métodos, na primeira fase as medições foram feitas com 0,5cm na descida do desviómetro, menos de 1, 2 e 3m de corda, na segunda fase os resultados foram recolhidos com mais de 1, 2 e 3m de corda para ambos métodos de medição.

3.4.2 INTERVALO DE MEDIÇÃO DE MENOS DE 1, 2 E 3m NO MÉTODO DOWNHOLE

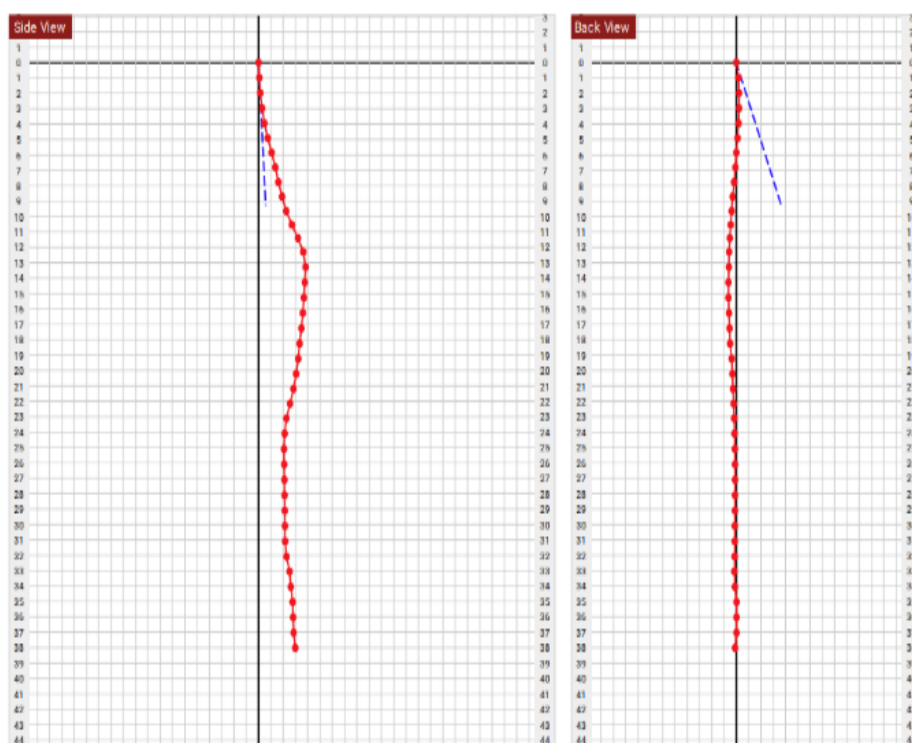


Figura 26. Medição feita com 0,50cm de intervalo de medição, com media de azimuth de 34,3°, media angular de 10,4°, e uma diferença de desvio de 29,1m.

Tabela 11. Resultados obtidos com 0,50cm de intervalo de medição.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	10,82	98,63	0,185599	-0,02817	-0,98222
2	4,96	61,14	0,261321	0,013563	-1,97848
3	9,17	28,24	0,336727	0,153959	-2,9657
4	10,85	16,87	0,391354	0,334097	-3,94782
5	16,3	11,03	0,445052	0,609579	-4,90763
6	19,48	11,09	0,509196	0,936829	-5,85038
7	17,65	14,41	0,584651	1,230492	-6,80331
8	16,07	5,56	0,61147	1,506001	-7,76423
9	18,69	7,12	0,651189	1,823978	-8,7115
10	20,46	14,96	0,741425	2,161684	-9,64842
11	27,73	19,32	0,895368	2,600786	-10,5336
12	29,72	19,49	1,060775	3,06814	-11,402
13	26,28	21,57	1,22355	3,479892	-12,2987
14	10,59	23,09	1,295624	3,648949	-13,2816
15	4,25	236,53	1,233805	3,608078	-14,2789
16	3,93	208,19	1,201428	3,54767	-15,2765
17	5,73	182,9	1,196376	3,447957	-16,2715
18	7,16	188,47	1,178018	3,324676	-17,2637
19	8,73	190,82	1,149525	3,175596	-18,2522
20	10,15	158,2	1,21497	3,011973	-19,2365
21	10,18	190,35	1,183216	2,838107	-20,2208
22	12,83	196,2	1,121264	2,624866	-21,1958
23	16,45	199,05	1,028836	2,357195	-22,1549
24	17,44	199,44	0,929088	2,074575	-23,1089
25	8,38	197,27	0,885822	1,935407	-24,0982
26	3,69	177,75	0,888349	1,871099	-25,0961
27	1,17	64,22	0,906736	1,879979	-26,0959
28	0,98	28,58	0,914917	1,894999	-27,0958
29	0,83	20,94	0,920095	1,908528	-28,0957
30	0,93	17,18	0,924889	1,924034	-29,0956
31	1,16	350,66	0,921603	1,944011	-30,0953
32	0,94	12,67	0,925202	1,960016	-31,0952
33	6,45	25,28	0,973174	2,061594	-32,0889
34	14,79	21,98	1,06872	2,298316	-33,0557
35	5,98	55,06	1,154122	2,357983	-34,0503
36	11,53	68,8	1,340476	2,430265	-35,0301
37	2,27	25,3	1,357403	2,466074	-36,0293
38	2,25	26,63	1,375001	2,501169	-37,0286
39	9,96	347,76	1,338332	2,670198	-38,0135

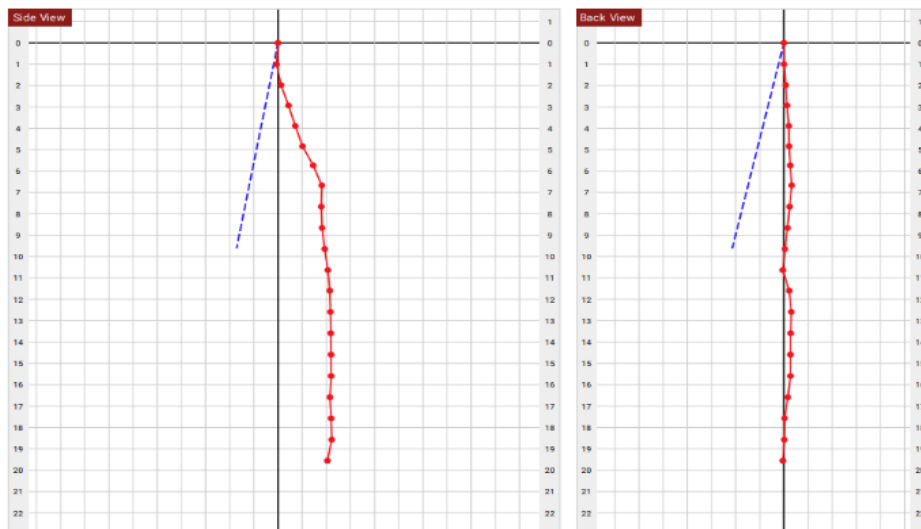


Figura 27. Menos de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 147,3°, media angular de 9,75°, uma diferença de desvio de 10,83m.

Tabela 12. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	3,19	346,9	-0,01261	0,054199	-0,99845
2	11,3	190,88	-0,0496	-0,13822	-1,97907
3	18,25	180,65	-0,05315	-0,45137	-2,92876
4	16,83	185,24	-0,07959	-0,73969	-3,88593
5	17,53	171,56	-0,03538	-1,03763	-4,83949
6	26,28	176,89	-0,01136	-1,47974	-5,73613
7	21,21	180,1	-0,01199	-1,84153	-6,66839
8	5,2	67,58	0,071787	-1,80696	-7,66428
9	5,17	100,45	0,160404	-1,82331	-8,66021
10	9,02	124,36	0,289826	-1,91179	-9,64784
11	9,11	137,22	0,397362	-2,028	-10,6352
12	16,22	243,87	0,146584	-2,15102	-11,5954
13	5,23	242,42	0,065788	-2,19322	-12,5913
14	1,6	109,09	0,092174	-2,20235	-13,5909
15	0,99	130,84	0,105246	-2,21365	-14,5907
16	0,16	188,82	0,104817	-2,21641	-15,5907
17	6,83	55,39	0,202696	-2,14886	-16,5836
18	8,41	99,75	0,346839	-2,17363	-17,5729
19	1,57	145,03	0,362543	-2,19608	-18,5725
20	10,86	8,59	0,390684	-2,00979	-19,5546

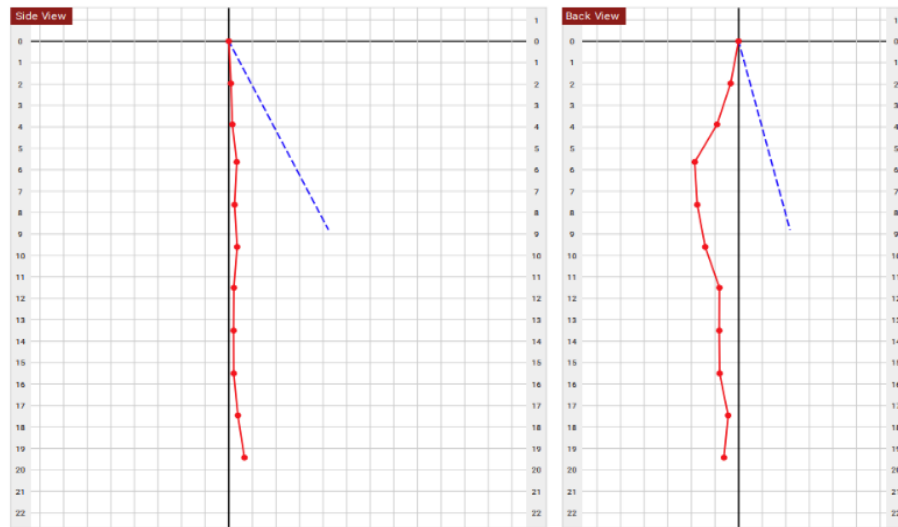


Figura 28. Menos de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 40,82°, media angular de 10,99°, uma diferença de desvio de 11,56m.

Tabela 13. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	10,11	291,72	-0,32615	0,129923	-1,96895
3	16,76	282,3	-0,88964	0,252784	-3,88399
4	28,83	287,63	-1,80877	0,544878	-5,6361
5	4,07	138,45	-1,71462	0,438646	-7,63105
6	10,27	78,34	-1,3654	0,510711	-9,59901
7	17,99	109,47	-0,78302	0,304822	-11,5012
8	0,39	216,78	-0,79117	0,293919	-13,5012
9	0,48	75,52	-0,77495	0,298108	-15,5011
10	11,57	70,31	-0,39727	0,433261	-17,4605
11	9,48	333,78	-0,54281	0,728773	-19,4332



Figura 29. Menos de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 11,62°, media angular de 12,75°, uma diferença de desvio de 11,72m.

Tabela 14. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	18,19	310,53	-0,71181	0,608586	-2,85008
2	28,95	314,72	-1,74363	1,630373	-5,47521
3	4,51	102,52	-1,51334	1,579234	-8,46592
4	17,48	123,4	-0,76104	1,083186	-11,3274
5	0,86	116,09	-0,7206	1,063383	-14,327
6	9,95	348,29	-0,82581	1,570961	-17,2819
7	9,31	319,66	-1,13997	1,940886	-20,2424

3.4.3 INTERVALO DE MEDIÇÃO COM MAIS DE 1, 2 E 3m NO MÉTODO DOWNHOLE

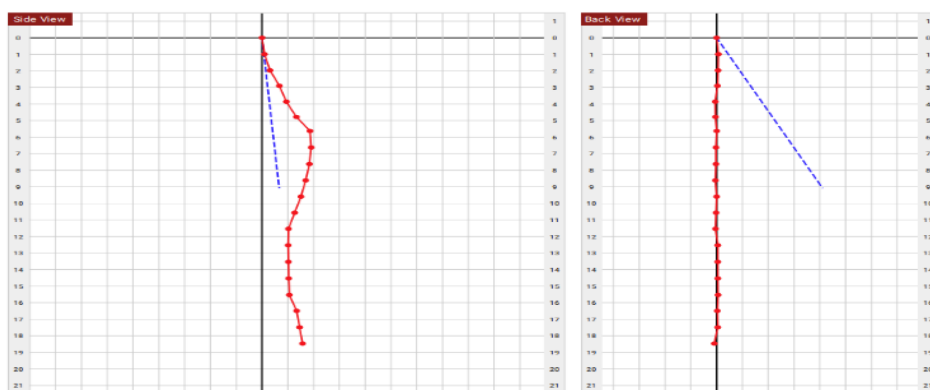


Figura 30. Mais de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 279,29°, media angular de 10,94°, e uma diferença de desvio de 10,31m.

Tabela 15. Resultados obtidos com mais de 1m de intervalo de medição.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	6,78	311,34	-0,08864	0,07798	-0,99301
2	12,48	272,63	-0,30451	0,087896	-1,96938
3	21,31	272,32	-0,66762	0,102607	-2,90101
4	16,37	257,94	-0,94324	0,043721	-3,86047
5	22,94	277,09	-1,33003	0,091829	-4,78138
6	32,1	281,39	-1,85096	0,196773	-5,6285
7	3,17	242,57	-1,90005	0,171299	-6,62697
8	3,95	96,28	-1,83157	0,163764	-7,6246
9	8,58	104,34	-1,68703	0,126813	-8,61341
10	10,95	80,59	-1,49963	0,15787	-9,5952
11	14,01	101,46	-1,26237	0,10977	-10,5655
12	13,96	101,3	-1,0258	0,062499	-11,5359
13	5,18	13,54	-1,00466	0,150275	-12,5318
14	0,51	271,56	-1,01356	0,150517	-13,5318
15	0,71	293,64	-1,02491	0,155486	-14,5317
16	1,54	291,28	-1,04996	0,16524	-15,5314
17	16,39	270,09	-1,33213	0,165683	-16,4907
18	6,73	284,58	-1,44555	0,195183	-17,4838
19	10,19	226,82	-1,57455	0,074123	-18,4681

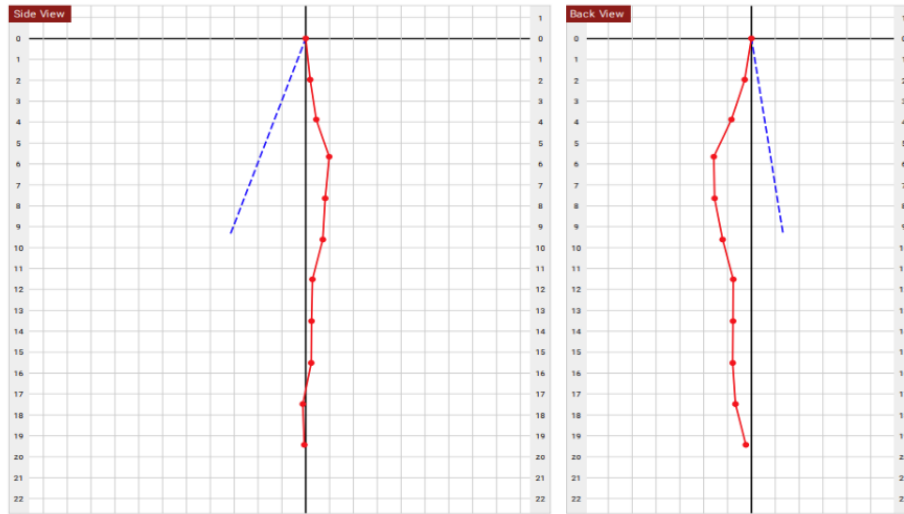


Figura 31. Mais de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 73,67°, media angular de 11,3°, uma diferença de desvio de 10,63m.

Tabela 16. Resultados obtidos com mais de 2m de intervalo de medição.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	9,71	189,86	-0,05776	-0,33234	-1,97135
2	17,78	181,42	-0,0729	-0,94288	-3,87582
3	27,28	192,56	-0,27224	-1,83762	-5,65337
4	4,88	55,07	-0,13275	-1,7402	-7,64613
5	10,05	352,74	-0,17686	-1,39399	-9,61544
6	18,21	20,81	0,045186	-0,80976	-11,5153
7	1,11	80,72	0,083423	-0,80351	-13,5149
8	0,53	113,75	0,100356	-0,81096	-15,5148
9	10,7	48,55	0,378683	-0,56515	-17,48
10	12,74	328,19	0,146201	-0,19034	-19,4308

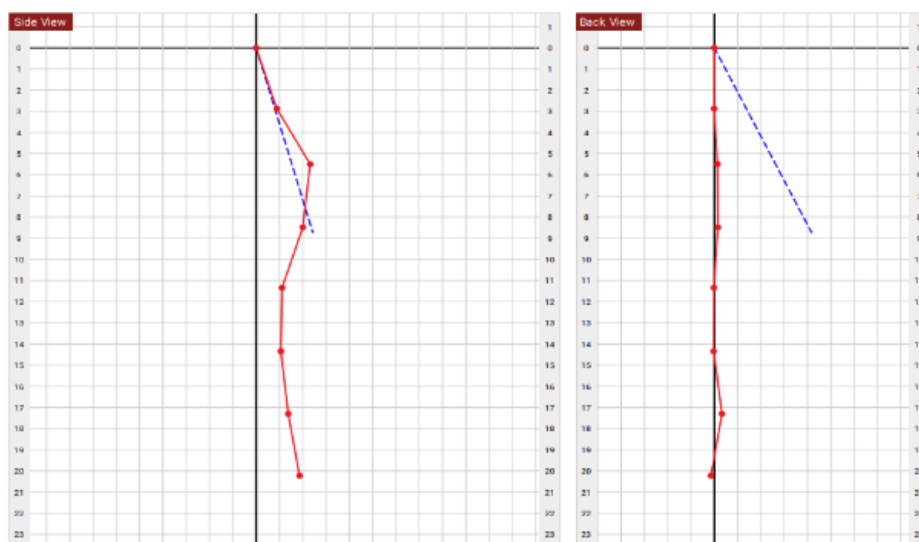


Figura 32. Mais de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 353,95°, media angular de 13,22°, uma diferença de desvio de 12,28m.

Tabela 17. Resultados obtidos com mais de 3m de intervalo de medição.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	17,1	18,71	0,282965	0,835505	-2,86738
2	28,71	24,82	0,887907	2,143519	-5,49857
3	5,99	196,34	0,79983	1,843099	-8,48219
4	17,66	209,79	0,34767	1,053263	-11,3408
5	0,95	210,63	0,322328	1,010464	-14,3404
6	9,13	67,57	0,762341	1,192093	-17,3024
7	13	334,83	0,475322	1,802869	-20,2255

3.4.4 INTERVALO DE MEDIÇÃO DE MENOS DE 1, 2 E 3m NO MÉTODO UPHOLE

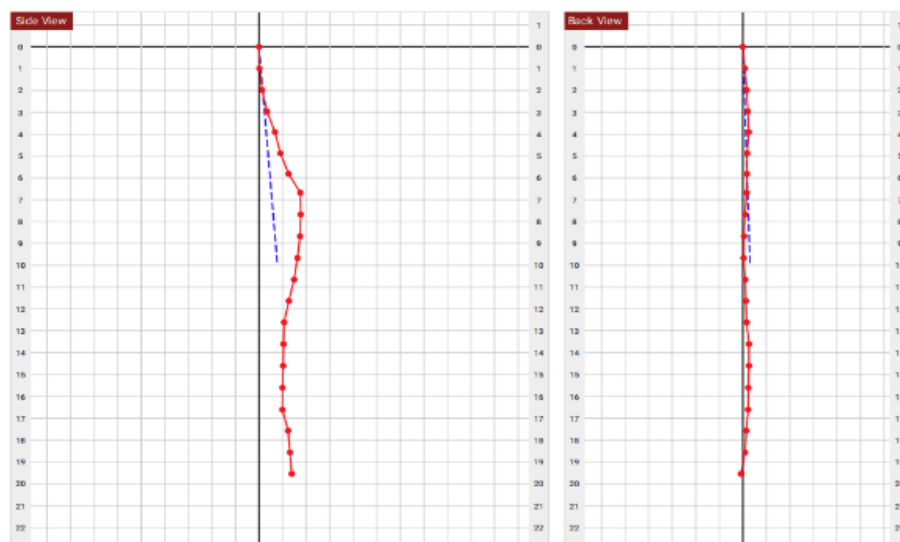


Figura 33. Menos de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 339.76°, media angular de 9.88°, e uma diferença de desvio de 9.61m.

Tabela 18. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,35	109,14	0,088085	-0,03057	-0,99564
2	7,84	65,33	0,212042	0,026364	-1,9863
3	12,17	45,74	0,363022	0,173494	-2,96382
4	19,77	38,07	0,571592	0,43978	-3,90488
5	14	17,02	0,642404	0,671106	-4,87518
6	20,26	30,08	0,815963	0,970752	-5,81331
7	30,03	30,81	1,072292	1,400577	-6,67907
8	4,11	314,49	1,021163	1,450803	-7,6765
9	2,8	269,75	0,972314	1,45059	-8,67531
10	6,52	220,17	0,899068	1,363823	-9,66884
11	9,11	185,95	0,882655	1,206345	-10,6562
12	12,81	205,69	0,78654	1,006543	-11,6313
13	11,91	203,9	0,702928	0,817864	-12,6098

14	6,04	135,39	0,776824	0,742955	-13,6043
15	0,95	211,52	0,768156	0,728822	-14,6041
16	2,24	255,1	0,730385	0,718771	-15,6034
17	0,48	279,83	0,72213	0,720202	-16,6033
18	14,88	14	0,784255	0,969369	-17,5698
19	5,4	359,33	0,783154	1,063471	-18,5653
20	10,98	324,8	0,673363	1,21911	-19,547

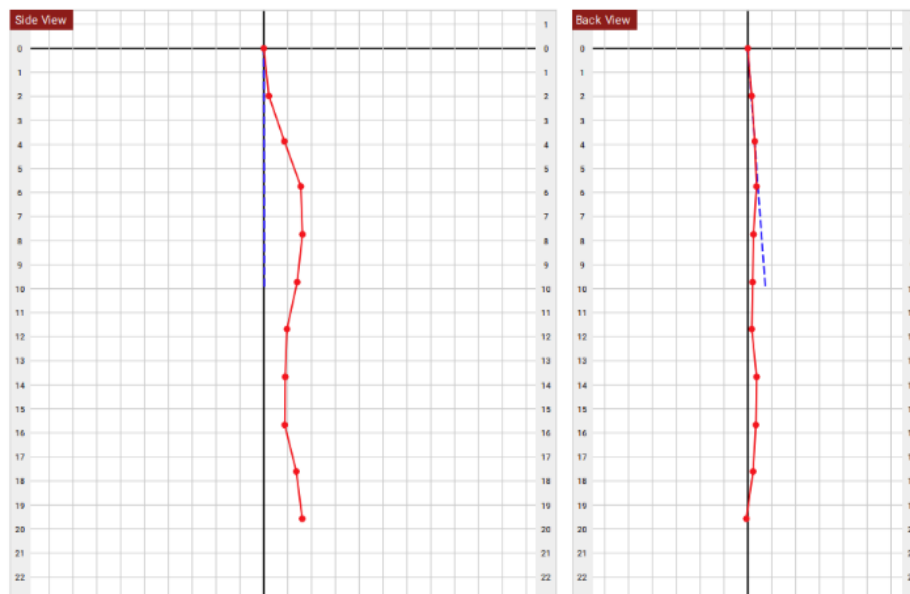


Figura 34. Menos de 2m de intervalo de medição, com media de azimute de 355,35°, media angular de 10,27°, uma diferença de desvio de 9,76m.

Tabela 19. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	7,71	61,18	0,235084	0,129345	-1,98192
2	19,37	35,14	0,616884	0,671786	-3,86871
3	20,22	29,71	0,959475	1,272169	-5,74546
4	4,06	322,76	0,873784	1,3849	-7,74044
5	6,43	213,39	0,75052	1,19789	-9,72786
6	12,45	208,62	0,543988	0,819398	-11,6808
7	6,17	133,22	0,700634	0,672194	-13,6692
8	1,06	260,6	0,664132	0,666152	-15,6689
9	14,42	10,27	0,752929	1,156228	-17,6059
10	10,84	335,16	0,594921	1,497564	-19,5702

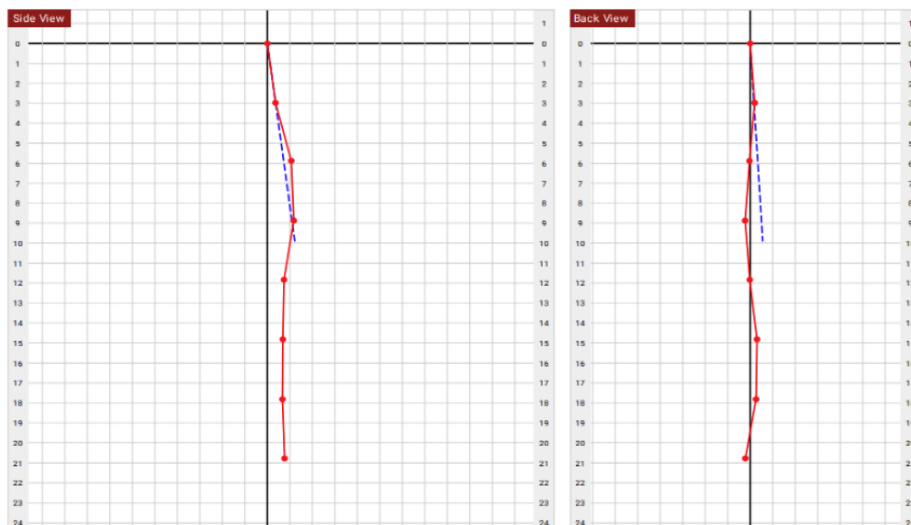


Figura 35. Menos de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 348,12°, media angular de 7,45°, uma diferença de desvio de 10,9m.

Tabela 20. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	7,91	65,61	0,376008	0,170485	-2,97146
2	14,28	18,31	0,608479	0,873003	-5,87876
3	4,3	335,5	0,5152	1,077686	-8,87032
4	9,23	190,87	0,424455	0,605126	-11,8315
5	6,22	135,68	0,651549	0,372577	-14,8138
6	0,83	283,5	0,609292	0,382722	-17,8135
7	9,35	317,66	0,281018	0,742985	-20,7736

3.4.5 INTERVALO DE MEDIÇÃO COM MAIS DE 1, 2 E 3m NO MÉTODO UPHOLE

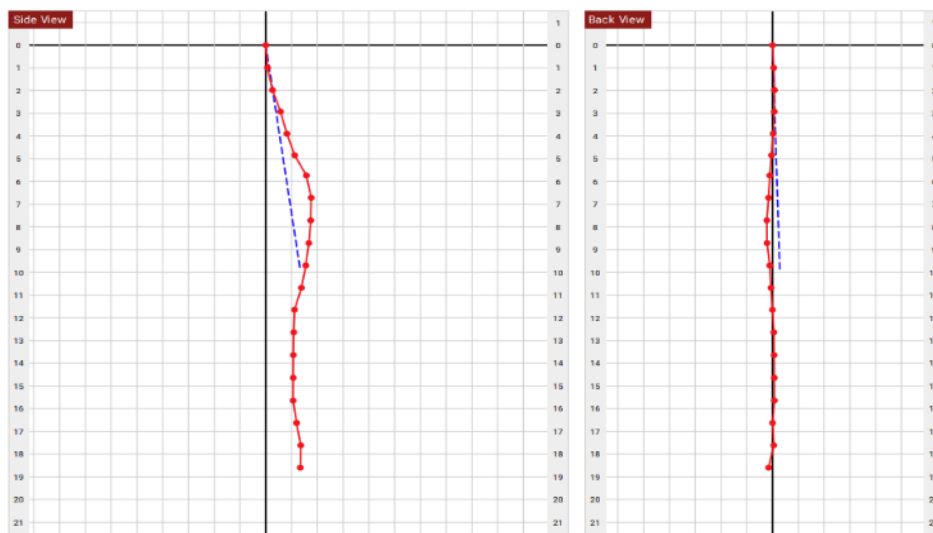


Figura 36. Mais de 1m de intervalo de medição, com media de azimuth de 98,89°, media angular de 9,69°, uma diferença de desvio de 8,7m.

Tabela 21. Resultados obtidos em menos de 1m de intervalo de medição.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	4,79	86,76	0,08337	0,00472	-0,99651
2	11,11	62,46	0,254229	0,093815	-1,97777
3	18,33	52,04	0,502186	0,287261	-2,92703
4	14,4	43,37	0,672963	0,468042	-3,89561
5	18,11	41,47	0,878811	0,700957	-4,84607
6	27,21	45,41	1,204443	1,021962	-5,73541
7	11,17	38,93	1,326172	1,17266	-6,71647
8	3,97	307,8	1,271466	1,215094	-7,71407
9	4,19	228,27	1,216939	1,166461	-8,71139
10	9,24	191,23	1,185668	1,008965	-9,69842
11	10,08	218,43	1,076881	0,871857	-10,683
12	15,86	221,36	0,896296	0,666735	-11,6449
13	3,56	175,32	0,901362	0,604848	-12,643
14	1,09	194,38	0,896638	0,586422	-13,6428
15	0,49	178,79	0,896818	0,577871	-14,6428
16	0,33	195,25	0,895303	0,572315	-15,6428
17	8,78	26,28	0,962886	0,709179	-16,631
18	9,72	69,69	1,121223	0,767781	-17,6167
19	11,72	318,39	0,986334	0,919657	-18,5958

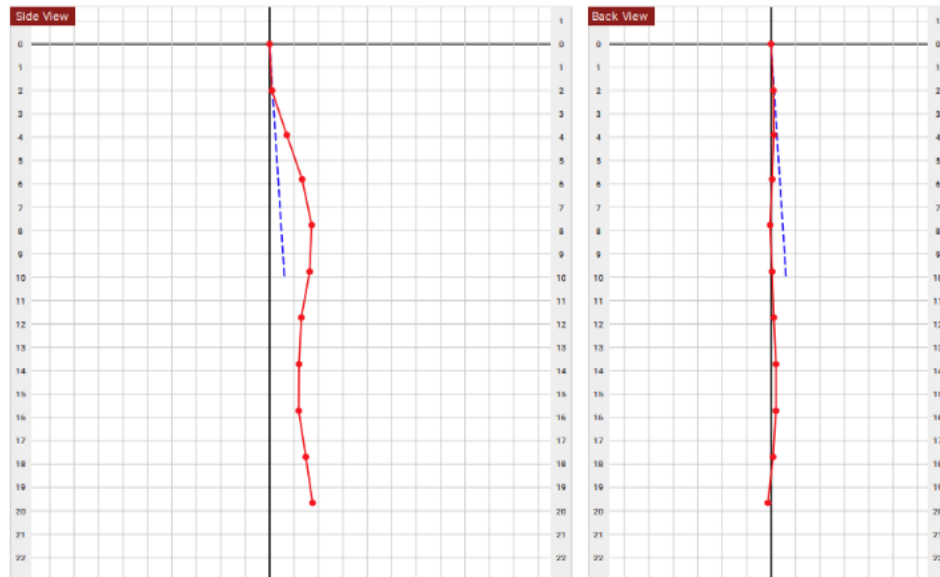


Figura 37. Mais de 2m de intervalo de medição, com media de azimuth de 59,24°, media angular de 8,81°, uma diferença de desvio de 9,8m.

Tabela 22. Resultados obtidos em menos de 2m de intervalo de medição.

Furo 8					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	3,97	79,03	0,135938	0,02635	-1,9952
2	17,71	35,18	0,486465	0,523622	-3,90042
3	18,34	27,53	0,777341	1,081675	-5,79883
4	11,61	21,65	0,925836	1,455779	-7,75791
5	3,32	169,64	0,946665	1,341842	-9,75455
6	10,06	201,99	0,81585	1,017899	-11,7238
7	3,69	170,96	0,836074	0,890782	-13,7197
8	0,32	217,89	0,829214	0,881966	-15,7196
9	9,03	11,64	0,892548	1,189414	-17,6948
10	10,04	356,06	0,86859	1,537261	-19,6642

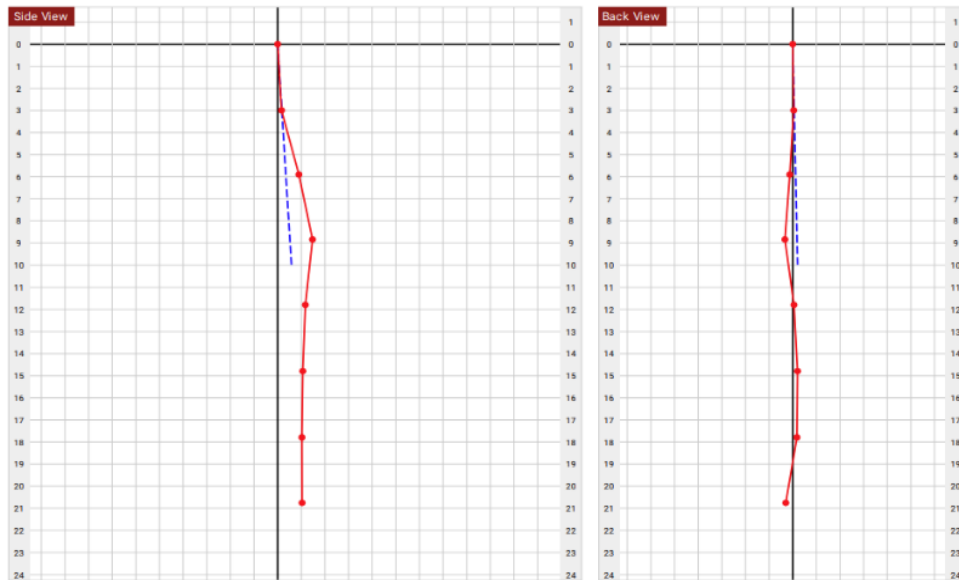


Figura 38. Mais de 3m de intervalo de medição, com media de azimuth de 26,72°, media angular de 7,48°, uma diferença de desvio de 10,79m.

Tabela 23. Resultados obtidos em menos de 3m de intervalo de medição.

Furo 9					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	3,23	59,11	0,145056	0,08678	-2,99523
2	14,53	32,72	0,551895	0,72001	-5,89928
3	11,78	25,8	0,818458	1,271422	-8,8361
4	9,36	173,92	0,870136	0,786255	-11,7962
5	3,57	171,11	0,899004	0,601695	-14,7903
6	0,84	260,37	0,855643	0,594338	-17,79
7	9,05	316,21	0,529088	0,934986	-20,7527

RESUMO DO CAPÍTULO 3

Este capítulo constitui a parte mais crucial deste trabalho de pesquisa começando pela construção da instalação de teste e a medição do perfil do tubo. O segundo passo foi colheita de dados por utilizações consecutivas do desviómetro, mudando os seus parâmetros de operação, mas utilizando o mais corretamente possível os protocolos de operação propostos pelo fabricante. O terceiro passo foi a repetição das medições anteriores introduzindo agora um pequeno erro, aleatório, na medição da cordada.

Primeiro fizeram-se medições de 1, 2 e 3m, para ambos métodos propostos pelo fabricante sem a introdução de *offset*. Segundo fez-se a medição com 0,50cm no método *Downhole*, por último fez-se medições com menos de 1, 2 e 3m para ambos métodos, o mesmo procedimento foi repetido com medições de mais 1, 2 e 3m.

A recolha dos dados na instalação de teste eu pude observar que o desviómetro não reconhece medições de corda dada com menos e mais centímetros dos valores padrão que a sonda apresenta antes de começar a perfilagem geométrica do furo em ambos métodos.

4.0 INTRODUÇÃO DOS ERROS DE OPERAÇÃO

Nesta fase de recolha dos dados introduziram-se alguns erros de operação de colheita de resultados em ambos métodos, na primeira fase efetuou-se uma variação nos passos de colheita dos resultados, na segunda fase se foi feita por uma paragem do desviómetro até aos 8 metros de profundidade para ambos métodos.

4.1 ESTUDO DA TRAJETÓRIAS DESCRITAS POR ACELERAÇÃO E ATITUDE

A trajetória do desviómetro é descrita como o percurso realizado por uma determinada sonda ao longo de um furo de pesquisa, com base nos sistemas de coordenadas Δx , Δy e Δz . Este percurso realizado pelo desviómetro é apresentado na forma de uma função que pode ser escrita na forma paramétrica, com uma função diferente para cada coordenada em função de um parâmetro, que geralmente é o tempo, e pode ser escrita como uma função implícita das coordenadas.

Numa análise mais física, considerou-se a trajetória descrita pela aceleração e atitude do desviómetro como sendo uma trajetória retilínea, porque o movimento retilíneo de um objeto é uniformemente variado quando a mesma tem uma aceleração instantânea constante e a sua trajetória descreve uma linha reta. Sabendo que temos uma aceleração instantânea constante haverá uma variação de velocidade do objeto. À medida que a velocidade do objeto aumenta com o tempo o movimento é chamado de uniformemente acelerado e quando a mesma velocidade diminui com o tempo o mesmo é chamado de movimento uniformemente retardado.

O movimento feito pelo desviómetro dentro de um furo de perfuração não é descrito por um movimento retilíneo porque o mesmo não faz uma linha reta mais não deixa de ter uma aceleração constante que depende basicamente do operador da sonda durante a colheita de dados na área de estudo. De acordo com (Frank G., 2021), (Miranda et al, 2018), o desviómetro possui o sensor BNO055 onde estão inseridos os sensores do acelerómetro, giroscópio e geomagnético, que permite ao equipamento medir ângulos, orientações, inclinações e azimuth em todas as direções, e por último, representar a geometria do furo em estudo.

4.2 TRAJETÓRIAS DESCRITAS NA VARIAÇÃO DE INTERVALO NO MÉTODO DOWNHOLE

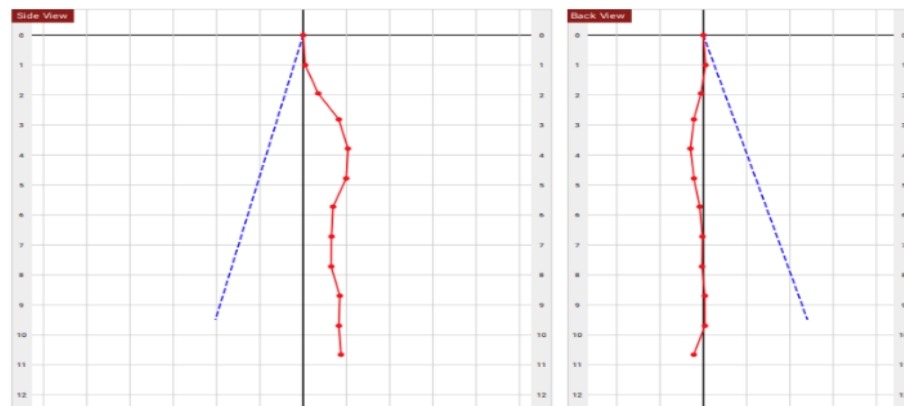


Figura 39. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 74°, media angular de 11,2°, diferenças de desvio 4,1m, passos de medidas 1,2 e 3m.

Tabela 24. Resultados obtidos numa variação dos passos de 1,2 e 3m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	3,89	93,42	0,06772	-0,00405	-0,9977
2	18,72	27,16	0,214224	0,281508	-1,94479
3	30,06	27,43	0,444974	0,7261	-2,8103
4	13,05	25,93	0,54371	0,929169	-3,78447
5	5,13	162,92	0,569972	0,843697	-4,78046
6	19,4	202,4	0,443396	0,536599	-5,72369
7	4,03	166,4	0,459921	0,468291	-6,72121
8	0,74	274,57	0,447047	0,46932	-7,72113
9	12,03	64,56	0,635261	0,558851	-8,69917
10	1,2	220,14	0,621761	0,542841	-9,69895
11	15,16	327,21	0,480134	0,762687	-10,6641

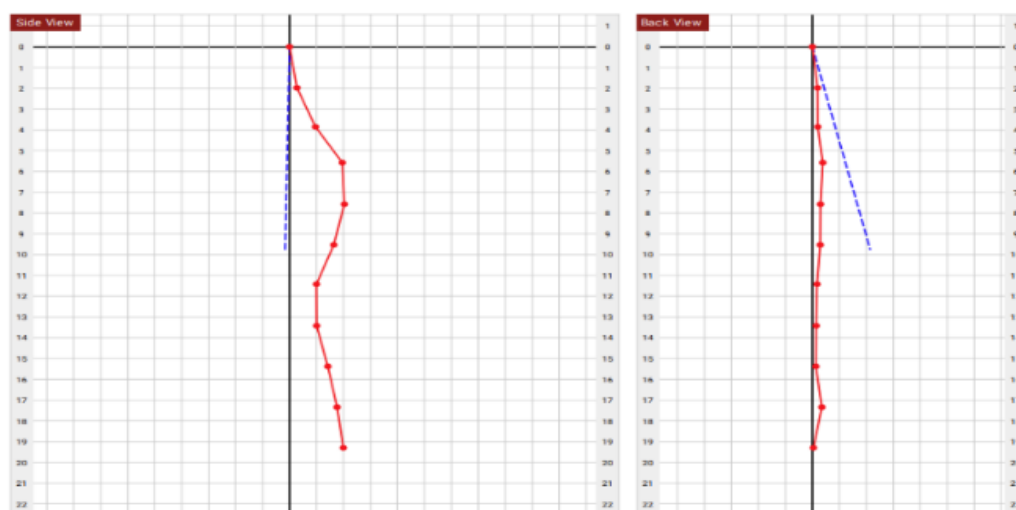


Figura 40. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 357,61°, media angular de 12,97°, diferenças de desvio 10m, passos de medidas 2,3 e 1m.

Tabela 25. Resultados obtidos numa variação dos passos de 2,3 e 1m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	9,68	51,92	0,264711	0,207411	-1,97152
2	20,03	17,91	0,475372	0,859239	-3,85055
3	30,47	27,55	0,94445	1,758414	-5,57434
4	3,19	328,59	0,886448	1,853399	-7,57124
5	11,31	198,28	0,763419	1,480959	-9,5324
6	19,09	207,71	0,459262	0,901871	-11,4224
7	0,92	298,4	0,431014	0,917144	-13,4222
8	12,01	15,36	0,541249	1,318444	-15,3784
9	11,8	50	0,854556	1,581339	-17,3361
10	11,21	323,81	0,624976	1,895134	-19,298



Figura 41. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 14,25°, media angular de 12,51°, diferenças de desvio 19,27m, passos de medidas 3,1 e 2m.

Tabela 26. Resultados obtidos numa variação dos passos de 3,1 e 2m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	18,1	29,76	0,46263	0,809106	-2,85155
2	15,18	10,31	0,603224	1,581979	-5,74687
3	30,9	17,39	1,063677	3,052185	-8,32107
4	5,13	155,34	1,175598	2,808402	-11,309
5	9,25	136,55	1,507236	2,458317	-14,27
6	19,22	192,59	1,291969	1,494475	-17,1028
7	0,89	277,1	1,245728	1,500234	-20,1025
8	0,95	315,74	1,211014	1,535857	-23,102
9	11,36	62,25	1,733969	1,810997	-26,0433
10	14,15	333,4	1,40559	2,466755	-28,9523

4.2.1 TRAJETÓRIAS DESCRITAS NA VARIAÇÃO DE INTERVALO NO MÉTODO UPHOLE

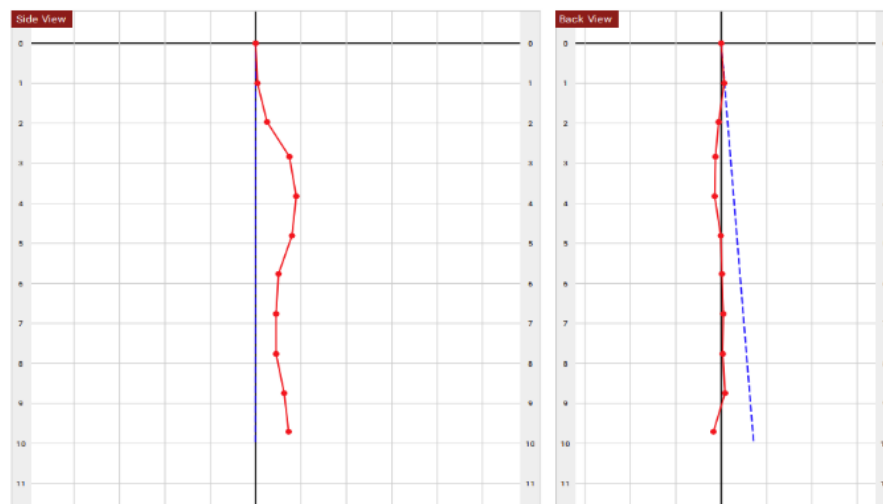


Figura 42. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 32,05°, media angular de 11,47°, diferenças de desvio 1,18m, passos de medidas 1,2 e 3m.

Tabela 27. Resultados obtidos numa variação de passos de 1, 2 e 3m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	4,39	95,38	0,076208	-0,00718	-0,99707
2	14,16	5,87	0,101227	0,236171	-1,96668
3	29,84	27,48	0,330829	0,67761	-2,8341
4	8,7	29,24	0,404715	0,809597	-3,82259
5	9,41	160,65	0,458889	0,655335	-4,80914
6	17,33	210,69	0,306855	0,39918	-5,76374
7	3,53	185,84	0,300591	0,337928	-6,76185
8	0,75	307,28	0,290175	0,345857	-7,76176
9	10,67	51,6	0,435278	0,460863	-8,74447
10	15,9	326,64	0,284628	0,689683	-9,70621

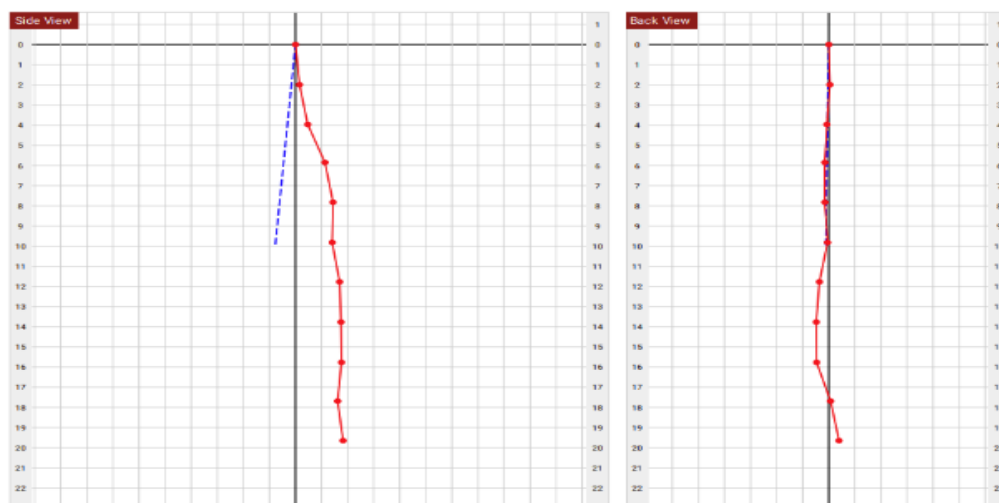


Figura 43. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 281,93°, media angular de 8,99°, diferenças de desvio 10,04m, passos de medidas 2, 3 e 1m.

Tabela 28. Resultados obtidos numa variação de passos de 2,3 e 1m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	4,64	283,09	-0,15759	0,036642	-1,99345
2	9,65	246,48	-0,46499	-0,09715	-3,96515
3	19,44	259,76	-1,12003	-0,21548	-5,85113
4	8,93	266,96	-1,43005	-0,23195	-7,82688
5	3,18	15	-1,40133	-0,12478	-9,82381
6	12,29	219,54	-1,67235	-0,45309	-11,778
7	3,75	199,49	-1,71599	-0,5764	-13,7737
8	0,65	305,8	-1,7344	-0,56313	-15,7736
9	16,11	12,21	-1,61702	-0,02071	-17,695
10	11,22	323,94	-1,84609	0,293878	-19,6568

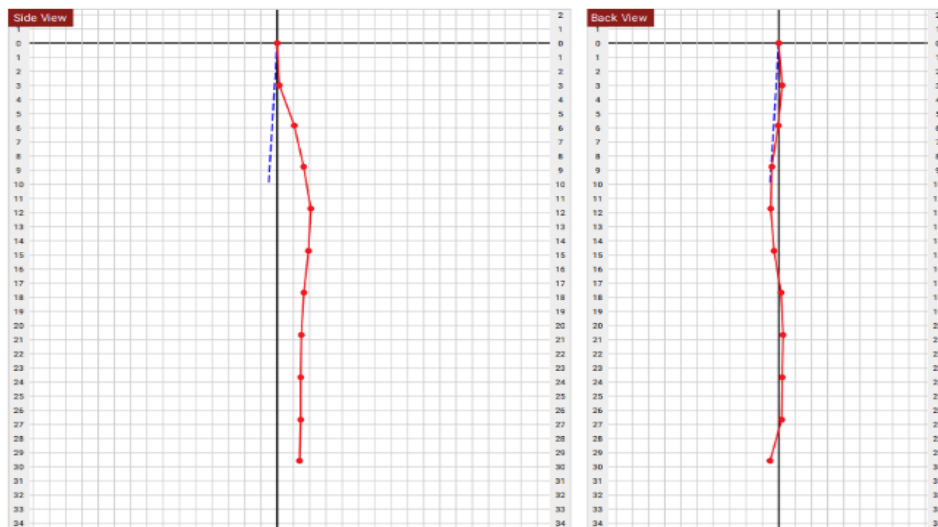


Figura 44. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 11,45°, media angular de 7,9°, diferenças de desvio 19,69m, passos de medidas 3, 1 e 2m.

Tabela 29. Resultados obtidos numa variação de passos de 3,1 e 2m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	4,74	112,04	0,229787	-0,09303	-2,98974
2	18,34	40,93	0,848213	0,62015	-5,83736
3	13,5	20,93	1,098392	1,274276	-8,75447
4	8,44	46,92	1,420003	1,575023	-11,722
5	4,68	180,1	1,419576	1,330252	-14,712
6	9,98	178,38	1,434274	0,810546	-17,6666
7	3,73	198,4	1,37267	0,62536	-20,6602
8	1,24	290,1	1,311703	0,64767	-23,6595
9	0,58	322,85	1,293364	0,671876	-26,6594
10	13,81	319,89	0,832006	1,219562	-29,5726

Como podemos observar à variação de intervalos recolha de resultados do desviómetro, para o intervalo de 1m se variou 1,2 3m, para o intervalo de 2m se variou 2, 3 e 1m, para o intervalo 3m se variou 3, 1 e 2m de profundidade até ao fundo do furo de pesquisa, através dos resultados geométricos que obtive através da variação dos intervalos fez com que os resultados apresentados não coincidiram ao trajeto percorrido pelo desviómetro desde o momento que houve variação de intervalos de colheita de resultados.

4.3 TRAJETÓRIAS DESCRITAS DO MÉTODO DOWNHOLE COM PARAGEM DA Sonda

Na segunda fase de recolha de dados na instalação de teste para o estudo e descrição da trajetória para ambos métodos de perfilagem geométrica, foquei-me na desvantagem do desviómetro, ficar estado de prontidão em profundidades até 8 metros durante a recolha de dados do furo de amostragem e gerar os resultados quando a sonda estiver na superfície.

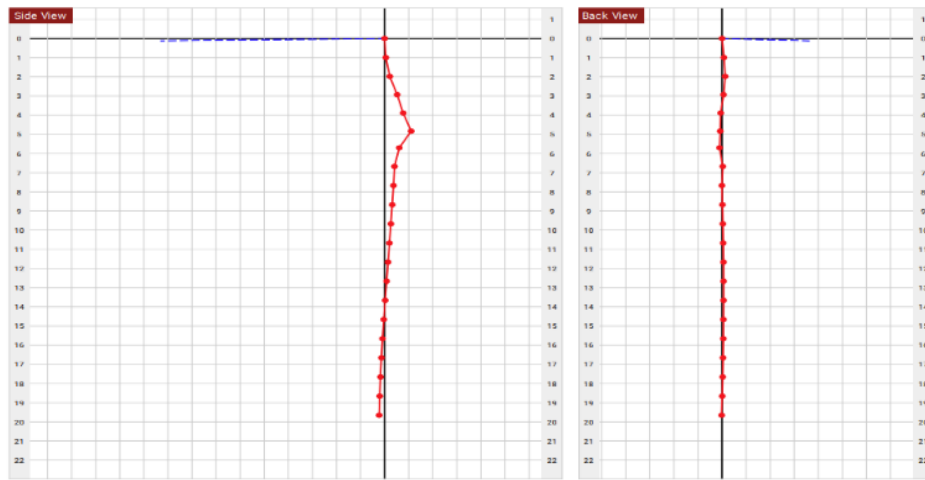


Figura 45. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de 64°, media angular de 7,6°, diferenças de desvio 21,8m e intervalo de 1m.

Tabela 30. Resultados obtidos no intervalo de 1m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,3	299,4	-0,08047	0,045345	-0,99572
2	10,05	257,52	-0,25086	0,007634	-1,98038
3	18,15	228,35	-0,48362	-0,19939	-2,93062
4	16,17	215,29	-0,64451	-0,4267	-3,89106
5	19,39	237,2	-0,92357	-0,60654	-4,83435
6	29,57	63,62	-0,48148	-0,38728	-5,7041
7	13,85	26,85	-0,37336	-0,1737	-6,67502
8	3,24	101,15	-0,31791	-0,18463	-7,67343
9	3,26	37,64	-0,28318	-0,1396	-8,67181
10	3,36	43,43	-0,24289	-0,09704	-9,67009
11	3,47	47,06	-0,19858	-0,05581	-10,6683
12	3,46	47,83	-0,15385	-0,01529	-11,6664
13	3,49	57,75	-0,10236	0,017193	-12,6646
14	3,37	60,51	-0,0512	0,046131	-13,6628
15	3,26	66,47	9,44E-04	0,068834	-14,6612
16	3,05	65,24	0,04926	0,091118	-15,6598
17	2,77	77,19	0,096384	0,101833	-16,6586
18	2,38	80,16	0,1373	0,10893	-17,6578
19	2,02	93,16	0,172494	0,106987	-18,6572
20	1,93	105,91	0,204883	0,097754	-19,6566

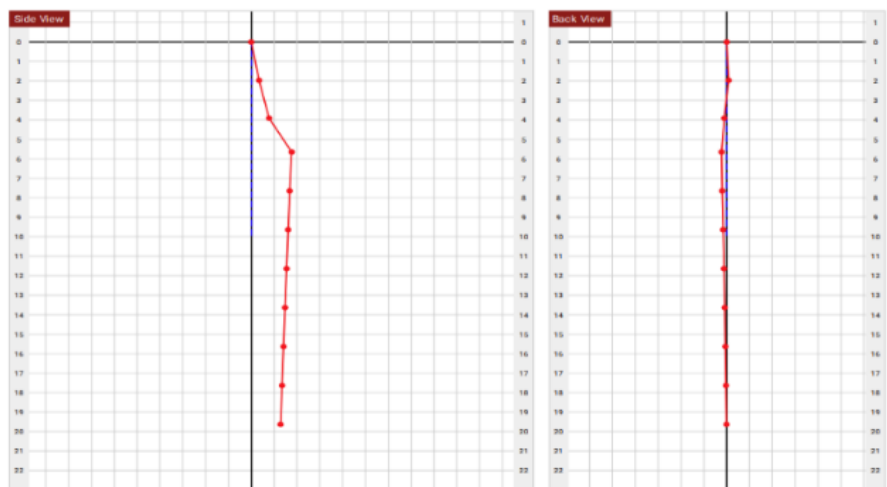


Figura 46. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 60,59°, media angular de 6,91°, diferenças de desvio 9,72m e intervalo de 2m.

Tabela 31. Resultados obtidos no intervalo de 2m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	10,1	290,67	-0,32816	0,123804	-1,96901
2	13,84	253,02	-0,78572	-0,01591	-3,91094
3	29,86	269,95	-1,78149	-0,01678	-5,64543
4	2,56	79,05	-1,69378	1,86E-04	-7,64343
5	2,33	65,28	-1,61992	0,034189	-9,64178
6	2,18	69,54	-1,54865	0,060782	-11,6403
7	2,12	71,42	-1,47852	0,084356	-13,639
8	2,09	73,61	-1,40854	0,104937	-15,6376
9	2,01	74,97	-1,34079	0,123128	-17,6364
10	1,97	75,49	-1,27423	0,140354	-19,6352

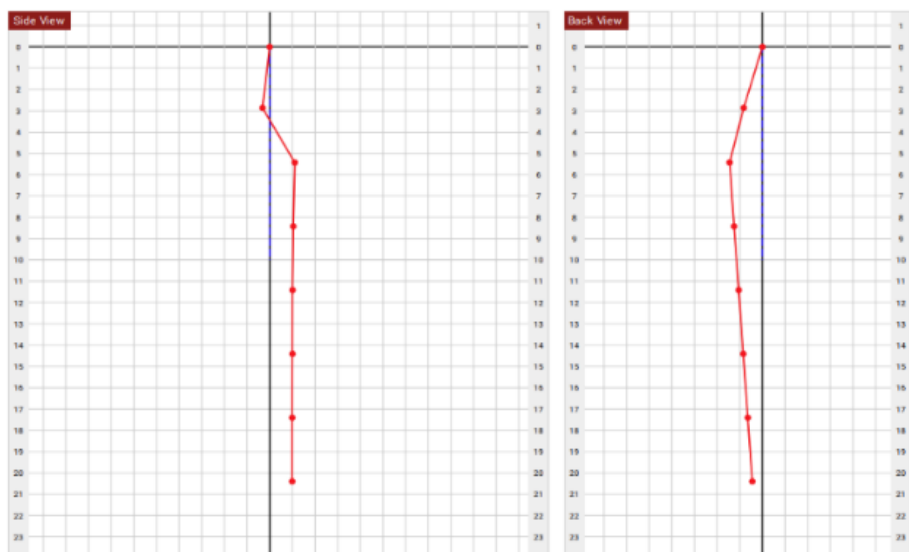


Figura 47. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 58,92°, media angular de 9,69°, diferenças de desvio 10,45m e intervalo de 3m.

Tabela 32. Resultados obtidos no intervalo de 3m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	17,15	217,57	-0,53938	-0,70116	-2,86661
2	31,25	305,14	-1,81206	0,194621	-5,43134
3	4	78,08	-1,6073	0,237845	-8,42404
4	3,93	67,58	-1,41723	0,316264	-11,417
5	3,83	59,76	-1,24411	0,417185	-14,4103
6	3,83	62,09	-1,06703	0,510984	-17,4036
7	3,81	59,04	-0,89609	0,613534	-20,397

4.3.1 CORREÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DESCRITAS DO MÉTODO DOWNHOLE

Tabela 33. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 1m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,3	299,4	-0,08047	0,045345	-0,99572
2	10,05	257,52	-0,25086	0,007634	-1,98038
3	18,15	228,35	-0,48362	-0,19939	-2,93062
4	16,17	215,29	-0,64451	-0,4267	-3,89106
5	19,39	237,2	-0,92357	-0,60654	-4,83435
6	29,57	63,62	-0,48148	-0,38728	-5,7041
7	13,85	26,85	-0,37336	-0,1737	-6,67502
8	#	#	#	#	#
...	...	...	...	...	...
20	#	#	#	#	#

Tabela 34. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 2m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	10,1	290,67	-0,32816	0,123804	-1,96901
2	13,84	253,02	-0,78572	-0,01591	-3,91094
3	29,86	269,95	-1,78149	-0,01678	-5,64543
4	2,56	79,05	-1,69378	1,86E-04	-7,64343
5	#	#	#	#	#
...	...	...	...	...	...
10	#	#	#	#	#

Tabela 35. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 3m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	17,15	217,57	-0,53938	-0,70116	-2,86661
2	31,25	305,14	-1,81206	0,194621	-5,43134
3	4	78,08	-1,6073	0,237845	-8,42404
4	#	#	#	#	#
...	...	...	...	...	...
7	#	#	#	#	#

4.4 TRAJETÓRIAS DESCRITAS DO MÉTODO UPHOLE COM PARAGEM DA Sonda

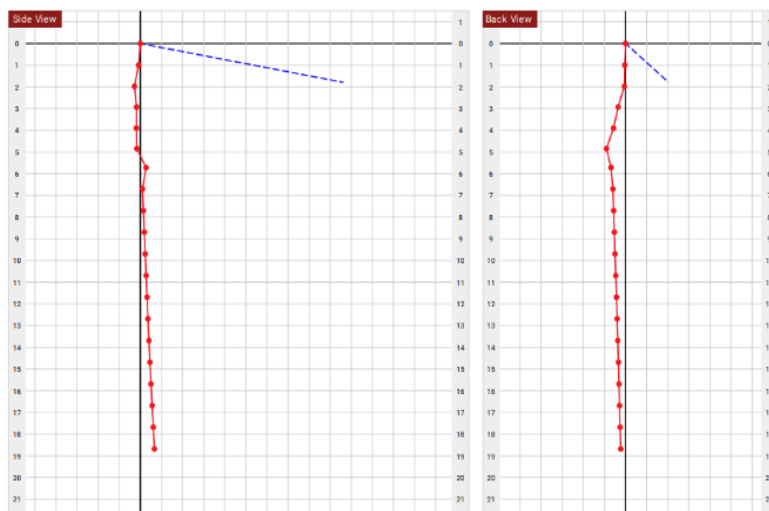


Figura 48. Representação geométrica do furo 1 com media de azimuth de $68,7^\circ$, media angular de $7,68^\circ$, diferenças de desvio 19,25m e intervalo de 1m.

Tabela 36. Resultados obtidos no intervalo de 1m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,52	246,04	-0,0879	-0,03906	-0,99536
2	11,04	228,46	-0,23124	-0,16605	-1,97686
3	18,08	331,15	-0,38098	0,105775	-2,92748
4	12,75	310,8	-0,54805	0,249983	-3,90282
5	19,49	316,73	-0,77674	0,492918	-4,84552
6	29,25	68,98	-0,32063	0,668184	-5,71802
7	11,04	194,58	-0,36884	0,482856	-6,69951
8	3,08	82,6	-0,31556	0,489776	-7,69807
9	3,12	79,99	-0,26196	0,499237	-8,69659
10	3,08	79,74	-0,20909	0,508807	-9,69514
11	3,11	81,09	-0,15549	0,51721	-10,6937
12	3,09	82,29	-0,10207	0,524442	-11,6922
13	3,2	78,54	-0,04736	0,535533	-12,6907
14	3,14	76,25	0,005843	0,548552	-13,6892
15	3,2	74,48	0,059629	0,563489	-14,6876
16	3,29	70,83	0,113837	0,582334	-15,6859
17	3,37	69,1	0,168753	0,603304	-16,6842
18	3,46	70,03	0,225475	0,623916	-17,6824
19	3,55	71,44	0,284175	0,643625	-18,6805

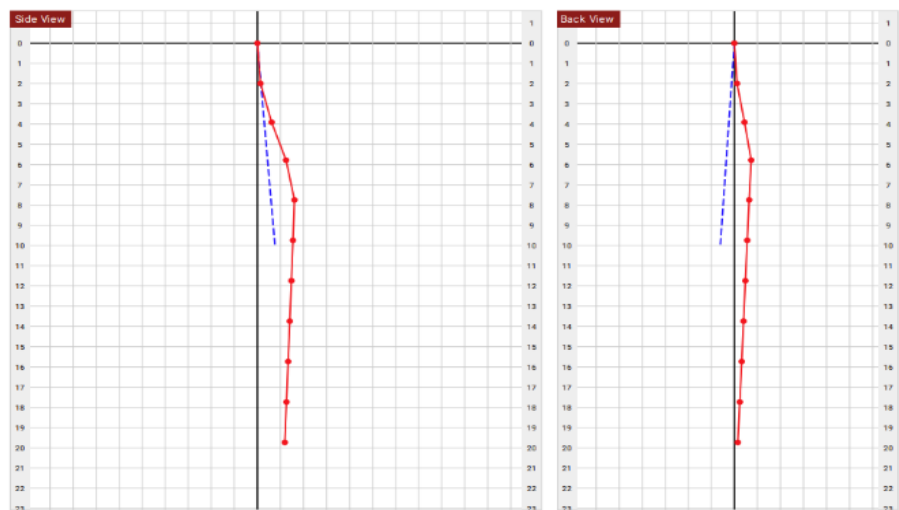


Figura 49. Representação geométrica do furo 2 com media de azimuth de 185,71°, media angular de 7,16°, diferenças de desvio 9,82m e intervalo de 2m.

Tabela 37. Resultados obtidos no intervalo de 2m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimuth	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,08	323,97	-0,10417	0,143217	-1,99214
2	16,9	317,33	-0,49823	0,570706	-3,90577
3	20,25	308,52	-1,03983	1,001821	-5,78215
4	10,84	269,51	-1,41595	0,998604	-7,74647
5	3,01	155,33	-1,37211	0,903169	-9,74371
6	3,05	153,1	-1,32397	0,808269	-11,7409
7	3,04	152,59	-1,27514	0,71411	-13,7381
8	3,07	150,64	-1,22262	0,620756	-15,7352
9	3,15	152,98	-1,17269	0,522851	-17,7322
10	3,23	152,93	-1,12141	0,422508	-19,729

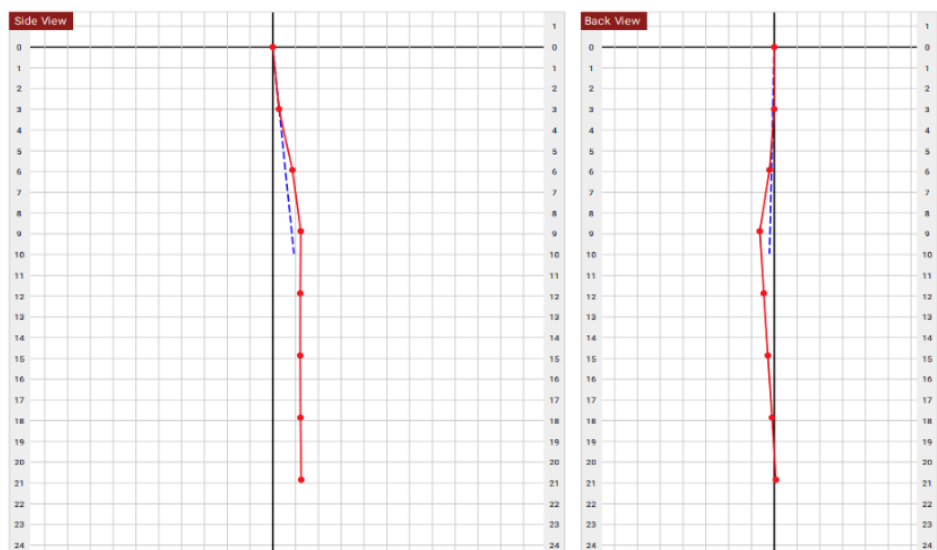


Figura 50. Representação geométrica do furo 3 com media de azimuth de 21,46°, media angular de 5,95°, diferenças de desvio 10,9m e intervalo de 3m.

Tabela 38. Resultados obtidos no intervalo de 3m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,16	334,12	-0,11777	0,242752	-2,98784
2	12,03	315,78	-0,55384	0,690864	-5,92196
3	10,82	285,34	-1,09695	0,839849	-8,86862
4	3,35	71,32	-0,93088	0,895997	-11,8635
5	3,44	65,65	-0,76688	0,970216	-14,8581
6	3,47	61,6	-0,60716	1,056579	-17,8526
7	3,36	53,78	-0,46531	1,160474	-20,8474

4.4.1 CORREÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DESCRITAS DO MÉTODO UPHOLE

Tabela 39. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 1m.

Furo 1					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,52	246,04	-0,0879	-0,03906	-0,99536
2	11,04	228,46	-0,23124	-0,16605	-1,97686
3	18,08	331,15	-0,38098	0,105775	-2,92748
4	12,75	310,8	-0,54805	0,249983	-3,90282
5	19,49	316,73	-0,77674	0,492918	-4,84552
6	29,25	68,98	-0,32063	0,668184	-5,71802
7	11,04	194,58	-0,36884	0,482856	-6,69951
8	3,08	82,6	-0,31556	0,489776	-7,69807
9	#	#	#	#	#
...	...	...	...	...	...
19	#	#	#	#	#

Tabela 40. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 2m.

Furo 2					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,08	323,97	-0,10417	0,143217	-1,99214
2	16,9	317,33	-0,49823	0,570706	-3,90577
3	20,25	308,52	-1,03983	1,001821	-5,78215
4	10,84	269,51	-1,41595	0,998604	-7,74647
5	#	#	#	#	#
...	...	...	...	...	...
10	#	#	#	#	#

Tabela 41. Correção dos resultados obtidos no intervalo de 3m.

Furo 3					
Informação #	Ângulo	Azimute	ΔX	ΔY	ΔZ
0			0	0	0
1	5,16	334,12	-0,11777	0,242752	-2,98784
2	12,03	315,78	-0,55384	0,690864	-5,92196
3	10,82	285,34	-1,09695	0,839849	-8,86862
4	#	#	#	#	#

...	...	...	...	...	...
7	#	#	#	#	#

4.5 COMPARAÇÃO DE CORDADA COM O AFASTAMENTO DO DESVIOMETRO

Dadas as características do local de instalação, o vão de uma escada em que o tubo foi suportado sobre um dos lados da escada e respetivo corrimão, podemos simplificar o perfil geométrico do tubo, supondo-o suportado por um plano vertical. Esta simplificação permite-nos ignorar uma das componentes horizontais do perfil.

Esta planificação do tubo permite também medir o seu perfil de forma muito simples, recorrendo à medição do afastamento horizontal em relação à vertical da boca, a cotas/profundidades medidas segundo essa mesma vertical. A alternativa exigiria a definição de uma triangulação espacial difícil de concretizar no vão de escada de montagem.

A simplificação é aceitável no perfil do furo de referência tal como instalado, pois, este realmente pouco se afasta do seu plano conceptual de suporte. É, no entanto, limitadora por não permitir reproduzir adequadamente as mudanças de direção do furo e a sua consequência no processo de medição com o desviómetro. Optamos por também ignorar os erros de rotação da própria sonda, esta sim uma limitação importante do trabalho feito.

Assim, a comparação de perfis foi feita recorrendo à comparação dos afastamentos horizontais em cada ponto de referência, supostos colineares, para permitir a subtração do perfil de referência.

Dado que os resultados das medições não são feitos em pontos compatíveis, essencialmente à mesma cota ou profundidade, não sendo, portanto, diretamente comparáveis, foi necessário proceder à sua compatibilização prévia. Uniformizou-se os perfis criando pontos de referência a cada meio metro segundo a vertical. Os pontos de medição foram considerados como os vértices de uma linha quebrada no espaço tridimensional. Os pontos de referência foram calculados recorrendo a interpolações lineares no segmento de reta adequado.

O procedimento é simples, descrevendo cada segmento pelo seu ponto de origem (x_0, y_0, z_0) e o seu vetor de direção (a, b, c) em relação a este.

Aplica-se a expressão;

$$(x-x_0)/a = (y-y_0)/b = (z-z_0)/c \quad \text{Equação 9}$$

Em que, fazendo z tomar cada um dos valores de referência, nos permite calcular cada uma das outras coordenadas:

$$X_i = a \cdot (z_i - z_0)/c + x_0 \quad \text{Equação 10}$$

$$Y_i = b \cdot (z_i - z_0)/c + y_0 \quad \text{Equação 11}$$

O afastamento à cota z_i é obtido por:

$$A = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad \text{Equação 12}$$

Todo este cálculo está feito na folha de cálculo anexa Controle de Desvio por Acelerómetro. A designação dos furos de cada ensaio de laboratório encontra-se no Anexo lista de ensaios para melhor interpretação dos gráficos de comparação e variação de cordada.

4.5.1 COMPARAÇÃO DE CORDADA E A VARIAÇÃO DO ERROS

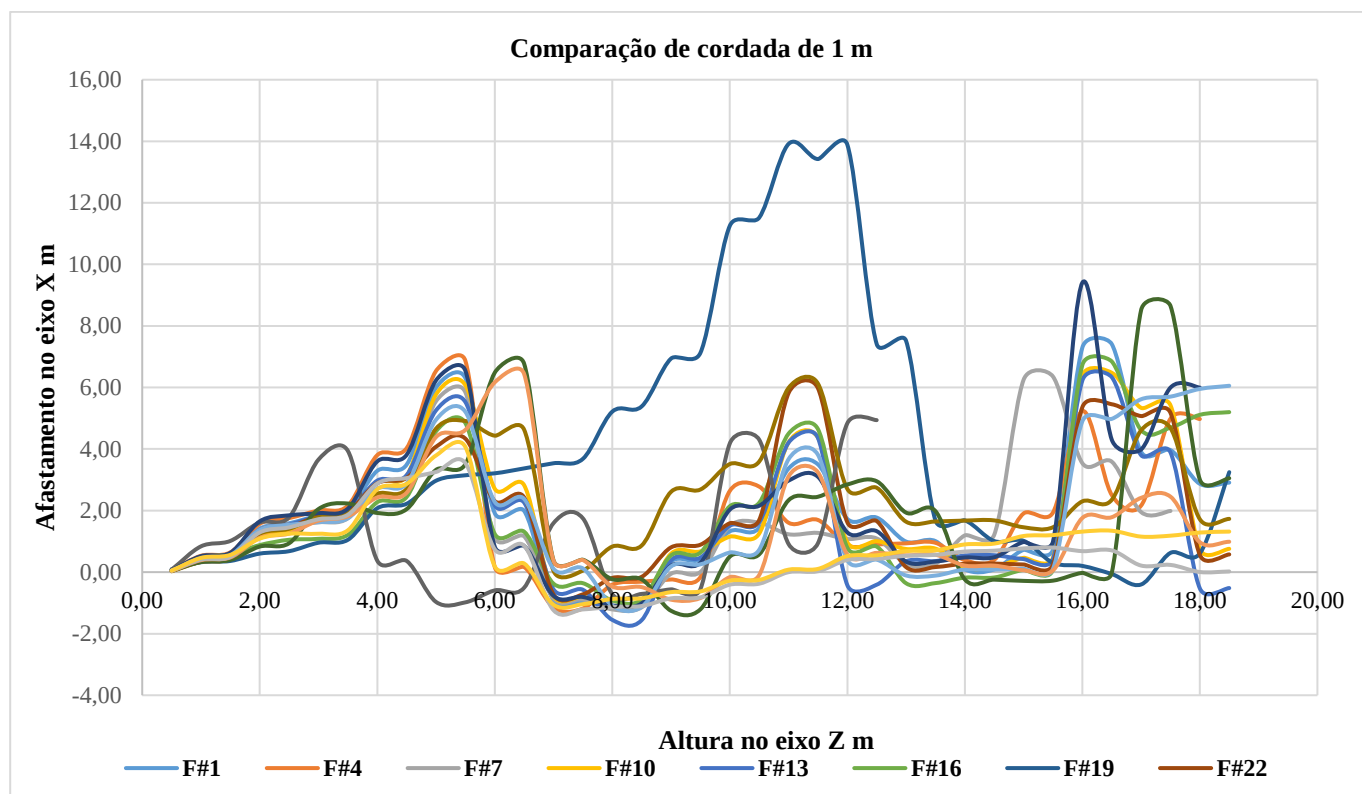


Figura 51. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 1m método Descendente e Ascendente.

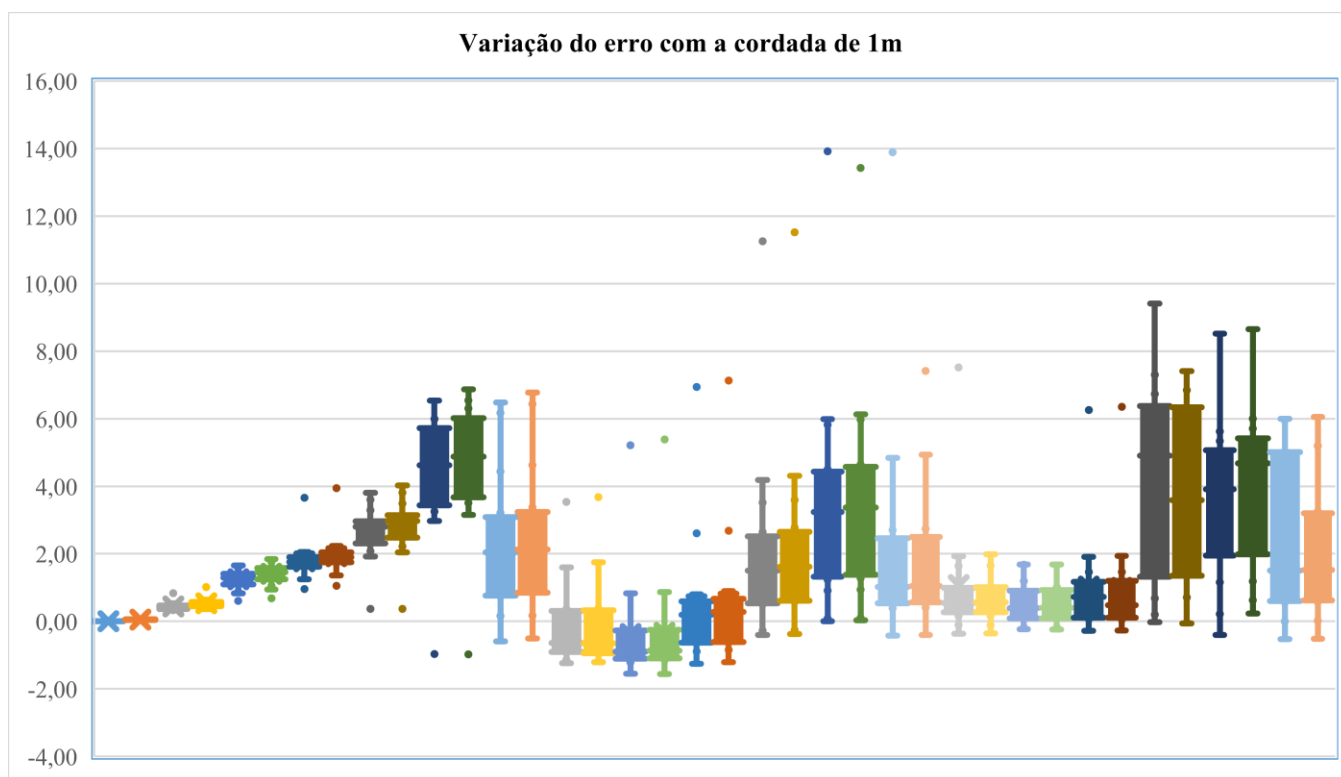


Figura 52. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 1m do método Descendente e Ascendente.

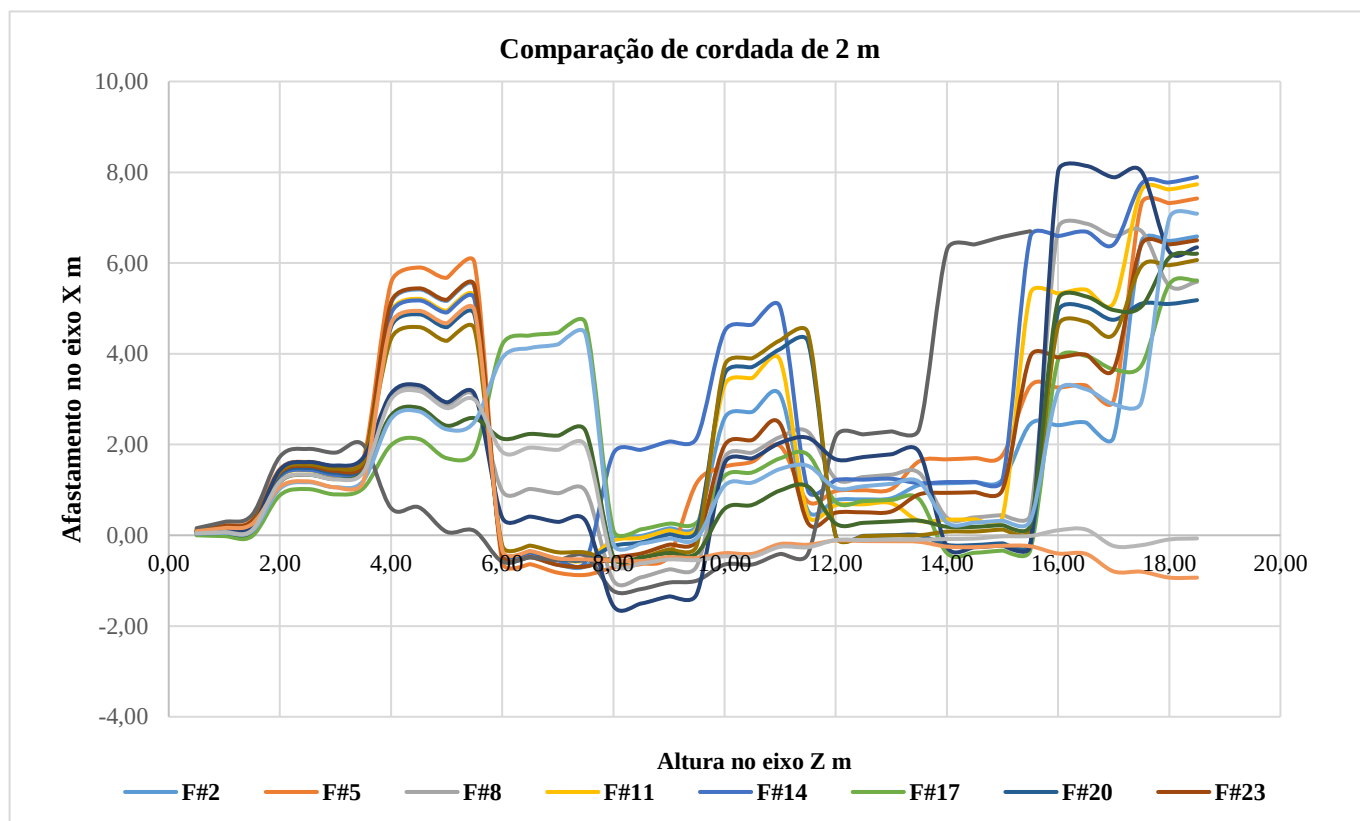


Figura 53. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 2m método Descendente e Ascendente.

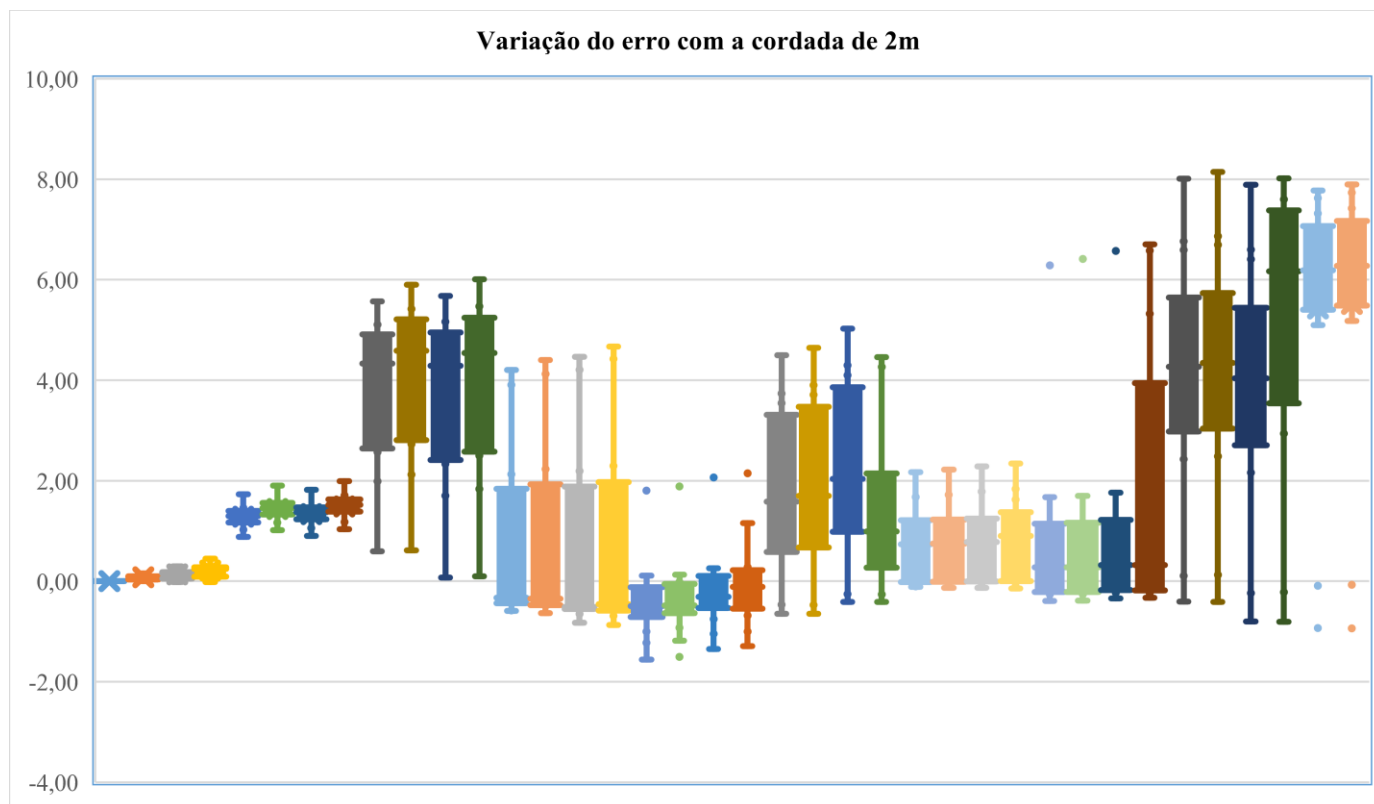


Figura 54. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 2m do método Descendente e Ascendente.

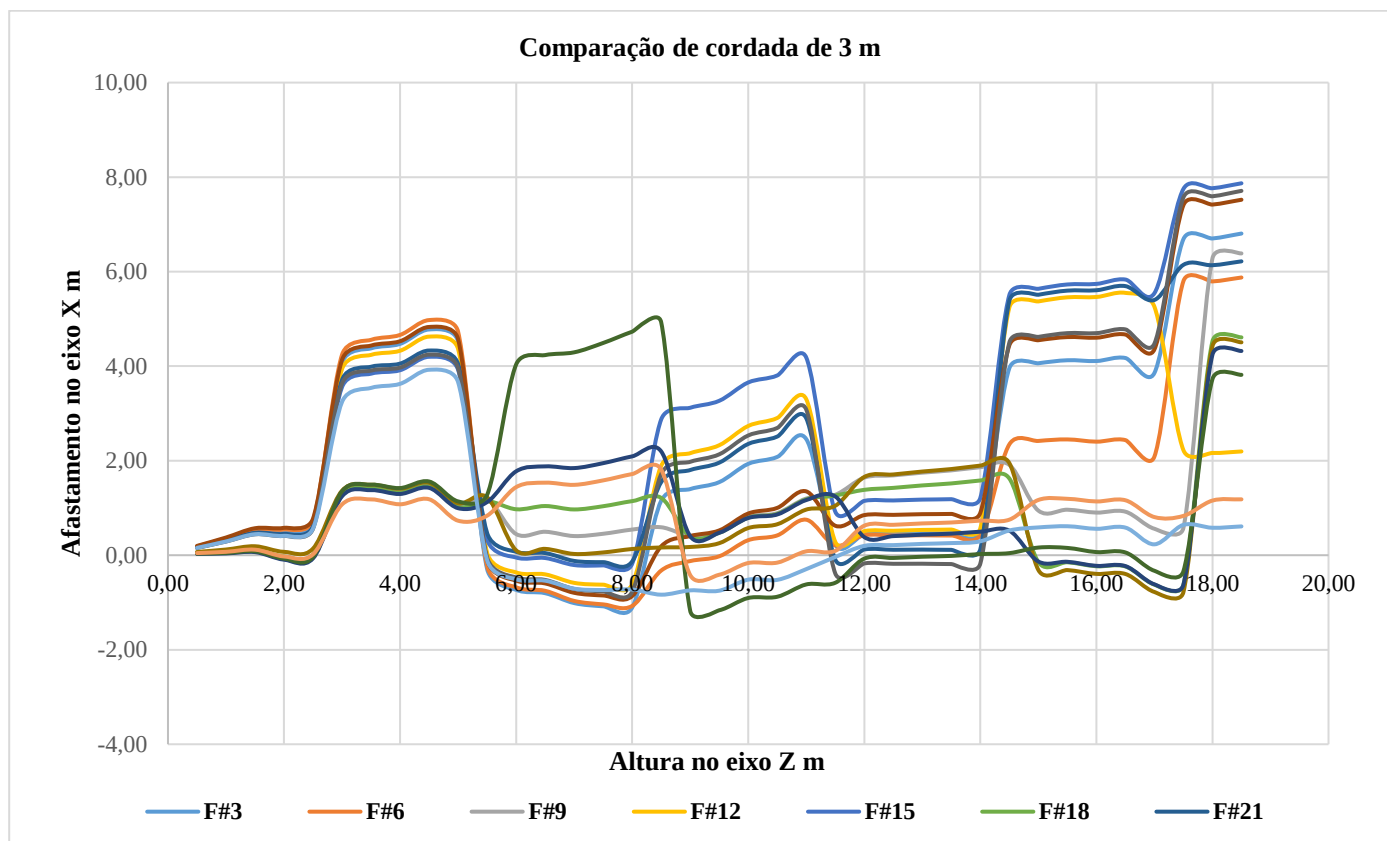


Figura 55. Comparações de cordada em metros envolvendo o passo 3m método Descendente e Ascendente.

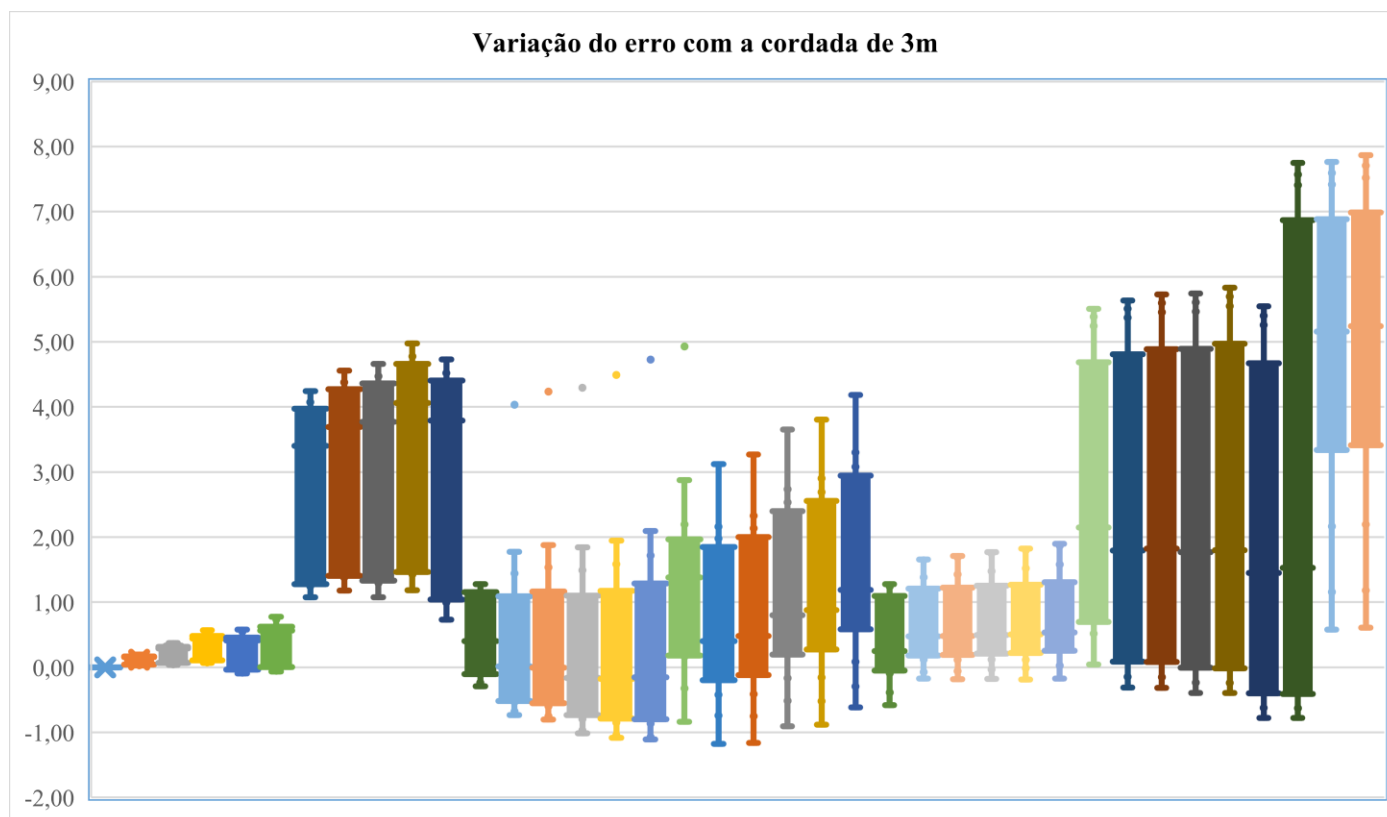


Figura 56. Comparação da variação do erro a cordada nos passos de 3m do método Descendente e Ascendente.

4.5.2 COMPARAÇÃO DO FURO REFERÊNCIA SEM MODIFICAÇÃO DE PASSOS DESCENDENTES

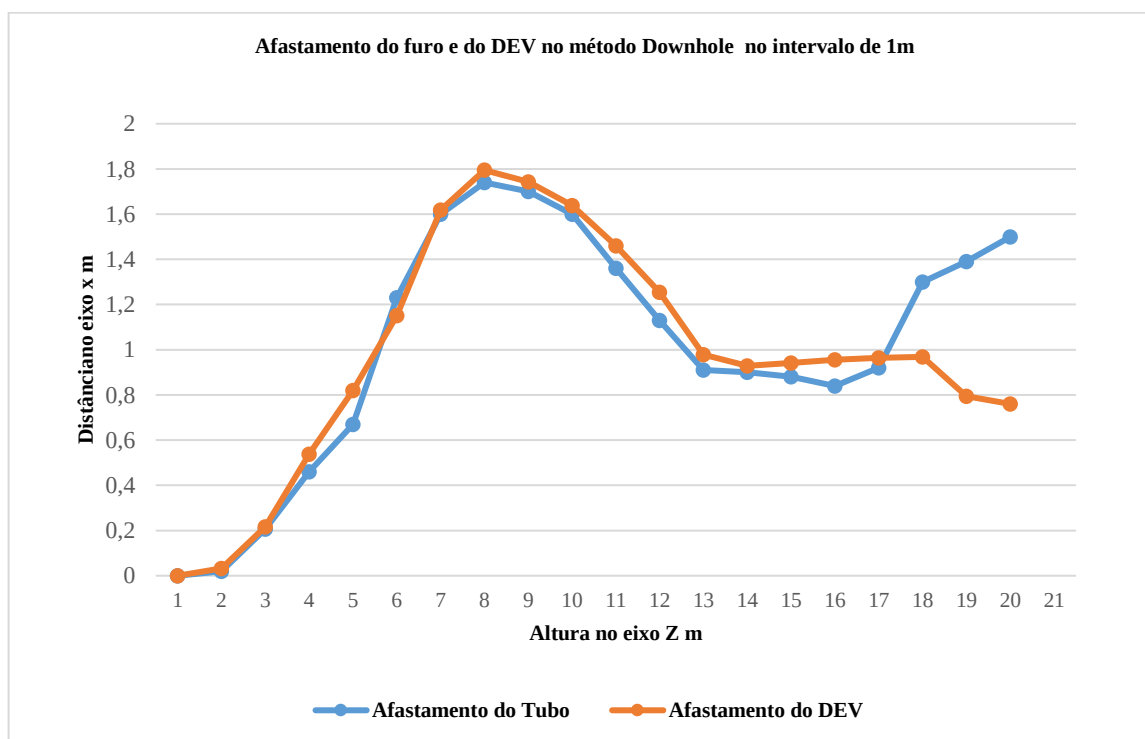


Figura 57. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 1m no método Downhole.

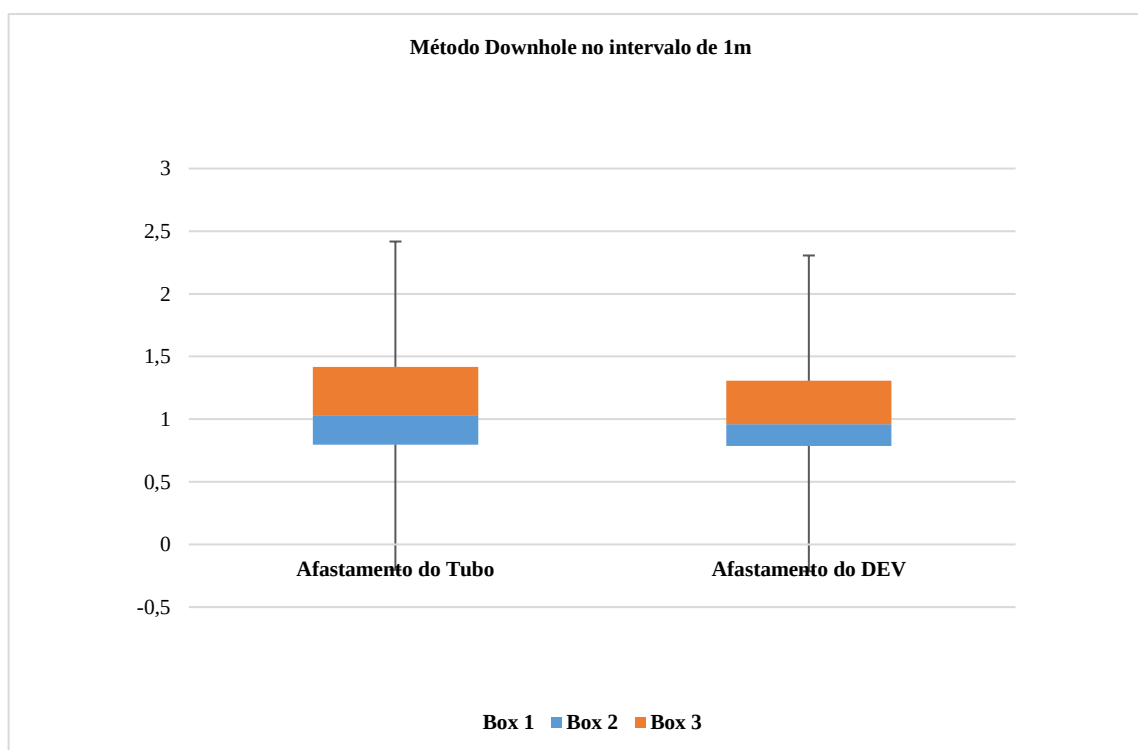


Figura 58. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 1m.

Tabela 42. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 1m.

Método Downhole 1m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,019	0,03288469	-0,99647826	-0,01388469
2	0,207	0,216868	-1,9788308	-0,009868
3	0,46	0,537977	-2,9254239	-0,077977
4	0,67	0,8190791	-3,885033	-0,1490791
5	1,23	1,1508348	-4,8269734	0,0791652
6	1,6	1,6178786	-5,7064557	-0,0178786
7	1,74	1,7946606	-6,690372	-0,0546606
8	1,7	1,7431929	-7,6874514	-0,0431929
9	1,6	1,6378523	-8,681583	-0,0378523
10	1,36	1,4597306	-9,664099	-0,0997306
11	1,13	1,2550983	-10,640546	-0,1250983
12	0,91	0,97887	-11,597105	-0,06887
13	0,9	0,9291313	-12,59578	-0,0291313
14	0,88	0,94098127	-13,595706	-0,06098127
15	0,84	0,9559144	-14,595541	-0,1159144
16	0,92	0,96422684	-15,595474	-0,04422684
17	1,3	0,96787626	-16,572445	0,33212374
18	1,39	0,7941529	-17,55695	0,5958471
19	1,5	0,7596723	-18,556309	0,7403277

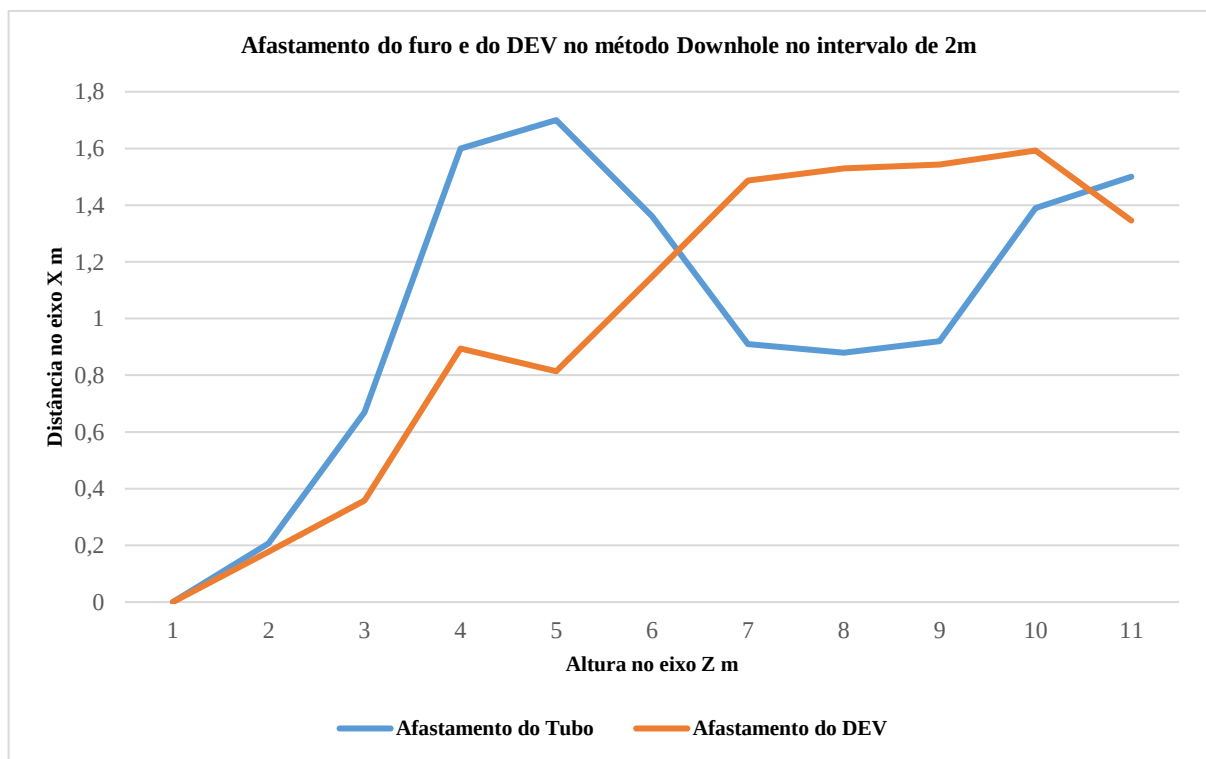


Figura 59. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 2m no método Downhole.

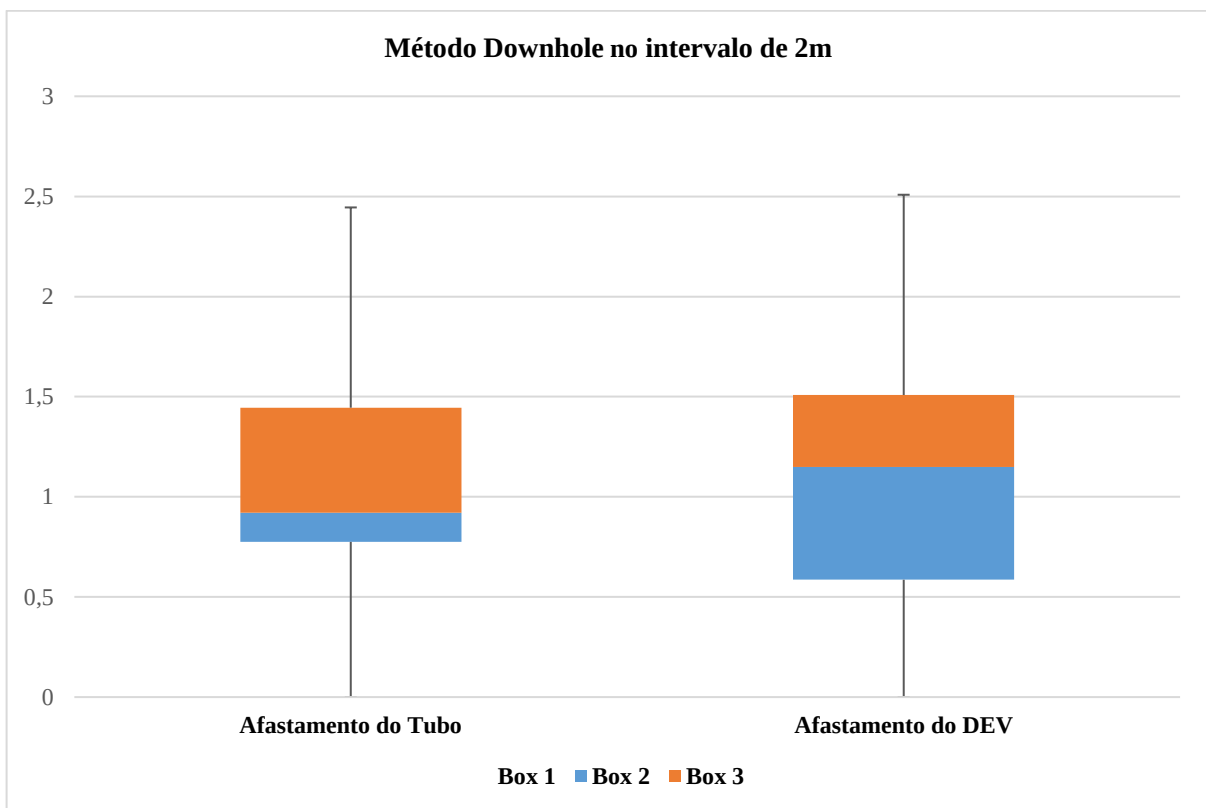


Figura 60. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 2m.

Tabela 43. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 2m.

Método Downhole 2m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,207	0,17731075	-1,9665098	0,02968925
2	0,67	0,3585759	-3,8882616	0,3114241
3	1,6	0,89467204	-5,611697	0,70532796
4	1,7	0,8135852	-7,6079454	0,8864148
5	1,36	1,1486727	-9,574391	0,2113273
6	0,91	1,486773	-11,482663	-0,576773
7	0,88	1,5301174	-13,482092	-0,6501174
8	0,92	1,5436674	-15,482006	-0,6236674
9	1,39	1,5926485	-17,443985	-0,2026485
10	1,5	1,34523	-19,387413	0,15477

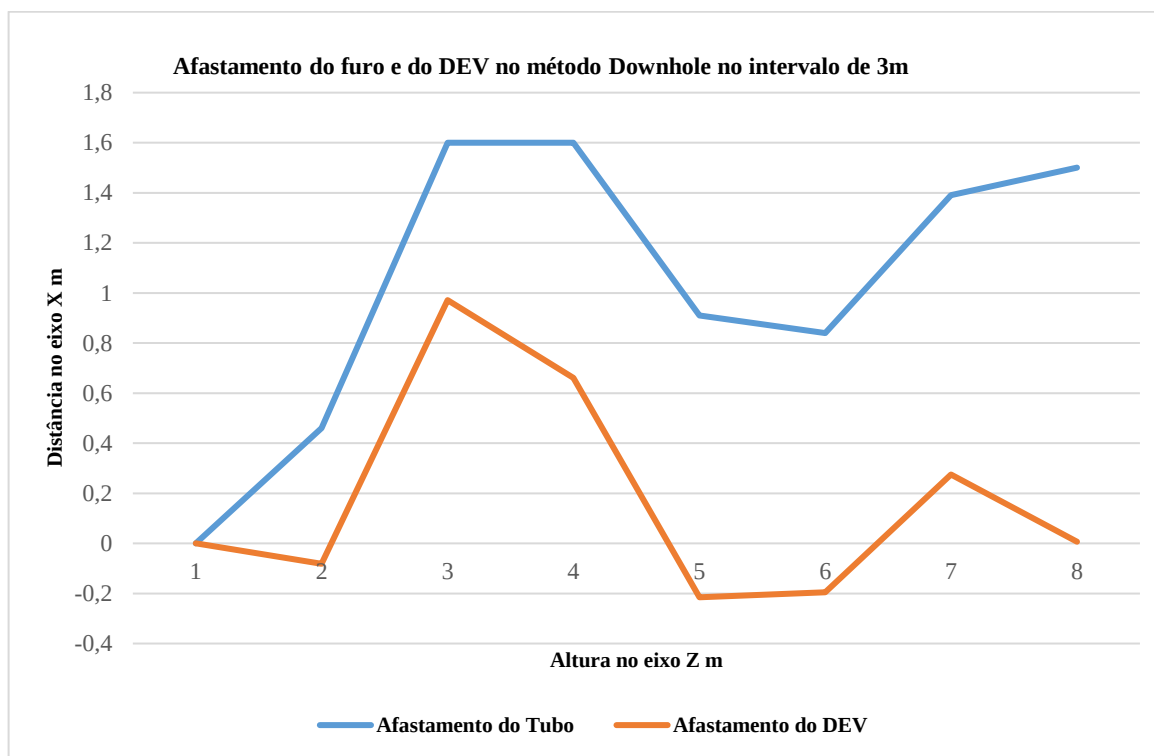


Figura 61. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 3m no método Downhole.

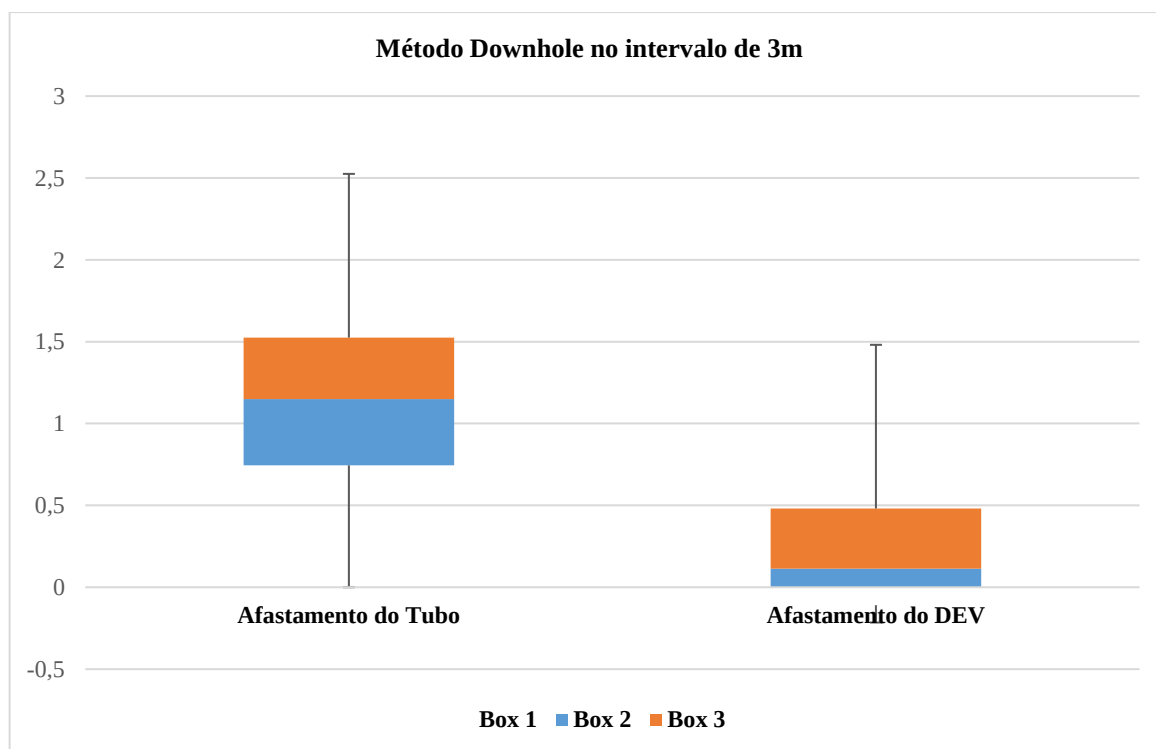


Figura 62. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Downhole no intervalo de 3m.

Tabela 44. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 3m.

Método Downhole 3m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,46	-0,0809613	-2,854944	0,5409613
2	1,6	0,9713287	-5,456678	0,6286713
3	1,6	0,66074103	-8,43833	0,93925897
4	0,91	-0,21537061	-11,300424	1,12537061
5	0,84	-0,19553512	-14,29992	1,03553512
6	1,39	0,2747554	-17,247759	1,1152446
7	1,5	0,006727732	-20,183825	1,493272268

4.5.3 COMPARAÇÃO DO FURO REFERÊNCIA SEM MODIFICAÇÃO DE PASSOS ASCENDENTES

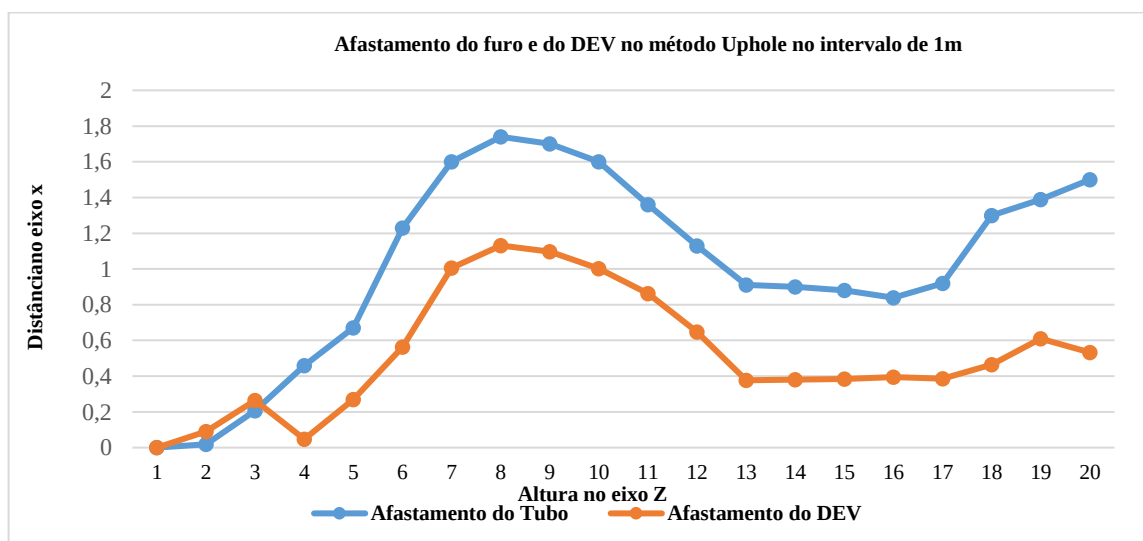


Figura 63. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 1m no método Uphole.

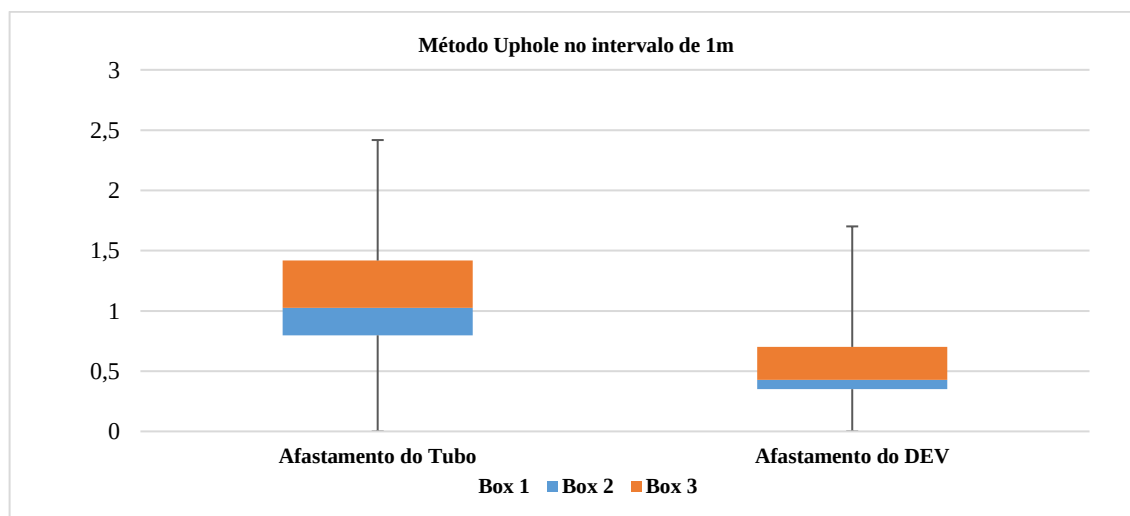


Figura 64. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 1m.

Tabela 45. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 1m.

Método Uphole 1m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,019	0,090282634	-0,99591595	-0,071282634
2	0,207	0,26419708	-1,975068	-0,05719708
3	0,46	0,048012465	-2,9205866	0,411987535
4	0,67	0,26908427	-3,8897746	0,40091573
5	1,23	0,56402725	-4,8374314	0,66597275
6	1,6	1,005169	-5,7214417	0,594831
7	1,74	1,1313465	-6,7100673	0,6086535
8	1,7	1,0976365	-7,708061	0,6023635
9	1,6	1,0021119	-8,703441	0,5978881
10	1,36	0,86249423	-9,687138	0,49750577
11	1,13	0,6473759	-10,662902	0,4826241
12	0,91	0,3776386	-11,622511	0,5323614
13	0,9	0,38071483	-12,619205	0,51928517
14	0,88	0,38331962	-13,619011	0,49668038
15	0,84	0,3942399	-14,618951	0,4457601
16	0,92	0,38521445	-15,618612	0,53478555
17	1,3	0,46387768	-16,592865	0,83612232
18	1,39	0,6093356	-17,580526	0,7806644
19	1,5	0,5322835	-18,565212	0,9677165

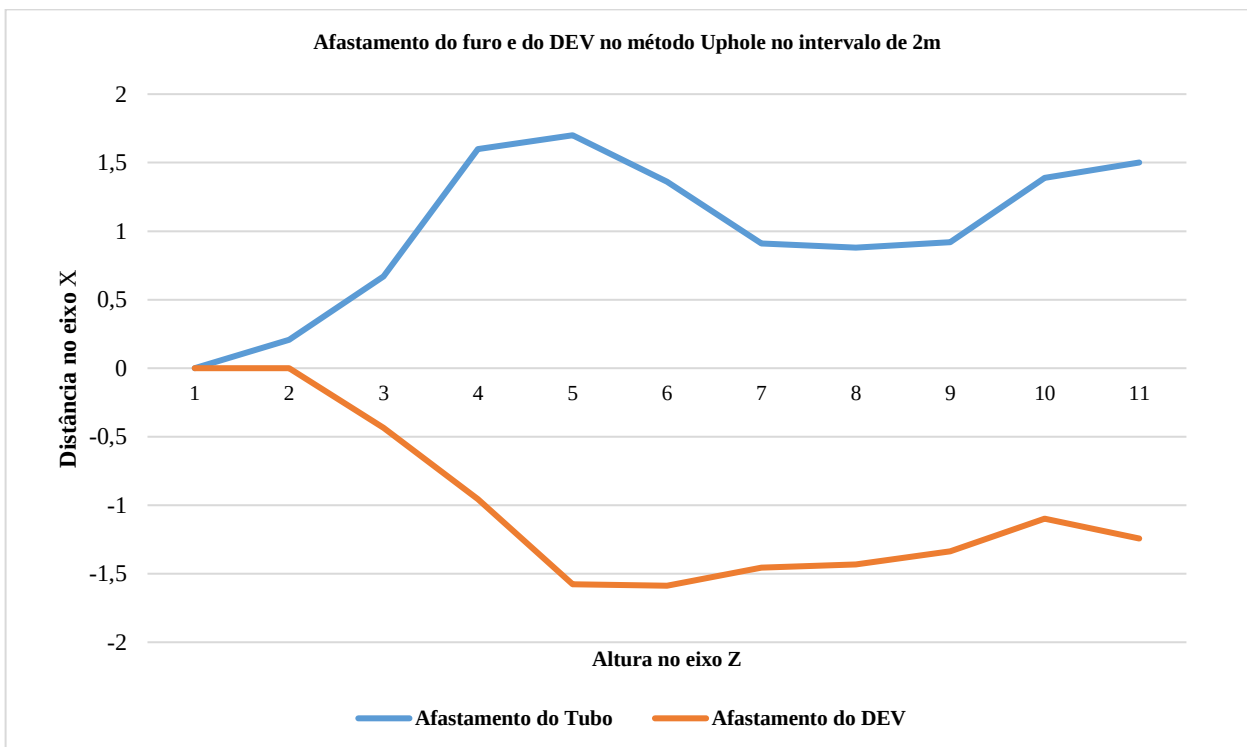


Figura 65. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 2m no método Uphole.

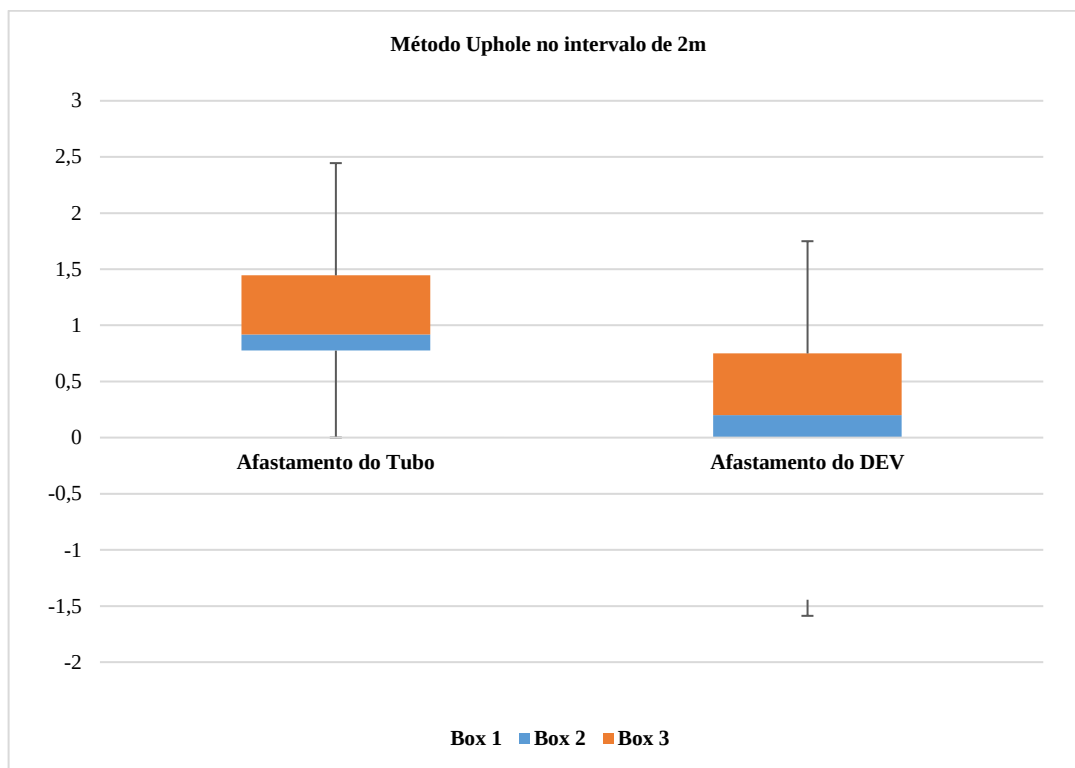


Figura 66. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 2m.

Tabela 46. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 2m.

Método Uphole 2m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,207	0	-2	0,207
2	0,67	-0,433951	-3,9298499	1,103951
3	1,6	-0,9550478	-5,8588724	2,5550478
4	1,7	-1,577923	-7,71324	3,277923
5	1,36	-1,587423	-9,703763	2,947423
6	0,91	-1,45649	-11,67277	2,36649
7	0,88	-1,4315399	-13,66891	2,3115399
8	0,92	-1,3354117	-15,666077	2,2554117
9	1,39	-1,0982347	-17,636415	2,4882347
10	1,5	-1,2431278	-19,607998	2,7431278

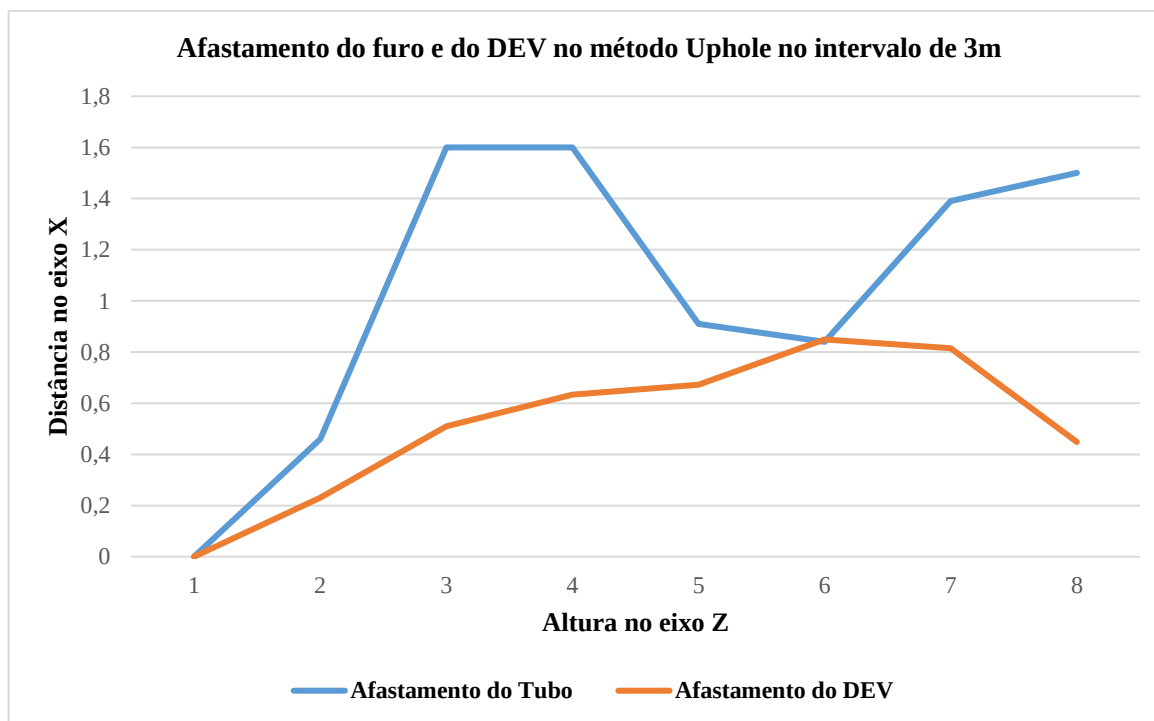


Figura 67. Comparação do afastamento do furo com o trajeto conhecido com o trajeto do DEV num intervalo de 3m no método Uphole.

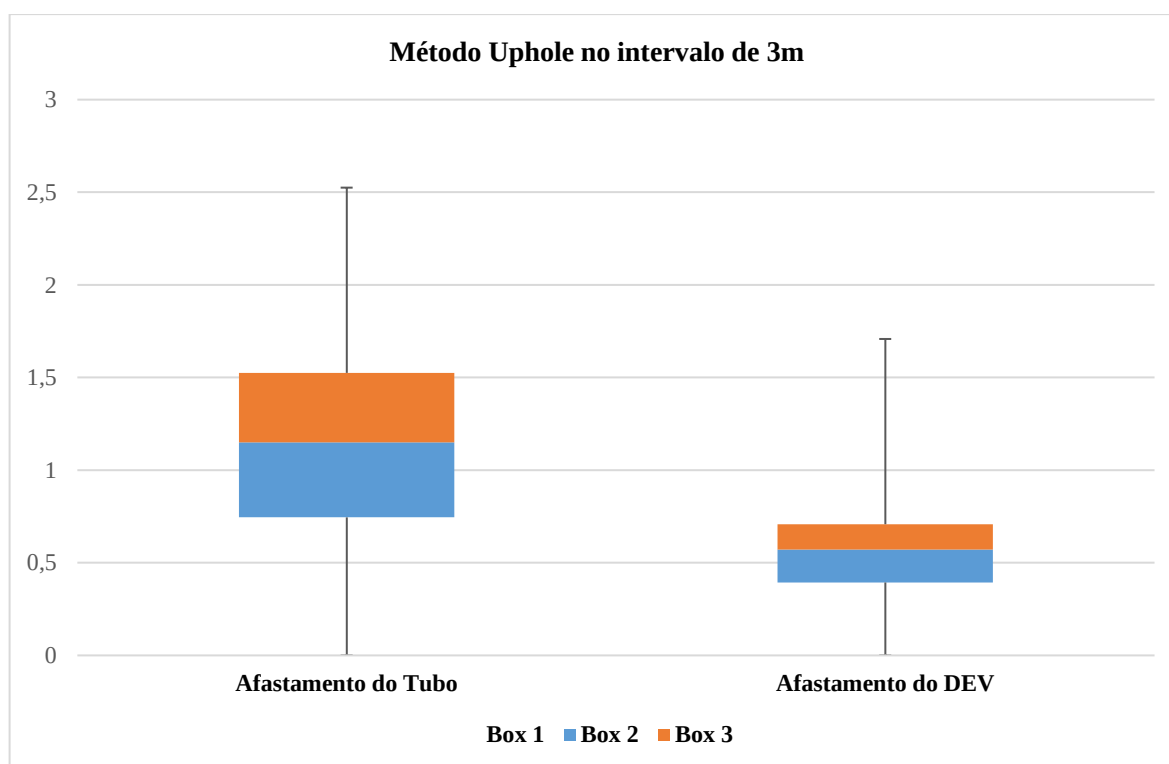


Figura 68. Comparação analítica do afastamento do tubo e do DEV no método Uphole no intervalo de 3m.

Tabela 47. Diferença de afastamento do DEV com a geometria do tubo no intervalo de 3m.

Método Uphole 3m				
z	Afastamento do Tubo	Afastamento do DEV	ΔZ	Diferença
0	0	0	0	0
1	0,46	0,23091567	-2,9879832	0,22908433
2	1,6	0,5102211	-5,895805	1,0897789
3	1,6	0,63375926	-8,86819	0,96624074
4	0,91	0,67245734	-11,82644	0,23754266
5	0,84	0,8492655	-14,813903	-0,0092655
6	1,39	0,8147968	-17,813704	0,5752032
7	1,5	0,44783148	-20,771166	1,05216852

RESUMO DO CAPÍTULO 4

Com um nível de incerteza fez-se medições aleatórias variando os intervalos de medidas na recolha de nos intervalos de 1 (1, 2 e 3m), 2 (2, 3 e 1m) e 3 (3, 1 e 2m), para ambos sentidos. Onde pode-se perceber que o resultado apresentado não diz a posição ou trajeto percorrido pelo desviómetro ao longo do furo com trajeto conhecido. Para aprofundar mais o estudo dos erros do equipamento, trajetórias descritas pela atitude a medida que a sonda ascende e descende ao longo do furo.

Adotou-se os métodos proposto, no método *Downhole* a sonda desceu até 8 metros de profundidade, onde parei a mesma e continuei o processo de medição de 1,2 e 3 metros para saber se o equipamento é capaz de descrever a sua trajetória como vemos nas Figuras 45, 46 e 47, nas Tabelas 30, 31 e 32, o mesmo método se adotou no método *Uphole* onde a sonda ascende do fundo do furo até a boca do furo, a sonda desceu até 8 metros de profundidade, onde a sonda foi parada novamente e continuei o processo de medição de 1,2 e 3 metros para saber se o equipamento é capaz de descrever a sua trajetória como vemos nas Figuras 48, 49 e 50, nas Tabelas 36, 37 e 38, os erros descritos pelo trajeto do equipamento foram corridos até a profundidade em que a sonda se deslocou no ponto 4.3.1 na correção das Tabelas 33 ,34 e 35 e ponto 4.4.1 na correção das Tabelas 39 ,40 e 41 deste capítulo. Mais uma vez se pode ver a importância do sensor de aceleração para o cálculo da aceleração do sistema e a descrição do trajeto do equipamento dentro do furo.

Durante os cálculos se fez uma interpolação dos resultados obtidos com a modificação dos passos com o furo de referência nas Figuras 51, 52, 53, 54, 55, 56 onde se observou que a mudança de passo nos métodos ascendente e descendente no passo 1, 2 e 3m o desviómetro apresentou muitas variações de erros nas curvas do furo e compensa os mesmos erros onde o furo não apresenta ondulações, podemos também observar nas figuras de comparação do desviómetro onde o equipamento não descreve o mesmo trajeto que o furo de referência para a perfilagem do furo.

Como podemos observar na Tabela 42 e Figura 57, nos primeiros metros não acontece afastamentos significativos entre o equipamento e tubo, a medida que a sonda vai no sentido descendente no método *Downhole* com intervalos de medida de 1m, acontece afastamentos ligeiros a partir dos 17 metros de profundidade acontece um afastamento muito significativo entre o tubo e o desviómetro. O que me faz chegar a conclusão de que o equipamento no método *Downhole* é recomendado para furos até 17 metros de profundidade. No método *Uphole* ou ascensão da sonda do fundo do furo com intervalo de medida de 1m, na Tabela 45 e Figura 63 podemos observar afastamentos significativos entre os resultados obtidos pela sonda e o distanciamento do tubo, os resultados obtidos vão reduzindo à medida que a sonda ascende ao longo do furo projetado, podemos observar que a sonda apresenta resultados fiáveis quando a mesma se encontra aos 3m de distância da boca do furo de pesquisa. Onde eu posso concluir que para o método *Uphole* é recomendado para furos com até 3,5 metros de profundidade.

A realização da comparação do afastamento do tubo e do desviómetro foi realizado com o medir de laser, mediu se todos os ângulos do tubo desde o último piso até o piso zero num intervalo de 1m, depois utilizou a ferramenta *Solid Edge* para se projetar o percurso do tubo. A representação gráfica de caixa das Figuras 58 e 64, pode se concluir que o afastamento do tubo apresenta maior variabilidade em comparação com o afastamento do desviómetro em ambos métodos, também se observa assimetrias no afastamento do tubo e do afastamento do desviómetro para ambos métodos no intervalo de 1m de recolha de dados.

CONCLUSÕES

A perfilagem geométrica de um furo de sondagem é um processo desafiador devido as formações rochosas atravessadas e desvio que um furo perfurado pode apresentar. A criação de furo de pesquisa com as condições de um furo real foi um processo que foi um dos fatores fundamentais para o avanço do estudo do rigor e trajeto do furo utilizando o equipamento que mede o desvio o desviómetro.

O trajeto do furo e o trajeto percorrido pela sonda para obter a geometria do furo não apresenta resultados satisfatórios desde o momento que a mesma é submetida a erros que é comum em um processo de medição. Com o aumento e redução dos intervalos definidos pelo equipamento a mesma não reconhece os erros o que me leva a concluir que os resultados apresentados após a perfilagem não são fiáveis em comparação aos valores de intervalos utilizados durante o processo de recolha de dados, visto que o desviómetro apenas reconhece intervalos de 1, 2 e 3m, o que significa que valores como 0,80 m o equipamento reconhece 1m, 1,80 como 2 metros, 2,80 como 3m, e valores como 1,2 reconhece como 1, 2,20 como 2 e 3,20 como 3m de profundidade, o que não coincide com os valores de corda medidos pelo operador.

Outro inconveniente é o simples fato da sonda não reconhecer variação nos intervalos de medida, porque a mesma só reconhece os valores padronizados pela aplicação antes da colheita dos resultados. Visto que uma das problemáticas do desenvolvimento desta tese é o estudo do rigor de medição e o trajeto do equipamento no furo, não parece normal mais por curiosidade fez-se medições com uma variações de intervalos de passos de amostragem, no intervalo de 1m fez-se 1, 2 e 3m, no intervalo de 2m fez-se 2, 3 e 1, e no intervalo de 3m fez-se 3, 1 e 2m, infelizmente o equipamento só reconheceu o valor do *input* introduzido antes da perfilagem e não os valores de corda do operador, onde mais uma vez os resultados não estavam de acordo a variação dos intervalos medidos.

O desviómetro foi projetado para furos de pedreiras e minas que normalmente não passam de 8 a 10m de profundidades, onde eu pode verificar para furos de 19m como é o caso do furo de estudo o equipamento apresenta uma desvantagem porque o mesmo funciona em sistema de prontidão para profundidades de 4m até o fundo do furo, aproveitando está desvantagem fez-se a recolha de amostras com muito rigor dos métodos propostos, sonda desviómetro só desceu até 8 metros de profundidade e a sonda gerou resultados para ambos métodos até o fundo do furo, onde mais uma vez os resultados não coincidem com o trajeto percorrido pela metros de corda dado pelo operador e pelo trajeto apresentado pela sonda após a perfilagem geométrica do furo.

Uma observação dos gráficos mostra que o erro:

1. Cresce com a profundidade ou comprimento do furo;
2. Cresce com a inclinação do furo;
3. Cresce com a variação da inclinação, especialmente com a inversão da curvatura;
4. Cresce com o abaixamento da taxa de amostragem;
5. Cresce com a perda de rigor operativo.

Este comportamento era o esperado, tendo em conta a ordem do método de recuperação da trajetória usado. Um aspeto relevante do estudo do trajeto do furo e atitude do equipamento ao longo do furo foi a comparação do deslocamento e a comparação analítica do furo e da sonda desviómetro, onde pode concluir

que o equipamento apresenta um descolamento similar ao do tubo no intervalo de 1m no método *Downhole* e no *Uphole* apresenta simetria mais com afastamentos significativos.

A utilização do desviómetro para cálculos de desvio de furo apresentou alguns inconvenientes que podem não ser levados em conta porque são erros não muitos significativos no intervalo de 1m, comparando com os intervalos de 2 e 3m que apresentam muitas diferenças no trajeto conhecido do furo e o trajeto da sonda. A análise dos resultados mostra que no método *Downhole* o desviómetro tem eficiência até os 17 metros de profundidade, o método *Uphole* tem uma eficiência até os 3,5 metros de profundidade.

Sugere-se a comparação dos resultados do desviómetro com outra sonda desviómetro ou com um outro equipamento de sondagem capaz de medir o desvio do furo. Recomenda-se também a implementação do sensor de aceleração no desviómetro para a sonda ser capaz de calcular os metros de corda dados pelo operador e calcular a aceleração do equipamento a medida que o desviómetro se movimenta ao longo do furo de pesquisa, e o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de verificar a variação dos intervalos de medida para evitar os erros de corda dado pelo operador e o desenvolvimento de outra ferramenta para o equipamento não funcionar em prontidão aos 4 metros de profundidade e fazer a perfilagem do furo no fundo do furo e não na boca do furo perfurado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida A. (2021). Implementação de normativas de segurança e otimização de processos de fabricação do equipamento desviómetro-O-PITDEV. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Ambiente.
- API, Recommended Practices for Core Analysis (2º ed.). (1998). American Petroleum Institute
- Bhandari, S. (1997). Engineering Rock-Blasting Operations. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema
- Bourgoyne Jr., A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., & Young Jr., F. S. (1986). Applied Drilling Engineering. Richardson, Tx, USA: Society of Petroleum Engineering.
- 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).
- Bulant, P., Eisner, L., Pšenčík, I., & Le Calvez, J. (2007). Importance of Borehole Deviation Surveys for Monitoring of Hydraulic. Geophysical Prospecting.
- Chipavela A. (2013). Análise e Discussão das Operações de Perfuração e Completação em Poços Petrolíferos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas.
- Fernberg, H. (2008). Surface Drilling - The Master of Productivity. UK: Atlas Copco.
- Frank G. (2021). Desenvolvimento de um desviómetro para avaliação geométrica de furos e sua aplicação na mineração. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Ambiente.
- Gatlin, C. (1960). Petroleum Engineering, Drilling and well Completions. Englewoodwood Clifs, N.J., USA: Prentice-Hall.
- Giles, E., & Roller, E. (2012). Fly rock Elimination Program Part 2: Profilers and Bore tracks. ISEE: International Society of Explosives Engineers.
- Girão Nery, (2004). Perfilagem Geofísica em Poço Aberto. Fundamentos básicos com ênfase em petróleo.
- Gonçalves T. (2017). A análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na deteção indireta de anomalias de operações de perfuração. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia de Minas e Geo-Ambiente.
- Hall, K., Worsey, T., & Rouse, N. Methods to Quantify Drilling Accuracy. The Journal of Explosives Engineering.
- Hardrockdrills. Borehole Drilling Machines. How Drilling Tools Selection Impacts Borehole Quality. Shanghai, China.<http://hardrockdrills.blogspot.com/>
- Harris, J. E. Drill Accuracy. The Journal of Explosives Engineering, 16(2).
- Hendricks, C., Scoble, M., & Boudreault, F. (fevereiro de 1994). A Study of Blasthole Drilling Accuracy: Monitoring Instrumentation and Practice. CIM Bulletin.
- Jimeno, C. L. (2017). Manual de Perforación, Explosivos y Voladura.
- 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.

- Kangwa, S., & Sinkala, T. (2004). Hole Deviations in Mining Operations: Types, Sources and Effects. *The Journal of Explosives Engineering*, 20(3).
- Kearey P., Brooks M. and Hill I., 2002: *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3rd edition. Blackwell Science Ltd.
- Kearey P., Hill I. and Brooks M. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (Ed). Tj International Ltd., Padstow, Cornwall, United Kingdom.
- Leite, F. S. (2013). *Desarrollo de una Herramienta de diseño de Túneles*.
- Lourenço G. (2018). *Estudo das trajetórias teóricas de veículos comandadas por parâmetros cinemáticos aferidores da comodidade e segurança da circulação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil.
- Luciano Fonseca (2014). *Avaliação de Métodos de Perfilagem Geofísica na Pesquisa de Minério de ferro – Estudo de Caso: Definição de Contatos Litológicos na Mina de Capanema, MG*.
- 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. In 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. S., Brito, P., & Frank, G. (2018). Borehole Deviation Control Using Electronics: An Euler's Approach. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951– 952.
- Orpen, J. (2007). *Introducing the borehole surveying benchmarking project*. Institute of Mine Surveyors of South Africa.
- 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.
- Ribeiro, P. R. (2000). *Engenharia de Perfuração*. Departamento de Engenharia de Petróleo. Brasil: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- 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, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto.
- Sandhaus, B., & McClure, R. (2012). *Fly rock Elimination Program Part 3: 3D Bench Photogrammetry*. ISEE: International Society of Explosives Engineers.
- SANDVIK. (2001). *Curso ministrado pela Sandvik/Tamrock: "Quarry Academy"*, São Paulo/SP.
- 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.
- Tabacniks, M. H. (2009). Conceitos Básicos da Teoria de Erros. São Paulo: Instituto de Física da Universidade de São Paulo.
- Thomas, J. E. (2001). Fundamentos da Engenharia de Petróleo (2ª ed.). Rio de Janeiro, Brasil: Petrobras.
- VIM (2012). Vocabulário Internacional de Metrologia-Conceitos fundamentais e gerais e termos associados.
- Williamson, H. (2000). Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling. SPE Drilling & Completion, 15(04). doi: <https://doi.org/10.2118/67616-PA>.

ANEXO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO REALIZADOS

- F# – corresponde aa cada furo de ensaio realizado no laboratório.
- F#(n) – designação de cada medição registada em folha propria.
- GD# – designação utilizada para os gráficos de comparação de cada passo de ensaio de laboratório.
- Folha – corresponde ao cálculo de cada ensaio experimental na folha de Excel.
- N – designa-se ao número dos furos de ensaios.
- Direção – corresponde a direção em que o ensaio foi feito (descendente/ascendente).
- Operação – designação no procedimento em que o ensaio foi realizado (experimental, norma e erro).
- Passo – designação do comprimento de cordada 1,2 e 3m para a realização do ensaio.

F#	Folha	N	Operação	Direção	Passo
0	'F#0'!	0	Referência	Manual	1
1	'F#1'!	1	Experimental	Descendente	1
2	'F#2'!	2	Experimental	Descendente	2
3	'F#3'!	3	Experimental	Descendente	3
4	'F#4'!	4	Experimental	Descendente	1
5	'F#5'!	5	Experimental	Descendente	2
6	'F#6'!	6	Experimental	Descendente	3
7	'F#7'!	1	Experimental	Descendente	1
8	'F#8'!	2	Experimental	Descendente	2
9	'F#9'!	3	Experimental	Descendente	3
10	'F#10'!	4	Experimental	Descendente	1
11	'F#11'!	5	Experimental	Descendente	2
12	'F#12'!	6	Experimental	Descendente	3
13	'F#13'!	1	Normal	Descendente	1
14	'F#14'!	2	Normal	Descendente	2
15	'F#15'!	3	Normal	Descendente	3
16	'F#16'!	1	Normal	Ascendente	1
17	'F#17'!	2	Normal	Ascendente	2
18	'F#18'!	3	Normal	Ascendente	3
19	'F#19'!	1	Erro	Descendente	1
20	'F#20'!	2	Erro	Descendente	2
21	'F#21'!	3	Erro	Descendente	3
22	'F#22'!	4	Erro	Descendente	1
23	'F#23'!	5	Erro	Descendente	2
24	'F#24'!	6	Erro	Descendente	3
25	'F#25'!	7	Erro	Descendente	1
26	'F#26'!	8	Erro	Descendente	2
27	'F#27'!	9	Erro	Descendente	1
28	'F#28'!	10	Erro	Descendente	1
29	'F#29'!	11	Erro	Descendente	2
30	'F#30'!	12	Erro	Descendente	3

31	'F#31'!	1	Erro	Ascendente	1
32	'F#32'!	2	Erro	Ascendente	2
33	'F#33'!	3	Erro	Ascendente	3
34	'F#34'!	4	Erro	Ascendente	1
35	'F#35'!	5	Erro	Ascendente	2
36	'F#36'!	6	Erro	Ascendente	3
37	'F#37'!	7	Erro	Ascendente	1
38	'F#38'!	8	Erro	Ascendente	2
39	'F#39'!	9	Erro	Ascendente	3
40	'F#40'!	1	Erro	Descendente	1
41	'F#41'!	2	Erro	Descendente	2
42	'F#42'!	3	Erro	Descendente	3
43	'F#43'!	1	Erro	Ascendente	1
44	'F#44'!	2	Erro	Ascendente	2
45	'F#45'!	3	Erro	Ascendente	3
46	'F#46'!	1	Erro	Descendente	1
47	'F#47'!	2	Erro	Descendente	2
48	'F#48'!	3	Erro	Descendente	3
49	'F#49'!	1	Erro	Ascendente	1
50	'F#50'!	2	Erro	Ascendente	2
51	'F#51'!	3	Erro	Ascendente	3