

Caracterização morfológica de cavidades de erosão em ambiente laboratorial com aplicação de geomática

Mauro Emanuel Pinheiro Silveiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(Ciclo de estudos integrados)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida
Co-orientador: Prof. Doutora Cristina Maria Sena Fael

maio de 2020

Agradecimentos

A presente dissertação não poderia ser concluída sem a ajuda de múltiplas pessoas que estiveram ao meu lado nesta longa caminhada.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Almeida e à minha coorientadora Professora Doutora Cristina Fael pelo empenho, paciência, dedicação e motivação que me transmitiram durante este período. Agradeço igualmente ao Professor Gonçalo Vieira pertencente ao IGOT da Universidade de Lisboa pela ajuda e colaboração dada relativamente ao tratamento de fotografias (fotogrametria) para a presente dissertação.

Em segundo lugar, agradeço a todos os meus Professores e colegas de curso, pois sem eles não teria chegado onde cheguei.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus amigos pela coragem que me deram durante esta etapa.

Por último, quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional e carinho que me deram pois sem eles teria ficado pelo caminho e não teria finalizado a dissertação, especialmente aos meus pais, à minha namorada, ao meu irmão, à minha sobrinha, ao meu tio Álvaro, aos meus sogros e à minha cunhada.

Resumo

Os métodos de registo de morfologia fluvial tradicionais em ambiente laboratorial limitam a quantidade e qualidade dos dados obtidos, importa assim validar métodos geomáticos recentes que, quando aplicáveis a modelos reduzidos e a este tipo de modelação, permitam incrementar o conhecimento e análise de diferentes fenómenos que, quando transpostos à escala natural, minimizam as graves consequências destes.

Nesse âmbito, o presente trabalho de dissertação visa analisar as diferenças entre os métodos de varrimento laser, medição pontual e fotogrametria na análise das características das cavidades de erosão que se desenvolvem junto de pilares de pontes. A opção por estes métodos advém de permitirem recolher um volume considerável de informação e, os mesmos, permitirem análises morfológicas inovadoras, nomeadamente os métodos de varrimento a laser e fotogrametria. No estudo, foram realizadas medições de cavidades de erosão obtidas no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas, da Universidade da Beira Interior, e através dos diferentes métodos obtidas as profundidades máximas das cavidades de erosão, a sua caracterização geométrica e volumetria. Os resultados obtidos no presente estudo referentes à profundidade máxima das cavidades de erosão e das suas dimensões planimétricas foram comparados com os valores medidos com um hidrómetro de ponta direita e uma fita métrica. Posteriormente, foram ainda comparados os perfis longitudinais e transversais e, para os métodos de varrimento a laser e fotogrametria, analisadas as diferenças na caracterização geométrica das cavidades de erosão e sua volumetria através das nuvens de pontos. Com os dados obtidos foram efetuados cálculos de parâmetros estatísticos em relação às diferenças entre métodos e foi efetuada a validação dos mesmos através do software de análise estatística.

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos apresentam desvios máximos de 15% relativamente à profundidade máxima das cavidades de erosão, e de 35% no que diz respeito às suas dimensões em planta e, relativamente ao volume erodido, as diferenças máximas entre o método de varrimento a laser e fotogramétrico são de 7%. As diferenças, principalmente as de maior valor, espelham as dificuldades de implementação dos métodos escolhidos e outros erros detetados ao longo do trabalho experimental.

Palavras-chave

Geomática; Morfologia tridimensional; Modelo experimental

Abstract

Traditional methods for recording fluvial morphology in laboratory environment limits the quantity and quality of obtained data, so it is important to validate recent geomatic methods that, when applied to reduced models and to this type of modeling, allow to increase the knowledge and analysis of different phenomena that, when transposed to a natural scale, minimize the serious consequences of these.

Considering the previous, this dissertation aims to analyze the differences between methods, laser scanning, point measurement and photogrammetry, on the analysis of the characteristics of scour holes that develop next to bridge piers. These methods were chosen because they allow to collect a considerable amount of information and also innovative morphological analysis, namely laser scanning and photogrammetry. In this study measurements were performed on scour holes developed during essays at the Laboratory of Fluvial Hydraulics and Structures, at the Universidade da Beira Interior. Maximum depths of scour holes were obtained using different methods registering the geometric characterization and volume. Results obtained in the present study referring to the maximum depth of the scour holes and their planimetric extension were compared with the values measured with a point gauge and a tape measure. Later, the longitudinal and transversal profiles were also compared and, for the laser scanning and photogrammetry methods, differences in the geometric characterization of the scour holes and its volume were analyzed using point clouds. Analysis of statistical parameters was performed on differences between methods and its validation was carried out using the statistical analysis software.

The results obtained by the different methods show maximum deviations of 15% in relation to the maximum depth of the scour holes, and 35% in terms of their measurements in plan dimensions and, in relation to the eroded volumes, the maximum differences between the laser and photogrammetric scanning methods are 7%. The differences, especially those of greater value, reflect the difficulties in implementing the chosen methods and other errors detected during the experimental work.

Keywords

Geomatic; Tridimensional morphology; Experimental modeling

Índice

Capítulo 1- Introdução.....	1
Capítulo 2- Síntese de conhecimentos	5
Secção 1- Métodos de descrição morfológica de cavidades de erosão.....	5
Subsecção 1- Métodos clássicos aplicados em ambiente laboratorial.....	5
Subsecção 2- Métodos geomáticos aplicados em ambiente laboratorial	7
Capítulo 3- Metodologia.....	21
Capítulo 4- Instalação experimental e equipamentos.....	27
Secção 1- Descrição do canal hidráulico.....	27
Secção 2- Equipamentos geomáticos	29
Subsecção 1- Varrimento a laser.....	29
Subsecção 2- Levantamento fotogramétrico.....	30
Subsecção 3- Distanciómetro laser	31
Capítulo 5- Resultados	33
Secção 1- Descrição de resultados	34
Secção 2- Resumo de resultados	37
Secção 3- Diferenciais de resultados	40
Subsecção 1- Diferenciais entre profundidades máximas das cavidades de erosão ...	40
Subsecção 2- Diferenciais entre perfis	42
Subsecção 3- Diferenças de dimensões das cavidades de erosão.....	54
Subsecção 4- Diferencial em nuvens de pontos para os métodos de varrimento a laser e fotogrametria	57
Subsecção 5- Diferencial de volumetria das cavidades de erosão.....	59
Capítulo 6- Discussão de resultados.....	61
Capítulo 7- Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	71
Referências bibliográficas	73
Apêndice	77
Apêndice A.1-Levantamentos por varrimento a laser	77
Apêndice A.1.1-Levantamentos por varrimento a laser (MDE)	95
Apêndice A.2-Método de medição pontual (distanciómetro digital laser)	113

Apêndice A.3-Método fotogramétrico.....	120
Apêndice A.3.1-Método fotogramétrico (DEM).....	127
Apêndice B.1-Comparação de perfis dos métodos de estudo.....	134
Anexo B.1.1-Gráficos de dispersão de cotas entre métodos	147
Anexo B.1.2-Histogramas de diferenças entre métodos	158
Anexo B.1.3-Gráficos de probabilidades de diferenças entre métodos.....	169
Apêndice B.1.4-Histogramas de diferenças entre métodos (correção de erro sistemático)	176
Apêndice C.1-Comparação de nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria	187

Lista de Figuras

Figura 1- Exemplo de nuvem de pontos resultante do varrimento a laser: Adaptado de Vinicius (2017). Acedido em 3 de outubro de 2019. URL: https://www.uavgeo.com	10
Figura 2- Métodos básicos de reconstrução fotogramétrica: a) Retificação de fotografias; b) Estereorestituição; c) Restituição múltipla.....	12
Figura 3- Esquema sensor ótico adaptado de Ballio e Radice (2003)	14
Figura 4- Testes de validação de método adaptado de Ballio e Radice (2003)	14
Figura 5- Caracterização esquemática das cavidades de erosão adaptado de Fael <i>et al.</i> (2004).....	15
Figura 6- Esquema laboratorial adaptado de Diab <i>et al.</i> (2010)	16
Figura 7- Câmaras utilizadas por Bouratsis <i>et al.</i> (2017).....	19
Figura 8- Desenho esquemático da rede para varrimento laser	22
Figura 9- Base de apoio adaptada para suporte à realização do método fotogramétrico ...	23
Figura 10- Sobreposição longitudinal fotogramétrica	23
Figura 11- Desenho esquemático da aplicação do método de medição pontual	24
Figura 12- Hidrómetro de ponta direita.....	25
Figura 13- Vista geral do canal de Estruturas Hidráulicas.....	27
Figura 14- Elementos constituintes do canal hidráulico: a) Entrada do canal- Tranquilizador do escoamento; b) Extremidade de jusante do canal- Comporta pendular	28
Figura 15 - Curva granulométrica adaptado de Lança (2013).....	28
Figura 16- Multiestação Leica MS50	29
Figura 17- Equipamento de apoio ao método de varrimento a laser: a) mini prisma circular; b) alvo	30
Figura 18- Máquina fotográfica Canon Eos 70D	31
Figura 19- Distanciômetro eletro-ótico laser digital	31
Figura 20- Distorção de pilar e sombras; Levantamento do Ensaio 1 pelo método de VL efetuado a montante da caixa de areia	33
Figura 21- Cavidade de erosão Ensaio 1: a) visada a montante do pilar; b) visada lateral direita do pilar	34
Figura 22- Nuvens de pontos Ensaio 1: a) VL; b) FG	35
Figura 23- Curvas de nível Ensaio 1: a) VL; b) FG	35
Figura 24- Perfil longitudinal Ensaio 1: a) VL; b) FG (m).....	36
Figura 25- Perfil transversal Ensaio 1: a) VL; b) FG (m).....	36
Figura 26- Perfis MP (distanciômetro laser): a) longitudinal; b) transversal	36
Figura 27- Ensaio 1: a) MP; b) FG (m)	37

Figura 28- Caracterização esquemática da cavidade de erosão.....	38
Figura 29- Diferenças de profundidades máximas entre o método de referência (hidrómetro por Dias, 2018) com os utilizados no presente estudo: VL, MP, FG.....	41
Figura 30- Perfis de comparação de métodos Ensaio 1: a) perfis longitudinais; b) perfis transversais; verde- VL; azul- MP; vermelho- FG	44
Figura 31- Gráfico de dispersão de cotas para Ensaio 1: a) diferenças entre VL e FG; b) diferenças entre VL e MP; c) diferenças entre MP e FG	45
Figura 32- Histogramas de diferenças entre métodos Ensaio 1: a) diferenças entre VL e MP; b) diferenças entre VL e FG; c) diferenças entre MP e FG	46
Figura 33- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo: diferenças entre VL e MP; b) diferenças entre VL e FG; c) diferenças entre MP e FG.....	48
Figura 34- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados por VL e MP	49
Figura 35- Probabilidades de diferenças entre métodos Ensaio 1: a) VL e MP; b) VL e FG; c) MP e FG.....	51
Figura 36- Valores deslocados à mediana Ensaio 1: a) diferenças entre VL e FG; b) diferenças entre VL e MP; c) diferenças entre MP e FG	52
Figura 37- Diferenças entre medições das cavidades de erosão: a) Dif. entre Dias (2018) e VL; b) Dif. entre Dias (2018) e MP; c) Dif. entre Dias (2018) e FG.....	56
Figura 38- MDE das diferenças entre superfícies dos métodos VL e FG; Ensaio 1.....	58
Figura 39- Histograma de diferenças entre nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria Ensaio 1 (Intervalo de confiança 95%)	58
Figura 40- Diferenças entre volumetria das cavidades de erosão pelos métodos de VL e FG	60
Figura 41- Exemplo de mancha de pontos gerada pelo método de varrimento a laser sobre um alvo	61
Figura 42- MDE das diferenças entre os métodos de VL e FG- Ensaio 6.....	62
Figura 43- Perfis Ensaio 2: a) perfis longitudinais; b) perfis transversais	62
Figura 44- Perfis longitudinais - Ensaio 1.....	63
Figura 45- Falta de informação na zona do perfil longitudinal (VL) Ensaio 6: a) nuvem de pontos com identificação de zona onde foi efetuado perfil longitudinal; b) perfis longitudinais.....	63
Figura 46- Efeito das sombras do pilar na nuvem de pontos do método VL.....	64
Figura 47- Erro de medição MP – Perfis transversais Ensaio 17.....	65
Figura 48- Erro de operador na realização de MP- Perfis transversais Ensaio 1	65
Figura 49- Nuvem de pontos método VL: Ensaio 8.....	66
Figura 50- Perfil transversal método MP: Ensaio 13.....	66

Figura 51- Diferenças entre método de VL e FG (eliminado erro sistemático): Ensaio 1- métodos validados.....	67
Figura 52- Diferenças entre métodos maioritariamente positivas (eliminado erro sistemático): a) Ensaio 1- diferenças entre VL e MP; b) Ensaio 2- diferenças entre VL e MP; c) Ensaio 2- diferenças entre MP e FG; Métodos não validados	67
Figura 53- Diferenças entre métodos maioritariamente negativas (eliminado erro sistemático): a) Ensaio 7- diferenças entre VL e MP; b) Ensaio 11- diferenças entre VL e MP; c) Ensaio 11- diferenças entre método de MP e FG; Métodos não validados	68
Figura 54- Relação Profundidade/Área erodida: VL (Ensaio 1)	69
Figura 55- Comparação de curvas de nível de diferentes ensaios: Ensaios 1 e 3 (VL).....	69
Figura 56- Perfis realizados em várias zonas da cavidade de erosão	70
Figura 57- Visualização da cavidade de erosão em várias perspetivas.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 1- Diferenças e correção de pontos antes e depois da transformação; Adaptado de Eder <i>et al.</i> (2011)	17
Tabela 2- Medições experimentais dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo.....	38
Tabela 3- Medições experimentais dos ensaios analisados pelos métodos VL e MP.....	39
Tabela 4- Desvios da profundidade máxima da cavidade de erosão entre métodos	41
Tabela 5- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo e respetiva análise de normalidade	47
Tabela 6- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados por VL e MP e respetiva análise de normalidade.....	49
Tabela 7- Intervalos de confiança a 95% das diferenças entre métodos pela estatística Bayesiana (resultados intermédios) - Ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo.....	50
Tabela 8- Intervalos de confiança a 95% das diferenças entre métodos pela estatística Bayesiana (resultados intermédios) - Ensaios analisados pelos métodos de VL e MP.....	51
Tabela 9- Testes estatísticos de validação de métodos com cotas deslocadas à mediana (erro sistemático) e respetivo intervalo de confiança 95%: ensaios realizados pelos 3 métodos	53
Tabela 10- Testes estatísticos de validação de métodos com cotas deslocadas à mediana (erro sistemático) e respetivo intervalo de confiança 95%: ensaios realizados pelos métodos VL e MP.....	54
Tabela 11- Diferenças das dimensões das cavidades de erosão entre métodos (a,b,c de acordo com a figura 28).....	55
Tabela 12- Parâmetros estatísticos das diferenças de nuvens de pontos para os métodos de VL e FG	59
Tabela 13- Diferenças entre volumes dos métodos de varrimento a laser e fotogramétrico por ensaio	59

Lista de Acrónimos e Simbologia

Δ_{FG}	Diferenças entre medições por hidrómetro e método fotogramétrico
Δ_{MP}	Diferenças entre medições por hidrómetro e método de medição pontual
Δ_{VL}	Diferenças entre medições por hidrómetro e método de varrimento a laser
3D	Tridimensional
ADV	<i>Acustic Doppler Velocimeter</i> - Velocímetro <i>Doppler</i> Acústico
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
DSS	<i>Decision Support System</i> - Sistema de suporte à decisão
FG	Fotogrametria
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> - Sistema Global de Posicionamento por Satélite
GPS	<i>Global Positioning System</i> - Sistema de Posicionamento Global
h_{sm}	Profundidade máxima da cavidade de erosão
LDS	<i>Laser distance sensor</i> - Sensor de distância a laser
LED	<i>Light Emitting Diode</i> – Díodo Emissor de Luz
LHFE	Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas
m	Média
M	Mediana
MDE	Modelo Digital de Elevação
MP	Medição Pontual
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SSD	Sistema de suporte à decisão
UBI	Universidade da Beira Interior
UDS	<i>Ultrasonic Distance Sensor</i> - Sensor de Distância Ultrasónico
V_{ce}	Volume da cavidade de erosão
VL	Varrimento Laser
σ	Desvio padrão

Capítulo 1- Introdução

As erosões localizadas que se desenvolvem junto de pontes inseridas em leitos aluvionares são uma das principais causas da sua rutura parcial ou do seu colapso, sendo essas consideradas de grande complexidade. Assim, torna-se importante criar equipas multidisciplinares, constituídas não só por projetistas, mas também por engenheiros hidráulicos geotécnicos a fim de avaliar o impacto das erosões localizadas nas estruturas (Lima, 2008).

A ocorrência de acidentes em pontes decorrentes de fenómenos erosivos tem sido avaliada por diversos investigadores. Cita-se, a título de exemplo, um estudo realizado nos Estados Unidos que revelou que entre 1964 e 1972 cerca de 380 pontes sofreram acidentes devido a este fenómeno. O estudo refere ainda que o investimento médio de intervenção nas pontes onde ocorreu a rutura parcial foi de cem milhões de euros, custo este elevado e que enaltece a importância do estudo das erosões localizadas (Fael, 2008).

Em Portugal, as consequências das erosões localizadas junto a pilares de pontes também se têm feito sentir, como é o caso, por exemplo, do colapso da ponte Hintze Ribeiro, em Entre-os-Rios, sobre o rio Douro, no ano de 2001 que provocou cerca de 70 mortes (Branco, 2013).

Para além disso, a relevância do tema também se vê refletida no elevado número de estudos realizados nas últimas décadas visando, por um lado, caracterizar o fenómeno erosivo e, por outro, quantificar a profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão, conhecendo-se inclusive avanço obtidos por via da modelação numérica. Não obstante, poucos estudos têm sido realizados na caracterização do volume e geometria das cavidades apesar da sua importância para o estabelecimento das dimensões das medidas de proteção contra erosões localizadas (Fael *et al.*, 2004). Esta ausência prende-se, certamente, com a limitação das medições realizadas nos trabalhos experimentais que recorrem, fundamentalmente, a equipamentos de medição pontual (como por exemplo, Fael *et al.*, 2004, Lima, 2008 e Moreno *et al.*, 2014). Mais recentemente, autores como Bento *et al.* (2016) e Pedro *et al.* (2016), efetuaram estudos de erosões localizadas com recurso à fotogrametria, método este que permitiu a obtenção de formulações matemáticas para o volume erodido.

Tendo em conta o exposto, o presente trabalho visa contribuir para o melhoramento da caracterização das cavidades de erosão, utilizando para o efeito os resultados obtidos pelos

métodos de varrimento a laser, medição pontual com distanciómetro eletro-ótico laser e fotogrametria. A opção pelos métodos de varrimento a laser e fotogrametria resultaram de serem atuais e práticos, permitindo recolher um volume de informação maior e que poderão permitir efetuar análises morfológicas inovadoras, tendo em conta os métodos usualmente utilizados. Enquanto que o método de medição pontual com distanciómetro eletro-ótico laser tem o intuito de realizar, de um modo rápido, os perfis transversais e longitudinais das cavidades de erosão.

O presente estudo é composto por sete capítulos e três apêndices, sendo o presente capítulo a introdução.

No capítulo 2, procede-se à síntese de conhecimentos, sendo o mesmo dividido em 2 secções. A primeira é direcionada para os métodos clássicos aplicados em ambiente laboratorial e a segunda orientada para os métodos geomáticos aplicados.

No capítulo 3, é apresentado a metodologia do trabalho experimental.

No capítulo 4, procede-se na descrição da instalação experimental, sendo o mesmo dividido por 2 secções. A primeira é direcionada para a descrição do canal hidráulico utilizado para o trabalho experimental e a segunda é orientada para a descrição dos equipamentos utilizados no estudo.

No capítulo 5, apresenta-se os resultados obtidos pelos métodos utilizados no presente estudo, sendo o mesmo dividido por 3 secções. Na primeira é apresentada de forma detalhada os resultados obtidos pelos métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria de um dos ensaios, sendo os restantes apresentados em anexo. Na segunda é exposta de forma resumida os resultados obtidos pelos métodos de estudo, profundidade máxima, volumetria e dimensões das cavidades de erosão. Na terceira e última secção é feita a análise dos resultados, onde são comparadas as profundidades máximas dos métodos de estudo e dimensões das cavidades de erosão com os resultados de Dias (2018). Também nesta secção é realizada a análise das diferenças dos perfis realizados pelos métodos de estudo e da volumetria das cavidades de erosão e é feita uma comparação de nuvens de pontos para os métodos onde o mesmo é possível (método de varrimento a laser e fotogrametria).

No capítulo 6, discutem-se os resultados referentes à comparação dos métodos utilizados no presente estudo.

No capítulo 7, apresenta-se as principais conclusões obtidas no presente trabalho e propõem-se trabalhos futuros.

A dissertação inclui, ainda, 3 apêndices. No Apêndice A apresentam-se as fichas dos ensaios realizados. O mesmo é dividido em 3 partes, A.1, A.2 e A.3 onde são apresentadas as fichas dos ensaios, separadas por métodos, varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria, respectivamente. No Apêndice B são apresentados os perfis sobrepostos dos vários métodos de estudo por ensaio. O mesmo é dividido por tipo de análise realizada para a comparação de perfis. No Apêndice C apresenta-se a comparação das nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria.

Capítulo 2- Síntese de conhecimentos

No presente capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre as principais técnicas laboratoriais utilizadas na caracterização morfológica de cavidades de erosão.

Este capítulo é constituído por 1 secção e duas subsecções. Na secção faz-se uma introdução aos métodos de descrição morfológica de cavidades de erosão. Na primeira subsecção referem-se métodos clássicos já utilizados na caracterização da morfológica de cavidades de erosão em ambiente laboratorial e, na segunda, apresenta-se uma breve explicação sobre a geomática e qual o seu objetivo. Também nesta se referem alguns métodos geomáticos já utilizados no estudo de cavidades de erosão junto a pilares de pontes.

Secção 1- Métodos de descrição morfológica de cavidades de erosão

Embora o estudo sobre erosões localizadas tenha sido bastante aprofundado nas últimas décadas, o propósito do mesmo tem incidido, essencialmente, na caracterização da profundidade máxima das cavidades de erosão com recurso a métodos clássicos de medição, como é exemplo do hidrómetro. Contudo, mais recentemente, começaram a ser consideradas novas técnicas de análise das cavidades de erosão com recurso a métodos geomáticos quer na avaliação dos volumes erodidos quer na caracterização da evolução temporal das cavidades de erosão. A utilização de métodos geomáticos, como é o caso da fotogrametria e da topografia tridimensional, têm sido cada vez mais inseridos em trabalhos laboratoriais.

Subsecção 1- Métodos clássicos aplicados em ambiente laboratorial

Pela revisão bibliográfica efetuada é visível que são poucos os dados laboratoriais que servem de base às formulações empíricas que relacionam a profundidade máxima das cavidades de erosão com o volume erodido, junto a pilares de pontes na presença de detritos. Daí a necessidade e relevância da implementação de novas técnicas de análise da morfologia das cavidades de erosão para estes casos.

Foram realizados trabalhos laboratoriais visando estabelecer equações para caracterizar a evolução temporal do volume erodido em torno de pilares cilíndricos inseridos em leitos

arenosos uniformes. Link e Zanke (2004) recorreram a um Sensor de Distância a Laser (LDS) inserido num pilar acrílico transparente e incolor (para uma melhor visualização da cavidade de erosão) para a realização de 8 perfis verticais ao longo do decorrer do ensaio, tomados em quatro direções diferentes em torno do pilar ($0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 180^{\circ}, 225^{\circ}, 270^{\circ}, 315^{\circ}$). Enquanto que, Link *et al.* (2008) realizaram ensaios com leito constituído por gravilha uniforme. Para o estudo das cavidades de erosão utilizaram o mesmo método de Link *et al.* (2004) alterando apenas o número de perfis efetuados para 24 (15° de intervalo entre cada perfil vertical). Através dos mesmos, foi possível o cálculo do volume erodido para os tempos de observação de medição. Foram realizados testes com três diferentes intensidades de escoamento.

Fael *et al.* (2004) analisaram a ocorrência de cavidades de erosão junto de encontros de pontes, tendo em consideração o efeito do respetivo comprimento nos valores da velocidade do escoamento acima dos quais tal ocorrência se dá. Para o efeito, os métodos de medição utilizados foram a medição pontual através de um hidrómetro de ponta direita e os levantamentos topográficos das cavidades de erosão recorrendo a um teodolito Leica TCR 307.

Com o recurso a experiências laboratoriais, Yanmaz e Kose (2007) analisaram cavidades de erosão junto a pilares de secção transversal circular e quadrada fundados em leitos de areia de granulometria uniforme. Para o estudo da profundidade da cavidade de erosão foi colocada uma escala num tubo oco de acrílico. Os ensaios experimentais foram interrompidos aos 5, 20, 60, 100 e 150 min para a cavidade de erosão ser analisada. Para esta análise foram realizadas medições com o recurso a uma malha aplicada em redor do pilar composto de linhas com um espaçamento de 2 cm ao longo do canal com o intuito de serem realizadas curvas de nível. Do mesmo estudo resultaram formulações empíricas adimensionais para a variação temporal do volume da cavidade de erosão.

Lima (2008) realizou ensaios laboratoriais para estudar a influência das dimensões de pilares, da duração dos ensaios e da granulometria do material de fundo em cavidades de erosão. Foi desenvolvido um método experimental que permitiu retirar moldes das cavidades de erosão em redor do pilar, de maneira a melhor caracterizá-las. No fim de cada ensaio era colocado em torno do pilar e da zona escavada uma cofragem para ser feito um molde de uma mistura de parafina e vaselina com o intuito de se obter o relevo da cavidade de erosão, e identificar zonas de escavação e de depósito de areia. Após a secagem do molde, o mesmo era removido e era determinada a profundidade máxima de escavação com auxílio de um comparador. A evolução temporal da profundidade máxima das cavidades de erosão foi avaliada utilizando um hidrómetro de ponta direita.

Devido às cheias de setembro de 2009 nos EUA, os autores Hong e Sturm (2010) decidiram realizar estudos relativamente aos efeitos das mesmas em fundações de pontes. Para tal, os autores realizaram um modelo de uma ponte situada na Geórgia à escala de 1:60. Neste estudo foi medida a velocidade e altura de escoamento e profundidade da cavidade de erosão. Para as medições da cavidade de erosão os autores utilizaram um hidrómetro.

Com o objetivo de avaliar o desempenho de modelos de previsão de cavidades de erosão para pilares complexos, Moreno *et al.* (2014) realizaram 11 ensaios experimentais. Para o estudo da profundidade das cavidades de erosão, durante a primeira hora, os autores realizaram medições com intervalos de 5 a 10 minutos e, a partir do primeiro dia, as medições foram efetuadas 3 vezes ao dia. Os ensaios tiveram uma extensão entre 14 a 28 dias e a profundidade das cavidades de erosão foram avaliadas através de um hidrómetro adaptado com um erro de medição inferior a 1,0 mm. No final dos ensaios calcularam as diferenças entre as previsões de profundidade das cavidades de erosão e as medições experimentais através da média dos desvios relativos, no sentido de avaliar o desempenho dos modelos.

Subsecção 2- Métodos geomáticos aplicados em ambiente laboratorial

A geomática foi um termo gerado na Universidade Laval, situada no Canadá, em meados dos anos 80 (Gomasasca, 2010).

Como definição, o autor Gomasasca (2010), neste artigo, considerou a geomática como uma abordagem sistemática multidisciplinar e integrada para selecionar os instrumentos e as técnicas apropriadas para angariar, armazenar, integrar, modelar, analisar, recuperar, transformar, exibir e distribuir dados georreferenciados espacialmente de diferentes fontes.

Atualmente, a geomática encontra-se em fase de desenvolvimento, estando a ser utilizadas disciplinas e técnicas da geomática para a regulação de informações geoespaciais e para o uso adequado dos dados de observação da Terra para estudar e gerenciar perigos e riscos ambientais (Gomasasca, 2010).

A nível do planeta o intuito é ser realizada uma infraestrutura global de dados espaciais capaz de gerir conjuntos heterogéneos de dados e superar a ausência crónica de interoperabilidade entre bancos de dados, tendo por base a implementação de vários códigos-fonte nos níveis local, nacional e continental e harmonizando-as em um contexto global (Gomasasca, 2010).

Para Gomarasca (2010) a geomática é constituída pelas seguintes disciplinas e técnicas:

- Ciência da computação (representar e processar informação através de instrumentos tecnológicos e de métodos, modelos e sistemas);
- Geodesia (determinar a forma e tamanho da Terra);
- Topografia (combinação de procedimentos para o levantamento direto da Terra. Topografia é uma combinação de métodos e instrumentos para medir e representar de forma abrangente os detalhes da superfície da Terra), sendo dividida por:
 - Planimetria (determinar as posições relativas da representação dos pontos na superfície da Terra);
 - Altimetria (determinar a altura dos pontos na superfície da Terra em relação à superfície do geoide);
 - Taquimetria (levantamento planimétrico e altimétrico da superfície da Terra);
 - Levantamento de Terras (medir áreas, mover e retificar fronteiras e nivelar superfícies).
- Cartografia (descrever a forma e dimensão da Terra e os seus detalhes naturais e artificiais);
- Fotogrametria (determinar a posição e formas de objetos, medindo-os em imagens fotográficas);
- Detecção remota (obter remotamente dados territoriais e ambientais);
- Sistemas globais de posicionamento por satélite (GNSS) (fornecer a posição tridimensional de objetos fixos ou móveis, no espaço e no tempo em toda a superfície da Terra);
- Sistema de varrimento a laser (localizar objetos e medir a distância por meio de radiação incidente);
- Sistemas de informação geográficas (SIG) (combinar instrumentos capazes de receber, registrar, recuperar, transformar, representar e processar dados espaciais georreferenciados);
- *Decision support system*- Sistema de Suporte à Decisão (DSS) (implementar sistemas de informação geográfica complexos a fim de criar cenários);
- Sistema especialista (considerar equipamentos capazes de imitar os processos cognitivos dos especialistas e sua capacidade de gerenciar a complexidade da realidade);
- WebGIS (distribuir dados geográficos armazenados remotamente em máquinas dedicadas para bancos de dados);

- Ontologia (descrever conceitos e relacionamentos existentes para elementos de um grupo, entidade ou classe).

Deste modo, torna-se importante para o presente estudo fazer uma breve descrição sobre topografia, varrimento a laser e fotogrametria.

A topografia surge como união de palavras gregas “topos” (lugar) e “*grafhein*” (descrição), ou seja, muito resumidamente descrição do lugar (Veiga *et al.*, 2012).

Em diferentes artigos, os autores Espartel (1987), Doubeck (1998) e Antunes (1995) deram diferentes objetivos à topografia. Espartel (1987) considerou que a topografia tem como objetivo a determinação de contornos, dimensões e posições de um terreno, sem ter em conta a sua curvatura resultante da esfericidade terrestre e Doubeck (1998) considerou que a topografia tem como objetivo o estudo de métodos para a representação de um terreno em superfície plana. Antunes (1995) considerou que o objetivo principal da topografia é efetuar medições de ângulos, distâncias e desníveis que permitam a realização de uma porção de superfície à escala pretendida e adequada à situação. Estas operações designam-se por levantamentos topográficos e podem ser divididos por reconhecimento, escolha, implementação e medição das redes locais de apoio, ligação da rede local à rede global (geodésica auxiliar ou cadastral) e levantamento de pormenor apoiando-se na rede local.

Para os levantamentos topográficos existem diferentes equipamentos com funções distintas como é o caso dos equipamentos clássicos, como por exemplo teodolitos e níveis, equipamentos de varrimento a laser, distanciómetros, entre outros.

O varrimento a laser é uma tecnologia ativa que utiliza a luz laser e medição de ângulos para determinar as coordenadas de uma grande quantidade de pontos de forma quase contínua e quase em tempo real (Mateus, 2011). Pode-se dizer que o mesmo é uma tecnologia de medição e digitalização remota 3D de alta precisão que permite executar levantamentos tridimensionais/bidimensionais traduzidos na realização de projetos de especial complexidade técnica. Esta tecnologia veio revolucionar os tradicionais métodos de levantamento, permitindo um aumento de precisão, detalhe e redução de erros, custos e tempo de medição. Com a capacidade de melhorar o processo de projeto e reduzir os erros de recolha de dados torna-se uma alternativa atraente para as técnicas tradicionais de levantamentos locais. Os levantamentos de varrimento a laser são aplicáveis em planeamento digital de edifícios, arquitetura, património imóvel, infraestruturas, análise de superfícies, etc. A Figura 1 representa um exemplo de um levantamento de varrimento a laser de uma superfície.

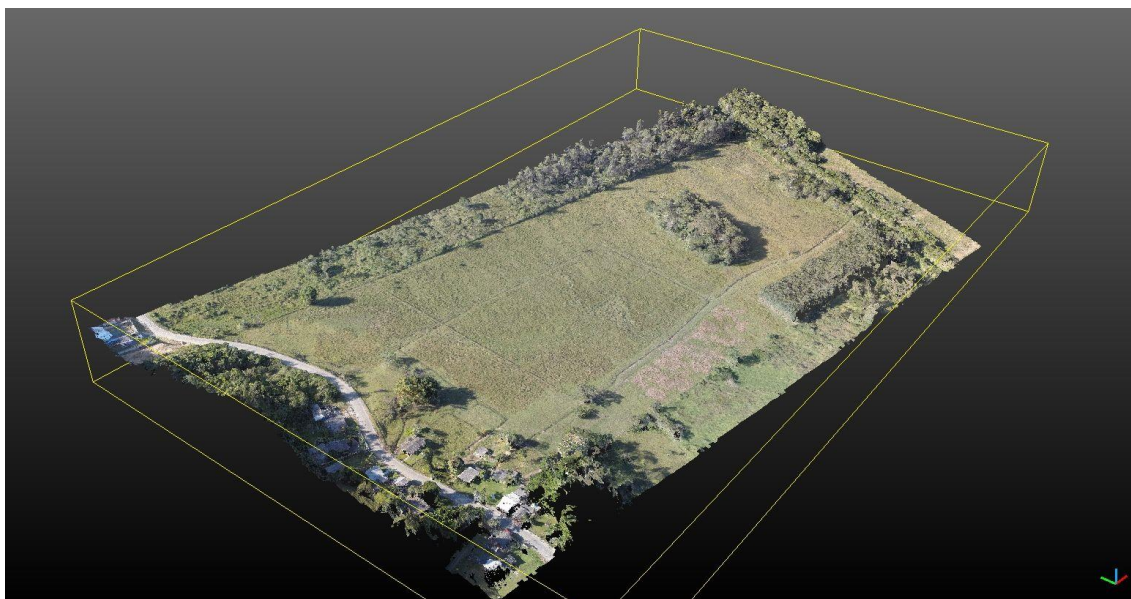


Figura 1- Exemplo de nuvem de pontos resultante do varrimento a laser: Adaptado de Vinicius (2017). Acedido em 3 de outubro de 2019. URL: <https://www.uavgeo.com>

Outro método geomático utilizado para a caracterização de cavidades de erosão é a fotogrametria. A fotogrametria tem com definição o processo de derivação de informações métricas sobre um objeto através de medições, do mesmo, feitas nas fotografias, deixando para a fotointerpolação a tarefa de obter informações qualitativas. Com o avançar da tecnologia para a aquisição de dados de imagem no espaço em uma região mais ampla do espectro eletromagnético, o significado de fotogrametria foi estendido para incluir sensoriamento remoto, passando da fotointerpretação clássica para o uso de processamento de imagem digital, além da interpretação humana e aplicação de técnicas de análise computacional a imagens além da fotografia (Gomasasca, 2010).

Para Gomasasca (2010) a fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia que permite obter informações válidas sobre objetos físicos e o meio ambiente, através de processos de coleta, medição e interpretação de imagens e representação analógica ou digital dos modelos de energia eletromagnética de sistemas de pesquisa (câmaras fotográficas ou sistemas de digitalização), sem contato com os objetos.

A fotogrametria divide-se, tradicionalmente, em terrestre e aérea consoante a localização dos pontos- estação da câmara fotográfica na altura em que é feita a cobertura fotográfica (Cruz *et al.*, 2003).

Na fotogrametria terrestre, as câmaras métricas são, normalmente, utilizadas apoiando-se sobre um ponto firme da superfície terrestre, havendo, no entanto, situações em que têm de ser estacionadas em pontos considerados menos firmes (barcos, helicópteros).

Atualmente torna-se rara a tradicional fotogrametria terrestre, cujo objetivo é cartografar zonas de superfície terrestre a uma distância, em termos de ótica, considerada infinita. Só em expedições científicas e em glaciologia é que se continua a utilizar esse método para obter a topografia da superfície. Todas as outras aplicações das câmaras métricas terrestres estão relacionadas com a fotogrametria próxima, na qual os objetos se encontram a distâncias óticamente finitas. Os campos de fotogrametria próxima são atualmente os campos da arquitetura e engenharia civil, conservação do património monumental, arqueologia, biofotogrametria, fotogrametria legal e fotogrametria industrial (Cruz *et al.*, 2003).

Na fotogrametria aérea, as câmaras são normalmente, instaladas em aviões ou plataformas espaciais, dependendo do sítio a ser analisado. Os campos de fotogrametria aérea incluem os campos de cartografia, estudo de deformações terrestres, ordenamento do território e estudos ambientais de várias ordens como é o exemplo de floretas e águas (Cruz *et al.*, 2003).

Atualmente, com os avanços tecnológicos, é possível o mapeamento de grandes áreas sem necessidade de mobilização de muitos profissionais com custos mais baixos. Através sistemas aéreos remotamente pilotados, mais especificamente através de Drones, é possível atingir resoluções de poucos centímetros e precisões compatíveis com aerolevantamentos convencionais fotogramétricos (Cruz *et al.*, 2003).

Existem três métodos básicos de reconstrução fotogramétrica, a retificação da fotografia, Figura 2 a), a restituição por estereoscopia, Figura 2 b), e restituição múltipla, Figura 2 c). Diretamente relacionados com os métodos de reconstrução estão os modos de obtenção das fotos do objeto que vai ser reconstruído. Isto é, há determinados cuidados a ter na obtenção das fotografias para se conseguir tratá-las pelo método adequado e chegar a bons resultados com um valor mínimo de erros (Cruz *et al.*, 2003).

Para a restituição do objeto por reconstrução de fotografia, cada ponto do objeto deve ser fotografado em apenas uma fotografia, para a estereorestituição cada ponto do objeto deve ser fotografado em duas fotografias, obtidas em pontos de estação distintos e a câmara deve-se encontrar aproximadamente paralela à superfície e para a restituição múltipla cada ponto do objeto deve estar fotografado em pelo menos três fotografias, obtidas de estação distintos, de preferência a diferentes cotas e com eixos óticos das câmaras não paralelos (Cruz *et al.*, 2003).

a)

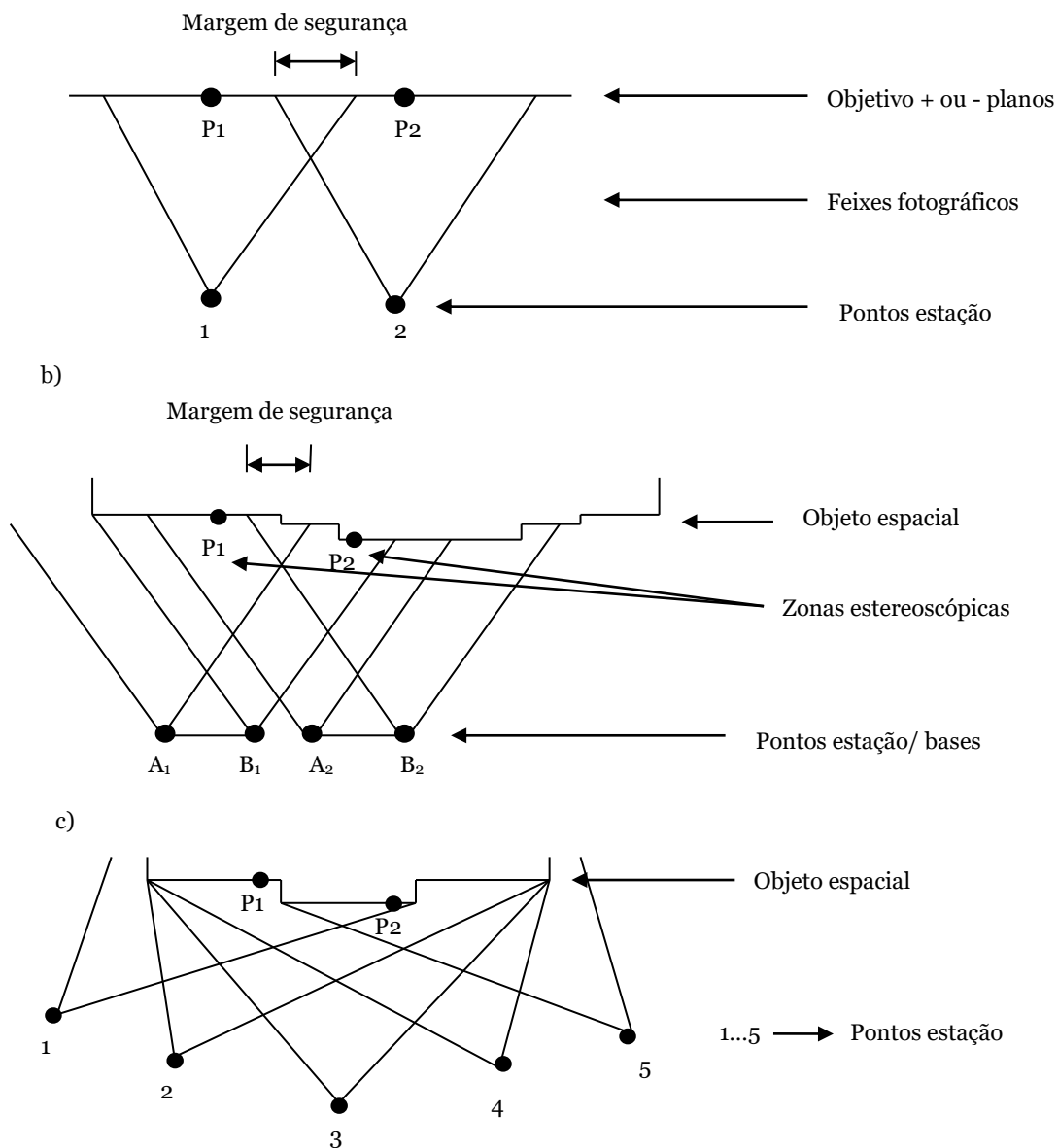


Figura 2- Métodos básicos de reconstrução fotogramétrica: a) Retificação de fotografias; b) Estereorestituição; c) Restituição múltipla

Os três métodos anteriormente citados são utilizados essencialmente na fotogrametria terrestre. Na fotogrametria aérea, o método da restituição múltipla não era utilizado devido à dificuldade que apresenta na obtenção de grandes ângulos entre os eixos óticos das câmaras em voo (Cruz *et al.*, 2003).

Na escolha do método deve-se ter em conta o tipo de objeto a restituir e a sua distribuição espacial e o tipo de instrumentos de restituição fotogramétrica de que se dispõe (Cruz *et al.*, 2003).

Para os levantamentos fotogramétricos devemos ter em conta a iluminação e tempo de exposição, as fotografias devem ser retiradas essencialmente à luz do dia, se isto não for possível tem de ser utilizada luz artificial (com recurso a projetores, preferencialmente a LED a fim de evitar reflexões no objeto). No passado eram feitos testes com outra câmara para determinar a abertura e tempo de exposição a usar e, após a sessão fotográfica definitiva, deveria ser observado imediatamente as fotografias para detetar problemas antes de abandonar a missão por completo. No presente, com recurso a máquinas fotográficas digitais este último processo torna-se facilitado visto que a própria máquina exhibe as imagens momentaneamente e a mesma determina a abertura e exposição a utilizar automaticamente. Para os mesmos e para que o trabalho seja preciso, durante a sessão fotográfica deve ser usado um caderno de campo para anotar imediatamente tudo o que seja importante, deve ser preparado um formulário para caderneta com lista de pontos a verificar, particularidades do objeto a fotografar devem ser fotografadas para ajudar à interpretação das imagens e devem ser feitos croquis do local de tomada de fotos e da sua vizinhança (Cruz *et al.*, 2003).

Para um trabalho com maior precisão e para auxílio à sobreposição de fotografias, essencialmente na fotogrametria terrestre, devem ser utilizados pontos fotogramétricos que devem aparecer nitidamente nas fotografias e cuja posição no sistema de coordenadas utilizado deve ser determinado antes do trabalho. Quanto mais pontos fotogramétricos foram utilizados, maior será a precisão final. Podem ser utilizados pontos fotogramétricos naturais que existam no objeto (cruzes em janelas, buracos, etc.) e pontos fotogramétricos artificiais (círculos concêntricos, círculos com quadrantes de cores, etc.) (Cruz *et al.*, 2003). Atualmente, com o avanço na tecnologia, podem também ser utilizadas miras de deteção automática por *software*.

Uma fotocélula de intensidade de luz difusiva acoplada a uma fibra ótica foi testada como um sensor de chave sem toque para perfil de fundo. Ballio e Radice (2003) realizaram experiências laboratoriais com o objetivo de testar um novo sistema de monitorização de leitos fluviais. O sistema é constituído por um sensor de fibra ótica inserido num tubo, tal como esquematizado na Figura 3, e tem capacidade de gerar perfis ao longo do leito em estudo. Para testar o mesmo, os autores fixaram o aparelho de medição numa plataforma fixa realizaram medições contínuas com e sem presença de água. Como método de comparação os autores realizaram medições manuais nos pontos medidos pelo sensor ótico e compararam os 3 testes realizados (Figura 4). Os autores concluíram que o método em estudo apresenta um erro de 1,7 mm, erro este considerado aceitável tendo em conta o diâmetro mediano do material do leito é de 1,9 mm.

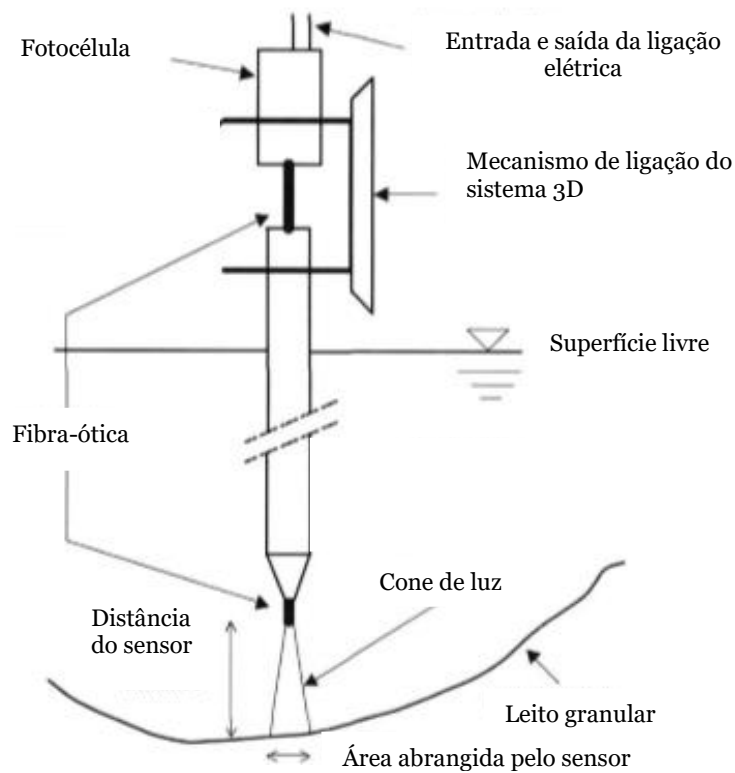


Figura 3- Esquema sensor óptico adaptado de Ballio e Radice (2003)

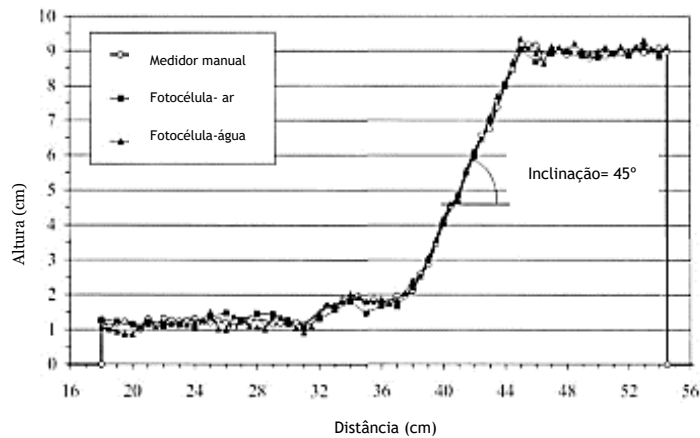


Figura 4- Testes de validação de método adaptado de Ballio e Radice (2003)

Tal como referido anteriormente, Fael (2007) realizou trabalho experimental com o objetivo de estudar a ocorrência de cavidades de erosão junto de encontros de pontes. Para a medição da profundidade das cavidades de erosão utilizou um hidrômetro de ponta direita adaptado para o efeito e, no final dos ensaios procedeu ao levantamento topográfico das cavidades de erosão recorrendo a uma estação total Leica TCR 307. O

tratamento dos levantamentos topográficos foi realizado através do programa informático *Aneba Cartomap*. A autora caracterizou o volume e a geometria das cavidades de erosão em função da velocidade do escoamento e do comprimento dos obstáculos, tendo desenvolvido equações de cálculo das principais dimensões das cavidades de erosão (Figura 5).

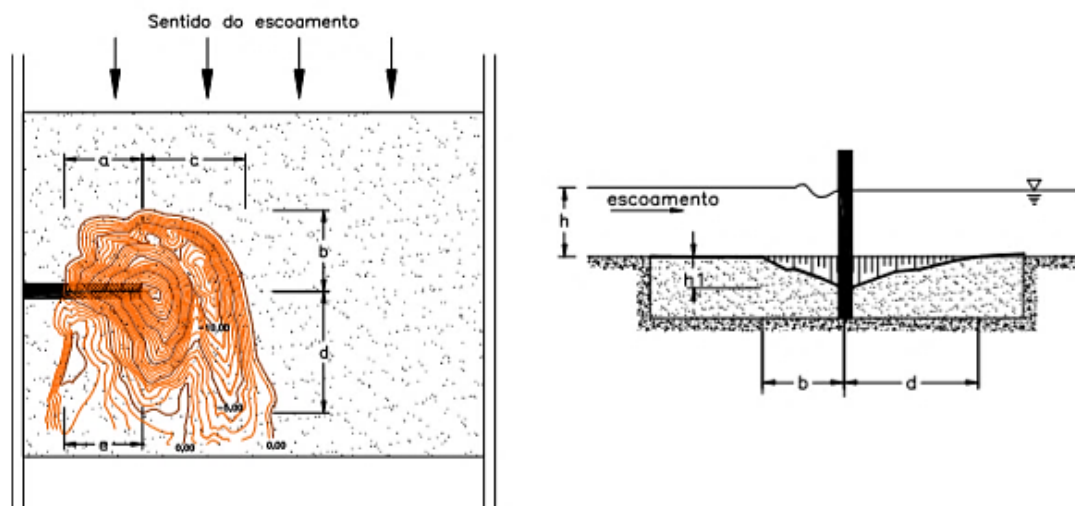


Figura 5- Caracterização esquemática das cavidades de erosão adaptado de Fael *et al.* (2004)

Em relação ao estudo sobre cavidades de erosão em torno de pilares cilíndricos, Umeda *et al.* (2008) realizaram ensaios experimentais e analisaram as mesmas com o recurso à fotogrametria. Para o estudo foram realizados ensaios com o objetivo de ser avaliada a profundidade máxima das cavidades de erosão e o volume erodido. Os ensaios foram efetuados num canal com cerca de 12 m de comprimento, 0,4 de largura e 0,4 de profundidade. O leito do local de estudo foi preenchido de areia fina (cerca de 0,139 mm de diâmetro médio) contendo no meio um pilar cilíndrico de vinil com 32 mm de diâmetro. Para a realização do método fotogramétrico foi utilizada uma máquina fotográfica com uma distância focal de 30 mm a cerca de 0,7 m de distância do fundo do canal. Foram retiradas fotografias ao longo do local de estudo com o intuito de captar cerca de 5 imagens de cada ponto (cerca de 0,2 a 0,5 m entre fotografia) e para pontos de referência foram utilizadas réguas graduadas no local de estudo (Umeda *et al.*, 2008). Para a validação da precisão do método fotogramétrico foi utilizado um método clássico como meio de comparação (medições através de réguas graduadas). Da análise realizada, os autores concluíram que a precisão do método fotogramétrico é inferior a 1 mm, sendo no máximo de, 0,2 mm na horizontal, 0,3 mm na vertical e 0,7° angularmente (Umeda *et al.*, 2008).

Para o estudo da geometria de cavidades de erosão junto a fundações de pontes, Diab *et al.* (2010) realizaram ensaios laboratoriais com a duração de 40 horas onde as fundações foram inseridas em gravilha de dimensão uniforme com 3,25 mm. Para o estudo das cavidades de erosão os autores utilizaram métodos geomáticos não intrusivos. A altura de escoamento foi medida com recurso a *Ultrasonic Distance Sensor*- Sensores de Distância Ultrassônicos (UDS), sensores estes distribuídos ao longo do canal hidráulico, como exemplificado no esquema apresentado na Figura 6. Para a medição da velocidade de escoamento os autores utilizaram um *Acoustic Doppler Velocimeter*- Velocímetro Doppler Acústico (ADV), também representado na Figura 6. Para a medição da superfície das cavidades de erosão, os autores utilizaram um distanciômetro laser com precisão de $\pm 0,30$ mm inserido dentro do pilar transparente e incolor. O mesmo foi apoiado em dois motores que faziam com que o distanciômetro laser se movesse, um na vertical com uma precisão de $\pm 0,02$ mm e outro em torno do pilar com uma precisão angular de $\pm 0,01^\circ$. Com este método os autores realizaram perfis verticais em 24 planos.

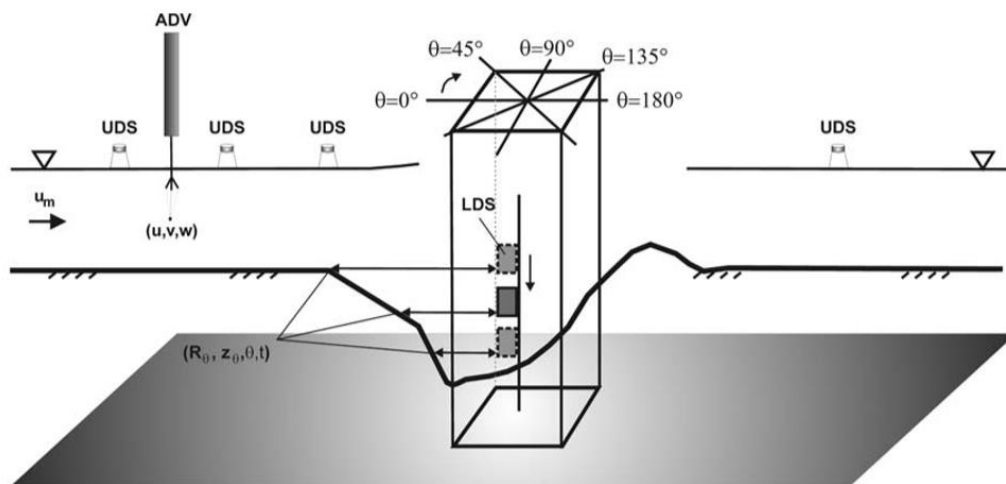


Figura 6- Esquema laboratorial adaptado de Diab *et al.* (2010)

Eder *et al.* (2011) realizaram um estudo de abordagem fotogramétrica para uma avaliação mais profunda em relação espaço/tempo no que diz respeito ao estudo das cavidades de erosão. O estudo foi realizado num canal com 1,2m de largura. O leito do canal era composto por areia uniforme com 1,9mm de diâmetro tendo inserido no mesmo um pilar cilíndrico com 10 cm de diâmetro. Para uma análise fotogramétrica o leito era composto por diversos tons de areia (amarelo, branco e preto). Para o levantamento fotogramétrico foram colocadas 2 câmaras com uma distância focal de 24 mm a uma distância de 2,5 m acima da superfície livre do canal e um painel acrílico com 5 pontos na sua parte superior (pontos de controlo de coordenadas conhecidas para verificação de inexistência de deslocamento de raio da imagem pelo acrílico e hialino incolor e pela água) ao nível do

escoamento. Para a validação dos dados fotogramétricos foram realizados testes com e sem presença de água. Dos mesmos testes foi perceptível que a presença da água e o painel acrílico faziam uma distorção nos valores, distorção essa mais notória na componente vertical do que na planimétrica. Os valores adquiridos por fotogrametria foram sempre registados acima dos valores reais e foram corrigidos através dos 5 pontos conhecidos em relação ao seu deslocamento, rotação e escala. As diferenças iniciais e finais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Diferenças e correção de pontos antes e depois da transformação; Adaptado de Eder *et al.* (2011)

Ponto Nr.	Δx [cm]	Δy [cm]	Δz [cm]	res. x [cm]	res. y [cm]	res. z [cm]
900	0,37	0,82	6,33	0.12	0.08	0.06
901	0,57	0,48	6,71	-0.06	0.02	0.02
902	-0,25	0,46	6,92	-0.04	0.01	0.02
903	-0,36	0,89	6,97	0.06	-0.01	0.02
904	0,16	0,99	6,59	-0.07	-0.10	-0.08

Porter *et al.* (2014) realizaram ensaios laboratoriais para avaliar as vantagens e desvantagens da aplicação de três técnicas de medição da profundidade de cavidades de erosão (fotogrametria, ecosonda e um pilar com uma escala vertical com intervalos de 5 mm marcada na parte externa do mesmo). Os autores apresentam um novo sistema de medição que envolve uma câmara subaquática, apresentando vantagens pois proporciona medições precisas sobre toda a cavidade de erosão durante o decorrer dos ensaios e, ao mesmo tempo, permite obter informação qualitativa a partir das fotografias. Os resultados obtidos com o sistema de fotogrametria foram apresentados e discutidos de forma qualitativa, antes de serem feitas as comparações com os restantes métodos. Nestes ensaios foram detetadas dificuldades no que diz respeito à medição de pontos nas zonas de sombra do pilar, o que fez com que nessas mesmas zonas existisse uma discrepância de pontos e, por sua vez, a precisão nos mesmos locais fosse menor.

Chang *et al.* (2014) propõem um sistema de monitorização do escoamento com uma microcâmara que rastreia as imagens ao nível do leito. Para tal, dois algoritmos de reconhecimento de imagem foram desenvolvidos para apoiar a abordagem de rastreamento de imagens. Através de experiências laboratoriais, o estudo demonstrou que o sistema proposto é capaz de monitorizar com precisão a evolução da profundidade das cavidades de erosão em tempo real.

Bento *et al.* (2016) realizaram um trabalho experimental com o objetivo de reproduzir, em modelo físico, um escoamento na proximidade de um pilar complexo fundado num leito de sedimentos uniformes. No estudo, foi analisada a evolução temporal da profundidade máxima das cavidades de erosão junto aos elementos do pilar complexo, tendo sido feita a reconstrução tridimensional da cavidade de erosão. A evolução da profundidade das cavidades de erosão, imediatamente a montante do pilar foi avaliada através de um limnómetro de olho catódico (instrumento este que serve para fazer medições de variações do nível da superfície da água, sendo adaptado pelos autores para fazer medições da variação do nível do leito) e, junto de cada estaca de fundação a leitura foi efetuada através de uma escala graduada acoplada às mesmas. No final dos ensaios, as cavidades de erosão foram reconstruídas por aplicação de fotogrametria de pequena amplitude com o intuito de ser calculado a profundidade da cavidade de erosão e de ser calculado o seu volume. Os autores consideraram adequada a metodologia adotada (fotogrametria), nomeadamente no que diz respeito ao levantamento das características da cavidade de erosão.

Pedro *et al.* (2016) realizaram ensaios laboratoriais com o intuito de validar a utilização de fotogrametria para análise de superfícies de leitos com e sem presença de água. Para o uso da fotogrametria foram utilizadas duas câmaras fotográficas Canon EOS 600D com capacidade de fotografar em simultâneo a mesma imagem e para a sua calibração foi utilizado um tabuleiro de xadrez com quadrados com 3 x 3 cm. O seguidor de fundos PV-09 *Profile-Indicator* foi utilizado para comparação nos testes realizados com água. Este equipamento é baseado na medição das diferenças de condutividade. Foi realizado um primeiro teste para levantamento de um sólido conhecido numa caixa de areia de modo a comparar as dimensões reais conhecidas com as dimensões extraídas do método fotogramétrico. O segundo teste consistiu em fazer um levantamento com o recurso a fotogrametria e ao seguidor de fundos simulando a visualização da cavidade de erosão em tempo real. Para o primeiro teste, o erro médio situou-se na ordem dos 0,0102 m, correspondendo a 6,14% do valor real do comprimento do objeto (o valor do erro foi aceitável para os autores devido ao método fotogramétrico não ser rigoroso no levantamento de formas prismáticas). Para o segundo teste a diferença entre o valor real da profundidade de erosão junto ao pilar e a obtida pelo método fotogramétrico foi de 0,001 m e o erro com o seguidor de fundos foi de 0,058 m para a mesma profundidade. Estes autores concluíram que o método fotogramétrico pode ser uma ferramenta útil e bastante precisa, mas requer especial atenção aos fenómenos de luz e turbulência do escoamento.

Mais recentemente, Bouratsis *et al.* (2017) implementaram técnicas experimentais avançadas. O estudo visa a caracterização espaço-temporal quantitativa das erosões

localizadas junto de um pilar cilíndrico fundado em gravilha. Para a monitorização da evolução do leito do canal nas proximidades do pilar, foram utilizadas duas câmaras de filmar à prova de água, conforme ilustrado na Figura 7. As câmaras gravaram vídeos de 30 *frames* por segundo com o objetivo de registar a metade lateral da cavidade de erosão e assumir simetria à linha central do canal. Os vídeos foram processados em *MatLab* e obtiveram no final representações da topografia tridimensional da cavidade de erosão. Muitos estudos foram realizados até à data com a mesma técnica, sendo este o primeiro que obteve observações quantitativas de alta qualidade com erro médio na ordem dos 0,75 mm.



Figura 7- Câmaras utilizadas por Bouratsis *et al.* (2017)

Bento *et al.* (2018) realizaram ensaios sobre cavidades de erosão em torno de pilares complexos e as medições foram realizadas com recurso ao método fotogramétrico e a um sensor Kinect, sensor este utilizado para captação de gestos na consola Xbox (Microsoft) adaptado para o presente estudo. Os ensaios foram realizados num canal de 40,7 m de comprimento, 2 m de largura e 1 m de profundidade, sendo a secção de estudo uma caixa de areia (com diâmetro médio de 0,86 mm) com 5 m de comprimento e 0,4 m de profundidade. O pilar foi simulado por um retângulo com as extremidades arredondadas com dimensões 0,14 x 0,463 m. O método do sensor *Kinect* não pôde ser totalmente avaliado nestes ensaios pois a estrutura do pilar não permitiu serem capturados os valores dos pontos junto ao mesmo. Por este motivo, os autores comparam apenas valores afastados mais de 3 cm do pilar, tendo concluído pela validade de ambos os métodos, observando erros na ordem dos 0,001 m e 0,0005 m para o sensor Kinect e para a fotogrametria, respetivamente.

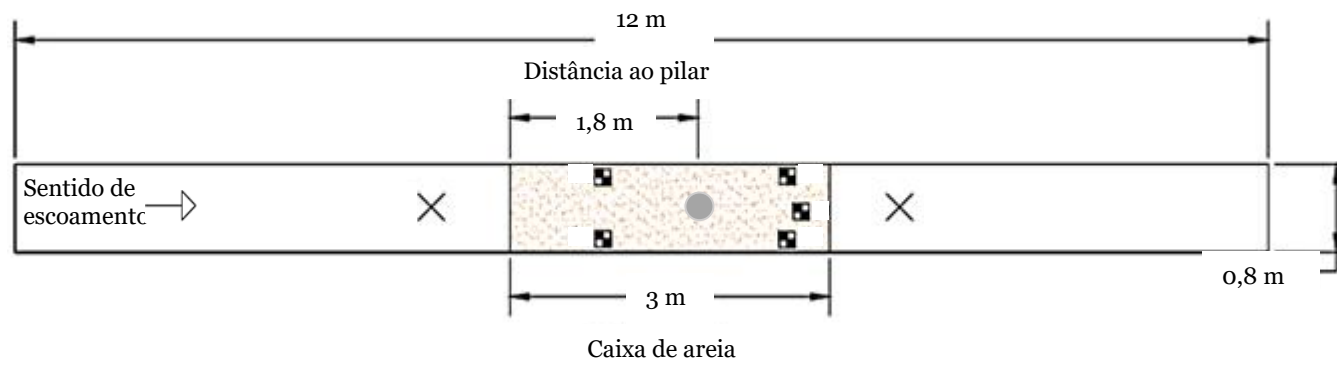
De um modo geral, a evolução da geometria das cavidades de erosão tem sido monitorizada apenas em termos de profundidade máxima das cavidades de erosão. No que diz respeito à sua forma em planta e volumetria, tem sido documentada através de medições fotogramétricas. A abordagem fotogramétrica da evolução temporal das cavidades de erosão foi realizada de forma pioneira por autores como Bouratsis *et al.* (2017) e Bento *et al.* (2016) e encontra-se numa fase de desenvolvimento. Verifica-se ainda que existem vários aspetos a serem melhorados, como é o caso dos erros associados ao atravessamento dos meios translúcidos pelos sistemas eletro-óticos que diversos autores utilizam, sendo necessário a continuação do estudo das várias técnicas já estudadas e de novas metodologias para o seu aperfeiçoamento.

Capítulo 3- Metodologia

O presente estudo é baseado na comparação de 4 métodos de análise de cavidades de erosão. Para o efeito, foram utilizados 17 ensaios experimentais realizados por Dias (2018) que tiveram por objetivo estudar o efeito das características geométricas de detritos acumulados a montante do pilar na profundidade máxima das cavidades de erosão.

A caracterização das cavidades de erosão (profundidades máximas, áreas planimétricas e volumes erodidos) vai ser realizada por métodos não intrusivos (geomáticos de varrimento a laser (VL), Fotogrametria (FG), Medição Pontual (MP), com recurso a um distanciómetro digital laser e Hidrómetro, sendo, deste último método mencionado, os valores medidos por Dias, 2018) aplicados no final de cada ensaio. Os métodos geomáticos de varrimento a laser e fotogramétrico foram selecionados por serem os mais recentes e por isso haver a necessidade de se aprofundar o seu conhecimento. Para além disso, são referidos por diversos autores, como por exemplo Bouratsis *et al.* (2017) e Pedro *et al.* (2016), como métodos de grande precisão. A opção pela utilização do distanciómetro a laser, como medida pontual, permite a comparação de perfis e profundidades com os restantes métodos.

A aplicação do método geomático de varrimento a laser, vai permitir obter uma nuvem de pontos das cavidades de erosão dos diversos ensaios realizados. A aplicação deste método vai ser realizada em dois pontos do canal hidráulico para uma melhor visualização da cavidade de erosão a ser analisada e vão ser utilizados dois pontos exteriores, de coordenadas conhecidas para o estacionamento do equipamento escolhido para a realização dos levantamentos, como é possível verificar no desenho esquemático representado na Figura 8. O local escolhido para a realização dos dois levantamentos por varrimento a laser vão ter em conta as limitações do equipamento de medição a nível de leitura vertical. Vão ser utilizados 5 alvos, também visíveis no desenho esquemático, na caixa de areia para ajuda na sobreposição das duas nuvens de pontos conseguidas através dos dois pontos de levantamento. O objetivo da aplicação deste método é ser conseguido obter uma nuvem de pontos das cavidades de erosão para que posteriormente seja possível realizar medições das dimensões, volumes e áreas das mesmas. Também com o recurso às nuvens de pontos tem-se como objetivo gerar superfícies e respetivas curvas de nível que vão servir para a realização de perfis transversais e longitudinais do local em estudo.



- Pilar de diâmetro de 0,005 m
- Alvos
- ⊗ Pontos exteriores de coordenadas conhecidas
- × Local de estacionamento de equipamento topográfico

Figura 8- Desenho esquemático da rede para varrimento laser

Através do método geomático fotogramétrico, também a ser utilizado como de análise de cavidades de erosão, vai ser conseguido obter uma nuvem de pontos da superfície em questão de 6 ensaios escolhidos aleatoriamente. Com o recurso a uma máquina fotográfica vão ser retiradas fotografias ao local de estudo a cerca de 1,0 m num plano horizontal da superfície com a ajuda de uma base de apoio, visível na Figura 9, adaptada para o efeito inserida no carril metálico pertencente ao canal hidráulico.



Figura 9- Base de apoio adaptada para suporte à realização do método fotogramétrico

Para melhorar a qualidade do levantamento fotogramétrico vão ser realizadas diversas fotografias com o intuito de ser fotografado pelo menos 5 vezes (cerca de 60% de sobreposição longitudinal e 30% transversal por fotografia- Figura 10) o mesmo ponto tanto a nível longitudinal como transversal, seguindo a metodologia descrita por Umeda *et al.* (2008).

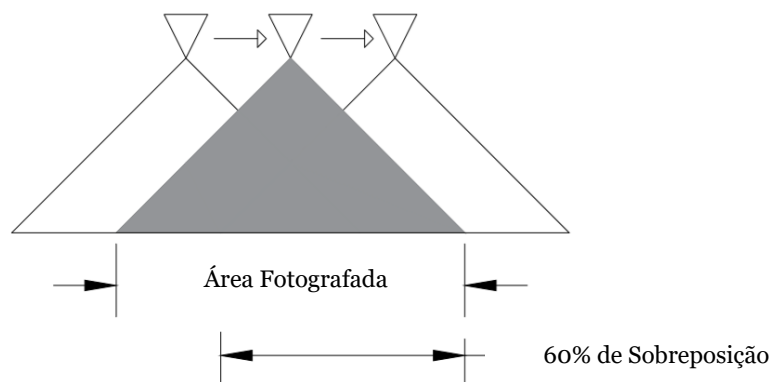
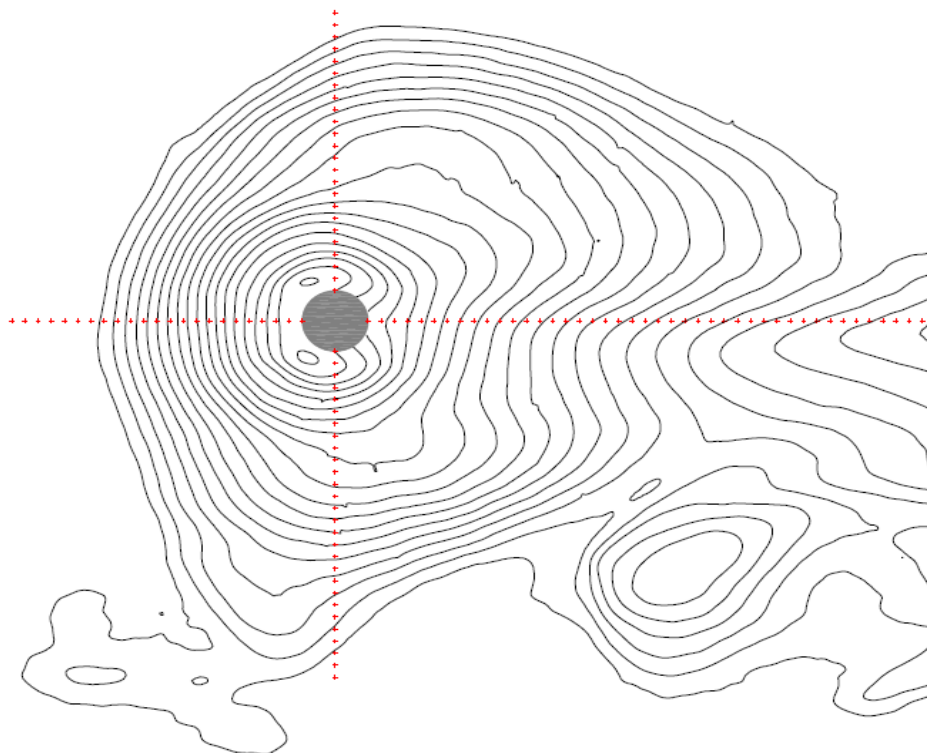


Figura 10- Sobreposição longitudinal fotogramétrica

O processamento fotogramétrico vai ser realizado com o apoio do Professor Gonçalo Vieira pertencente ao IGOT da Universidade de Lisboa e vão ser utilizados os alvos de apoio ao método de varrimento a laser como pontos conhecidos para uma melhor sobreposição das fotografias. Tal como o objetivo da aplicação do método de varrimento a laser, o deste é ser conseguido obter uma nuvem de pontos das cavidades de erosão para que posteriormente seja possível realizar medições das dimensões, volumes e áreas das mesmas. Também com o recurso às nuvens de pontos tem-se como objetivo gerar superfícies e respetivas curvas de nível que vão servir para a realização de perfis transversais e longitudinais do local em estudo.

A aplicação do método geomático de medição pontual vai ser realizada de forma a serem feitas medições de pontos com espaçamento de 1,0 cm a partir do centro da cavidade de erosão, tanto a nível longitudinal (no eixo do canal) como transversal, como é visível esquematicamente na Figura 11, permitindo a obtenção de perfis longitudinal e transversal do leito. Como apoio para a realização das medições, foi realizado um suporte adaptado, tal como para o método fotogramétrico a fim de ser conseguido serem realizadas medições num plano horizontal a cerca de 1,0 m da superfície do canal hidráulico.



+ Pontos de medição com espaçamento de 0,010 m

Figura 11- Desenho esquemático da aplicação do método de medição pontual

As medições realizadas no trabalho de Dias (2018) foram feitas através de um hidrómetro de ponta direita adaptado para o estudo (Figura 12) para a medição da profundidade máxima das cavidades de erosão e através de uma fita métrica para as medições longitudinais e transversais das cavidades de erosão.



Figura 12- Hidrómetro de ponta direita

Através das medições dos diversos métodos em estudo vão ser realizadas comparações entre os mesmos a fim de se poderem validar para utilizações futuras. Em primeiro lugar vão ser calculadas as diferenças entre métodos das profundidades máximas das cavidades de erosão. Em segundo lugar vão ser medidas as cotas dos perfis em intervalos de cm e é feita uma sobreposição dos mesmos para ser feito o estudo das diferenças entre os métodos por ensaio, realizando cálculos de medição de tendência central (média, mediana e desvio padrão) e testes estatísticos com recurso ao *software* SPSS. Em terceiro lugar vão ser calculadas as diferenças entre métodos das dimensões das cavidades de erosão. Em quarto lugar vai ser realizado o estudo do diferencial em nuvens de pontos para os métodos de varrimento a laser e fotogramétrico através de medições de tendência central (média, mediana e desvio padrão) e através da sobreposição de nuvens de pontos. Em quinto e último lugar, vai ser realizado um diferencial de volumetria das cavidades de erosão para os métodos onde este cálculo é possível (método de varrimento a laser e método fotogramétrico).

No presente estudo é esperado haver pequenos erros de precisão devido a rugosidade da granulometria do leito fluvial pois, é difícil de garantir que os pontos medidos pelos métodos de varrimento a laser, fotogrametria, medição pontual e hidrómetro de ponta direita correspondam exatamente aos mesmos.

Capítulo 4- Instalação experimental e equipamentos

Secção 1- Descrição do canal hidráulico

O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Hidráulica Fluvial e das Estruturas (LHFE) do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), da Universidade da Beira Interior (UBI).

O canal de Estruturas Hidráulicas tem 12,0 m de comprimento, 0,83 m de largura e 1,0 m de altura. O canal é constituído essencialmente por betão e possui na parede lateral direita 8 painéis de vidro (Figura 13) que permitem uma melhor visualização do escoamento ao longo do canal no decorrer dos ensaios. A cerca de 4,6 m da entrada do canal, a laje é interrompida por uma caixa paralelepípedica em toda a largura do canal, com cerca de 3,75 m de comprimento e 0,3 m de profundidade. A mesma é preenchida com areia e nela são colocados os pilares com os detritos, permitindo o desenvolvimento de cavidades de erosão.

O canal é alimentado a partir de uma conduta de ferro fundido dúctil que, através de uma eletrobomba de velocidade variável, canaliza a água do reservatório com cerca de 100 m³ situado no piso inferior ao laboratório. O seu circuito hidráulico foi dimensionado para um caudal máximo de 90 l/s.



Figura 13- Vista geral do canal de Estruturas Hidráulicas

Imediatamente à entrada do canal, foi instalado um conjunto de tubos cilíndricos de Cloreto de Vinilo com 25 mm de diâmetro dispostos em forma alveolar com o objetivo de estabilizar o escoamento no canal hidráulico (Figura 14 a)).

Para o controlo da altura do escoamento no canal, foi instalada uma comporta pendular na sua secção de jusante, como se pode visualizar na Figura 14 b)).

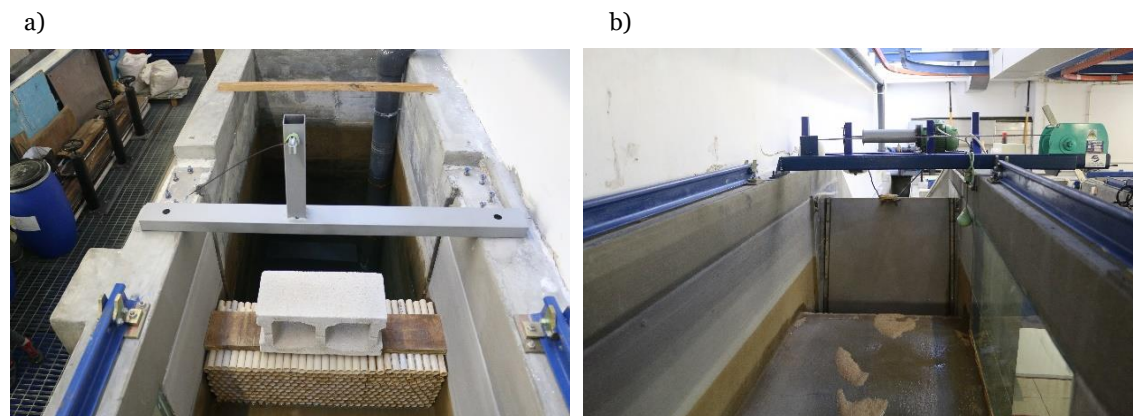


Figura 14- Elementos constituintes do canal hidráulico: a) Entrada do canal-Tranquilizador do escoamento; b) Extremidade de jusante do canal- Comporta pendular

Na parte superior das paredes laterais do canal hidráulico estão instalados dois carris nivelados onde se desloca um carro móvel ao longo do comprimento do canal. O mesmo serve de suporte ao equipamento de medição.

O material de fundo utilizado para a realização dos ensaios laboratoriais foi areia com valor característico de $D_{50} = 0,86$ mm, $D_{84,1} = 1,15$ mm, $D_{15,9} = 0,62$ mm, sendo representado na Figura 15 a curva granulométrica do mesmo (Lança (2013)).

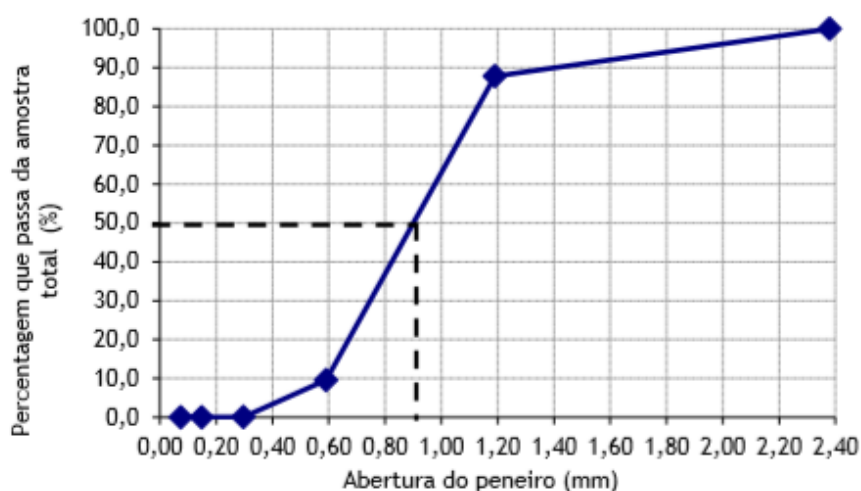


Figura 15 - Curva granulométrica adaptado de Lança (2013)

Secção 2- Equipamentos geomáticos

Subsecção 1- Varrimento a laser

No final de cada ensaio experimental (17 ensaios no total) procedeu-se ao levantamento topográfico das cavidades de erosão. Para o efeito, foi utilizada uma multiestação Leica MS50 (Figura 16). Este equipamento permite a medição de distâncias eletronicamente com ou sem prisma refletor com o recurso a um laser incorporado no mesmo. Também tem uma funcionalidade bastante atual que permite o varrimento a laser de um objeto tridimensional e permite transformá-lo numa nuvem de pontos para posteriormente com recurso a *software* seja criado o objeto em 3D. Para facilitar o trabalho em campo, este aparelho tem a capacidade de armazenamento interno e externo de dados para posterior transmissão para computador.



Figura 16- Multiestação Leica MS50

O equipamento a ser utilizado para o levantamento de varrimento a laser apresenta as seguintes características técnicas principais: precisão de medição angular: 1"; precisão de medição de distância com refletor: 2 mm + 1,5 ppm (ppm= mm por quilómetro); precisão de medição sem refletor: entre 0 e 500 m- 2 mm + 2ppm e >500 m – 4mm+ 2 ppm; precisão do varrimento: <0,6 mm (Leica, 2013).

Apesar das características referidas anteriormente, o equipamento não faz leituras a 360°, pelo que para a medição de pontos de maior profundidade da cavidade de erosão a multiestação tem de ser estacionada de forma a garantir o visionamento na totalidade da

zona de estudo. Por este motivo, foi decidido para este caso de estudo ser feito o estacionamento do equipamento em dois locais do canal, como foi mencionado no capítulo anterior. O estacionamento da multiestação Leica MS50 é feito através de dois pontos conhecidos, identificados no local por 2 mini prismas circulares (Figura 17 a)) e foram utilizados 5 alvos (Figura 17 b)) móveis na areia para a confirmação da sobreposição dos dois levantamentos da cavidade de erosão por ensaio.

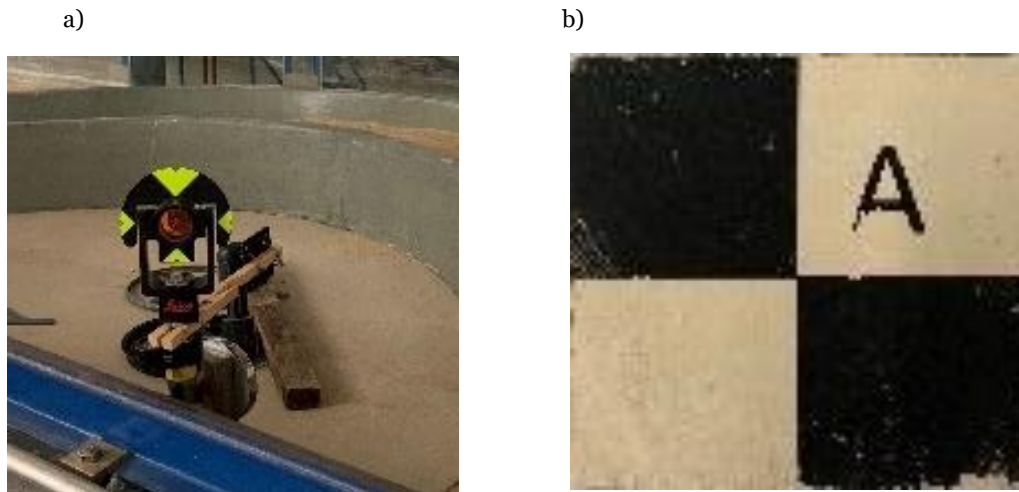


Figura 17- Equipamento de apoio ao método de varrimento a laser: a) mini prisma circular; b) alvo

A aplicação do método geomático de varrimento a laser, com recurso a uma Multiestação Leica MS50, vai permitir obter uma nuvem de pontos da área em estudo, utilizando para o seu o tratamento o *software* 3D *Reshaper*. Este *software* permite a geração de um modelo tridimensional da superfície, a partir do qual se obtêm as curvas de nível, a profundidade máxima das cavidades de erosão e o volume erodido. As curvas de nível da cavidade de erosão vão ser realizadas com espaçamento de 5 mm. Posteriormente, as curvas de nível são transferidas para o *software* *AutoCad Architecture* a fim de serem realizadas superfícies através de triangulação com o intuito de realizar perfis longitudinais e transversais das cavidades de erosão passando pelo eixo do pilar e de serem medidas as dimensões das cavidades de erosão.

Subsecção 2- Levantamento fotogramétrico

Através do método geomático fotogramétrico, com o recurso a uma máquina fotográfica Canon EOS 70D (Figura 18) com uma distância focal de 30 mm a cerca de 1,0 m num plano horizontal da superfície, vão ser retiradas fotografias à superfície de estudo a 6 ensaios escolhidos aleatoriamente. Para o tratamento das fotografias, depois do apoio do Professor Gonçalo Vieira pertencente ao IGOT da Universidade de Lisboa, vai ser utilizado o *software* *Agisoft PhotoScan*, *software* já utilizado por outros autores, como por exemplo

Bento *et al.*, (2018), com o intuito de obter uma nuvem de pontos. Como pontos de referência para o processamento através do *software* mencionado anteriormente, foram utilizados os alvos assentes na areia. Para o tratamento da nuvem de pontos vai ser utilizado o *software* 3D *Reshaper*. Deste vai ser gerado um modelo tridimensional da superfície e as suas curvas de nível, onde vai ser medida a profundidade máxima das cavidades de erosão e calculado o volume erodido. Posteriormente, tal como nos procedimentos do método de varrimento a laser, as curvas de nível são exportadas para o *software* *AutoCad Architecture* a fim de ser realizada uma superfície com o intuito de se realizar perfis longitudinais e transversais da cavidade de erosão passando pelo centro do pilar e de serem realizadas as medições das áreas em planta da erosão.



Figura 18- Máquina fotográfica Canon Eos 70D

Subsecção 3- Distanciómetro laser

Para o método de medição pontual, vai ser utilizado um distanciómetro eletro-ótico laser digital *Skil* (Figura 19). O mesmo tem como características: classe do laser- 2; tipo de laser- 650 nm; unidade de indicação mais baixa- 1 mm; precisão de medição- $\pm 0,003$ m; duração de medição- $<0,5$ seg. Com o distanciómetro eletro-ótico laser vão ser realizadas medições ponto a ponto, com distâncias de 0,010 m e vão ser realizados perfis longitudinais e transversais ao pilar no *software* *AutoCad*.



Figura 19- Distanciómetro eletro-ótico laser digital

Capítulo 5- Resultados

No presente capítulo é apresentada a descrição detalhada dos resultados obtidos dos diferentes métodos para os ensaios estudados, sendo apresentado uma tabela resumo dos resultados obtidos posteriormente. Também no mesmo é apresentada a análise realizada para a diferença entre profundidades máximas, perfis, áreas e volumetria das cavidades de erosão por ensaio através dos métodos realizados para o presente estudo, varrimento laser (VL), medição pontual com distanciômetro eletro-ótico laser (MP) e fotogrametria (FG).

Na Figura 20 apresenta-se o resultado obtido no ensaio 1 pelo levantamento efetuado a montante da caixa de areia por aplicação do método de varrimento a laser. O mesmo gera uma nuvem de pontos com erros tal, como verificado na bibliografia que se tem necessidade de serem eliminadas estas áreas obtendo-se apenas uma superfície de areia evitando erros posteriores de cálculo. Como é possível observar na Figura 20, a presença do pilar causa sombras a jusante do pilar no levantamento por varrimento a laser e causa erros de correspondência nos pontos medidos nele, causando uma superfície irregular no mesmo. Estas incongruências também são observadas em outros autores, nomeadamente, por Eder *et al.*, (2011) e Porter *et al.* (2014) no método de varrimento a laser.



Figura 20- Distorção de pilar e sombras; Levantamento do Ensaio 1 pelo método de VL efetuado a montante da caixa de areia

Para minimizar estes erros mencionadas anteriormente, foram efetuados levantamentos a montante e jusante do local de estudo, como já mencionado em capítulos anteriores. Pode-se verificar também na figura anterior que a zona imediatamente a montante do pilar se encontra com zonas brancas (zonas essas onde o equipamento não conseguiu fazer leitura de pontos), que não foram conseguidas ser corrigidas devido às limitações de leitura do equipamento e devido a não ser conseguido o estacionamento da multiestação,

devido às limitações de espaço do canal hidráulico, num local onde todas as zonas fossem observadas.

Situação semelhante ocorre no método fotogramétrico, onde a leitura do pilar é feita de forma incorreta e causa dispersão de pontos nesse mesmo local, pelo que se procedeu ao corte do pilar na nuvem de pontos final obtendo-se apenas a superfície de areia, como acontece no método de varrimento a laser.

Secção 1- Descrição de resultados

Nesta secção é apresentado um exemplo dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de análise das cavidades de erosão, sendo os restantes apresentados no Apêndice A.

Os resultados obtidos são organizados da seguinte forma: apresentação de fotografias da cavidade de erosão (Figura 21); apresentação de nuvens de pontos (Figura 22) e respetivas curvas de nível (Figura 23) da cavidade de erosão para os métodos de varrimento a laser e fotogramétrico; apresentação dos perfis longitudinais (Figura 24 e Figura 26) e transversais (Figura 25 e Figura 26) dos 3 métodos de estudo; apresentação do modelo digital de elevação (MDE), modelo este que representa a cavidade de erosão em escala vertical de cores (Figura 27).

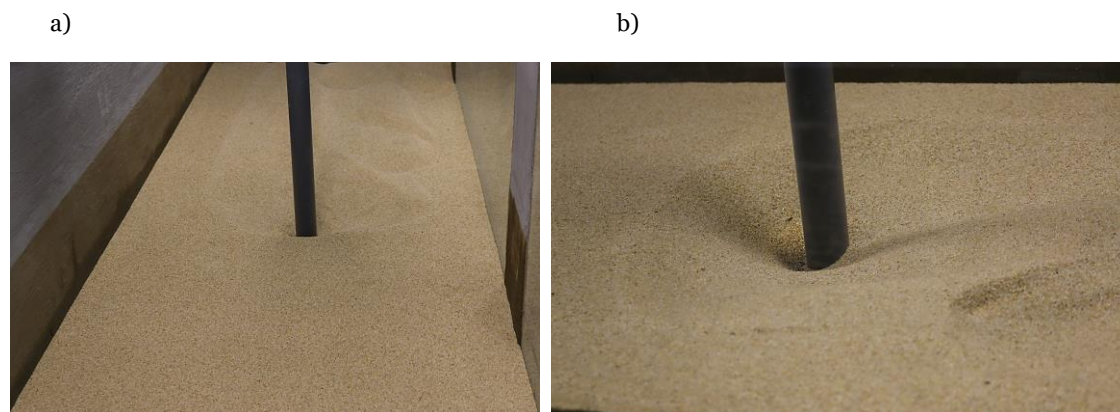


Figura 21- Cavidade de erosão Ensaio 1: a) visada a montante do pilar; b) visada lateral direita do pilar
Através dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria foram geradas nuvem de pontos da superfície em estudo, como se pode observar na Figura 22.

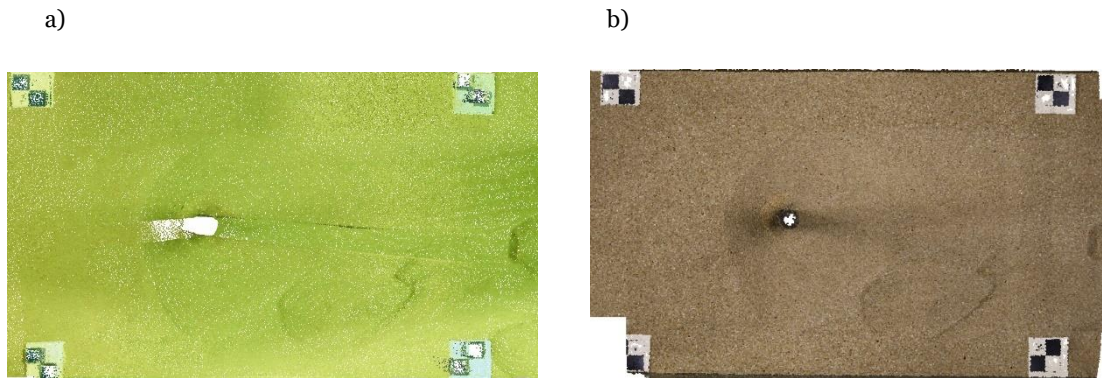


Figura 22- Nuvens de pontos Ensaio 1: a) VL; b) FG

Depois de feita a limpeza das nuvens de pontos, eliminando as zonas de sombra dos pilares e pontos dispersos que possam ser considerados incorretos, como por exemplo na zona dos alvos, são realizadas as curvas de nível espaçadas de 0,005 m através do *software 3D Reshaper* (Figura 23).

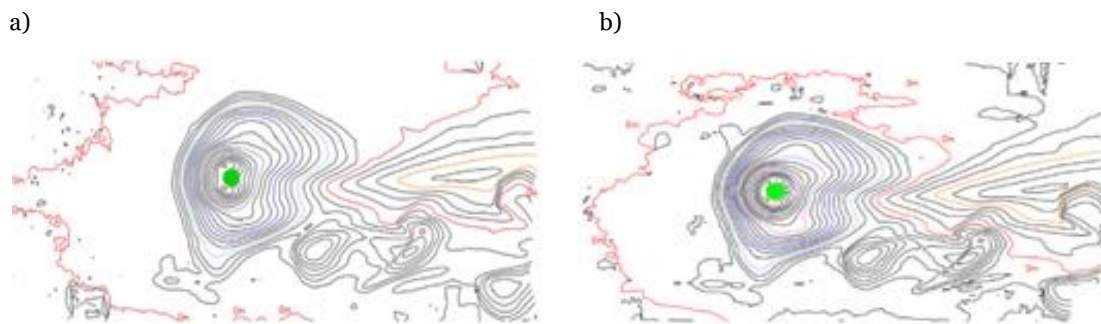
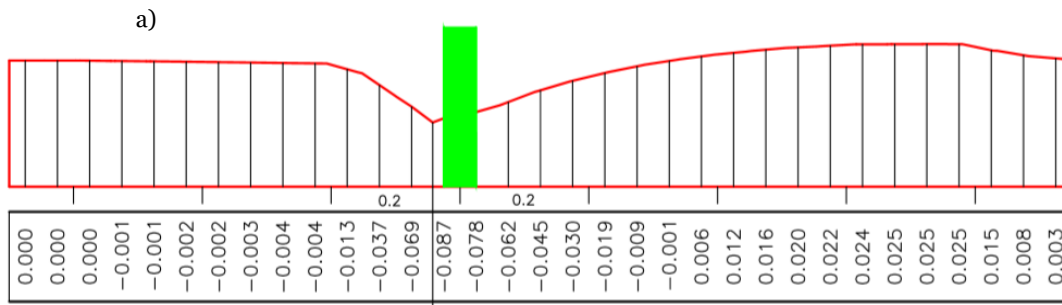


Figura 23- Curvas de nível Ensaio 1: a) VL; b) FG

Após a realização das curvas de nível dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria, as mesmas são exportadas para o *software AutoCad Architecture*. Com recurso às curvas de nível, através de intersecção à superfície triangulada, o *software* cria a superfície da cavidade de erosão onde posteriormente é feito um corte da mesma com o intuito de ser realizado o perfil longitudinal e transversal (Figura 24 e 25). Depois de realizados os perfis foram retiradas as medidas de cotas com afastamentos de 1,0 cm com o intuito de ser criada uma grelha numérica dos valores das mesmas inserida nos perfis.



Profundidade máxima da cavidade de erosão: 0,092

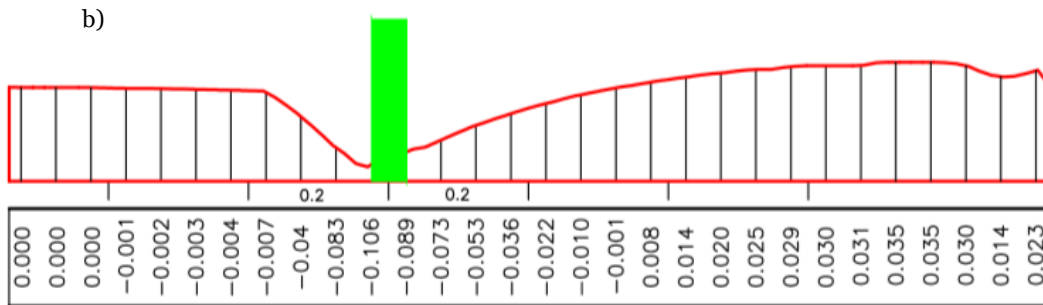


Figura 24- Perfil longitudinal Ensaio 1: a) VL; b) FG (m)

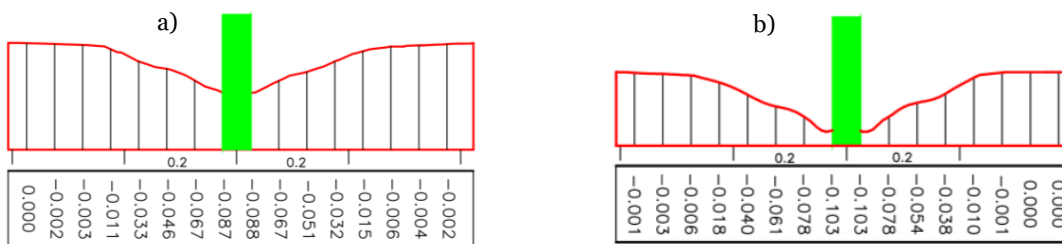
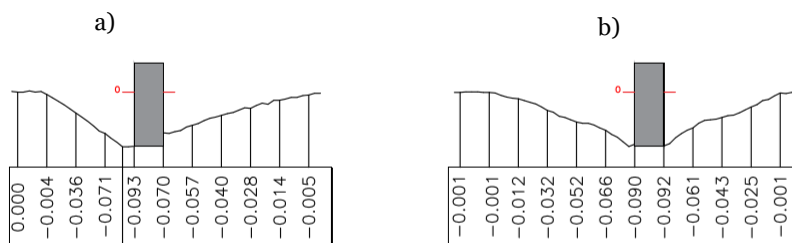


Figura 25- Perfil transversal Ensaio 1: a) VL; b) FG (m)

Para o método de medição pontual foram realizadas leituras das cotas com distâncias de 1,0 cm, como descrito em capítulos anteriores e as mesmas foram exportadas para o *software Autocad* para a realização dos perfis e respetiva grelha de cotas (Figura 26) como realizado para os métodos de varrimento a laser e fotogrametria.



Profundidade máxima da cavidade de erosão: 0,094

Figura 26- Perfis MP (distanciômetro laser): a) longitudinal; b) transversal (m)

Para os métodos de varrimento a laser e fotogramétrico, métodos para os quais foi possível obter nuvem de pontos dos ensaios, foi realizado um MDE (modelo digital de elevação) como se pode observar na Figura 27.

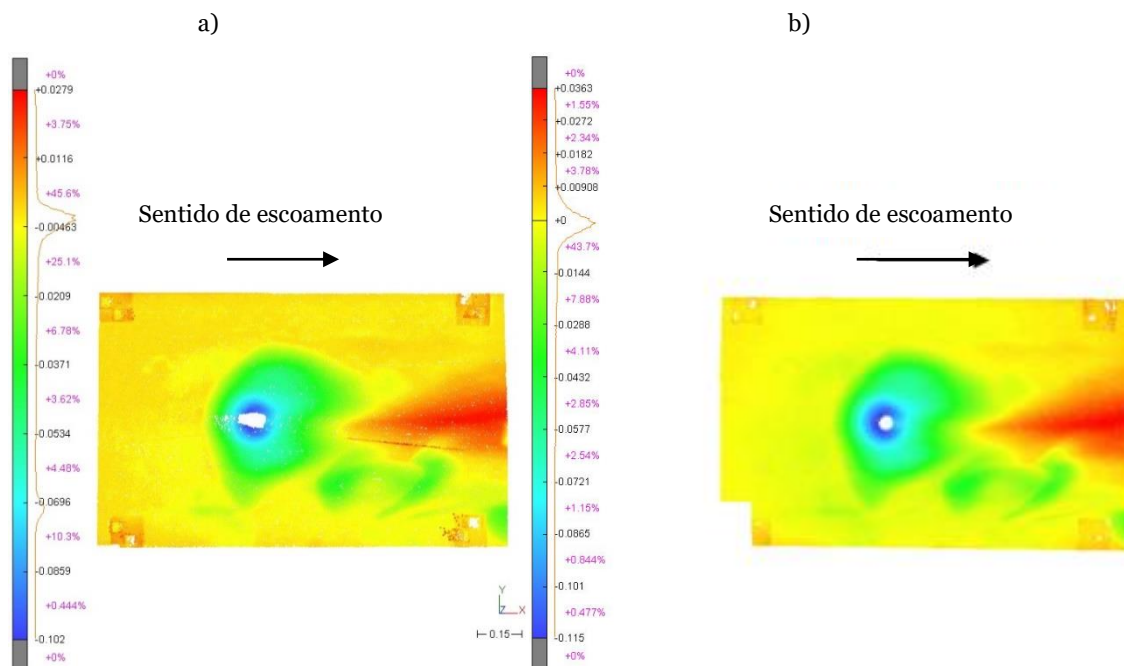


Figura 27- Ensaio 1: a) MP; b) FG (m)

Secção 2- Resumo de resultados

Na presente secção é apresentado a o resumo dos principais resultados obtidos no presente estudo através dos métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria. A medição da profundidade máxima pelos métodos de varrimento a laser e fotogrametria foi feita através de *softwares* de análise dos mesmos. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo e na Tabela 3 os restantes ensaios estudados pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual. As tabelas incluem a profundidade máxima das cavidades de erosão, h_{sm} , o volume erodido, V_{ce} e as dimensões planimétricas da cavidade de erosão a, b, c, conforme definidas na Figura 28.

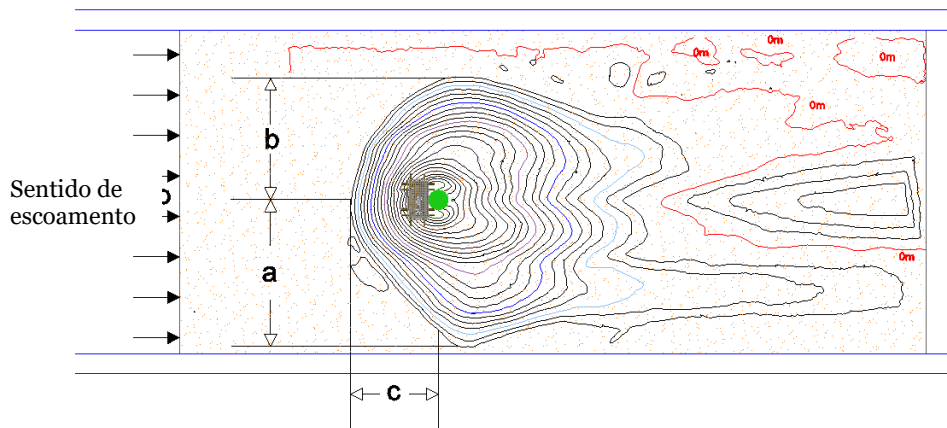


Figura 28- Caracterização esquemática da cavidade de erosão

Tabela 2- Medições experimentais dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo

Ensaio	Métodos	h_{sm} (m)	V_{ce} (mm ³)	a (m)	b (m)	c (m)
1	VL	0,092	6679×10^3	0,208	0,247	0,154
	----	MP	----	0,200	0,250	0,160
	----	FG	6988×10^3	0,207	0,248	0,154
	----	Hidrômetro	0,092	----	0,209	0,246
2	VL	0,121	15498×10^3	0,280	0,309	0,190
	----	MP	----	0,310	0,350	0,220
	----	FG	15312×10^3	0,268	0,285	0,171
	----	Hidrômetro	0,120	----	0,281	0,309
6	VL	0,101	5301×10^3	0,182	0,174	0,156
	----	MP	----	0,210	0,210	0,200
	----	FG	4956×10^3	0,180	0,183	0,168
	----	Hidrômetro	0,102	----	0,181	0,174
7	VL	0,126	11949×10^3	0,237	0,231	0,214
	----	MP	----	0,252	0,225	0,225
	----	FG	11615×10^3	0,223	0,231	0,202
	----	Hidrômetro	0,126	----	0,237	0,232
8	VL	0,081	2904×10^3	0,149	0,142	0,151
	----	MP	----	0,175	0,200	0,210
	----	FG	2987×10^3	0,163	0,145	0,182
	----	Hidrômetro	0,081	----	0,149	0,143
11	VL	0,099	9811×10^3	0,234	0,215	0,167
	----	MP	----	0,250	0,215	0,200
	----	FG	9793×10^3	0,225	0,212	0,174
	----	Hidrômetro	0,100	----	0,234	0,215

h_{sm} - profundidade máxima da cavidade de erosão; V_{ce} - volume erodido; dimensões a,b,c conforme Figura 28

Pela análise da Tabela 2, que apresenta os valores de profundidade máxima, volumes e dimensões das cavidades de erosão relativamente aos ensaios analisados pelos métodos de varrimento a laser, medição pontual, fotogrametria e medições efetuadas por Dias (2018),

pode-se verificar que os desvios são pouco significativos entre eles, havendo algumas exceções a ser analisadas no capítulo seguinte. De um modo geral, os valores referentes ao método aplicado por Dias (2018), método este considerado como de referência, estão dentro da mesma ordem de grandeza dos métodos aplicados no presente estudo.

Tabela 3- Medições experimentais dos ensaios analisados pelos métodos VL e MP

Ensaio	Métodos	h_{sm} (m)	V_{ce} (mm³)	a (m)	b (m)	c (m)
3	VL	0,132	16456×10 ³	0,254	0,348	0,196
----	MP	0,136	----	0,330	0,360	0,250
----	Hidrômetro	0,132	----	0,255	0,349	0,201
4	VL	0,132	17613×10 ³	0,255	0,260	0,196
----	MP	0,135	----	0,290	0,300	0,220
----	Hidrômetro	0,132	----	0,280	0,270	0,206
5	VL	0,144	20089×10 ³	0,310	0,311	0,224
----	MP	0,148	----	0,325	0,300	0,250
----	Hidrômetro	0,144	----	0,310	0,311	0,224
9	VL	0,142	17670×10 ³	0,272	0,286	0,227
----	MP	0,148	----	0,265	0,280	0,270
----	Hidrômetro	0,142	----	0,277	0,297	0,242
10	VL	0,095	9759×10 ³	0,256	0,273	0,151
----	MP	0,103	----	0,260	0,275	0,160
----	Hidrômetro	0,094	----	0,256	0,273	0,151
12	VL	0,095	7511×10 ³	0,207	0,214	0,156
----	MP	0,100	----	0,230	0,205	0,210
----	Hidrômetro	0,096	----	0,207	0,214	0,156
13	VL	0,102	8608×10 ³	0,213	0,238	0,158
----	MP	0,107	----	0,270	0,250	0,180
----	Hidrômetro	0,102	----	0,213	0,238	0,159
14	VL	0,076	2608×10 ³	0,161	0,231	0,125
----	MP	0,080	----	0,200	0,225	0,150
----	Hidrômetro	0,076	----	0,194	0,223	0,130
15	VL	0,095	7306×10 ³	0,219	0,232	0,160
----	MP	0,097	----	0,225	0,215	0,145
----	Hidrômetro	0,095	----	0,235	0,259	0,157
16	VL	0,069	2077×10 ³	0,098	0,115	0,145
----	MP	0,071	----	0,115	0,115	0,170
----	Hidrômetro	0,068	----	0,120	0,131	0,144
17	VL	0,097	7631×10 ³	0,196	0,193	0,141
----	MP	0,097	----	0,225	0,200	0,165
----	Hidrômetro	0,098	----	0,191	0,188	0,139

h_{sm} - profundidade máxima da cavidade de erosão; V_{ce} - volume erodido; a,b,c conforme Figura 28

Pela análise da Tabela 3, tabela esta que apresenta os mesmos valores da tabela anterior, mas para os ensaios em que foram realizadas medições apenas pelos métodos de varrimento a laser, medição pontual e medições efetuadas por Dias (2018), pode-se

verificar que os desvios são pouco significativos entre eles, também havendo algumas exceções a ser analisadas no capítulo seguinte. De um modo geral, como acontece na análise à tabela anterior, os valores referentes ao método aplicado por Dias (2018), método este considerado como de referência, estão dentro da mesma ordem de grandeza dos métodos aplicados no presente estudo.

No capítulo seguinte será feita uma análise aprofundada aos 17 ensaios onde se justificam as diferenças observadas nas tabelas 2 e 3 desta secção.

Secção 3- Diferenciais de resultados

Na presente secção é realizada uma análise às diferenças entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos aplicados em cada ensaio. Em primeiro lugar é apresentada a análise às diferenças entre profundidades máximas das cavidades de erosão obtidas no presente estudo, comparando as mesmas com os valores obtidos por Dias (2018). Em segundo lugar é apresentada a análise por ensaio às diferenças entre os perfis obtidos pelos diferentes métodos. Em terceiro lugar é apresentada a análise realizada para a diferença entre nuvens de pontos de métodos distintos para os ensaios onde o mesmo é possível (varrimento a laser e fotogrametria). Em quarto lugar é apresentada a análise realizada para as diferenças das áreas experimentais medidas e, por último, em quinto lugar é apresentada a análise das diferenças de volumetria dos distintos métodos onde o mesmo é possível calcular, por ensaio.

Subsecção 1- Diferenciais entre profundidades máximas das cavidades de erosão

Para o estudo da profundidade máxima das cavidades de erosão, foram avaliadas as diferenças entre os métodos estudados nesta dissertação, varrimento a laser, medição pontual e fotogramétrico, com os valores obtidos por Dias (2018), considerando este último como referência. Neste estudo, as medições foram realizadas com recurso a um hidrómetro de ponta direita. Na Tabela 4 apresentam-se os resultados obtidos. Os resultados são igualmente apresentados na Figura 29.

Para a designação das diferenças entre o método de referência e varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria foi utilizada a simbologia Δ_{VL} , Δ_{MP} e Δ_{FG} , respetivamente, sendo consideradas negativas as diferenças em que o método de referência nos dá valores de profundidades menores que o método a ser comparado.

Tabela 4- Desvios da profundidade máxima da cavidade de erosão entre métodos

Ensaio	h_{sm} hidrômetro (m)	Δ_{VL} (m)	Δ_{MP} (m)	Δ_{FG} (m)
1	0,092	0,000	-0,002	-0,014
2	0,120	-0,001	-0,003	0,000
3	0,132	0,000	-0,004	----
4	0,132	0,000	-0,003	----
5	0,144	0,000	-0,004	----
6	0,102	0,001	-0,006	-0,003
7	0,126	0,000	-0,006	0,001
8	0,081	0,000	-0,007	-0,004
9	0,142	0,000	-0,006	----
10	0,094	-0,001	-0,009	----
11	0,100	0,001	-0,011	0,001
12	0,096	0,001	-0,004	----
13	0,102	0,000	-0,005	----
14	0,076	0,000	-0,004	----
15	0,095	0,000	-0,002	----
16	0,068	-0,001	-0,003	----
17	0,098	0,001	0,001	----

A análise da Tabela 4 permite verificar que os desvios são pouco significativos relativamente à diferença entre as profundidades máximas das cavidades de erosão do método de referência, medições efetuadas por Dias (2018), e métodos aplicados na presente dissertação, havendo algumas exceções a serem analisadas no capítulo seguinte. Na Figura 29 apresentam-se, em forma de gráfico, os valores dos desvios entre métodos apresentados na Tabela 4.

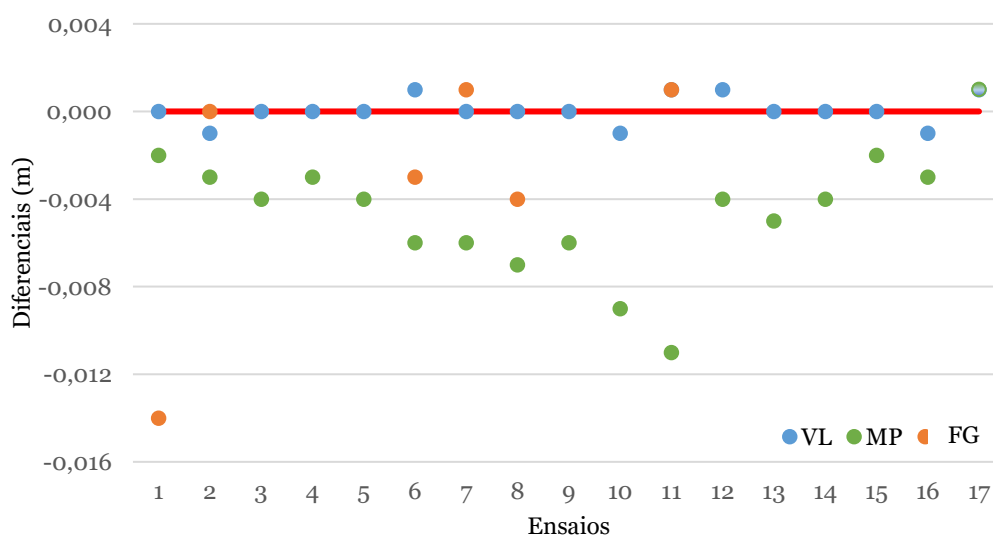


Figura 29- Diferenças de profundidades máximas entre o método de referência (hidrômetro por Dias, 2018) com os utilizados no presente estudo: VL, MP, FG

A análise da Figura 29 permite identificar melhor os ensaios em que os desvios de medição de profundidades máximas das cavidades de erosão entre o método de referência e os de estudo são maiores. O método de varrimento a laser é o que apresenta resultados mais próximos dos obtidos por Dias (2018). Pode-se verificar também que o método de medição pontual é o que apresenta desvios maiores em relação ao de referência, sendo eles maioritariamente negativos, com exceção do Ensaio 17. É também visível na Figura 29 que o maior desvio acontece na profundidade máxima da cavidade de erosão relativamente Ensaio 1, por parte do método fotogramétrico em relação ao de referência. Com maior detalhe, todos os desvios mais significativos são discutidos no capítulo seguinte.

Subsecção 2- Diferenciais entre perfis

Na presente subsecção são apresentadas as análises realizadas por ensaio às diferenças entre perfis de cada método de estudo. Em primeiro lugar, através dos perfis realizados por ensaio para os diferentes métodos de estudo (perfil longitudinal e transversal), são sobrepostos os mesmos e são retirados os valores de cotas de cada perfil com o intuito de serem calculadas as diferenças entre eles.

As cotas são obtidas em intervalos centimétricos em todos os perfis realizados pelos diferentes métodos de estudo em que o ponto inicial do perfil é sistemático em ambas as direções e tem a sua origem no pilar.

A partir das cotas recolhidas, referentes aos perfis obtidos pelos métodos de varrimento a laser, fotogramétrico e medição pontual são calculadas as diferenças entre eles tendo sido considerado como referência o perfil resultado do método de varrimento a laser.

Para a análise de diferenças entre métodos foram calculadas medidas de tendência central (média, mediana e desvio padrão) da amostra de resultados, foram realizados histogramas de diferenças entre métodos e gráficos de dispersão entre valores de cotas e foi feito um teste de normalidade para que posteriormente se pudesse verificar através de testes estatísticos se os métodos comparados se adaptavam para o estudo, através do *software* SPSS.

Para o estudo da normalidade, foram utilizados os testes de *Kolmogorov- Smirnov* e *Shapira- Wilk*, sendo que o primeiro teste é o mais apropriado tendo em conta a amostra dos resultados de estudo (o teste de *Shapira-Wilk* é particularmente apropriado para amostras inferiores a 30, o que no nosso caso é bastante superior (Marôco, 2014)).

Ambos os testes foram aplicados aos valores das diferenças entre métodos para decidir se a distribuição da amostra é ou não normal. Para um valor de $P < 0,05$, os valores das

diferenças apresentam uma distribuição não normal, sendo que para valores de $P > 0,05$ apresentam uma distribuição normal (Marôco, 2014).

Para a validação dos métodos utilizados no estudo das cavidades de erosão, foram utilizados os métodos propostos por Marôco (2014). Para as diferenças em que o teste de normalidade deu positivo, foi utilizado o teste paramétrico *T student* e para os restantes foi utilizado o teste não paramétrico de *Wilcoxon*. Os métodos são considerados validados quando o valor de P é superior a 0,05.

Através da análise estatística Bayesiana é calculado o intervalo de confiança a 95% das diferenças entre métodos e é feita a medição do comprimento do mesmo com o intuito de ser verificado se este se integra na mesma ordem de grandeza em todos os ensaios e métodos e é também realizado um gráfico de probabilidades da ocorrência das diferenças medidas.

Em primeiro lugar é apresentada a análise realizada para um dos ensaios, como exemplo, onde se inclui a comparação de perfis dos diferentes métodos de análise para os ensaios realizados (Figura 30), os gráficos de dispersão de cotas (Figura 31) e os histogramas de diferenças entre métodos (Figura 32). Seguidamente são apresentados os parâmetros estatísticos e o teste de normalidade para as diferenças entre métodos dos ensaios. Na Tabela 5, são apresentados os resultados para os ensaios estudados pelos 3 métodos (varrimento a laser, fotogrametria e medição pontual) e na Tabela 6, são apresentados os resultados dos ensaios estudados apenas pelo método de varrimento a laser e medição pontual.

Em segundo lugar são apresentadas as tabelas com os intervalos de confiança a 95% para as diferenças entre métodos de estudo por ensaio através da estatística Bayesiana, sendo os mesmos resultados divididos por ensaios analisados pelos 3 métodos (Tabela 7) e ensaios analisados apenas pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual (Tabela 8).

Tal como referido anteriormente, de seguida é apresentada a análise realizada pela comparação de perfis, começando por mostrar um exemplo dos 3 perfis sobrepostos para um ensaio (Figura 30), sendo os restantes mostrados no Apêndice B.1.

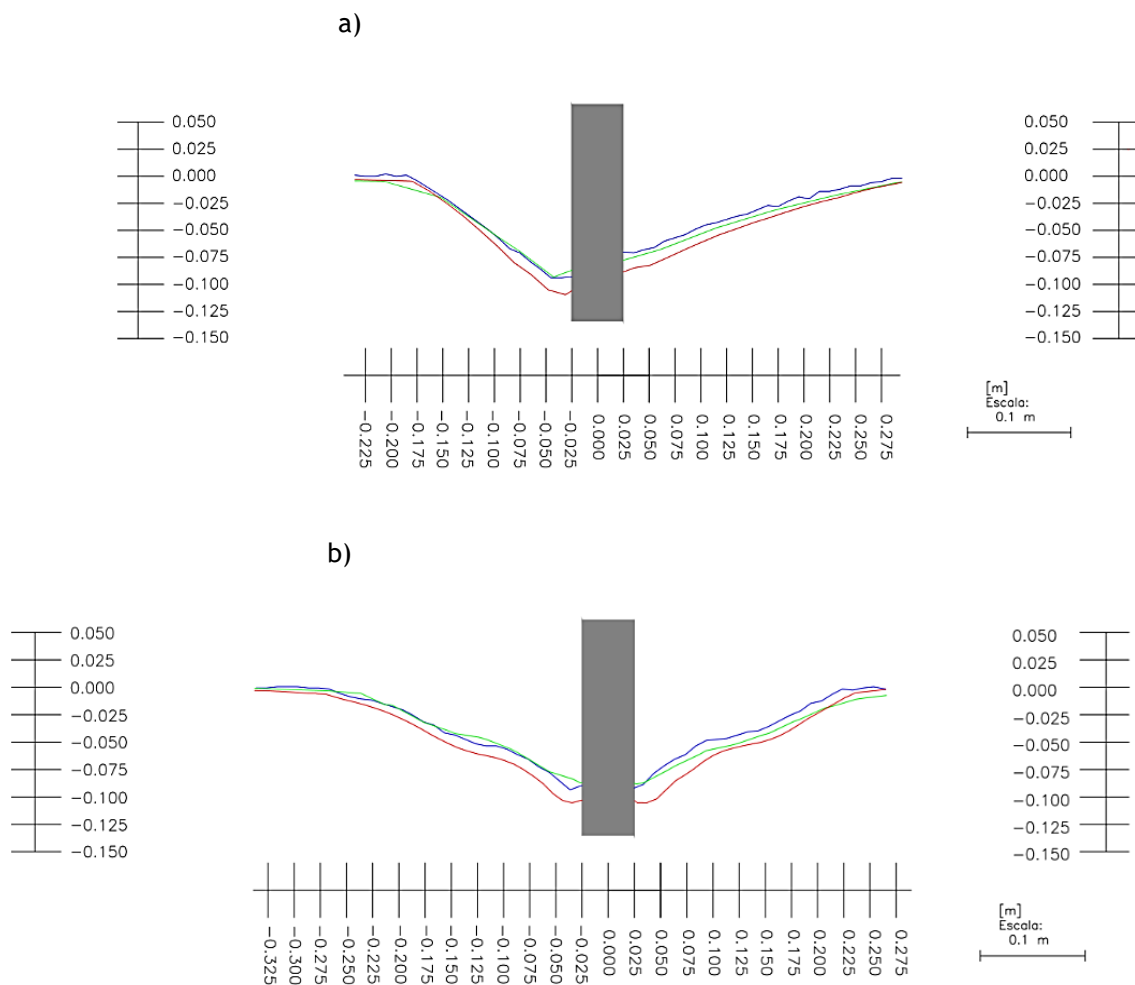


Figura 30- Perfis de comparação de métodos Ensaio 1: a) perfis longitudinais; b) perfis transversais; verde-VL; azul- MP; vermelho- FG

A análise da Figura 30 permite verificar que os desvios entre métodos de estudo no que diz respeito aos perfis realizados para o Ensaio 1 são muito significativos, principalmente no fotogramétrico em relação aos de varrimento a laser e medição pontual. A justificação do mesmo é discutida no próximo capítulo.

Seguidamente, apresenta-se a análise realizada para as diferenças de cotas dos perfis. Em primeiro lugar, na Figura 31 apresenta-se um exemplo dos gráficos de dispersão de valores de cotas entre métodos para o Ensaio 1 (sendo apresentado no Apêndice B.1.1 a análise dos restantes ensaios). Os valores de cotas apresentados estão divididos por: valores a montante, jusante, margem direita (direita na legenda da Figura 31) e margem esquerda (esquerda na legenda a Figura 31) do pilar.

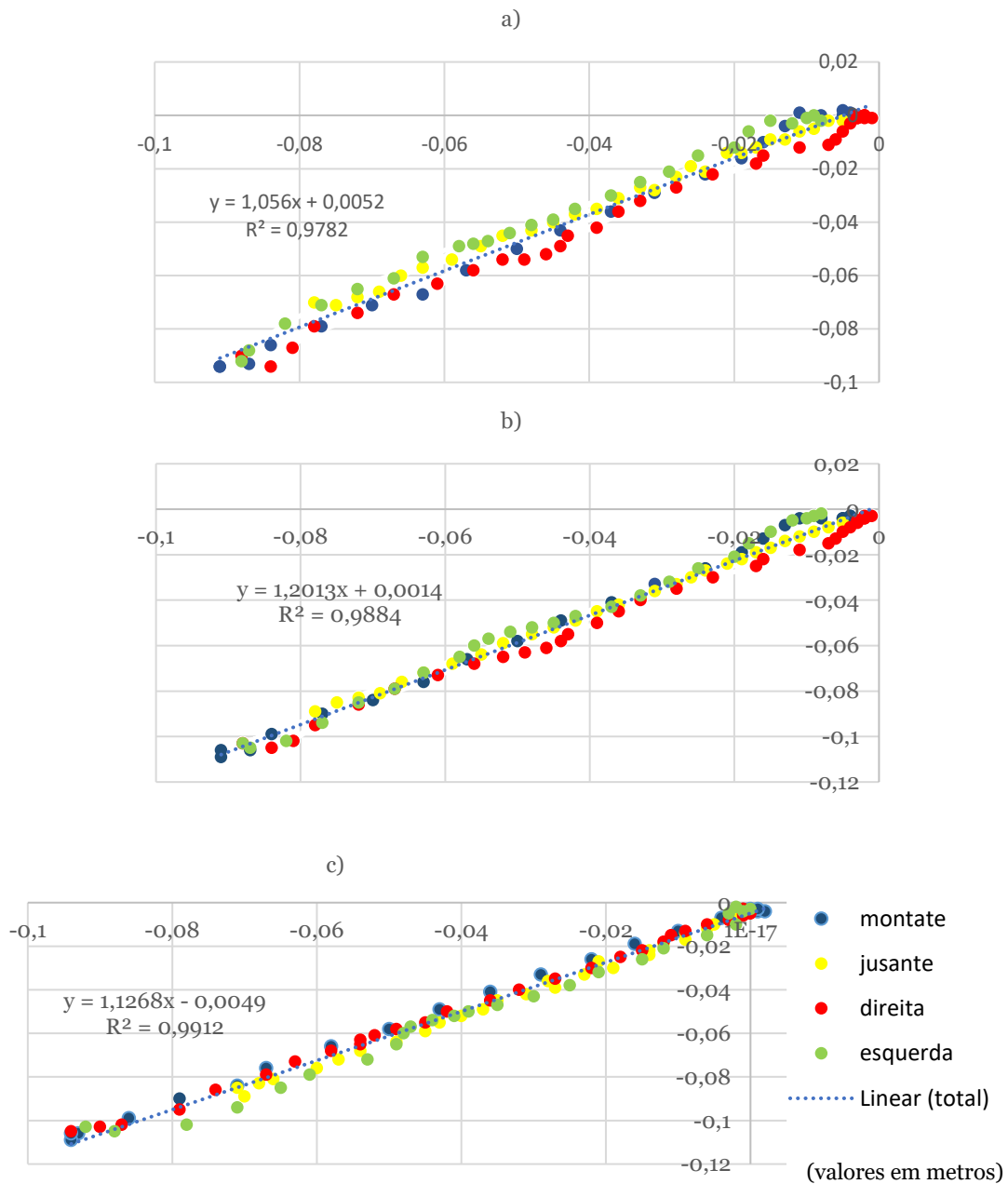


Figura 31- Gráfico de dispersão de cotas para Ensaio 1: a) diferenças entre VL e FG; b) diferenças entre VL e MP; c) diferenças entre MP e FG

A análise da Figura 31 permite verificar as diferenças entre valores de cota dos métodos de estudo para, como exemplo, o Ensaio 1. Para as diferenças entre o método de varrimento a laser e fotogrametria (Figura 31- a)), podemos verificar que o valor da inclinação da reta é de 0,9782, significando o mesmo que o valor das diferenças entre pontos medidos é significativo. O valor da reta quanto mais se aproxima de 1, menor é a oscilação de diferenças entre pontos medidos dos vários métodos de estudo em que a ocorrência de um erro sistemático é evidente. No exemplo apresentado, é possível verificar que os desvios entre valores de cota dos métodos de medição pontual e fotogramétrico são praticamente

constantes, sendo a inclinação da reta de 0,9912, e pode-se afirmar que ocorreu um erro sistemático na medição de um dos métodos.

Seguidamente apresenta-se a análise realizada para as diferenças de cotas dos perfis realizados para os métodos em estudo, através da realização de histogramas de diferenças entre métodos realizados (Figura 32). Os gráficos a), b), c) representam as diferenças entre métodos de varrimento a laser e medição pontual, varrimento a laser e fotogrametria e medição pontual e fotogrametria, respetivamente, para o Ensaio 1. Os restantes são apresentados no Apêndice B.1.2.

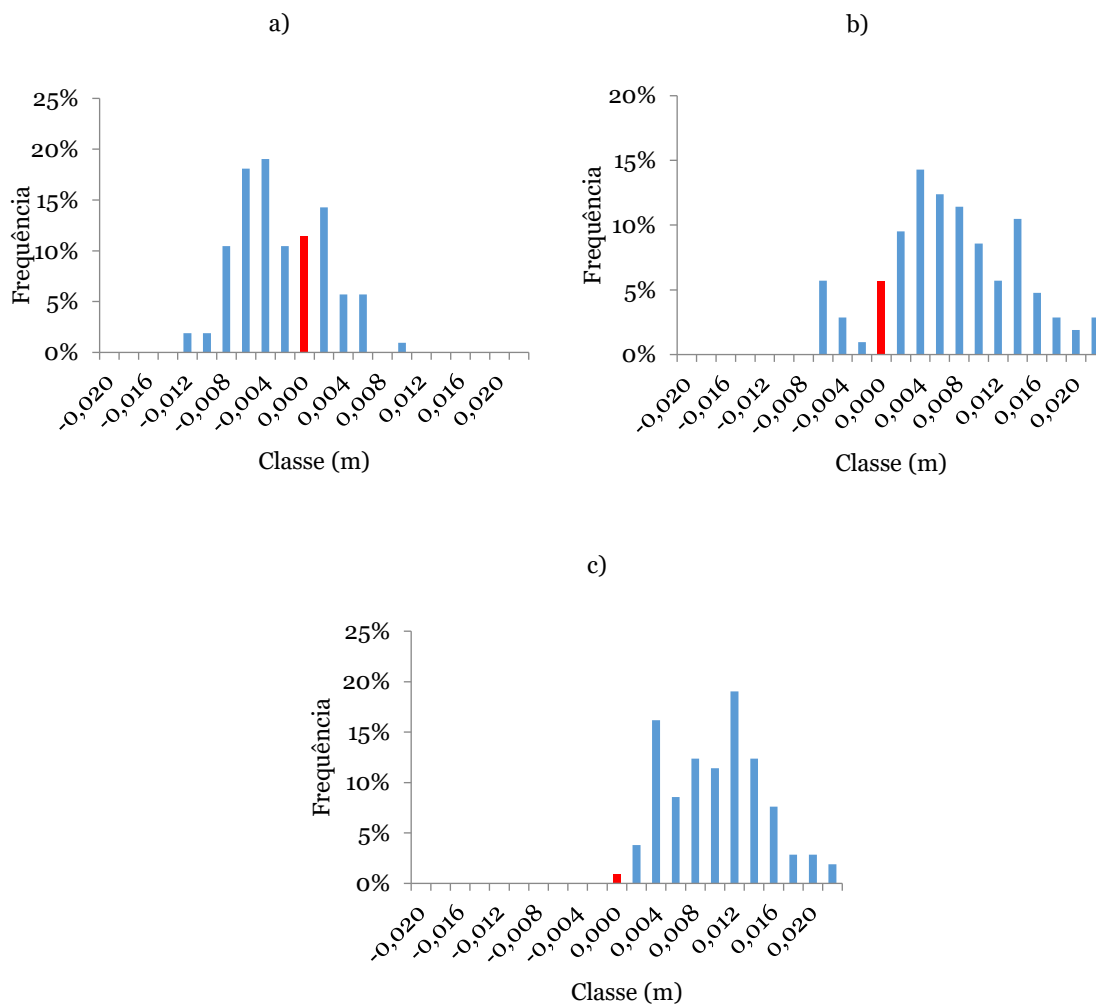


Figura 32- Histogramas de diferenças entre métodos Ensaio 1: a) diferenças entre VL e MP; b) diferenças entre VL e FG; c) diferenças entre MP e FG

A análise da Figura 32, em que se apresenta um exemplo de histogramas de diferenças entre métodos para o Ensaio 1, permite verificar o que foi dito anteriormente relativamente à Figura 30. Pode-se verificar que existe um erro sistemático por parte do método de medição pontual ou fotogramétrico que faz com que o primeiro dê valores de cota superiores ao segundo, originando diferenças positivas entre eles.

Também para a análise das diferenças de cotas dos perfis realizados para os diferentes métodos, foram calculados parâmetros estatísticos, mediana (M), média (m) e desvio padrão (σ), sendo criado um gráfico resumo com os mesmos. Foi feito também um teste de normalidade através do *software* SPSS com o intuito de analisar-se a distribuição das diferenças é ou não normal para posteriormente ser decidido o teste a utilizar para a validação dos métodos de estudo. Os mesmos resultados são apresentados nas tabelas 5 e 6 e figuras 33 e 34. Na Tabela 5 e Figura 33 são apresentados os valores e respectivos gráficos resumo para os ensaios estudados pelos 3 métodos de estudo e na Tabela 6 e Figura 34 é apresentado a mesma informação, mas para os ensaios apenas analisados pelos métodos de varrimento a laser (VL) e medição pontual (MP).

Tabela 5- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo e respetiva análise de normalidade

Ensaio	Métodos (Diferenças)	M (m)	m (m)	σ (m)	T. normalidade
1	VL e MP	-0,004	-0,003	0,005	Positivo
----	VL e FG	0,006	0,006	0,007	Positivo
----	MP e FG	0,010	0,010	0,005	Negativo
2	VL e MP	-0,005	-0,002	0,007	Negativo
----	VL e FG	-0,010	-0,009	0,006	Negativo
----	MP e FG	-0,008	-0,007	0,005	Negativo
6	VL e MP	0,001	0,001	0,005	Negativo
----	VL e FG	-0,004	-0,004	0,006	Negativo
----	MP e FG	-0,005	-0,004	0,004	Positivo
7	VL e MP	0,000	0,000	0,003	Negativo
----	VL e FG	-0,005	-0,006	0,003	Negativo
----	MP e FG	-0,006	-0,006	0,002	Negativo
8	VL e MP	-0,004	-0,003	0,008	Negativo
----	VL e FG	-0,005	-0,002	0,010	Negativo
----	MP e FG	0,000	0,001	0,004	Positivo
11	VL e MP	-0,003	-0,003	0,005	Negativo
----	VL e FG	-0,007	-0,008	0,005	Negativo
----	MP e FG	-0,003	-0,004	0,003	Negativo

(M) mediana; (m) média; (σ) desvio padrão

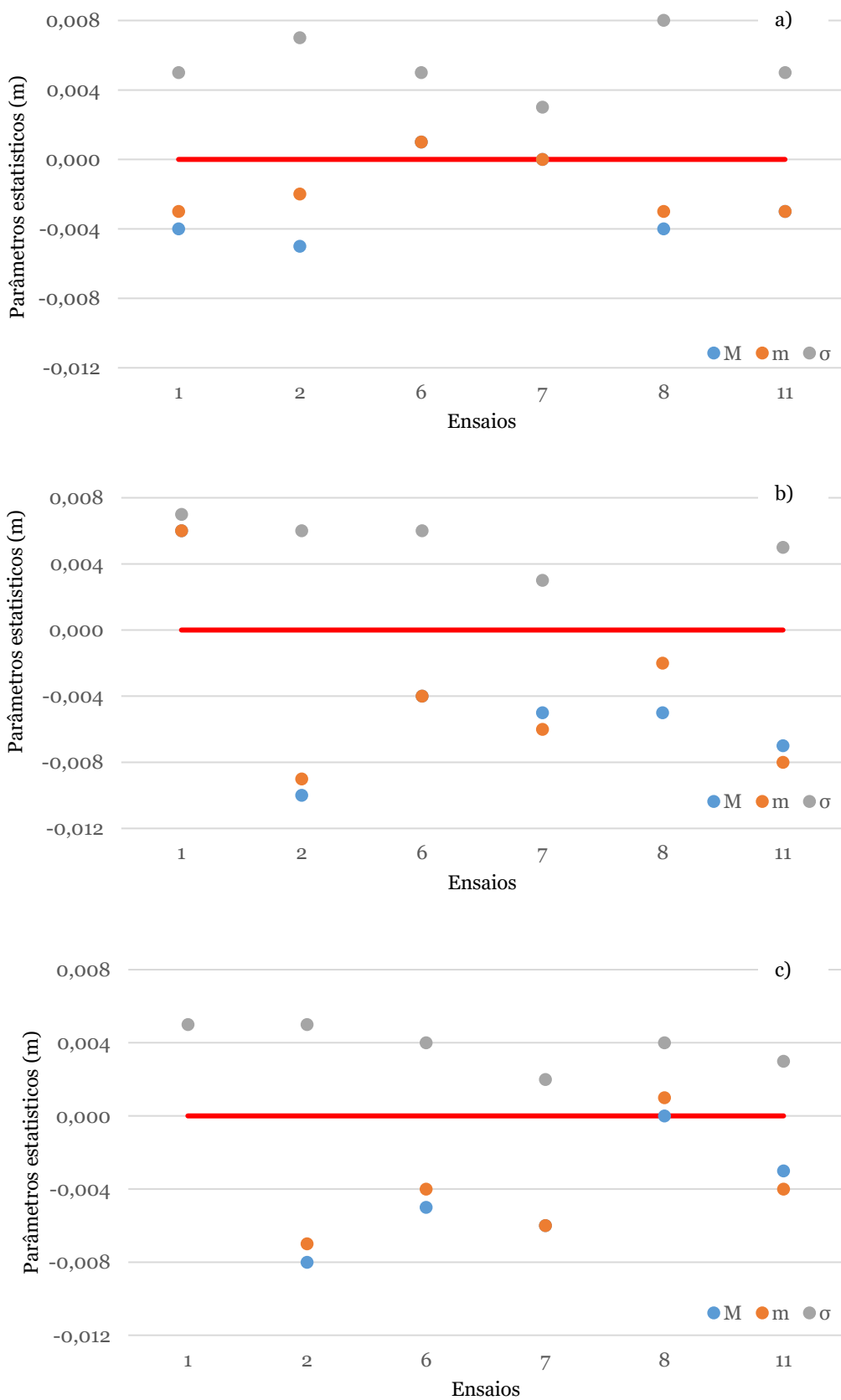


Figura 33- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo: diferenças entre VL e MP; b) diferenças entre VL e FG; c) diferenças entre MP e FG

A análise da Figura 33 permite verificar que relativamente à mediana, média e desvio padrão das diferenças entre os métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria são pouco significativos. As diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual são as que apresentam valores mais baixos.

Tabela 6- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados por VL e MP e respetiva análise de normalidade

Ensaio	Métodos (Diferenças)	M (m)	m (m)	σ (m)	T. Normalidade
3	VL e MP	-0,004	0,000	0,006	Negativo
4	VL e MP	-0,008	-0,009	0,005	Negativo
5	VL e MP	-0,005	-0,005	0,004	Negativo
9	VL e MP	-0,009	-0,009	0,007	Negativo
10	VL e MP	-0,005	-0,006	0,010	Negativo
12	VL e MP	-0,004	-0,004	0,004	Negativo
13	VL e MP	-0,005	-0,006	0,008	Negativo
14	VL e MP	-0,004	-0,006	0,006	Negativo
15	VL e MP	-0,009	-0,008	0,007	Negativo
16	VL e MP	0,000	0,000	0,006	Negativo
17	VL e MP	-0,003	-0,005	0,008	Negativo

(M) mediana; (m) média; (σ) desvio padrão

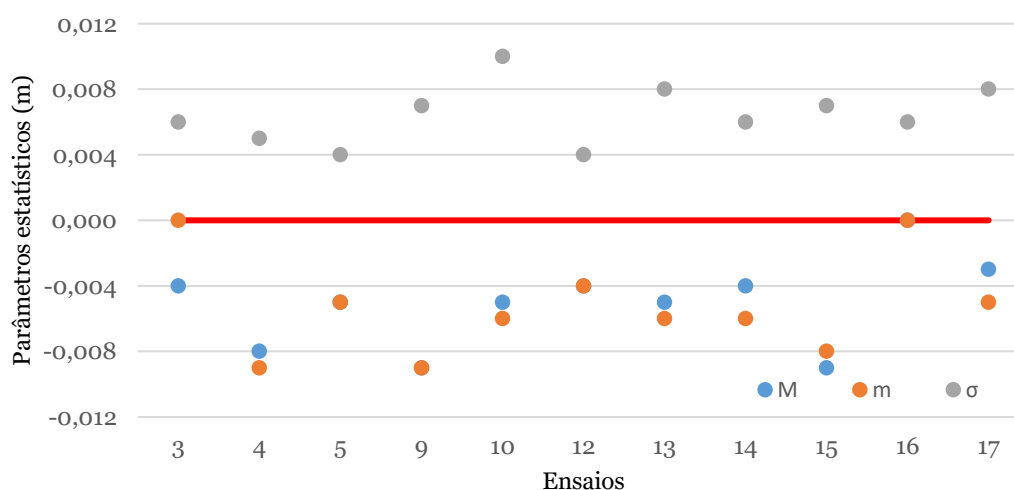


Figura 34- Parâmetros estatísticos dos ensaios analisados por VL e MP

No que diz respeito aos parâmetros estatísticos das diferenças dos ensaios analisados apenas pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual, pela Tabela 6 e Figura 34

pode-se verificar que os desvios entre parâmetros são pouco significativos, havendo algumas diferenças que serão discutidas no capítulo seguinte.

Através do *software SPSS*, foram calculados os intervalos de confiança a 95% pela estatística *Bayesiana* com intuito de ser discutida a ordem de grandeza dos mesmos. Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados, sendo estes divididos por ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo e ensaios analisados apenas pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual, respetivamente. Os resultados das tabelas apresentadas seguidamente, são apresentados como resultados intermédios, por esse motivo apresentam 4 casas decimais.

Tabela 7- Intervalos de confiança a 95% das diferenças entre métodos pela estatística Bayesiana (resultados intermédios) - Ensaios analisados pelos 3 métodos de estudo

Ensaio	Métodos (Diferenças)	Int. de confiança (95%) (m)	Amplitude do intervalo (m)
1	VL e MP	[-0,0039; -0,0021]	0,0018
----	VL e FG	[0,0051; 0,0076]	0,0025
----	MP e FG	[0,0084; 0,0103]	0,0019
2	VL e MP	[-0,0032; -0,0009]	0,0023
----	VL e FG	[-0,0100; -0,0079]	0,0021
----	MP e FG	[-0,0077; -0,0061]	0,0016
6	VL e MP	[-0,0002; 0,0018]	0,0020
----	VL e FG	[-0,0050; -0,0026]	0,0024
----	MP e FG	[-0,0054; -0,0038]	0,0016
7	VL e MP	[-0,0006; 0,0006]	0,0013
----	VL e FG	[-0,0064; -0,0054]	0,0011
----	MP e FG	[-0,0063; -0,0054]	0,0009
8	VL e MP	[-0,0043; -0,0009]	0,0033
----	VL e FG	[-0,0040; 0,0001]	0,0041
----	MP e FG	[-0,0003; 0,0016]	0,0019
11	VL e MP	[-0,0026; -0,0008]	0,0018
----	VL e FG	[-0,0083; -0,0066]	0,0017
----	MP e FG	[-0,0065; -0,0050]	0,0016

A análise da Tabela 7 que contém os intervalos de confiança a 95% das diferenças entre os três métodos de estudo, permite verificar que a amplitude dos intervalos depois de serem retirados os 2,5% das extremidades, é da mesma ordem de grandeza em todos os ensaios.

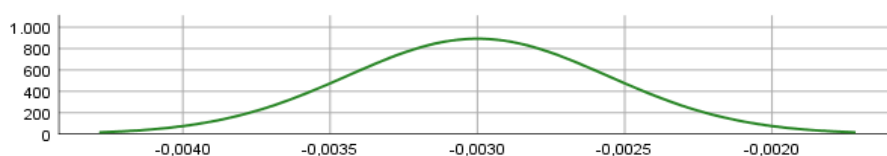
Tabela 8- Intervalos de confiança a 95% das diferenças entre métodos pela estatística Bayesiana (resultados intermediários) - Ensaios analisados pelos métodos de VL e MP

Ensaio	Métodos (Diferenças)	Int. de confiança (95%) (m)	Amplitude do intervalo (m)
3	VL e MP	[-0,0011; 0,0010]	0,0020
4	VL e MP	[-0,0098; -0,0081]	0,0017
5	VL e MP	[-0,0052; -0,0040]	0,0012
9	VL e MP	[-0,0106; -0,0080]	0,0027
10	VL e MP	[-0,0062; -0,0044]	0,0018
12	VL e MP	[-0,0048; -0,0035]	0,0013
13	VL e MP	[-0,0073; -0,0043]	0,0031
14	VL e MP	[-0,0076; -0,0050]	0,0027
15	VL e MP	[-0,0089; -0,0063]	0,0026
16	VL e MP	[-0,0009; 0,0017]	0,0027
17	VL e MP	[-0,0059; -0,0036]	0,0023

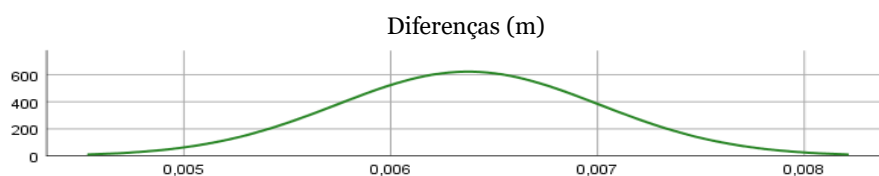
Pela análise da Tabela 8, onde estão inseridos os restantes ensaios da Tabela 7, pode-se verificar que a amplitude dos intervalos de confiança são da mesma ordem de grandeza, como acontece nas diferenças entre os três métodos de estudo.

Também através do mesmo *software* foi realizado uma análise de probabilidade das diferenças entre cotas dos perfis realizados através dos vários métodos por ensaio. Na Figura 35 é apresentado um exemplo, para o Ensaio 1, dos mesmos, às diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual, varrimento a laser e fotogrametria e medição pontual e fotogrametria, respetivamente. A análise aos restantes ensaios é apresentada no Apêndice B.1.3. Pode-se verificar que o número de casas decimais nos valores do eixo das diferenças nos três seguintes gráficos não é o mesmo, não sendo possível resolver o problema no *software*.

a)



b)



c)

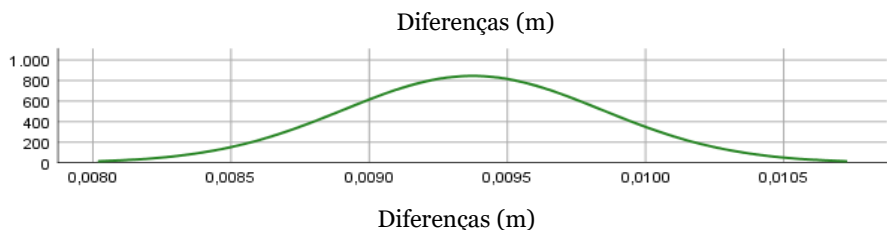


Figura 35- Probabilidades de diferenças entre métodos Ensaio 1: a) VL e MP; b) VL e FG; c) MP e FG

Através dos intervalos de confiança e da visualização das diferenças entre métodos foi apurado que ocorrem erros sistemáticos na realização dos métodos em estudo que fazem com que as diferenças entre eles estejam deslocadas para o lado positivo ou negativo em relação ao 0 (o 0 representa ausência de diferenças entre os métodos comparados). Por este motivo foi decidido deslocar o valor das cotas dos perfis à mediana das diferenças entre métodos. Ou seja, como por exemplo, nas diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual, foi retirado o erro sistemático (erro este considerado a mediana) ao método comparado (medição pontual). Na Figura 36 apresenta-se o exemplo das diferenças deslocadas à mediana para o Ensaio 1, estando representados no Apêndice B.1.4 os restantes ensaios.

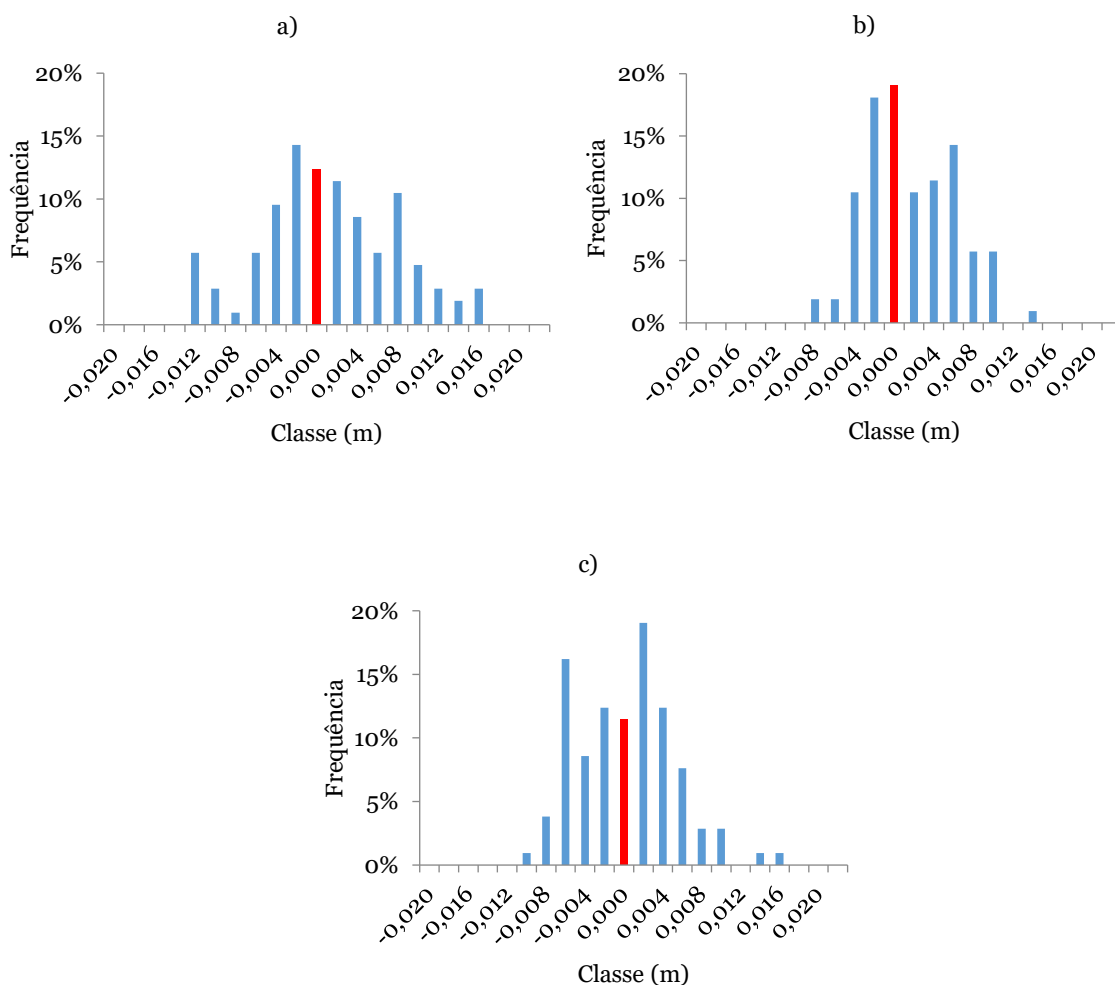


Figura 36- Valores deslocados à mediana Ensaio 1: a) diferenças entre VL e FG; b) diferenças entre VL e MP; c) diferenças entre MP e FG

A análise da Figura 36 permite verificar que as diferenças entre métodos depois de ser retirado o erro sistemático ficam centradas no valor 0, o que permite concluir que o valor do erro sistemático foi considerado corretamente, sendo ele a mediana.

Por fim, depois de corrigidos os erros detetados, através da redução da mediana aos valores de cota, procedeu-se ao cálculo dos testes de validação dos métodos utilizados.

Foi utilizado o teste *T student* para os ensaios onde as diferenças têm uma distribuição normal e foi utilizado o teste de *Wilcoxon* para os ensaios onde as diferenças são de distribuição não normal, testes estes indicados por *Marôco* (2014) para demonstrar a semelhança dos métodos comparados e validação dos mesmos para o estudo. A validação dos métodos surge se o valor de *P* for superior a 0,05.

A realização do teste para a validação dos métodos utilizados na presente dissertação foi realizada depois de serem corrigidos os erros, devido a estes terem sido detetados e a mesma é apresentada nas tabelas 9 e 10 (sendo os valores separados pelos ensaios realizados pelos 3 métodos- Tabela 9 e pelos ensaios realizados apenas pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual- Tabela 10).

Tabela 9- Testes estatísticos de validação de métodos com cotas deslocadas à mediana (erro sistemático) e respetivo intervalo de confiança 95%: ensaios realizados pelos 3 métodos

Ensaio	Métodos (Diferenças)	<i>P</i> (<i>T-</i> <i>student</i>)	<i>P</i> (<i>Wilcoxon</i>)	Int. Conf. 95% (m)	Média (m)
1	VL e MP	0,026	----	[0,0001; 0,0019]	0,0010
----	VL e FG	0,556	----	[-0,0009; 0,0016]	-0,0004
----	MP e FG	----	0,730	[-0,0006; 0,0013]	0,0004
2	VL e MP	----	0,000	[0,0018; 0,0041]	0,0029
----	VL e FG	----	0,086	[0,0000; 0,0021]	0,0010
----	MP e FG	----	0,007	[0,0003; 0,0019]	0,0011
6	VL e MP	----	0,818	[-0,0012; 0,0008]	-0,0002
----	VL e FG	----	0,964	[-0,0010; 0,0015]	0,0002
----	MP e FG	0,266	----	[-0,0004; 0,0012]	0,0004
7	VL e MP	----	0,814	[-0,0006; 0,0006]	0,0000
----	VL e FG	----	0,001	[-0,0014; 0,0004]	-0,0009
----	MP e FG	----	0,977	[-0,0003; 0,0006]	0,0002
8	VL e MP	----	0,722	[-0,0008; 0,0026]	0,0009
----	VL e FG	----	0,357	[0,0005; 0,0046]	0,0025
----	MP e FG	0,200	----	[-0,0003; 0,0016]	0,0019
11	VL e MP	----	0,040	[0,0004; 0,0022]	0,0010
----	VL e FG	----	0,328	[-0,0013; 0,0004]	-0,0005
----	MP e FG	----	0,001	[-0,0025; -0,0010]	-0,0018

A análise da Tabela 9 permite verificar que a média das diferenças entre os 3 métodos de estudo se aproximou de 0 depois de ser retirado o valor do erro sistemático sendo as diferenças entre o de varrimento a laser e medição pontual as menores.

Tabela 10- Testes estatísticos de validação de métodos com cotas deslocadas à mediana (erro sistemático) e respetivo intervalo de confiança 95%: ensaios realizados pelos métodos VL e MP

Ensaio	P (Wilcoxon)	Int. Conf. 95% (m)	Média (m)
3	0,000	[0,0029; 0,0050]	0,0039
4	0,167	[-0,0013; 0,0004]	-0,0004
5	0,451	[-0,0002; 0,0010]	0,0004
9	0,679	[-0,0016; 0,0010]	-0,0003
10	0,741	[-0,0012; 0,0006]	-0,0003
12	0,371	[-0,0008; 0,0005]	-0,0002
13	0,426	[-0,0023; 0,0007]	-0,0008
14	0,014	[-0,0036; -0,0009]	-0,0022
15	0,056	[0,0002; 0,0027]	0,0014
16	0,589	[-0,0009; 0,0017]	0,0000
17	0,020	[-0,0029; -0,0006]	-0,0017

A análise da Tabela 10 permite verificar que a média das diferenças para os ensaios estudados apenas pelos métodos de varrimento a laser e medição pontual também se aproximou de 0 depois de ser retirado o valor do erro sistemático sendo as diferenças entre o de varrimento a laser e medição pontual as menores.

Subsecção 3- Diferenças de dimensões das cavidades de erosão

Seguidamente são comparadas as dimensões das cavidades de erosão obtidas por Dias (2018), com os valores obtidos pelos métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria. Na Tabela 11 encontram-se os valores obtidos por Dias (2018) e os desvios obtidos no presente estudo. Na tabela foram utilizadas as letras a, b, c para identificar o local onde foi medida a cavidade de erosão, como demonstra a Figura 28. Para identificar as diferenças com os valores medidos pelos métodos de estudo nesta dissertação, foram utilizadas as siglas Δ_{VL} , Δ_{MP} , Δ_{FG} que representam as diferenças do método de referência (medições realizadas com o hidrómetro de ponta direita, Dias, 2018) com os métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogramétrico, respetivamente. Tal como foi apresentado em subsecções anteriores, na presente são apresentados gráficos resumo, na Figura 37, relativamente aos valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Diferenças das dimensões das cavidades de erosão entre métodos (a,b,c de acordo com a figura 28)

Ensaio	Dias (2018) (m)			Δ_{VL} (m)			Δ_{MP} (m)			Δ_{FG} (m)		
	a	b	c	Δ_a	Δ_b	Δ_c	Δ_a	Δ_b	Δ_c	Δ_a	Δ_b	Δ_c
1	0,209	0,246	0,154	0,001	-0,001	0,000	0,009	-0,004	-0,006	0,002	-0,002	0,000
2	0,281	0,309	0,190	0,001	0,000	0,000	-0,029	-0,041	-0,03	0,013	0,024	0,019
3	0,255	0,349	0,201	0,001	0,001	0,005	-0,075	-0,011	-0,049	----	----	----
4	0,280	0,270	0,206	0,025	0,010	0,010	-0,010	-0,030	-0,014	----	----	----
5	0,310	0,311	0,224	0,000	0,000	0,000	-0,015	0,011	-0,026	----	----	----
6	0,181	0,174	0,156	-0,001	0,000	0,000	-0,029	-0,036	-0,044	0,001	-0,009	-0,012
7	0,237	0,232	0,215	0,000	0,001	0,001	-0,013	0,007	-0,010	0,014	0,001	0,013
8	0,149	0,143	0,173	0,000	0,001	0,022	-0,026	-0,057	-0,037	-0,014	-0,002	-0,009
9	0,277	0,297	0,242	0,005	0,011	0,015	0,012	0,017	-0,028	----	----	----
10	0,256	0,273	0,151	0,000	0,000	0,000	-0,004	-0,002	-0,009	----	----	----
11	0,234	0,215	0,167	0,000	0,000	0,000	-0,016	0,000	-0,033	0,009	0,003	-0,007
12	0,207	0,214	0,156	0,000	0,000	0,000	-0,023	0,009	-0,054	----	----	----
13	0,213	0,238	0,159	0,000	0,000	0,001	-0,057	-0,012	-0,021	----	----	----
14	0,194	0,223	0,130	0,033	-0,008	0,005	-0,006	-0,002	-0,020	----	----	----
15	0,235	0,259	0,157	0,016	0,027	-0,003	0,010	0,044	0,012	----	----	----
16	0,120	0,131	0,144	0,022	0,016	-0,001	0,005	0,016	-0,026	----	----	----
17	0,191	0,188	0,139	-0,005	-0,005	-0,002	-0,034	-0,012	-0,026	----	----	----

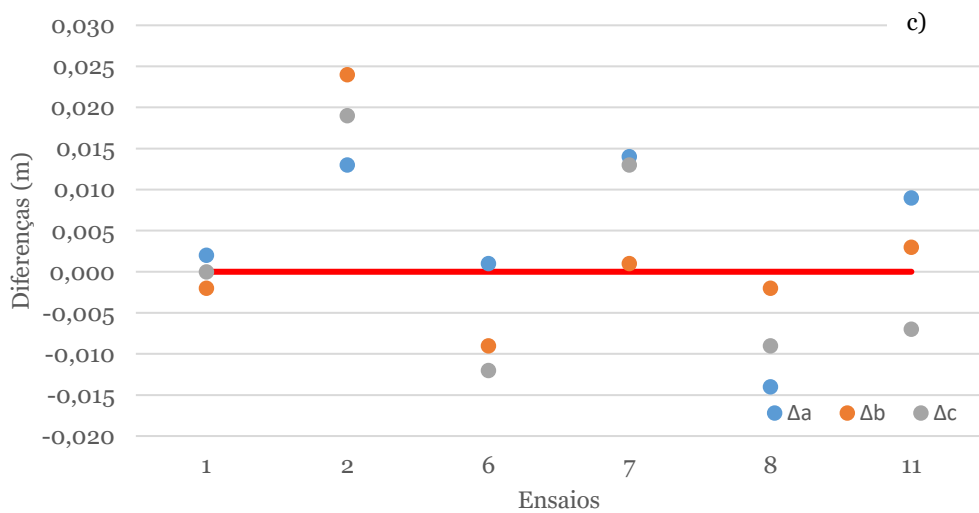
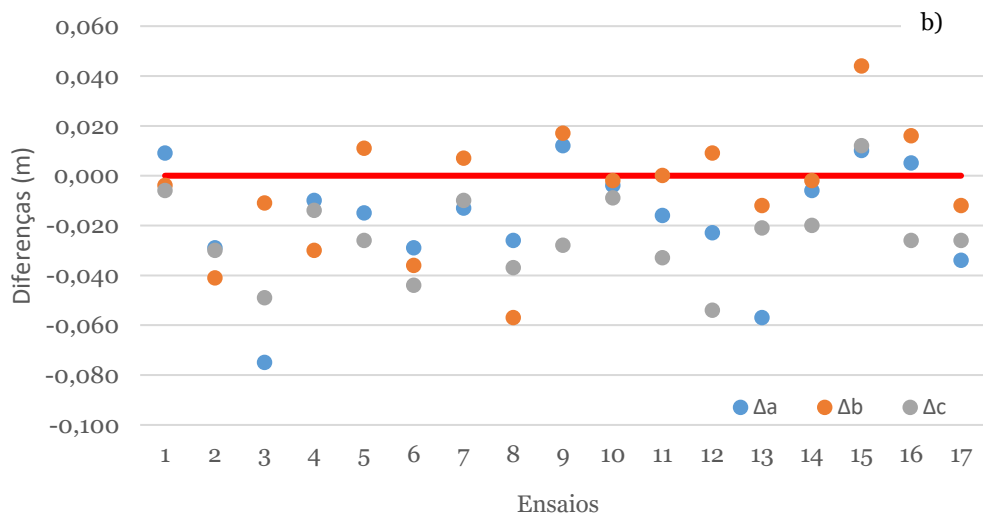
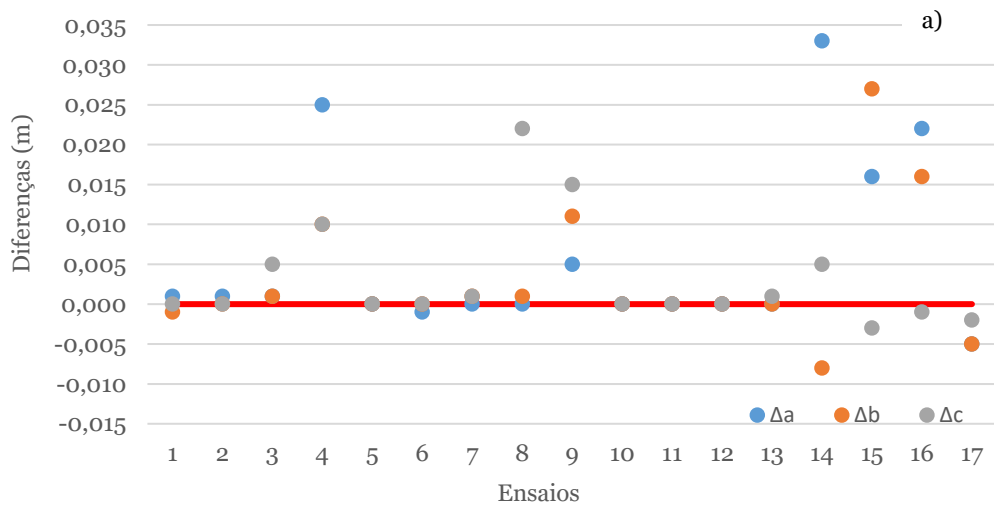


Figura 37- Diferenças entre medições das cavidades de erosão: a) Dif. entre Dias (2018) e VL; b) Dif. entre Dias (2018) e MP; c) Dif. entre Dias (2018) e FG

A análise da Tabela 11 e Figura 37 permite verificar que as diferenças entre dimensões das cavidades de erosão pelos diferentes métodos de estudo em comparação com as medições efetuadas por Dias (2018) são mais evidentes em relação ao método de medição pontual.

Subsecção 4- Diferencial em nuvens de pontos para os métodos de varrimento a laser e fotogrametria

Para os ensaios que foram estudados pelos métodos de varrimento a laser e fotogrametria, nos quais se obtiveram nuvens de pontos relativamente à superfície estudada, foi realizada uma comparação das mesmas. Salienta-se que para a presente análise foi considerado como referência o método de varrimento a laser uma vez que foi considerado, desde o início do estudo, o que nos oferece maior rigor de medição utilizando dois pontos de coordenadas conhecidas para o seu estacionamento.

Em primeiro lugar é apresentado um exemplo da análise realizada para a comparação das nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogramétrico (Figura 38), através do *CloudCompare* e respetivos parâmetros estatísticos das diferenças de 95% dos valores medidos (valores estes que não incluem as 2,5% das diferenças superiores e inferiores, consideradas *outliers*). Na Figura 39 é apresentado o histograma das diferenças entre os métodos de varrimento a laser e fotogrametria. No Apêndice C.1 são apresentadas as restantes comparações para os restantes ensaios analisados pelos métodos de varrimento a laser e fotogrametria.

É de salientar que a escala do MDE das diferenças entre superfícies (Figura 38) se encontra com sinais trocados por o motivo de não ser possível fazer a alteração através do *software* de análise, ou seja, os valores positivos representam os valores negativos para esta dissertação. No histograma apresentado na Figura 39 os sinais das diferenças já se encontram corretos, representando os valores positivos e negativos, o resultado do cálculo da seguinte fórmula (1) (Δ_{VL-FG} representa a diferença entre cotas do método de varrimento a laser e fotogrametria). Ou seja, no caso de o resultado da fórmula ser positivo, o valor indica que a superfície correspondente ao método de varrimento a laser se situa acima do método fotogramétrico (profundidades menores por parte da superfície do método de referência).

$$\Delta_{VL-FG} = Cota_{VL} - Cota_{FG} \quad (1)$$

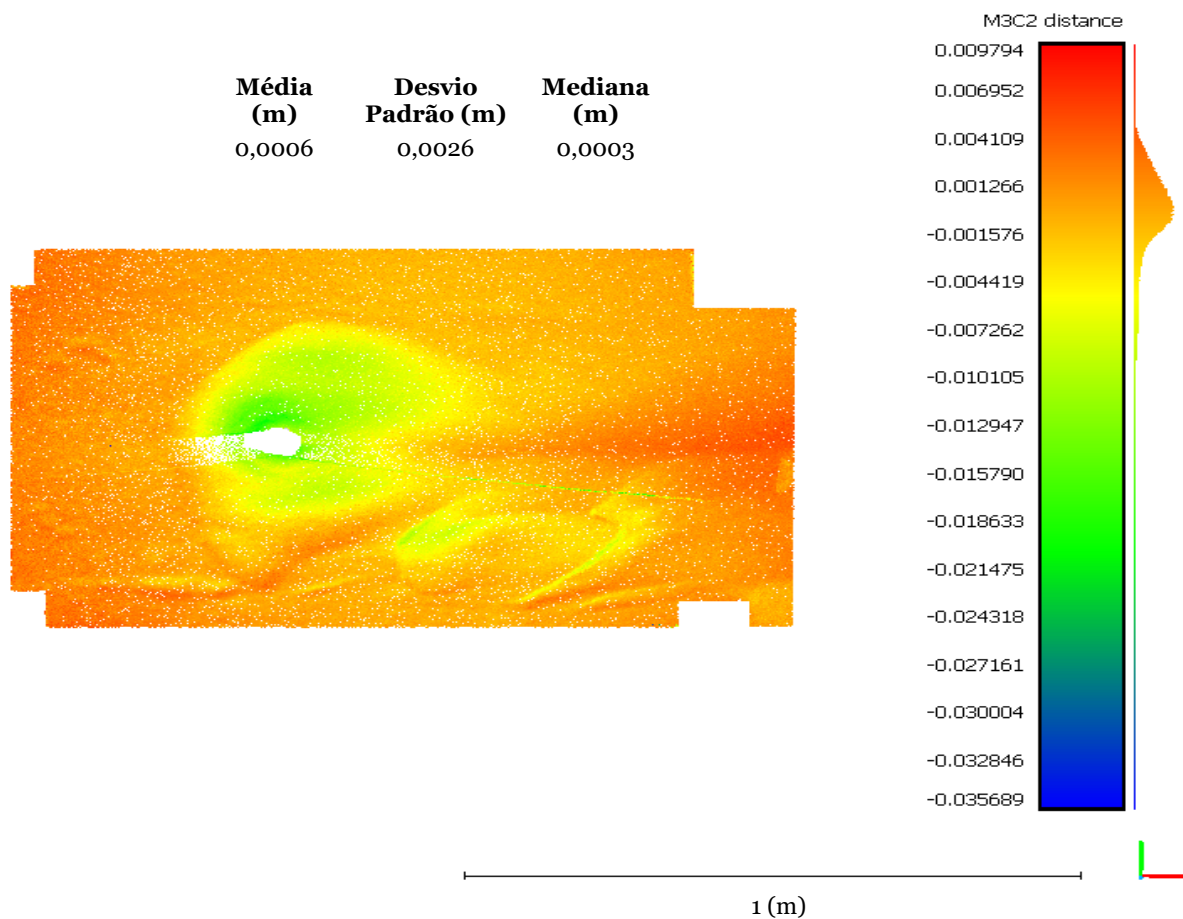


Figura 38- MDE das diferenças entre superfícies dos métodos VL e FG; Ensaio 1

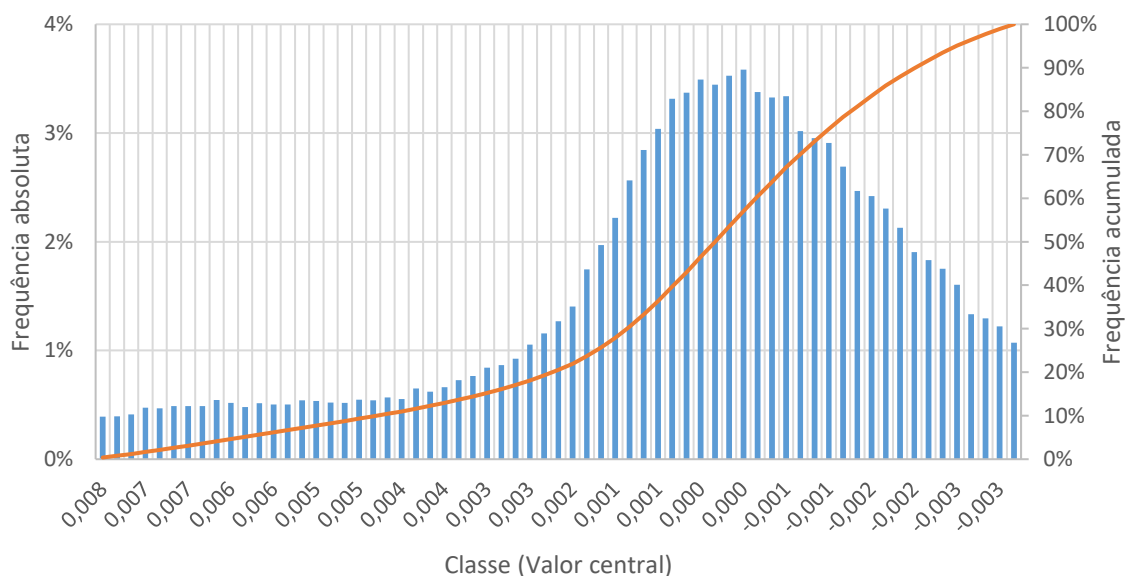


Figura 39- Histograma de diferenças entre nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria Ensaio 1 (Intervalo de confiança 95%)

Em segundo lugar é apresentada uma tabela resumo com os parâmetros estatísticos dos restantes ensaios analisados através da comparação de nuvens de pontos (Tabela 12).

Tabela 12- Parâmetros estatísticos das diferenças de nuvens de pontos para os métodos de VL e FG

Ensaio	<i>M</i> (m)	<i>m</i> (m)	σ (m)
2	-0,002	-0,002	0,002
6	-0,009	-0,009	0,009
7	-0,012	-0,011	0,0012
8	-0,010	-0,010	0,010
11	-0,002	-0,002	0,002

(*M*) Mediana; (*m*) Média; (σ) desvio padrão

Pode-se verificar, através do modelo digital de elevação (MDE) das diferenças entre as duas nuvens de pontos, dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria, que a nível de planimetria as diferenças encontram-se perto do zero (cor alaranjada), situação essa que se agrava ao nível que a profundidade da cavidade de erosão aumenta.

Subsecção 5- Diferencial de volumetria das cavidades de erosão

Através dos métodos de varrimento a laser e fotogramétrico foi possível calcular os volumes das cavidades de erosão. Como análise de resultados foi calculada a diferença entre a volumetria entre o método de varrimento a laser e fotogrametria.

Na Tabela 13 são apresentados os volumes das cavidades de erosão e é calculada a diferença entre os dois métodos onde V_{ce} e Δ_{VL-FG} . representam o volume da cavidade de erosão e diferença entre o método de varrimento a laser e fotogrametria, respetivamente.

Na Figura 40 estão representadas graficamente as diferenças referidas anteriormente.

Visto que o pilar é cortado na nuvem de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogramétrico, devido ao mesmo causar problemas nas suas proximidades, o volume erodido é calculado da seguinte forma:

$$v_{ce} = \text{Volume da cavidade de erosão sem pilar} - \text{volume do pilar} \quad (2)$$

Tabela 13- Diferenças entre volumes dos métodos de varrimento a laser e fotogramétrico por ensaio

Ensaio	V_{ce} (mm³) - VL	Δ_{FG}. (mm³)	Δ_{FG}. (%)
1	6679 × 10 ³	-309 × 10 ³	-5
2	15498 × 10 ³	186 × 10 ³	1
6	5301 × 10 ³	345 × 10 ³	7
7	11949 × 10 ³	334 × 10 ³	3
8	2904 × 10 ³	-83 × 10 ³	-3
11	9811 × 10 ³	18 × 10 ³	0

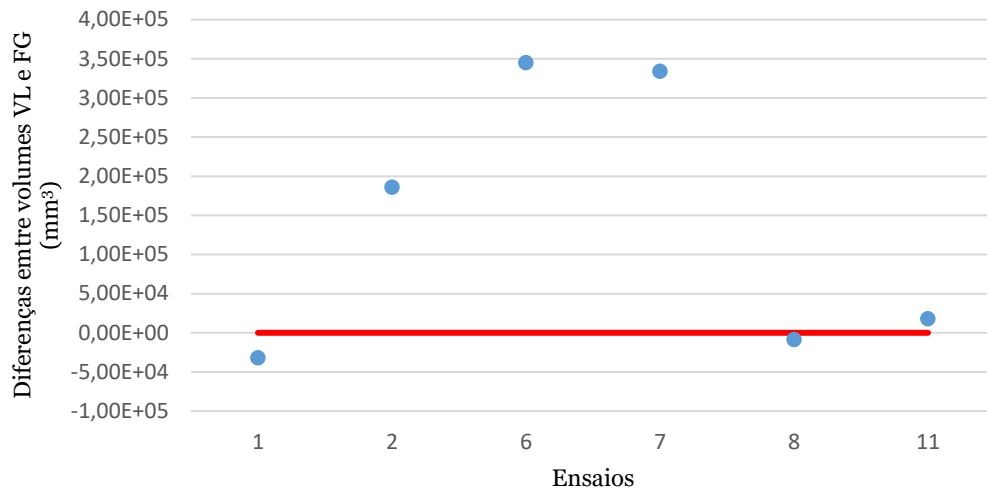


Figura 40- Diferenças entre volumetria das cavidades de erosão pelos métodos de VL e FG

Pela análise da Tabela 13 e Figura 40 permite verificar que ocorrem diferenças entre os volumes dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria, o que era de esperar tendo em conta os as diferenças apresentadas anteriormente.

Capítulo 6- Discussão de resultados

Através da análise das profundidades máximas das cavidades de erosão, é possível verificar que mais se aproxima dos valores obtidos por Dias (2018) é o método de varrimento a laser.

Em média, as diferenças nas profundidades máximas das cavidades de erosão verificadas entre métodos são de, 0 m, -0,003 m, -0,005 m entre o método de referência, medições através de hidrômetro de ponta direita por Dias (2018), e os de varrimento a laser, fotogrametria e medição pontual, respectivamente, sendo o fotogramétrico o que apresenta maior diferença, 0,014 m (Ensaio 1) que corresponde a cerca de 15% ao de referência.

De um modo geral é possível verificar que ocorreram erros de procedimento, principalmente no que diz respeito ao método fotogramétrico. Os mesmos resultam principalmente de uma falha na medição dos pontos de referência e de uma quantidade de fotografias insuficiente para um bom processamento fotogramétrico.

A medição dos pontos de referência para este método não foi efetuada no decorrer dos ensaios, pelo que o seu valor foi obtido através das nuvens de pontos do método de varrimento a laser. Na Figura 41 apresenta-se um exemplo da leitura efetuada pelo método de varrimento a laser sobre um alvo e pode-se observar que o mesmo apresenta erros de medição nesse mesmo local pelo que os valores dos pontos de referência não são precisos. O mesmo erro provoca um mau posicionamento da superfície, originando curvaturas, rotações e desníveis na mesma como se pode verificar através da comparação das nuvens de pontos para o Ensaio 6, sendo apresentado um exemplo na Figura 42. É visível neste caso que a amarração da nuvem de pontos aos pontos de referência é feita de forma incorreta provocando a diferença de cores no modelo digital de elevação principalmente na zona direita e esquerda da figura.



Figura 41- Exemplo de mancha de pontos gerada pelo método de varrimento a laser sobre um alvo



Figura 42- MDE das diferenças entre os métodos de VL e FG- Ensaio 6

Através da análise dos perfis longitudinais e transversais, para o Ensaio 2 (Figura 43), pode-se verificar pelo perfil vermelho (método fotogramétrico) que ocorreu um erro dos pontos de amarração inseridos para a realização do processamento fotogramétrico. O mesmo originou que houvesse uma falha de posicionamento da nuvem de pontos, e posterior erro de posição dos perfis realizados. Também se pode verificar, na mesma figura, que ocorreu um erro de operador na realização da medição pontual que originou oscilações nos valores adquiridos. Este erro deveu-se à falta de rigidez do suporte adaptado para a realização deste método.

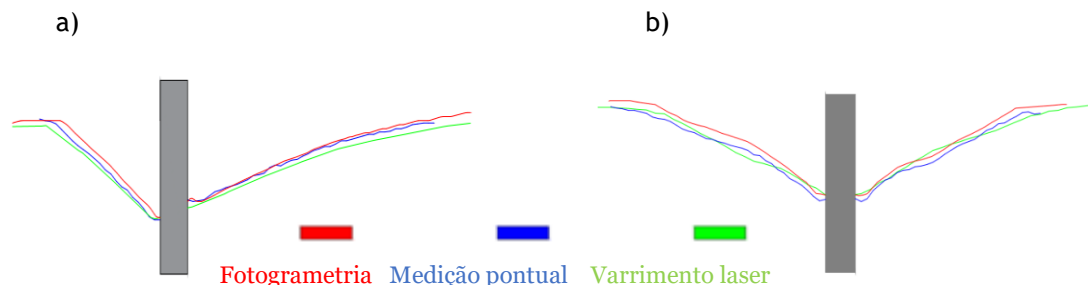


Figura 43- Perfis Ensaio 2: a) perfis longitudinais; b) perfis transversais

Nos perfis apresentados anteriormente é possível que ocorreu um erro de operador na medição pontual. O mesmo erro ocorreu devido à falta de rigidez do suporte do mesmo e devido à abertura do ponto laser que origina oscilações nas medições.

A falta de fotografias para uma correta sobreposição das mesmas no processamento fotogramétrico também é um erro detetado no trabalho experimental da presente dissertação. Este erro provoca um mau processamento do *software*, sendo este aumentado consoante a profundidade da cavidade de erosão aumenta devido ao programa não ter informação suficiente para gerar uma correta nuvem de pontos. Um exemplo

deste, ocorre no Ensaio 1, onde é visível na sobreposição dos perfis longitudinais que na superfície do leito fluvial o método aplicado apresenta semelhanças em relação aos de varrimento a laser e medição pontual, começando a aumentar as diferenças na medida que a profundidade da cavidade de erosão também aumenta (Figura 44).

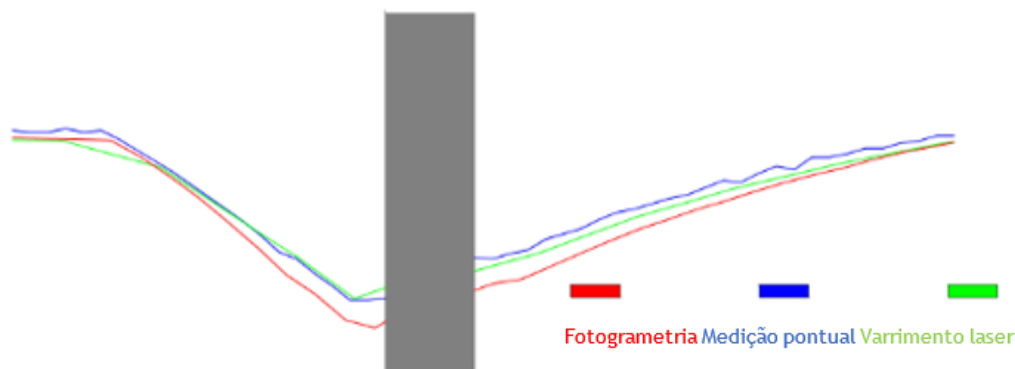


Figura 44- Perfis longitudinais - Ensaio 1

De uma forma geral, o método fotogramétrico apresenta maiores diferenças comparativamente com o método de varrimento a laser e medição pontual, apesar de ser visível que este apresenta vantagens em relação ao varrimento a laser em algumas zonas das cavidades de erosão, como é visível nos ensaios 6, 8, 9, 11, 14 e 15. Ao ser realizado o levantamento fotogramétrico num plano horizontal ao leito fluvial, este método não apresenta sombras devido ao posicionamento do pilar e consegue evitar erros em comparação ao de varrimento a laser. A título de exemplo, apresentam-se na Figura 45 os resultados do Ensaio 6, onde é possível verificar o efeito da falta de pontos a montante do pilar nos perfis realizados no mesmo local, estando representado na figura da esquerda, de uma forma aproximada, onde foi realizado o perfil.

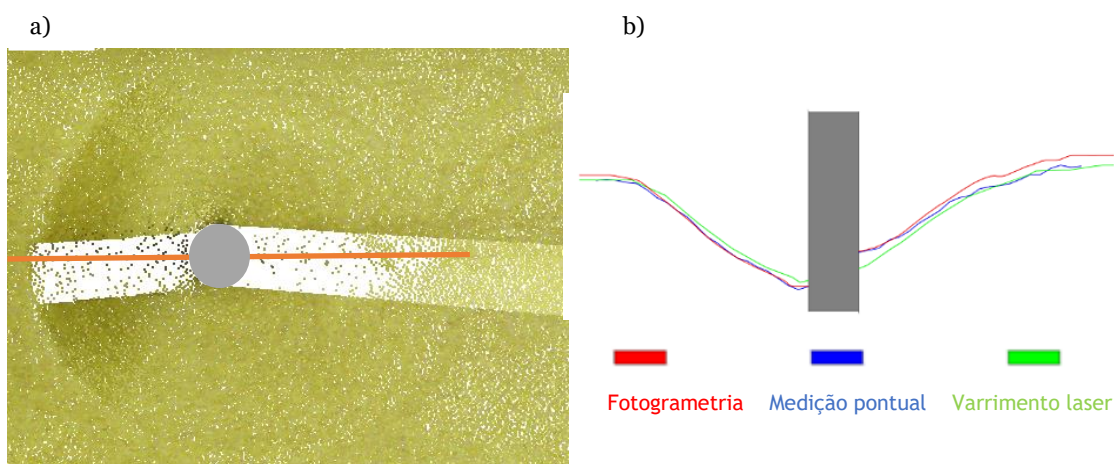


Figura 45- Falta de informação na zona do perfil longitudinal (VL) Ensaio 6: a) nuvem de pontos com identificação de zona onde foi efetuado perfil longitudinal; b) perfis longitudinais

O erro apresentado anteriormente por parte do método de varrimento a laser ocorre devido ao estacionamento da multiestação Leica MS50 apresentar limitações no canal hidráulico onde é realizado o trabalho experimental. Tendo em conta a largura do mesmo e, sendo este limitado lateralmente por uma parede de betão e uma parede lateral com vidros, torna reduzidas as opções para realizar o estacionamento da multiestação. Devido ao mesmo, em alguns ensaios não foi conseguido realizar a leitura completa de todos os pormenores da cavidade de erosão, sendo assim o erro mais evidente a montante e jusante do pilar. Outro erro causado devido a esta limitação, é não ser conseguido reduzir as sombras causadas pelo pilar na execução do trabalho experimental, o que faz com que nessas mesmas zonas ocorram problemas nas nuvens de pontos (Figura 46).



Figura 46- Efeito das sombras do pilar na nuvem de pontos do método VL

Através da medição pontual com recurso a um distanciómetro laser digital também foram registados alguns erros que fez com que os perfis deste método divergissem dos restantes. Como é possível verificar, por exemplo, no Ensaio 17, os perfis realizados por este método apresentam diferenças, sendo as mesmas justificadas tendo em conta algumas limitações do distanciómetro, como é o caso da largura do ponto laser de cerca de 3 mm a uma distância de 1,0 m da superfície. Esta limitação faz com que não se conheça com precisão o ponto que se está a medir, podendo variar o mesmo na zona coberta pelo ponto laser, podendo originar algumas diferenças (Figura 47). Outra causa das diferenças visíveis é o suporte utilizado para a leitura pontual não ser estático, ocorrendo por vezes oscilações na realização de medições. Outro erro detetado, é a falta de nivelamento em relação ao carro móvel utilizado como suporte de medições, carro este inserido num carril situado na superfície das paredes laterais do canal. Também para este método ocorreram erros por parte do operador das medições efetuadas, tendo sido mal apoiado o suporte do mesmo. O mesmo é visível na diferença de perfis transversais do Ensaio 1 (Figura 48) onde na margem direita do pilar ocorre um salto dos valores a partir de um certo momento (identificado na Figura 48 com traço vertical a cor de laranja) ficando constante as diferenças a partir desse ponto.

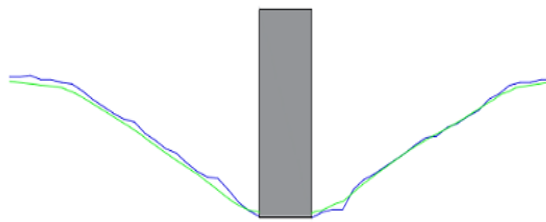


Figura 47- Erro de medição MP – Perfis transversais Ensaio 17

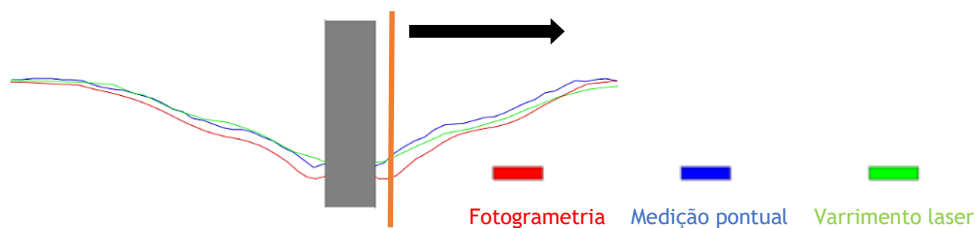


Figura 48- Erro de operador na realização de MP- Perfis transversais Ensaio 1

Os mesmos erros apresentados anteriormente são visíveis nos ensaios 3, 4, 5, 10, 12, 13 e 14 onde se pode verificar através dos métodos de análise que existe diferenças no método de medição pontual em relação ao de varrimento a laser.

Apesar dos erros detetados e descritos anteriormente, podem ocorrer diferenças devido à granulometria da areia utilizada como material de fundo onde foram realizados os ensaios. A mesma tem como dimensões 1,15 mm e 0,62 mm o que faz com que seja difícil a medição do mesmo ponto em ambos os métodos estudados.

Através da análise feita com recurso a estatística *Bayesiana* (Tabelas 7 e 8) é possível verificar que a amplitude do intervalo de confiança para as diferenças entre métodos tem a mesma ordem de grandeza, com exceção do Ensaio 8 para as diferenças entre o de referência com os restantes métodos e Ensaio 13. Para o Ensaio 8, pode-se verificar que as diferenças devem-se ao fato de ocorrer limitações na nuvem de pontos do método de varrimento a laser, como referido anteriormente, que originou na falta de pontos captados no local onde foi efetuado o perfil longitudinal (Figura 49) que se reflete na comparação do mesmo com os métodos de medição pontual e fotogrametria. No caso do Ensaio 13, pode-se verificar que houve um erro de procedimento na realização da medição pontual na margem esquerda do pilar (falta de rigidez no suporte digital laser que provoca oscilações nas medições), como se pode verificar na Figura 50 que fez com que a ordem de grandeza das diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual se alterasse.

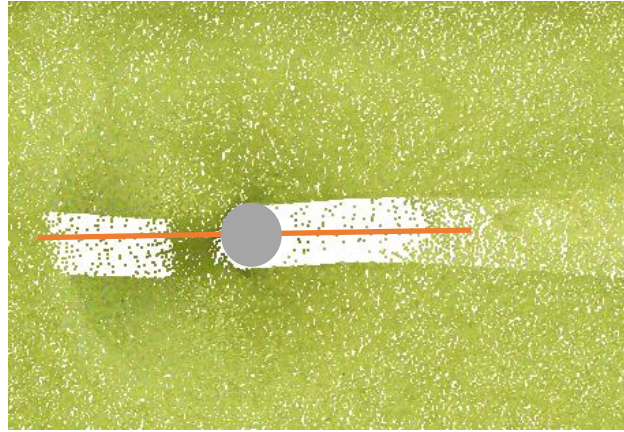


Figura 49- Nuvem de pontos método VL: Ensaio 8

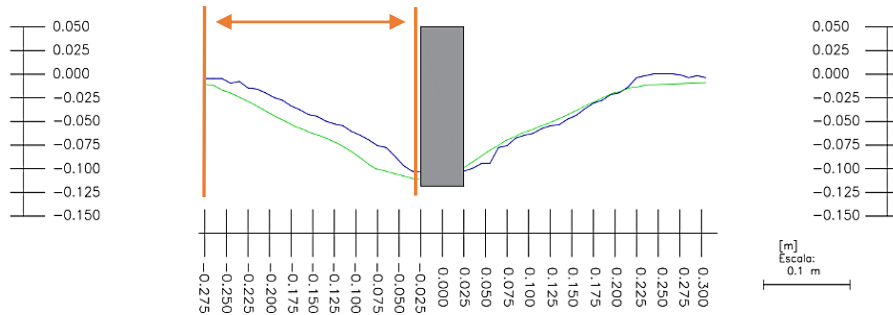


Figura 50- Perfil transversal método MP: Ensaio 13

Através da visualização dos histogramas e dos intervalos de confiança das diferenças entre métodos, foi possível verificar que ocorre um erro que faz com que as mesmas estejam deslocadas, centralmente (mediana) do ponto 0. Por este motivo, foi decidido que o mesmo erro era sistemático e foi feita uma redução do mesmo nos métodos comparados a fim de se deslocar centralmente as diferenças para o ponto 0 (mediana 0). O valor de erro sistemático nas diferenças entre métodos considerado, foi o valor da mediana, sendo este o valor central das mesmas.

No final, depois de serem anulados os erros, foram realizados os testes para validar os métodos utilizados no presente estudo e pode-se verificar que cerca 2/3 dos testes realizados, são validados os métodos para o presente estudo, casos estes em que o valor de P é superior a 0,05, ou seja, os valores das diferenças distribuem-se de forma simétrica em relação à mediana, que para este caso em que o erro sistemático foi anulado é o m. Na Figura 51 é apresentado um exemplo em que o teste de validação deu positivo.

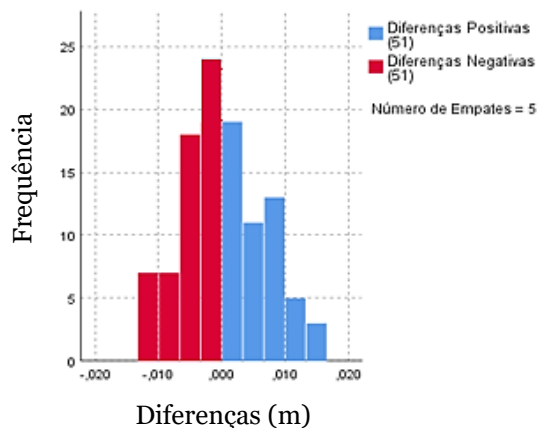


Figura 51- Diferenças entre método de VL e FG (eliminado erro sistemático): Ensaio 1- métodos validados

Nos casos em que não se validou os métodos (valor de P inferior a 0,05) é verificado que os valores das diferenças, mesmo depois de ser anulado o erro sistemático, se encontram mais para valores negativos, ou positivos, dependendo do caso. Nos ensaios 1, 2 e 3, para as diferenças entre o método de varrimento a laser e medição pontual, e no Ensaio 2 para as diferenças entre o método de medição pontual e fotogrametria é visível que mesmo depois de ser reduzido o erro sistemático dos mesmos, o método considerado como de referência (varrimento a laser para o primeiro caso e medição pontual para o segundo) se encontra com valores de diferenças maioritariamente positivas (exemplos Figura 52), ou seja, o mesmo apresenta valores de cota mais baixos em relação ao comparado.

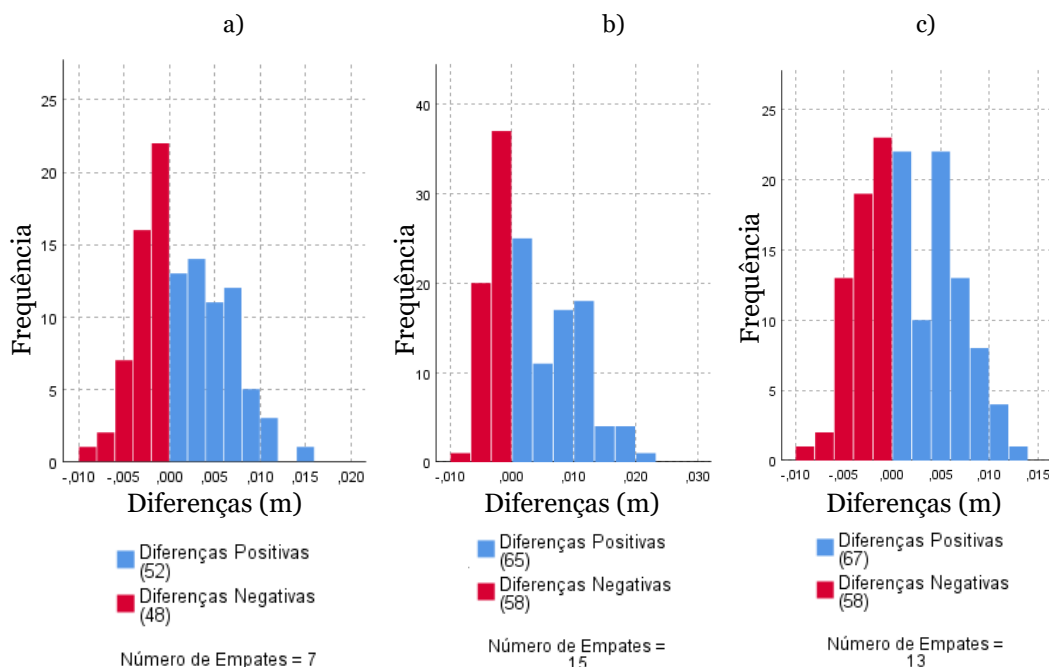


Figura 52- Diferenças entre métodos maioritariamente positivas (eliminado erro sistemático): a) Ensaio 1- diferenças entre VL e MP; b) Ensaio 2- diferenças entre VL e MP; c) Ensaio 2- diferenças entre MP e FG; Métodos não validados

Nos ensaios 7 e 11, para a diferença entre os métodos de varrimento a laser e fotogrametria e para as diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual e fotogrametria, respetivamente, e ensaios 14 e 17 para as diferenças entre os métodos de varrimento a laser e medição pontual, respetivamente, ocorre o contrário, as diferenças, mesmo depois de ser reduzido o erro considerado sistemático, são maioritariamente negativas (exemplos Figura 53).

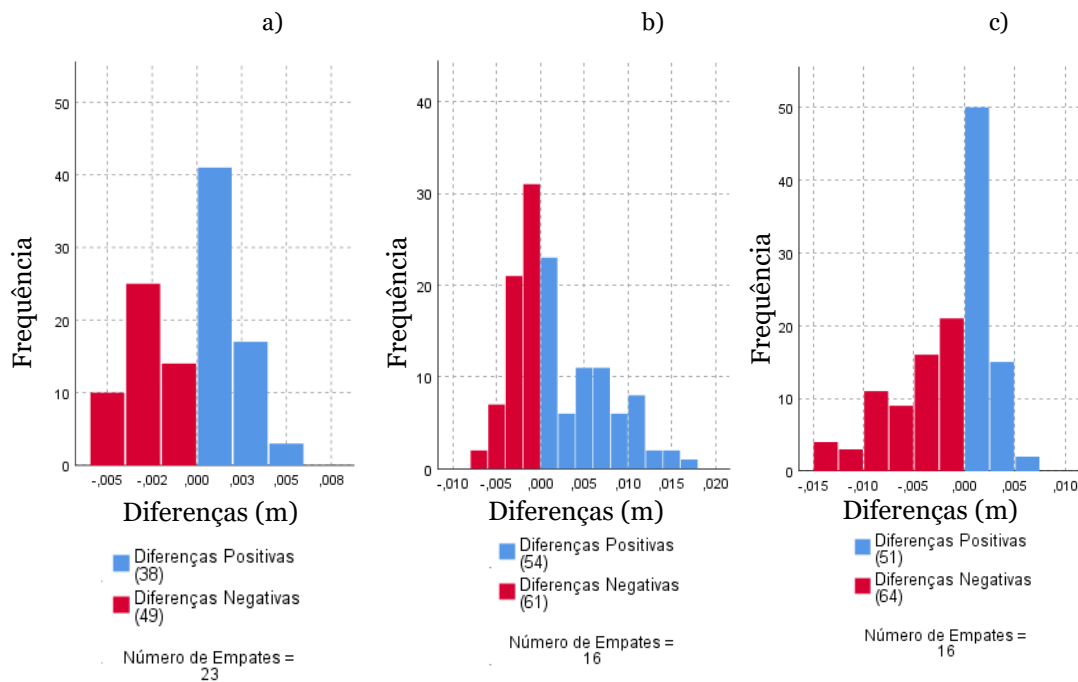


Figura 53- Diferenças entre métodos maioritariamente negativas (eliminado erro sistemático): a) Ensaio 7- diferenças entre VL e MP; b) Ensaio 11- diferenças entre VL e MP; c) Ensaio 11- diferenças entre método de MP e FG; Métodos não validados

Em suma, pode-se concluir pela análise realizada para as diferenças entre métodos de estudo que os erros máximos de medições de profundidades máximas das cavidades de erosão são de 0,001 m no que diz respeito às diferenças entre o método utilizado como de referência (medições através de hidrómetro por Dias, 2018) com o de varrimento a laser. Os métodos de medição pontual e fotogrametria apresentam diferenças máximas de 0,009 m e 0,014 m. Relativamente às diferenças entre medições feitas no mesmo ponto, em relação ao método de varrimento a laser, os de medição pontual e fotogrametria apresentam em média -0,004 m de diferença, o que significa que o de varrimento a laser faz leituras de valor de cota maioritariamente superiores em relação aos restantes. Pela diferença entre nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria pode-se confirmar o que foi dito anteriormente, observando-se que a nuvem de pontos do método de varrimento a laser se encontra com valores de cota maioritariamente superiores em relação ao método fotogramétrico.

Perante o que foi discutido anteriormente pode-se afirmar que os métodos analisados são adequados na caracterização das cavidades de erosão. Contudo, tendo em conta os erros detetados, torna-se importante corrigir os mesmos e verificar se tais diferenças diminuem.

Os métodos de varrimento a laser e fotogramétrico apresentam vantagens no que diz respeito à análise de cavidades de erosão e, no presente trabalho são apresentados vários tipos de análise possíveis para a realização de um futuro estudo dos quais:

- Relacionar o desenvolvimento da profundidade da cavidade de erosão com a área erodida;

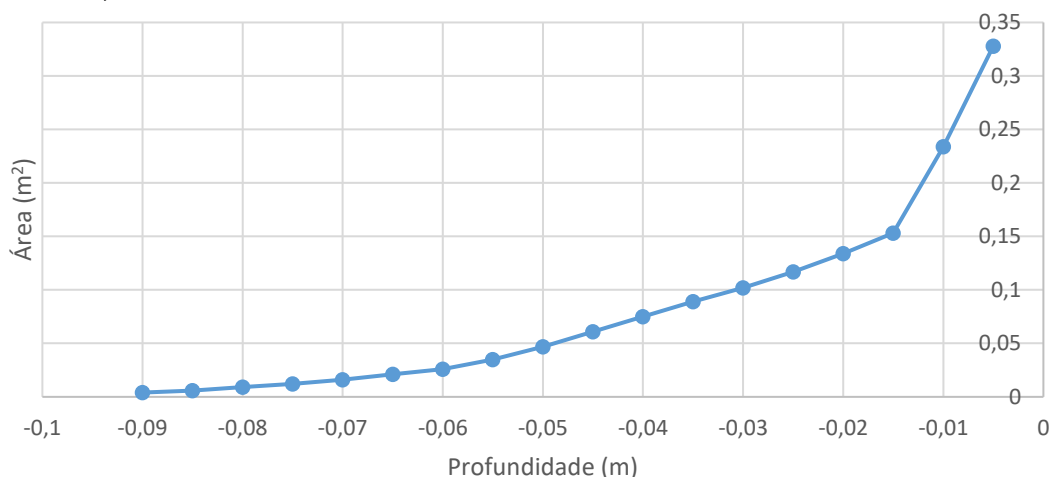


Figura 54- Relação Profundidade/Área erodida: VL (Ensaio 1)

- Permite a comparação entre cavidades de erosão de diferentes ensaios e caracterizar a morfologia (Ensaio 1 representação superior e Ensaio 3 representação inferior);

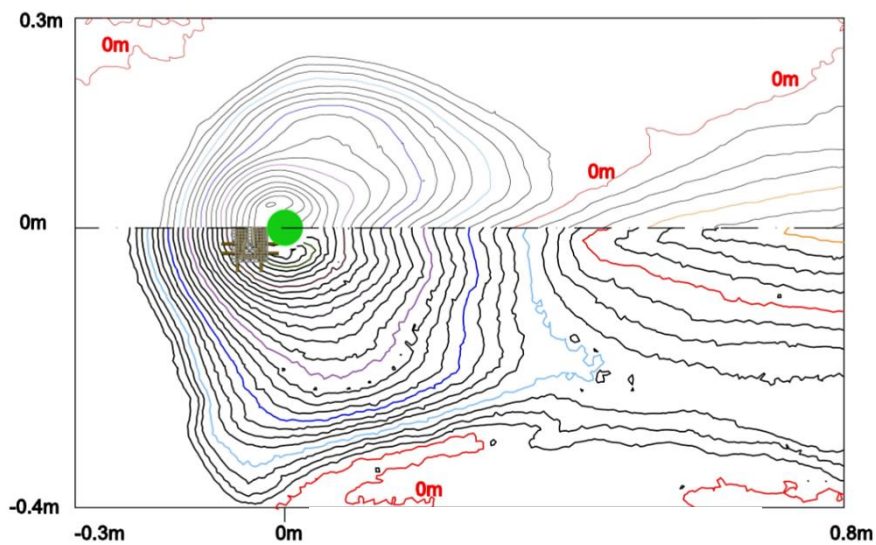


Figura 55- Comparação de curvas de nível de diferentes ensaios: Ensaios 1 e 3 (VL)

- Realização de perfis da cavidade de erosão com diferentes orientações;

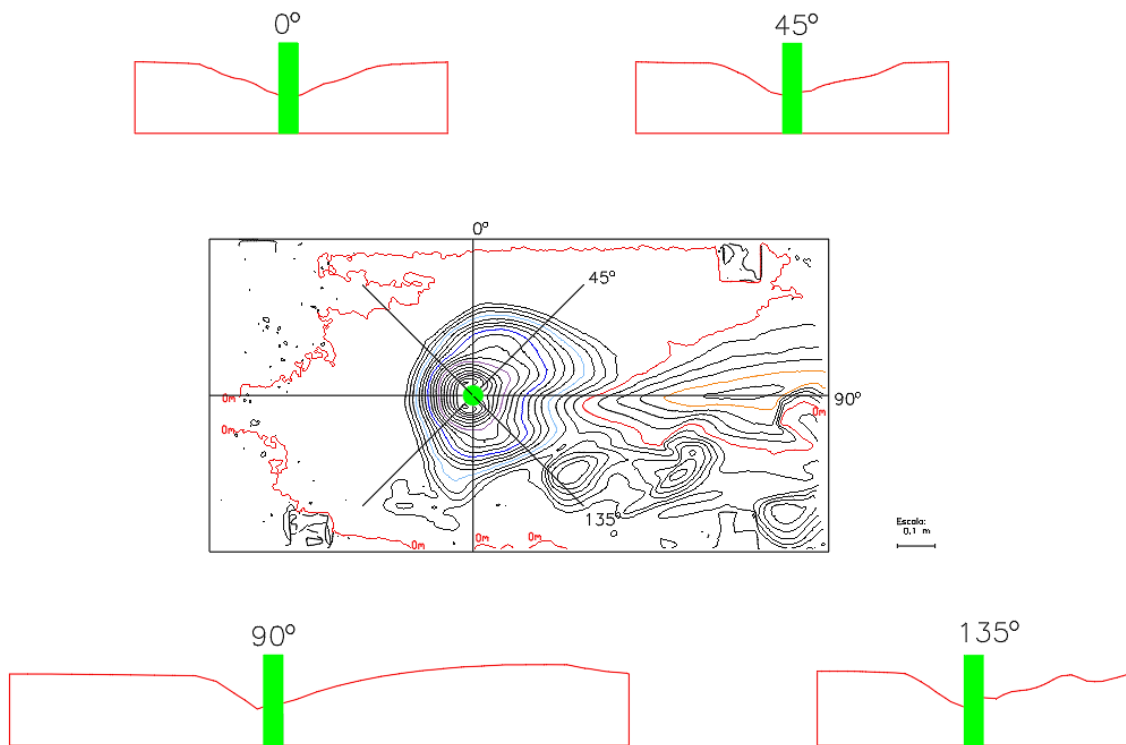


Figura 56- Perfis realizados em várias zonas da cavidade de erosão

- Visualização da cavidade de erosão em várias perspectivas através do *software* 3D *Reshaper*;

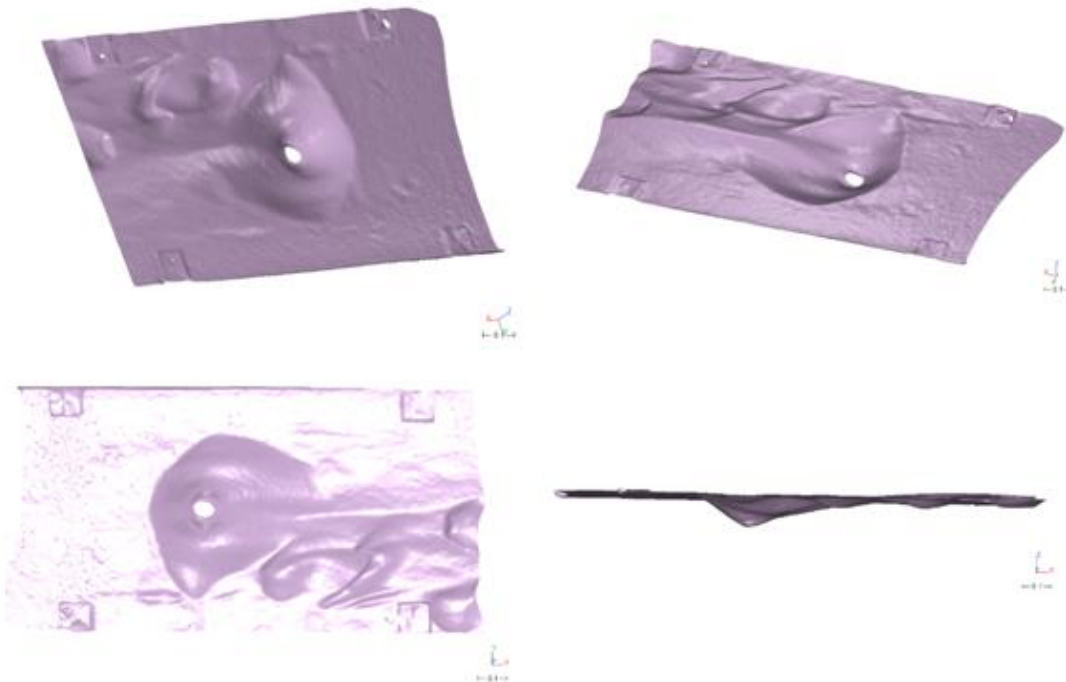


Figura 57- Visualização da cavidade de erosão em várias perspectivas

Capítulo 7- Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Através do presente estudo é possível concluir que os métodos geomáticos utilizados apresentam vantagens no que diz respeito à análise das cavidades de erosão junto a estruturas inseridas em leitos aluvionares, sendo os métodos de varrimento a laser e fotogrametria os que nos permitem obter maior detalhe de análise. O método de medição pontual, apesar das suas limitações, é considerado adequado na avaliação da profundidade das cavidades de erosão e no levantamento de perfis.

Pode-se verificar que o método de varrimento a laser apresenta limitações no que diz respeito ao seu posicionamento pois, devido às características do canal hidráulico (principalmente a sua largura) condicionam o mesmo. Por este motivo pode-se verificar que ocorreram zonas das cavidades de erosão que o método não conseguiu analisar, provocando zonas nas nuvens de pontos sem informação e originando diferenças deste método em relação aos restantes.

Para o método fotogramétrico, verifica-se que o mesmo obteve erros devido a não terem sido medidos corretamente os pontos de referência e, por vezes, não terem sido retiradas fotografias suficientes para um processamento deste método.

Através do método de medição pontual, como método de comparação através de perfis realizados para o mesmo, foi possível verificar que o mesmo não é preciso, visto não se conhecer com a precisão necessária o ponto onde em que se está a realizar a medição.

Em média, pode-se concluir que as diferenças de profundidades máximas entre o método de referência (medições efetuadas por Dias, 2018) e os de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria são de 0,000 m, -0,005 m e -0,003 m, respetivamente. Relativamente às diferenças entre perfis, pôde-se verificar que, em média, as diferenças encontram-se entre -0,004 e -0,005 m entre os 3 métodos utilizados na presente dissertação. No que diz respeito às dimensões das cavidades de erosão pôde-se verificar que ocorre uma maior diferença entre o método utilizado por Dias (2018) e medição pontual de, em média, -0,016 m, sendo as diferenças entre o de referência (valores de Dias, 2018) e varrimento a laser e fotogrametria de 0,004 e 0,002 m, respetivamente. Em relação aos volumes das cavidades de erosão pelos métodos de varrimento a laser e fotogrametria as diferenças são de, em média, 0,5%.

Em suma, apesar dos erros detetados, foi tentado reduzir os mesmos deslocando os valores das cotas dos diferentes métodos à mediana, valor este considerado o erro sistemático ocorrido nos métodos utilizados e foram validados na maior parte dos casos os métodos de varrimento a laser, medição pontual e fotogrametria para a realização do estudo da análise de cavidades de erosão, pelo que, se conclui que os métodos utilizados no presente estudo são adequados para a análise de cavidade de erosão tendo em conta os erros e limitações detetadas nos diferentes métodos.

Deste modo, tendo em conta o trabalho realizado, propõem-se algumas melhorias para trabalhos futuros, sendo estas divididas por método. Para o método de varrimento a laser propõe-se:

- Prismas fixos com coordenadas conhecidas para o estacionamento da multiestação Leica MS50;
- Alvos de referência fixos no canal com coordenadas conhecidas, a fim de se conseguir identificar se a sobreposição dos vários levantamentos ao local de estudo é bem efetuada;
- Realizar levantamentos a vários tipos de alvos, identificando o que cause menor erro por parte da multiestação Leica MS50.

Para o método de medição pontual:

- Retirar várias medições por ponto, a fim de evitar erros de medição;
- Realização de uma base de apoio para o distanciómetro digital laser que seja o mais estável possível.

Para o método fotogramétrico:

- Utilizar no mínimo 5 alvos de referência fixos no canal hidráulico com coordenadas conhecidas.
- Retirar o maior número de fotos possível (de preferência 9 de cada ponto) ao local que se pretende analisar.

Também como sugestão futura, é considerado útil, antes da realização de qualquer estudo, a realização de testes com os três métodos com objetivo de se avaliar o desvio entre eles, a fim de posteriormente ser possível realizar ajustes nas medições efetuadas e, sendo utilizado o mesmo *software* para a realização de perfis, deve-se exportar para o mesmo as curvas de nível da superfície em estudo com espaçamento entre elas inferior a 1 mm a fim de se evitar erros de processamento na realização da triangulação por parte do *software*.

Referências Bibliográficas

- Antunes, C. (1995). *Levantamentos Topográficos*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2-4.
- Ballio, F., Radice, A. (2003). *A Non-Touch Sensor for Local Scour Measurements*. Journal of Hydraulic Research, 41, 105-108.
- Bento, A. M., Ramos, P. X., Maia, R., Pêgo, J. P. (2016). *Caracterização da Erosão em Torno de um Pilar Complexo*. 13º Congresso de Água.
- Bento, A., Viseu, T., Pêgo, J. P., Couto, L. (2018). *Advanced Characterization Techniques of the Scour Hole Around a Bridge Pier Model*. River Flow 2018, 40.
- Bouratsis, P., Diplas, P., Dancey, C. L., Apsilidir, N. (2017). *Quantitative Spatio-Temporal Characterization of Scour at the Base of a Cylinder*. Water, 9(3).
- Branco, H. A. P. (2013). *Colapso de Pontes: Lições Aprendidas*. (Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal)
- Chang, W. Y., Lai, J. S., Yu, T. Y., Lin, F., Lee, L. C., Tsai, W. F., Loh, C. H. (2014). *Pier Scour Monitoring System by Bed-Level Image Tracking*. International Journal of Sediment Research, 29, 269- 277.
- Cruz, J. J. S., Redweik, P. M. (2003). *Manual do Engenheiro Topográfico*. Dislivro.
- Diab, R., Link, O., Zanke, U. (2010). *Geometry of Developing and Equilibrium Scour Holes at Bridge Piers in Gravel*. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(4), 544-552.
- Dias, J. (2018). *Estudo do Impacto dos Detritos nas Cavidades de Erosão Junto a Pilares de Pontes*. (Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal)
- Doubeck, A. (1989). *Topografia*. Universidade Federal do Paraná, pág. 205.
- Eder, K., Rapp, C., Kohl, V., Hanrieder, B., Stilla, U. (2011). *Photogrammetric Monitoring of Under Water Erosion in the Vicinity of Cylindrical Bridge Piers*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(2), 168-171.
- Espartel, L. (1987). *Curso de Topografia*. Globo, 9ª Edição, pág. 3.

- Fael, C. M. S. (2007). *Erosões Localizadas Junto de Encontros de Pontes e Respetivas Medidas de Protecção*. (Dissertação de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal)
- Fael, M. S. F., Hock, M., Cardoso, A. H. (2004). *Geometria de Cavidades de Erosão Junto de Encontros de Pontes de Comprimento Intermédio e Longo*. 7º Congresso de Água.
- Gomasasca, M. A. (2010). *Basics of Geomatics*. Applied Geomatics, 2(3), 137-146.
- Hong, S. H., Sturm, T. W. (2010). *Physical Modeling of Abutment Scour for Overtopping, Submerged Orifice, and Free Surface Flows*. 5th International Conference on Scour and Erosion, 590-598.
- Lima, M. M. C. L. (2008). *Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes*. Universidade do Minho, 33, 41-52.
- Link, O., Pflieger, F., Zanke, U. (2008). *Characteristics of Developing Scour-Holes at a Sand Embedded Cylinder*. International Journal of Sediment Research, 23, 258-266.
- Link, O., Zanke, U. (2004). *On the Time-Dependent Scour-Hole Volume Evolution at a Circular Pier in Uniform Coarse Sand*. 2nd International Conference on Scour and Erosion.
- Mateus, L. (2011). *Metodologia de Levantamento- Fotogramétrico e Varrimento a Laser 3D*. Universidade de Lisboa, pág. 48.
- Moreno, M. E., Couto, L. T., Maia, R., Cardoso, A. H. (2014). *Erosões Localizadas em Pilares Complexos de Pontes: Desempenho de Modelos de Previsão Existentes*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 35, 5-22.
- Pedro, F. G. L., Lemos, R. G., Fortes, C. J., Santos, J. A. (2016). *Application of Stereo Photogrammetry to Physical Scale Model Tests with Mobile Beds*. 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental.
- Porter, K., Simons, R., Harris, J. (2014). *Comparasion of Three Techniques for Scour Depth Measurement: Photogrammetry, Echosounder Profiling and a Calibrated Pile*. Coastel Engineering Proceedings, 1(34).
- Umeda, S., Yamazaki, T., Ishida, H. (2008). *Time Evolution of Scour and Deposition Around a Cylindrical Pier in Steady Flow*. 4º International Conference on Scour and Erosion, 140-146.

Umeda, S., Yamazaki, T., Ishida, H. (2008). *Time Evolution of Scour and Deposition Around a Cylindrical Pier in Steady Flow*. 4th International Conference on Scour and Erosion, 140-146.

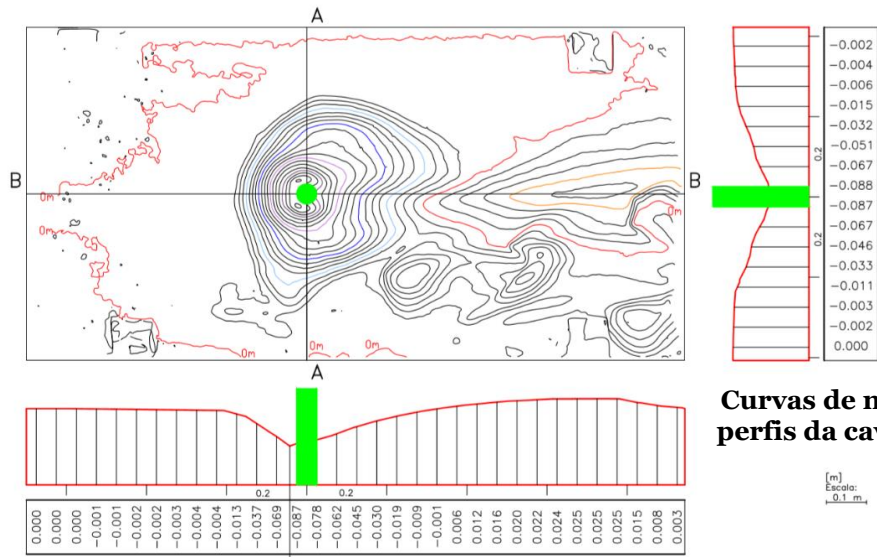
Veiga, L. A. K., Zanetti, M. A. Z., Faggian, P. L. (2012). *Fundamentos da Topografia*. Universidade Federal do Paraná, pág. 1.

Vinicius, M. (2017). UAVGeo- www.uavgeo.com. Acedido a 3 de outubro de 2019.

Yanmaz, A. M., Kose, O. (2007). *Surface Characteristics of Scouring at Bridge Elements*. Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, 31(2), 127-134.

Apêndice

Apêndice A.1-Levantamentos por varrimento a laser

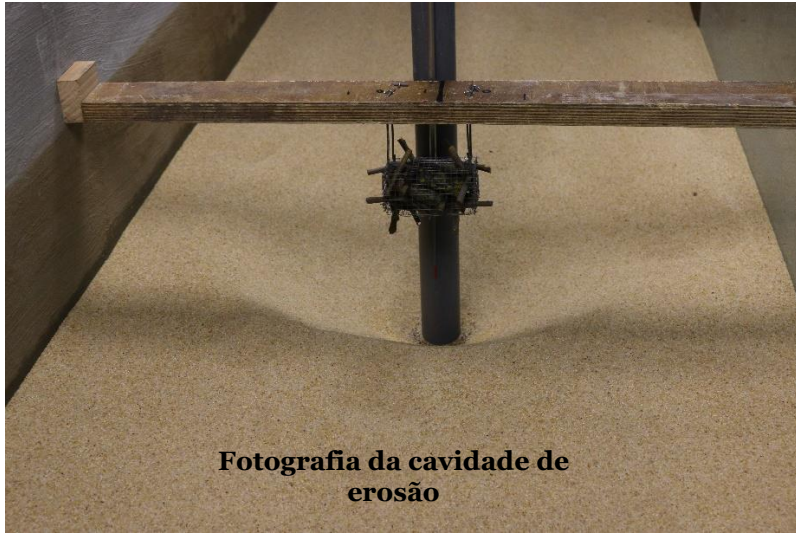


Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 0,1 m

Profundidade máxima da erosão: 0,092

Ensaio 1

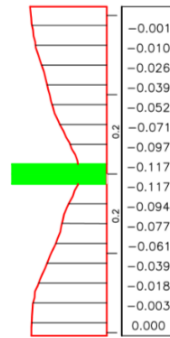
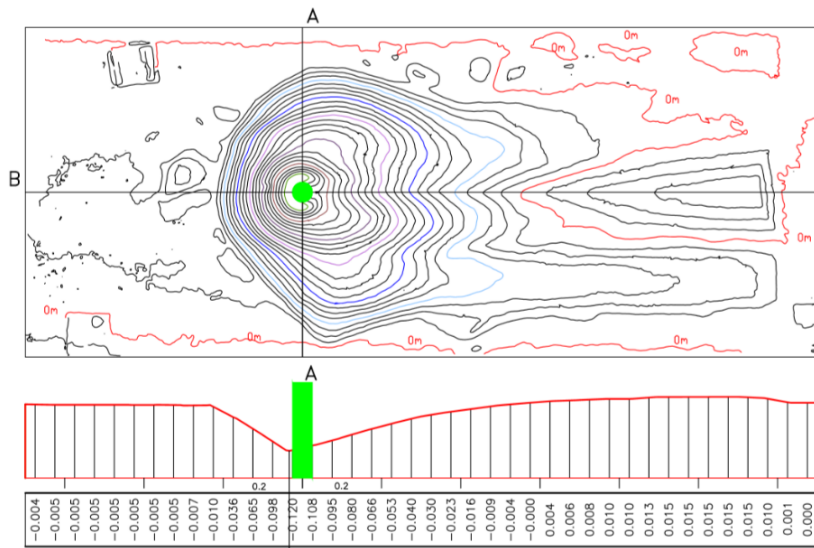


Fotografia da cavidade de erosão



Nuvem de pontos da cavidade de erosão

79



Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m.

Profundidade máxima da erosão: 0,121

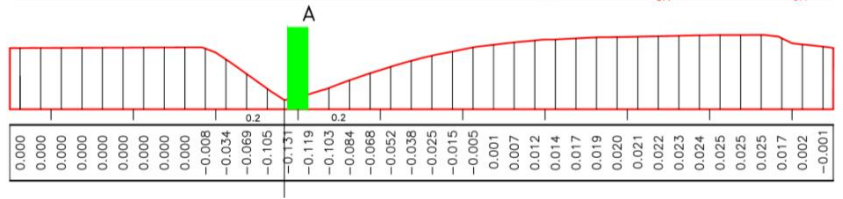
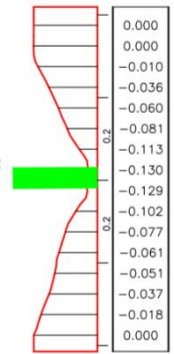
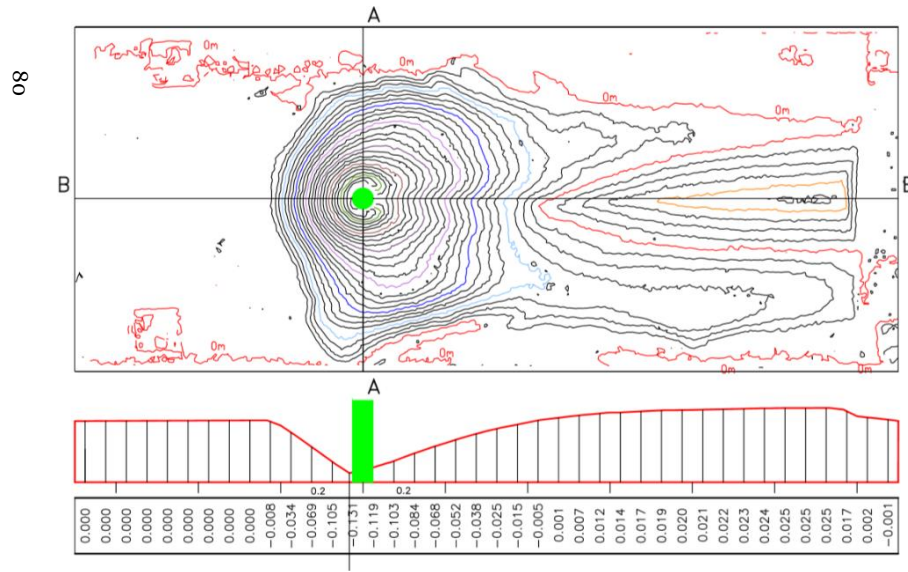
Ensaio 2



Fotografia da cavidade de erosão



Nuvem de pontos da cavidade de erosão

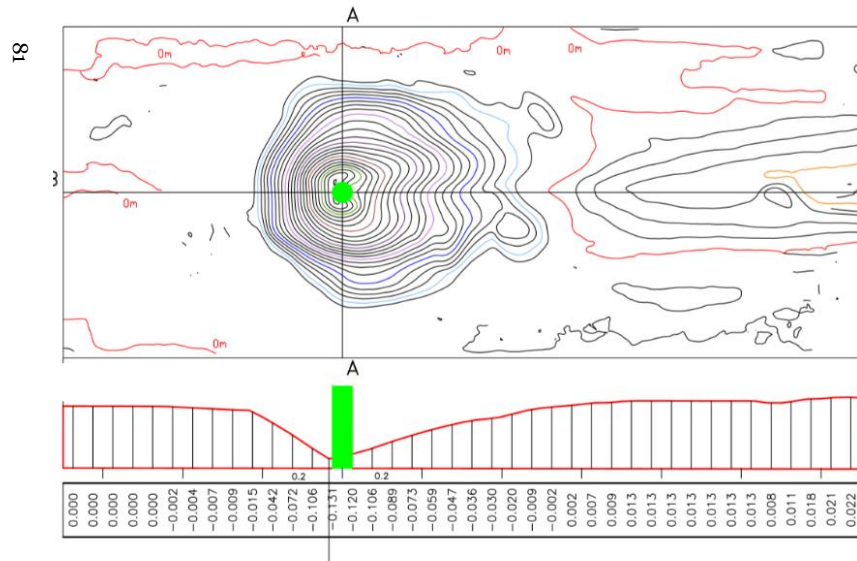
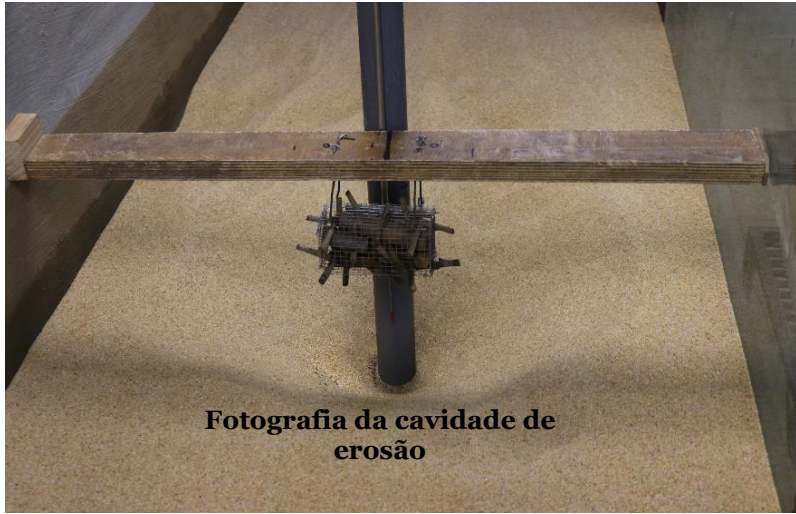


Profundidade máxima da erosão: 0,132

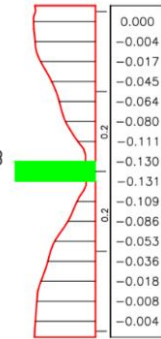
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

Escala: 0,1 m

Ensaio 3



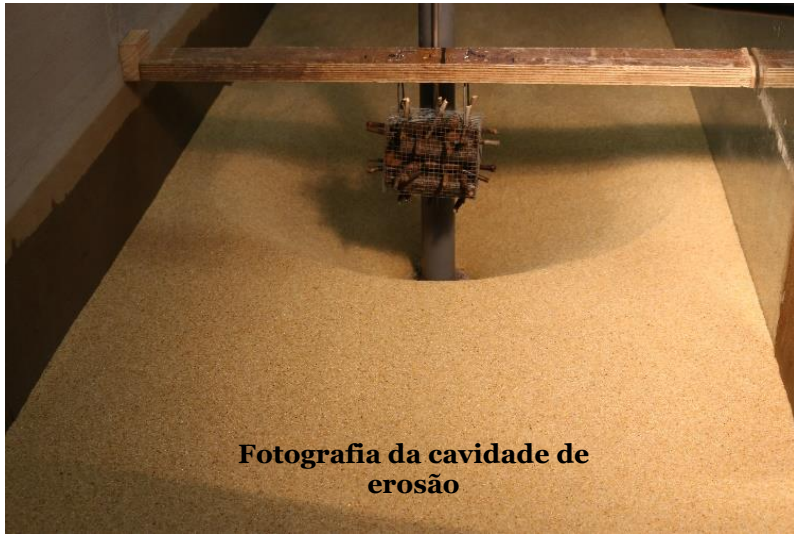
Profundidade máxima da erosão: 0,132



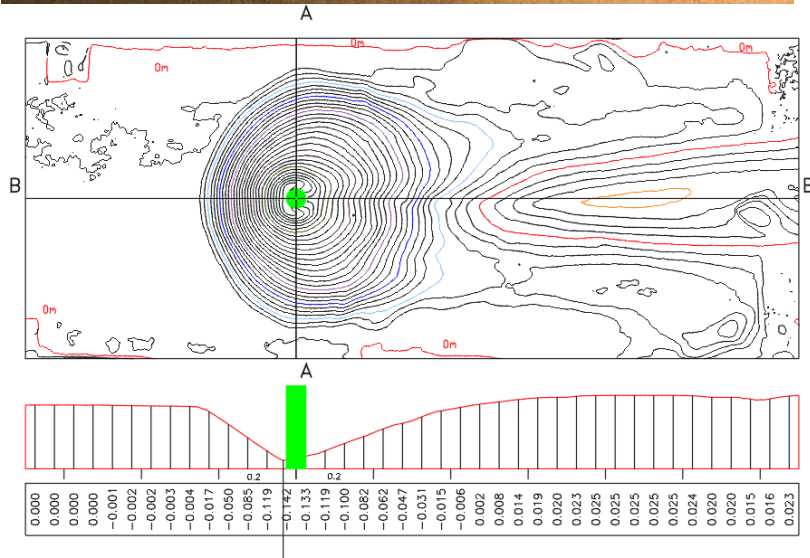
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 0,1 m

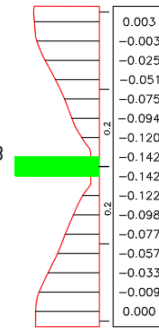
Ensaio 4



82



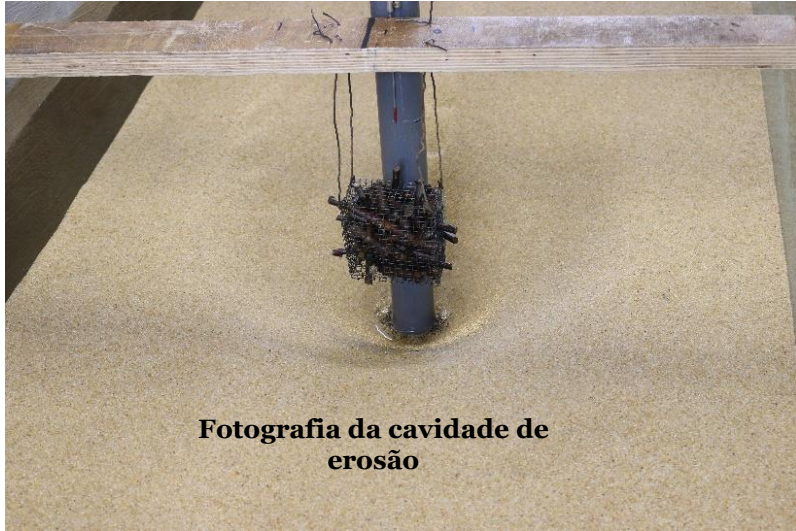
Profundidade máxima da erosão: 0,144



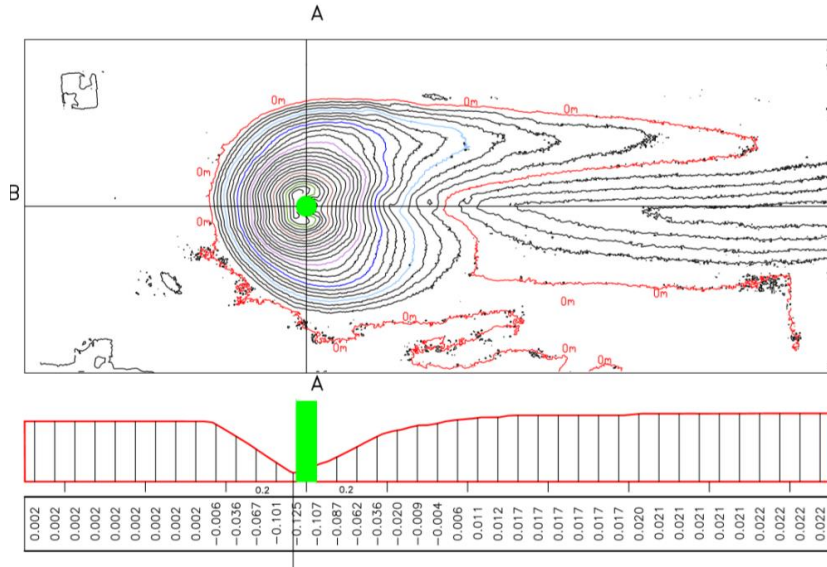
Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m.

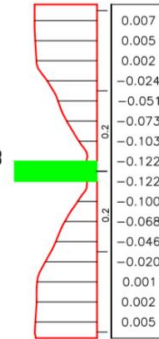
Ensaio 5



84



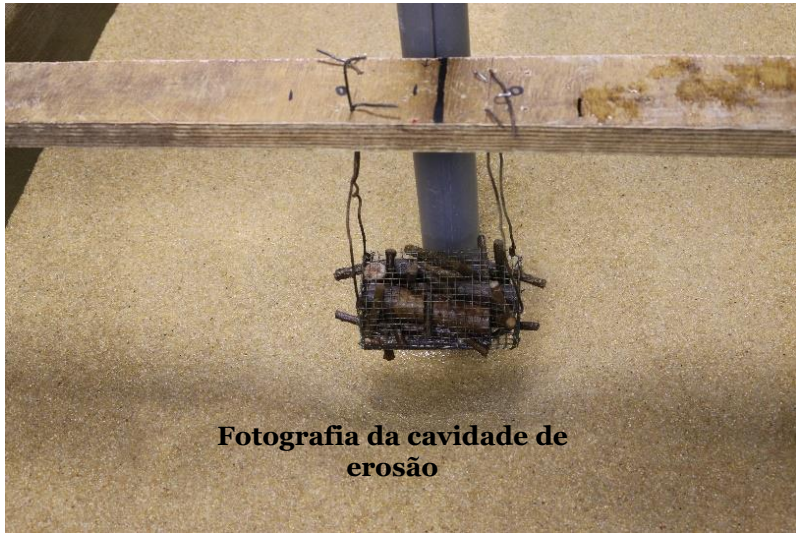
Profundidade máxima da erosão: 0,126



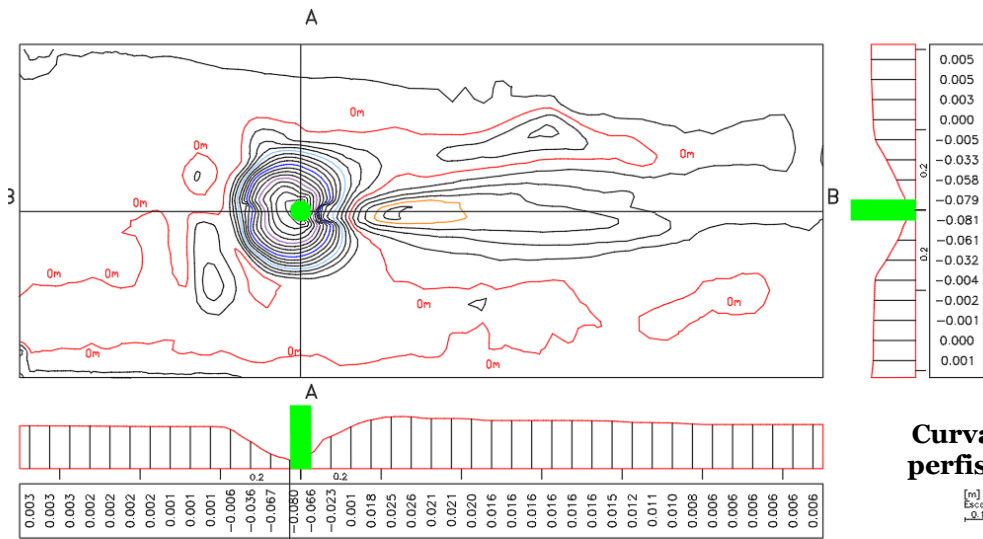
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 0,1 m

Ensaio 7



85



Profundidade máxima da erosão: 0,081

Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 1:2,1 m

Ensaio 8

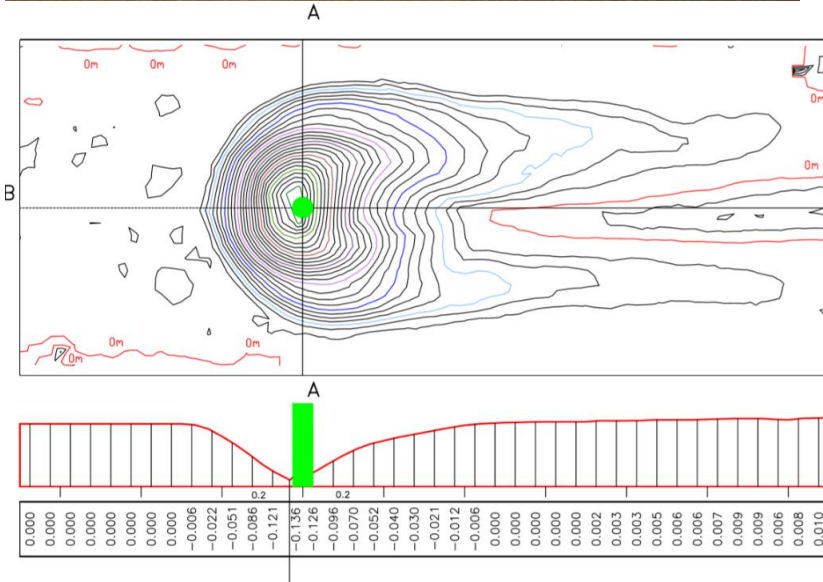


Fotografia da cavidade de erosão

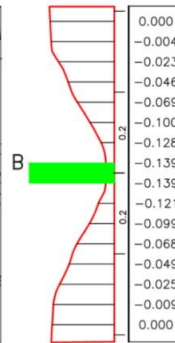


Nuvem de pontos da cavidade de erosão

98



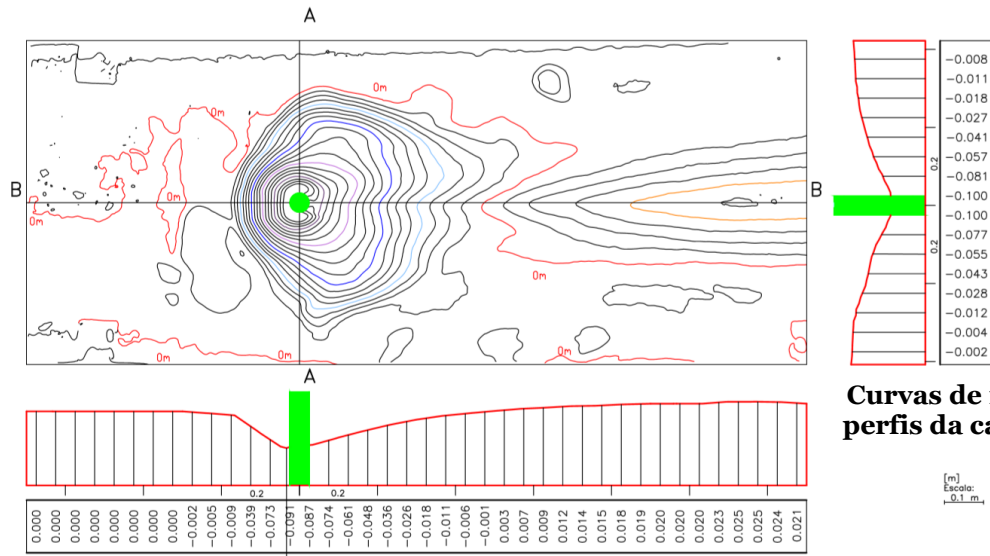
Profundidade máxima da erosão: 0,142



Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 1:1 m

Ensaio 9



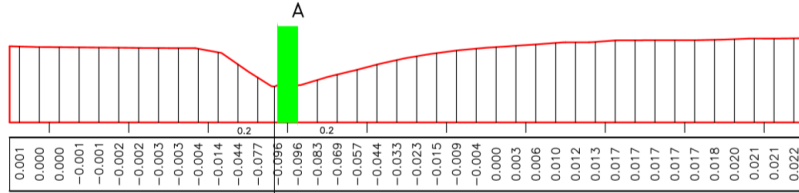
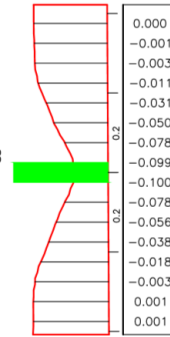
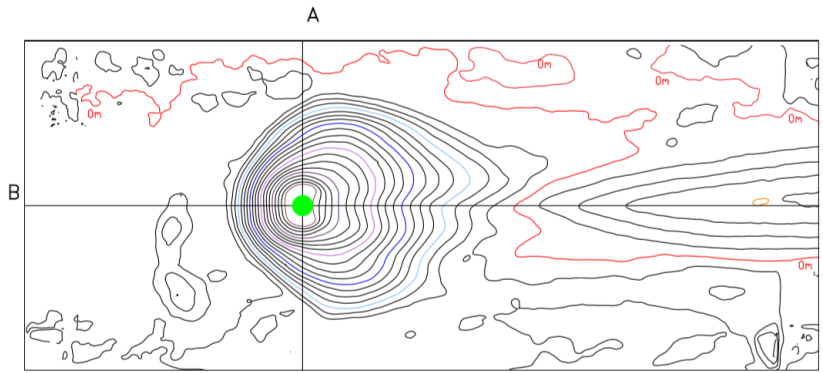
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

Ensaio 10

Profundidade máxima da erosão: 0,095



88

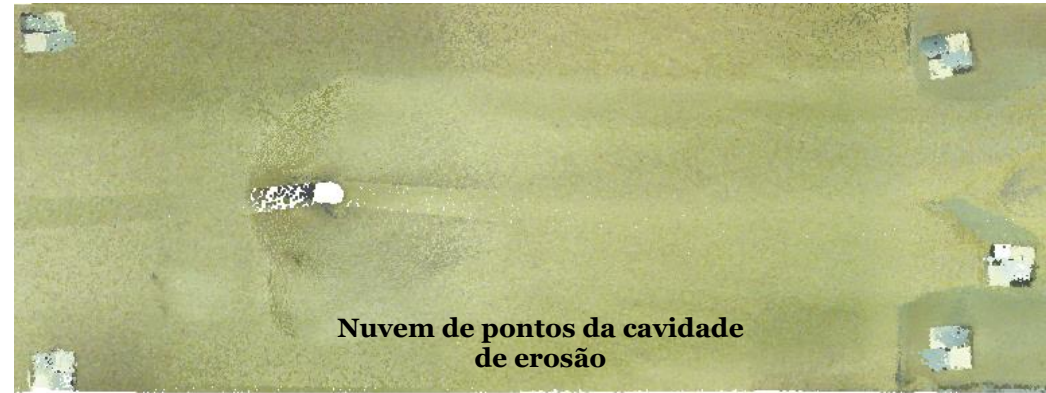


Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

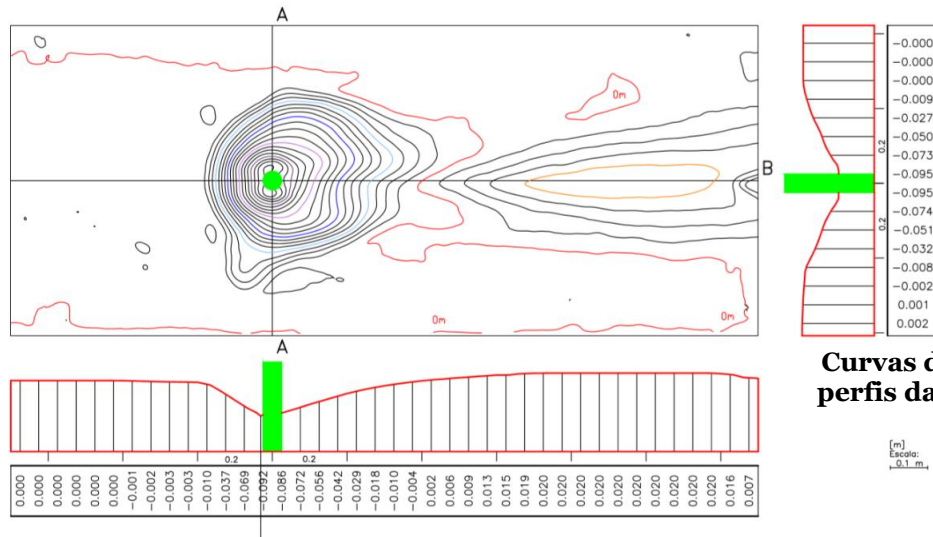
[m]
Escala: 0,1 m.

Profundidade máxima da erosão: 0,099

Ensaio 11



68



Profundidade máxima da erosão: 0,095

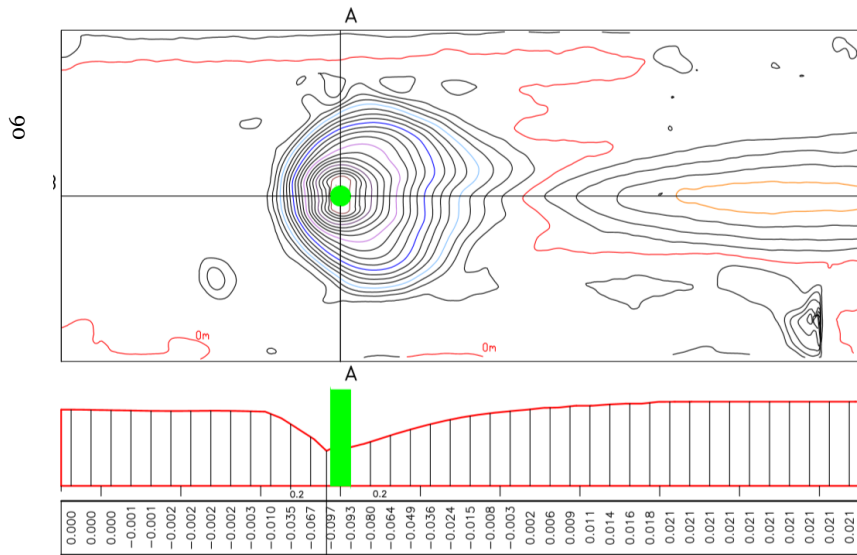
Ensaio 12



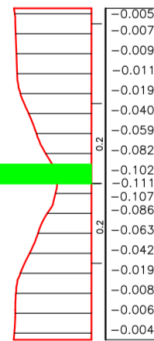
Fotografia da cavidade de erosão



Nuvem de pontos da cavidade de erosão



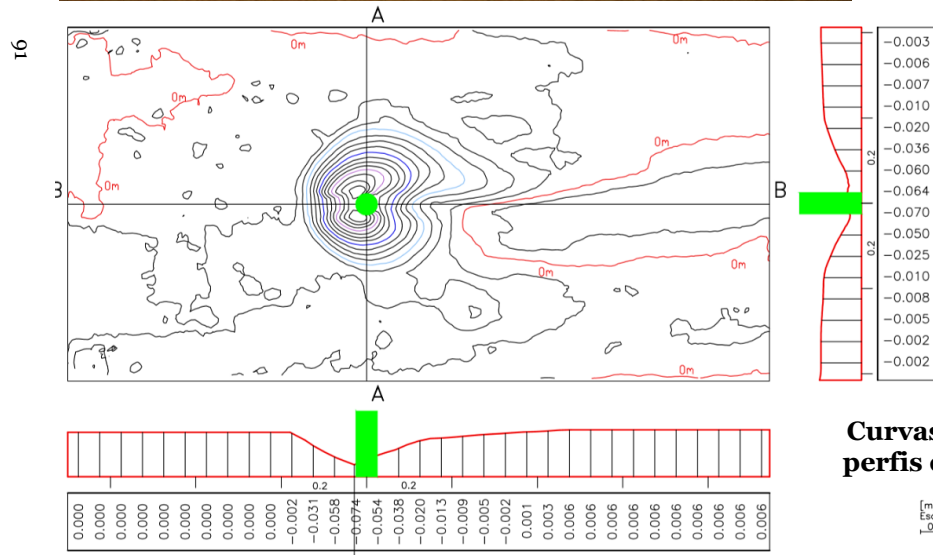
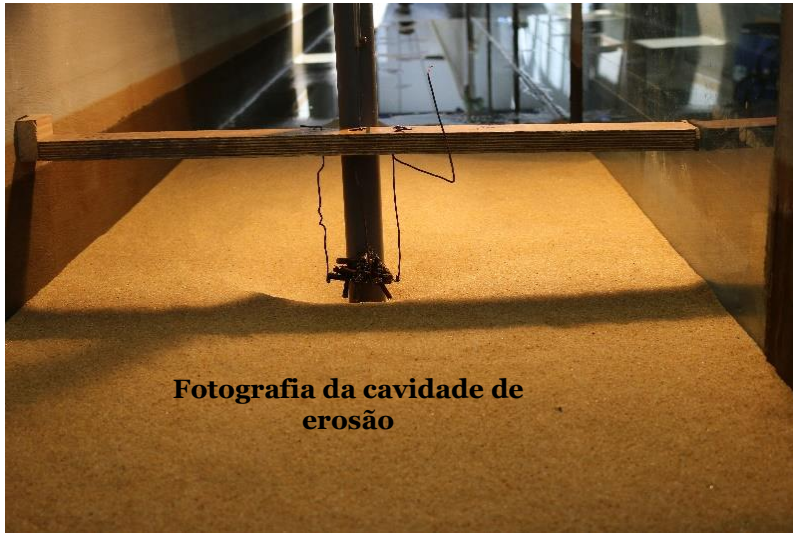
Profundidade máxima da erosão: 0,102



Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m

Ensaio 13

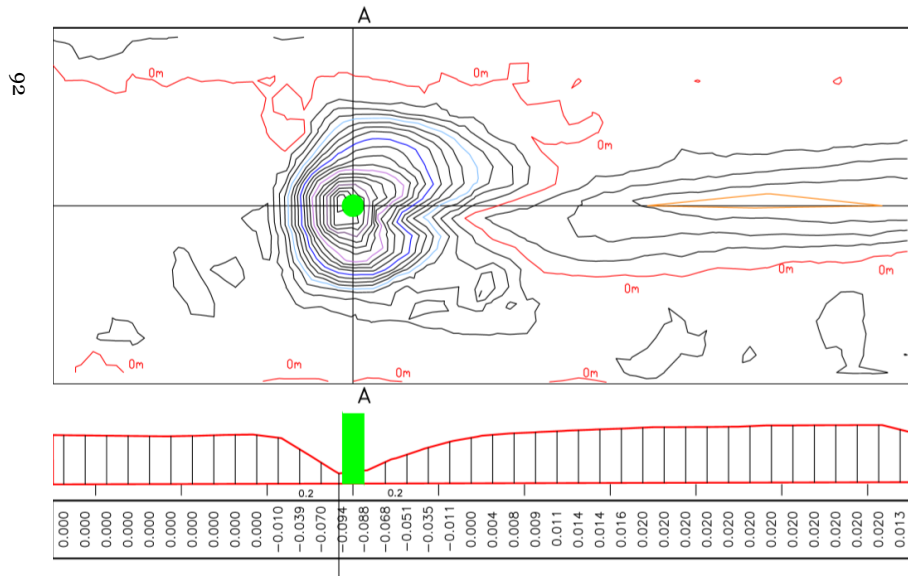




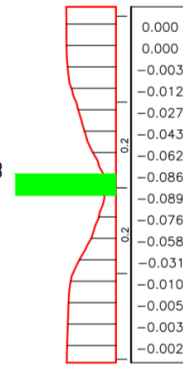
Fotografia da cavidade de erosão



Nuvem de pontos da cavidade de erosão



Profundidade máxima da erosão: 0,095



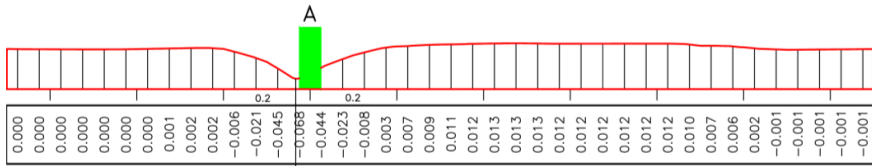
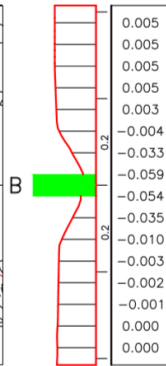
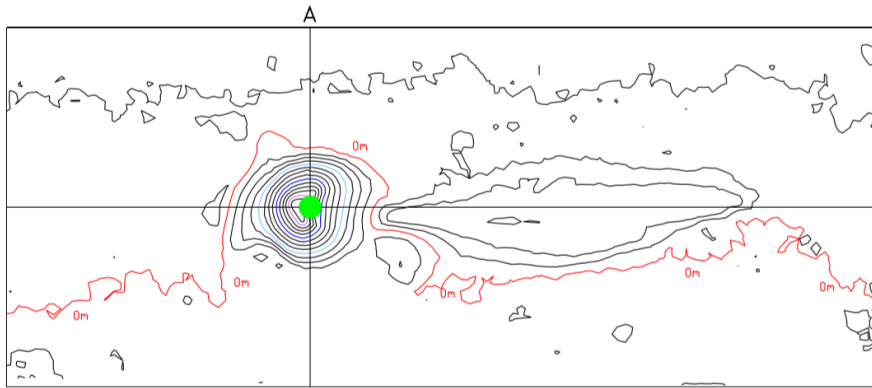
Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala: 0,1 m

Ensaio 15



83



Profundidade máxima da erosão: 0,069

Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

Escala: 0,1 m

Ensaio 16

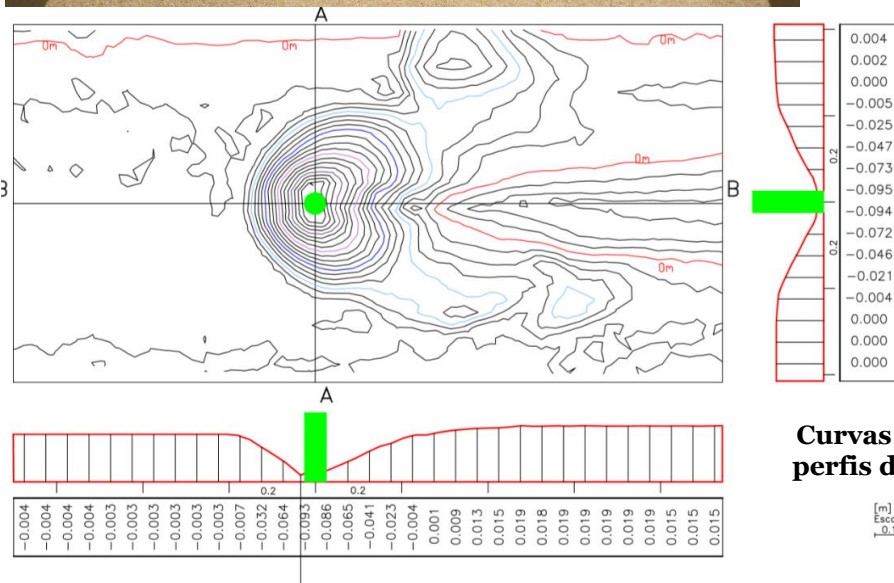


Fotografia da cavidade de erosão



Nuvem de pontos da cavidade de erosão

94

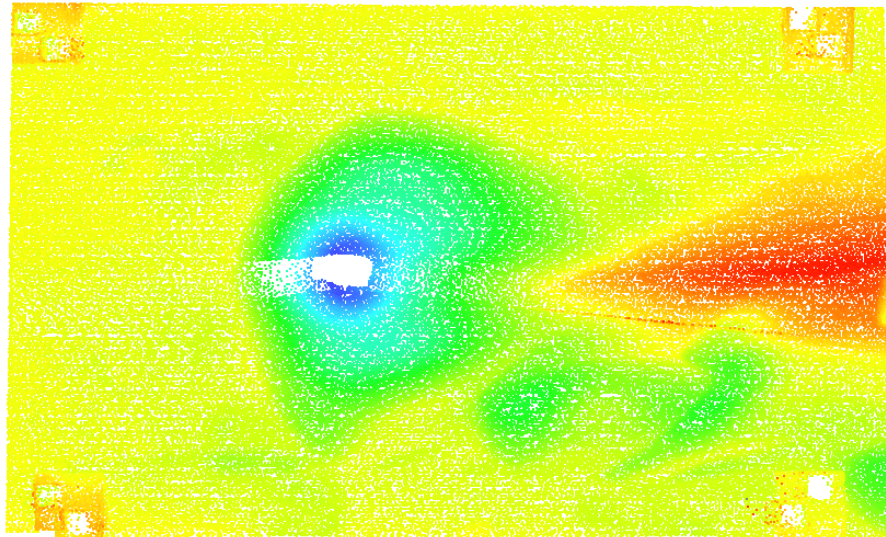
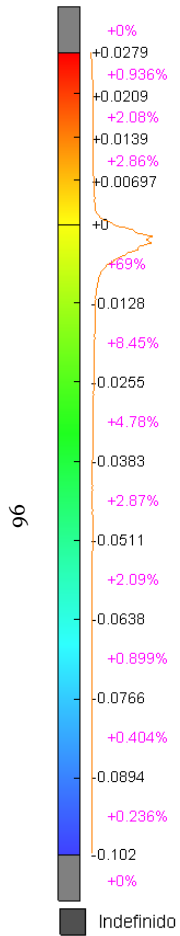


Profundidade máxima da erosão: 0,097

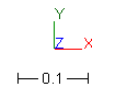
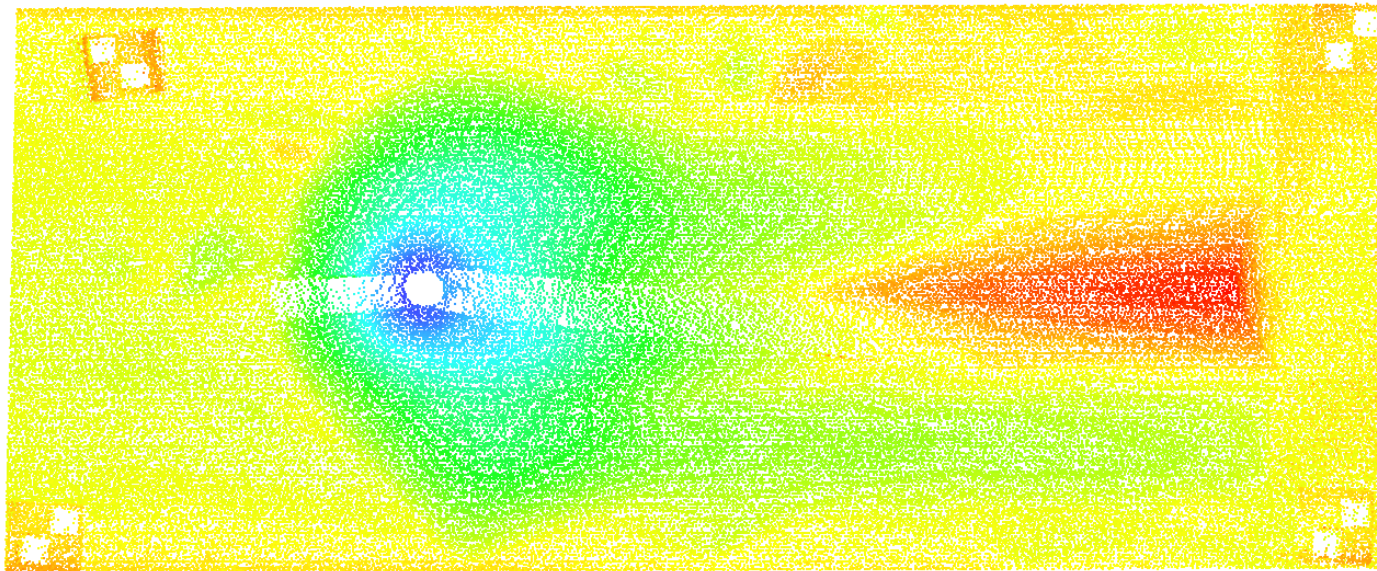
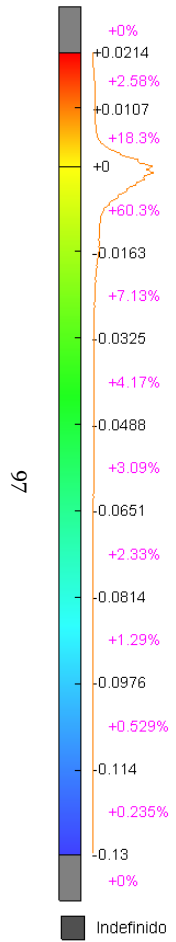
Ensaio 17

Apêndice A.1.1-Levantamentos por varrimento a laser (MDE)

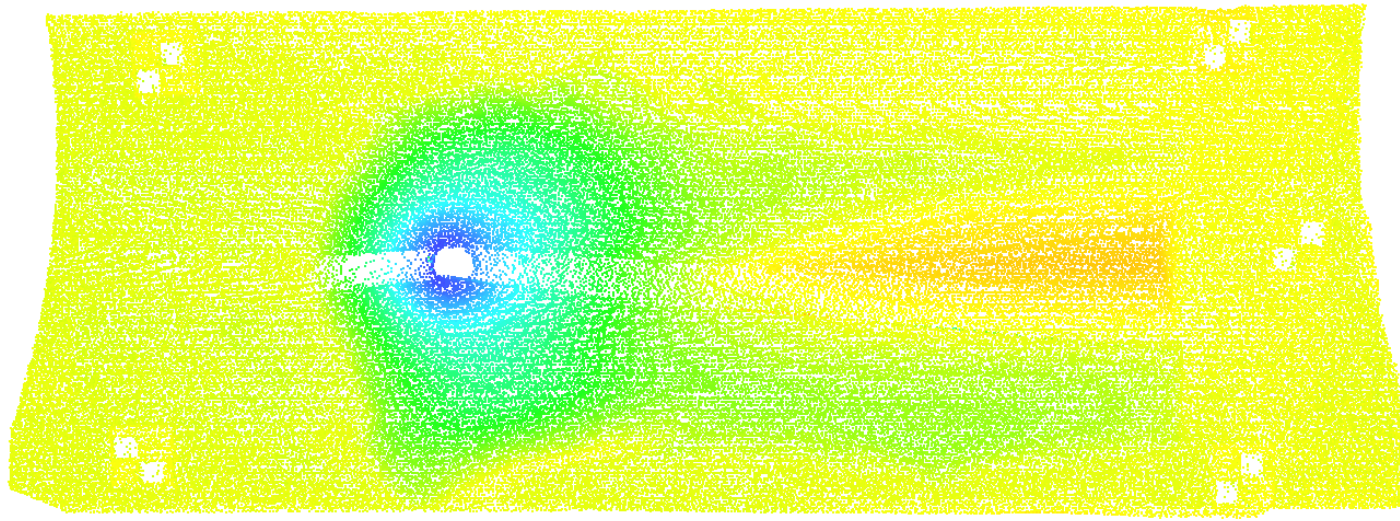
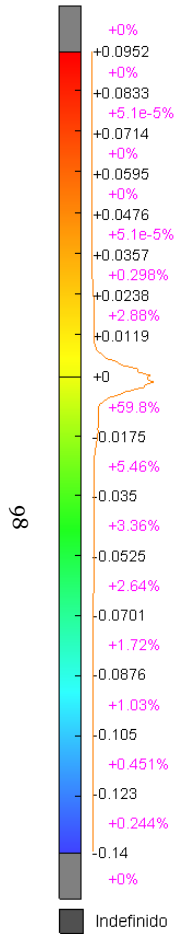
• Ensaio 1



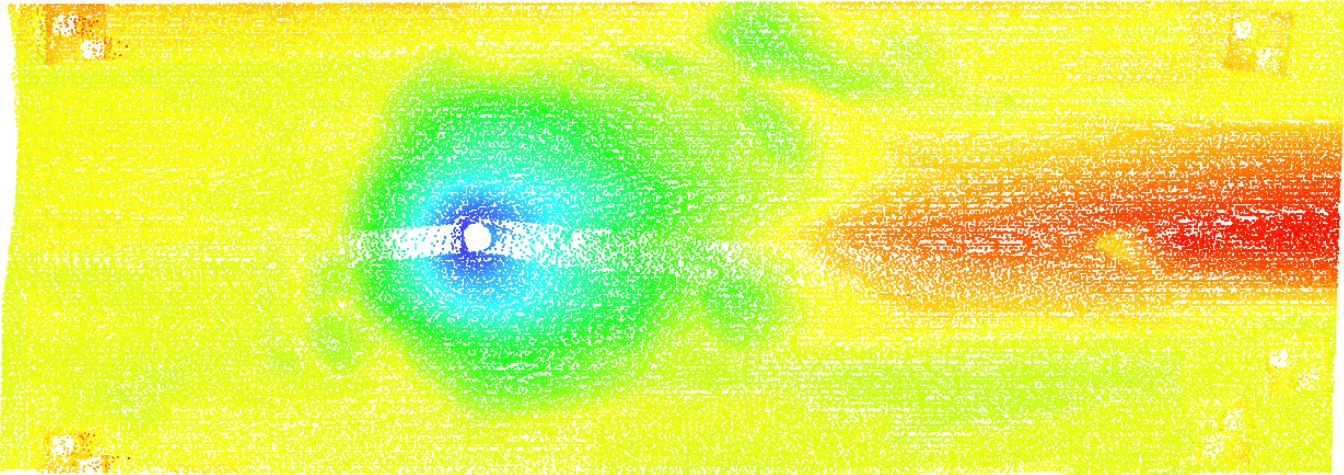
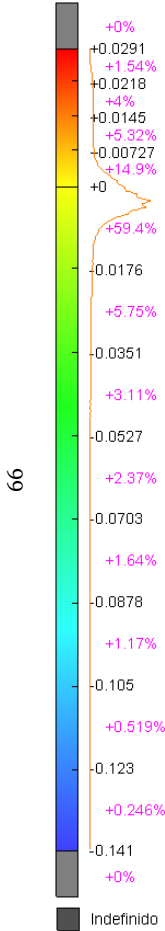
• Ensaio 2



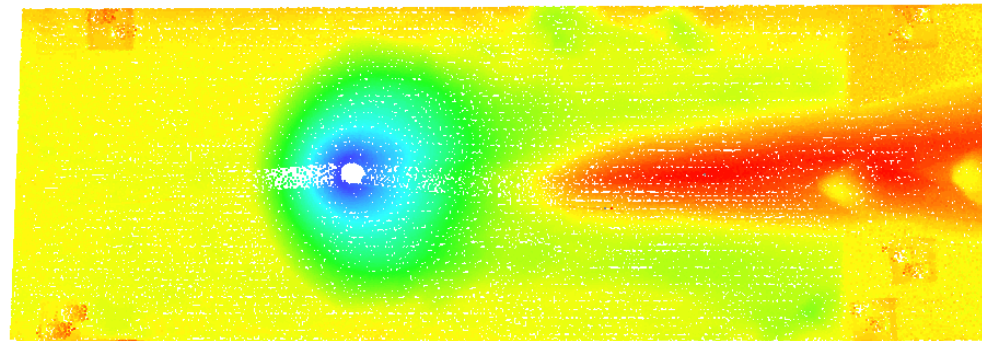
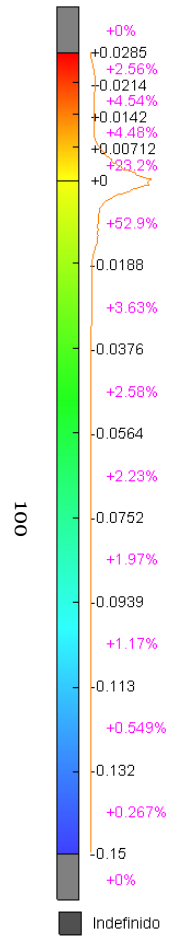
• Ensaio 3



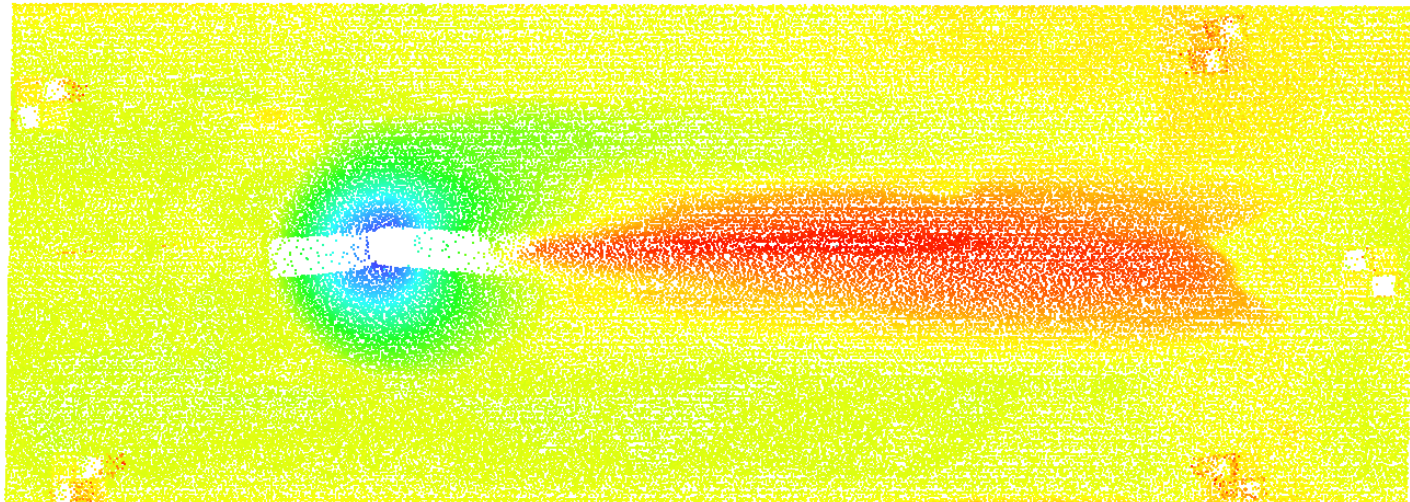
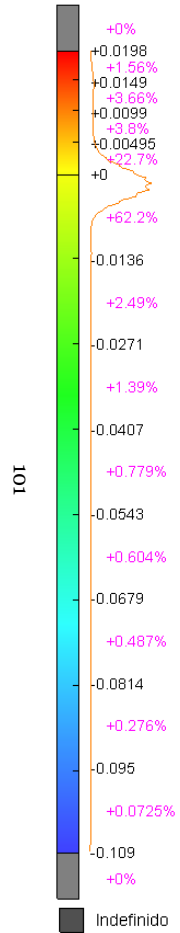
• Ensaio 4



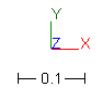
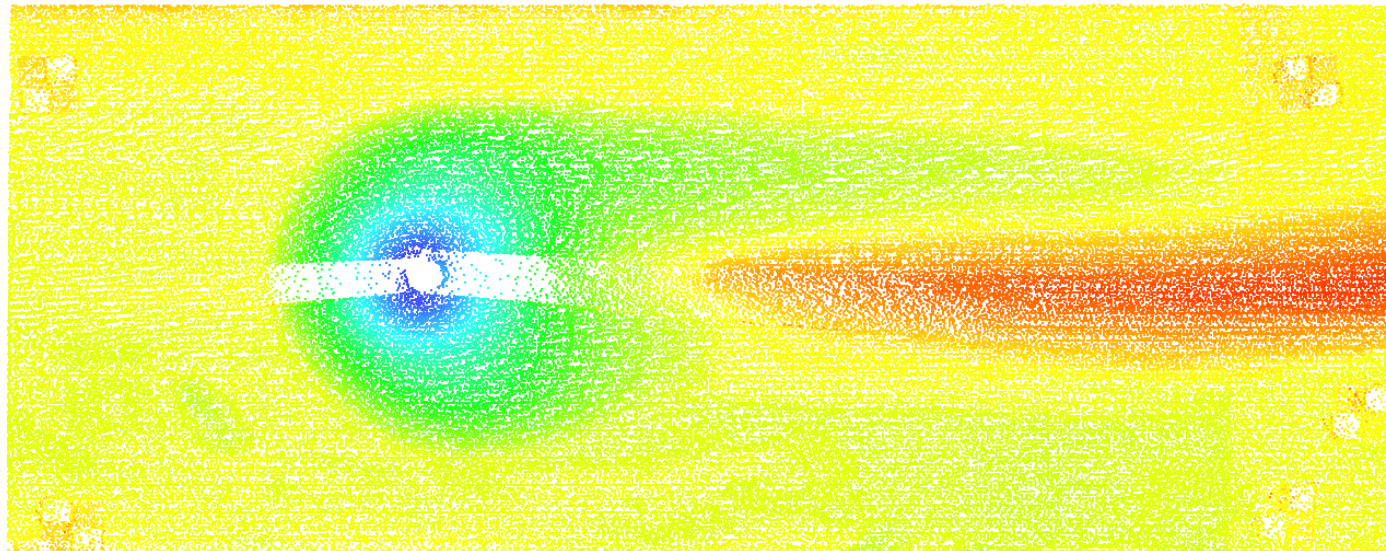
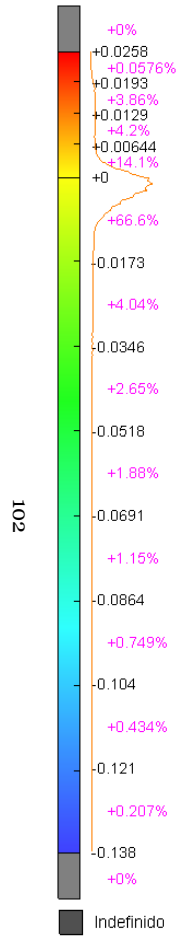
• Ensaio 5



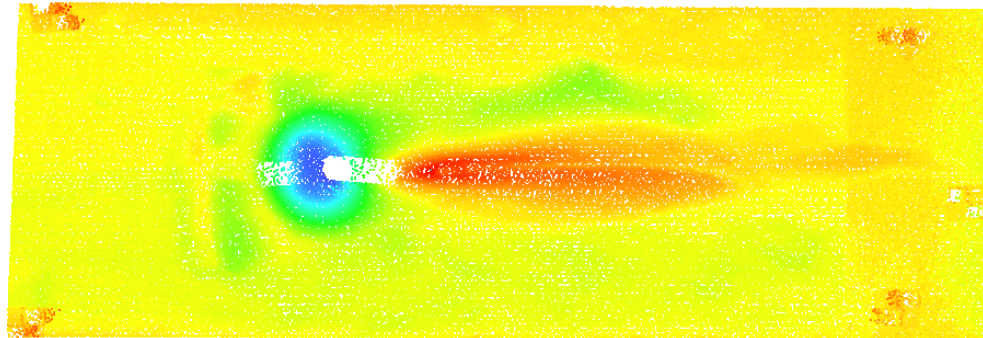
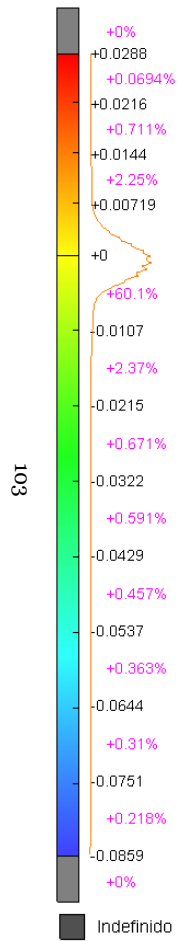
• Ensaio 6



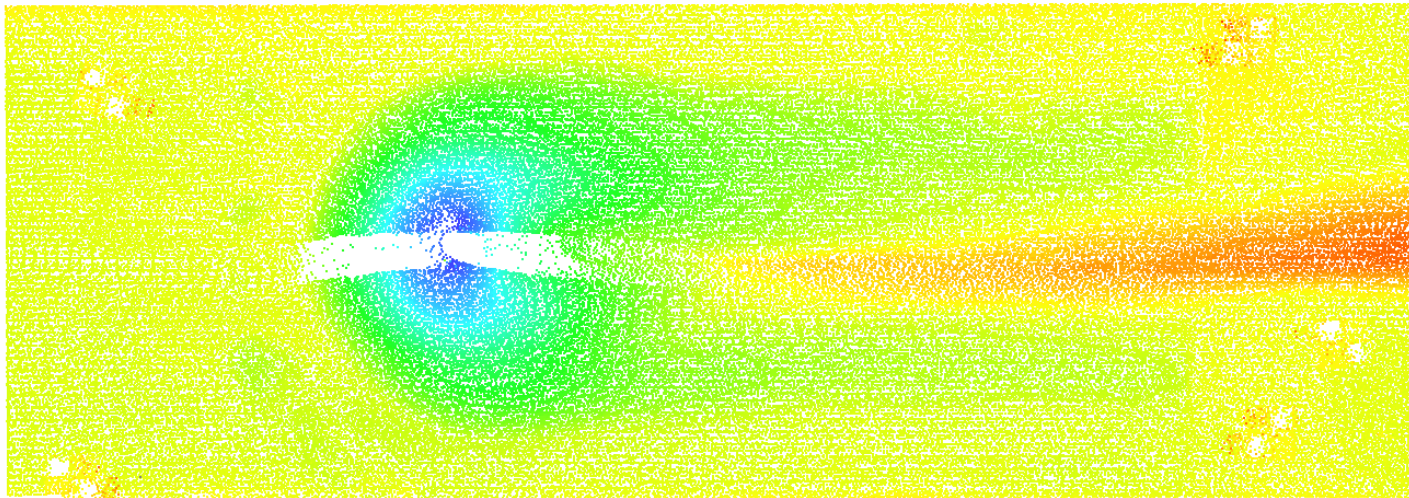
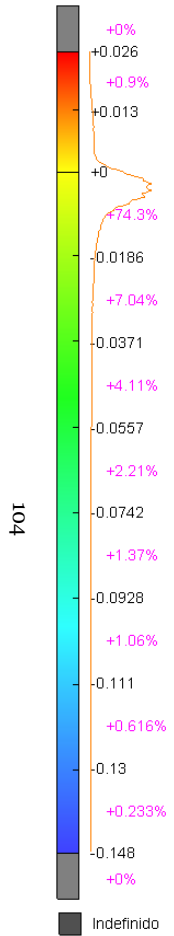
• Ensaio 7



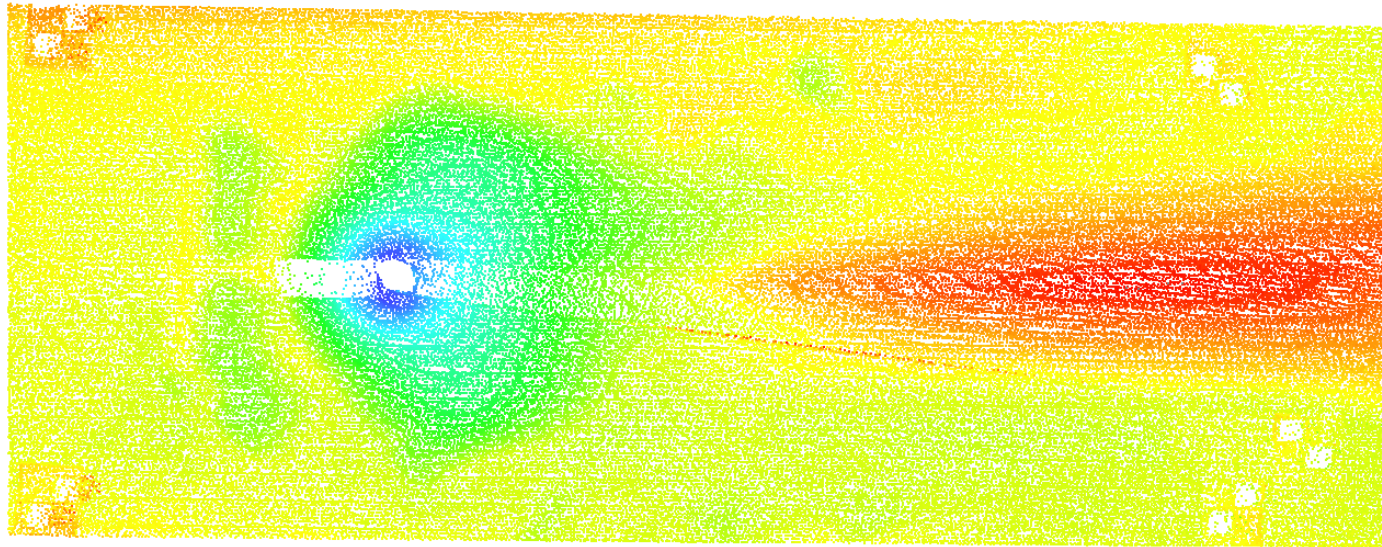
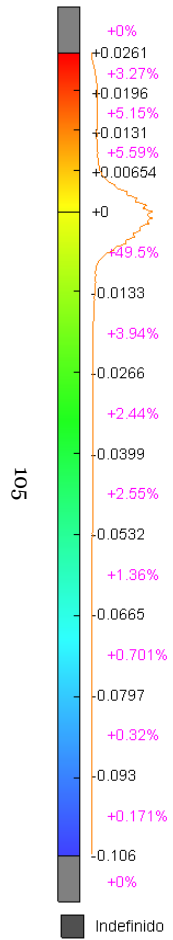
•Ensaio 8



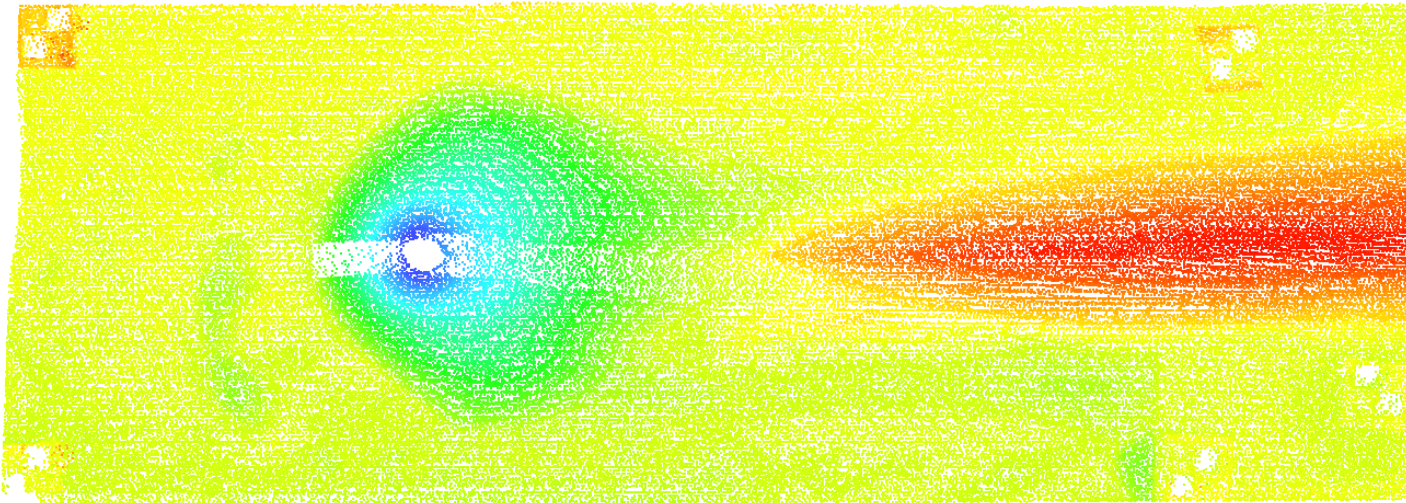
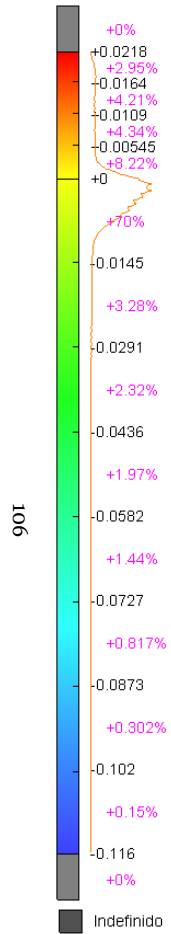
• Ensaio 9



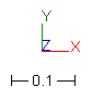
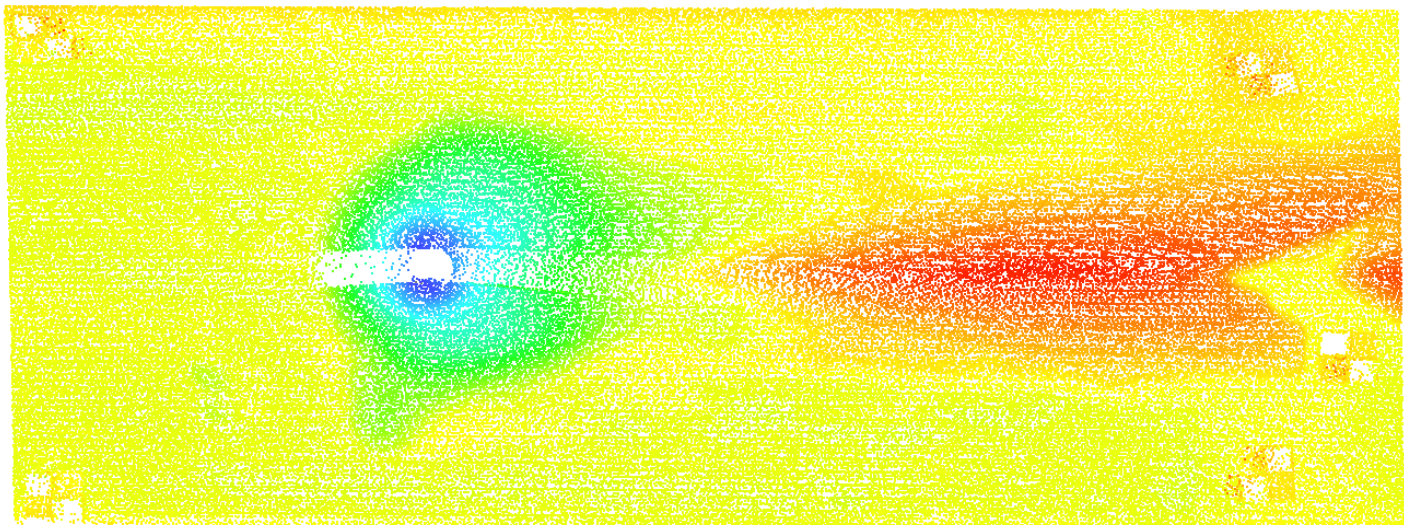
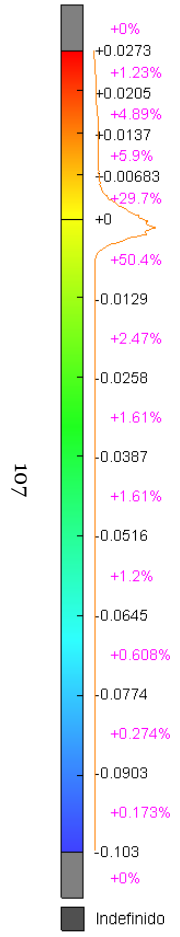
• Ensaio 10



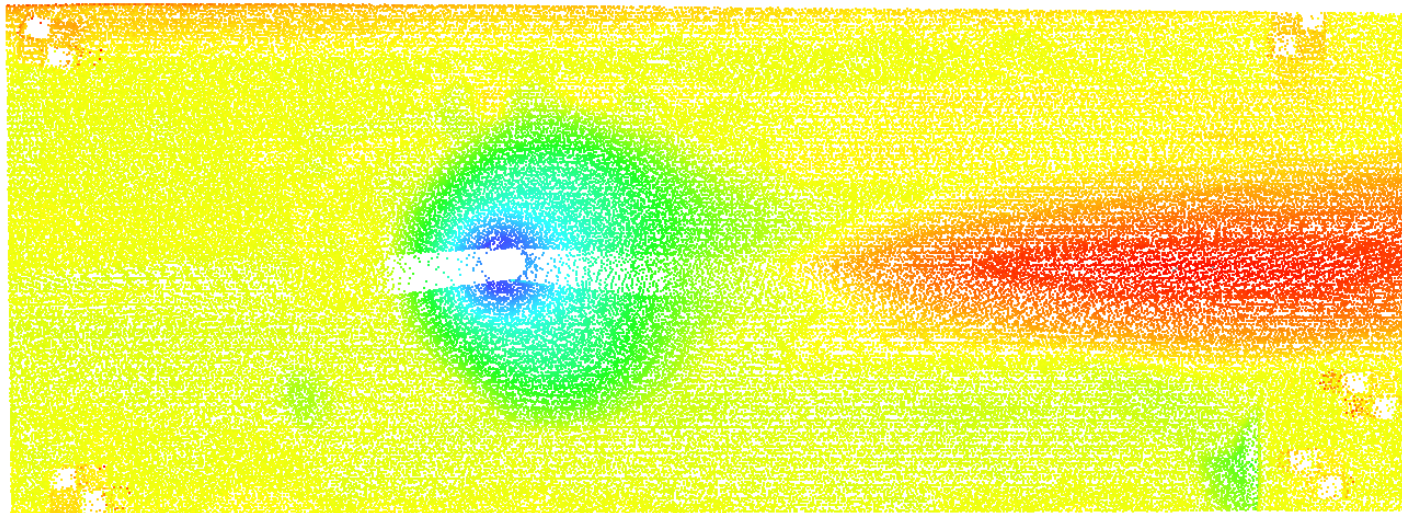
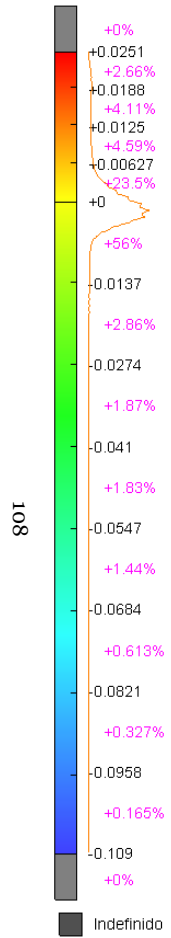
• Ensaio 11



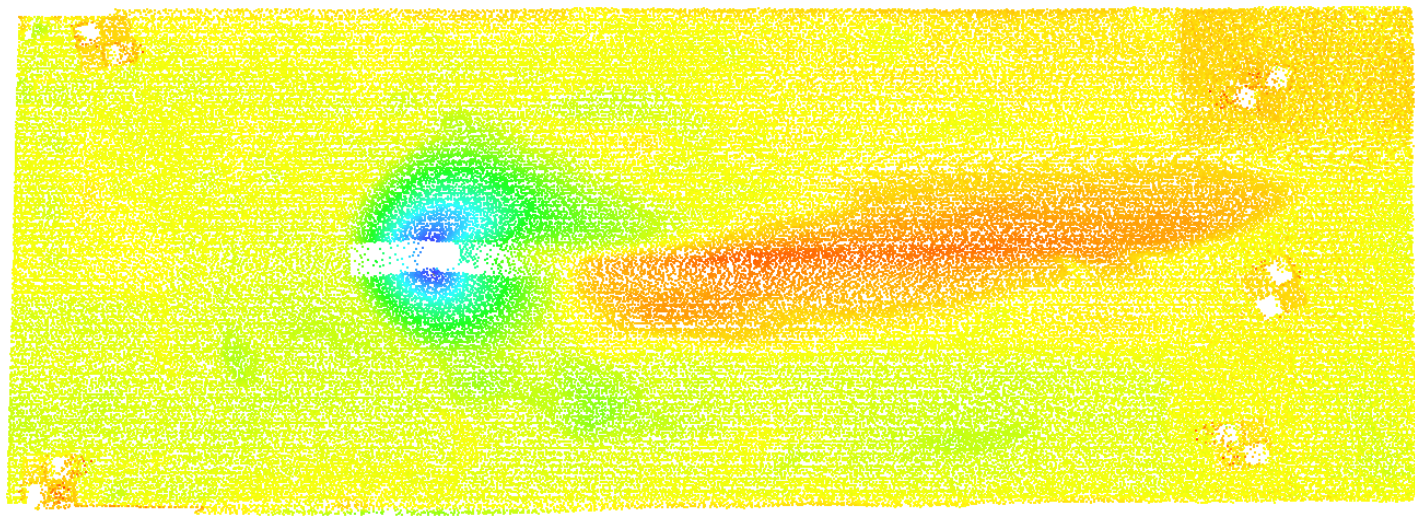
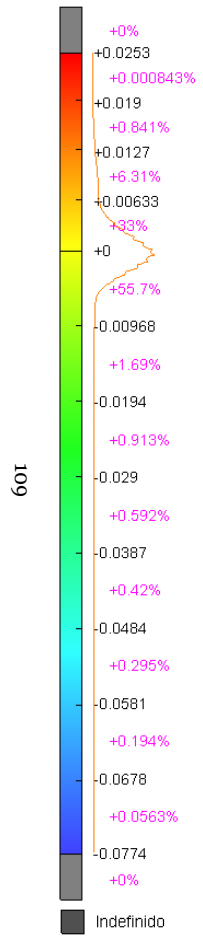
• Ensaio 12



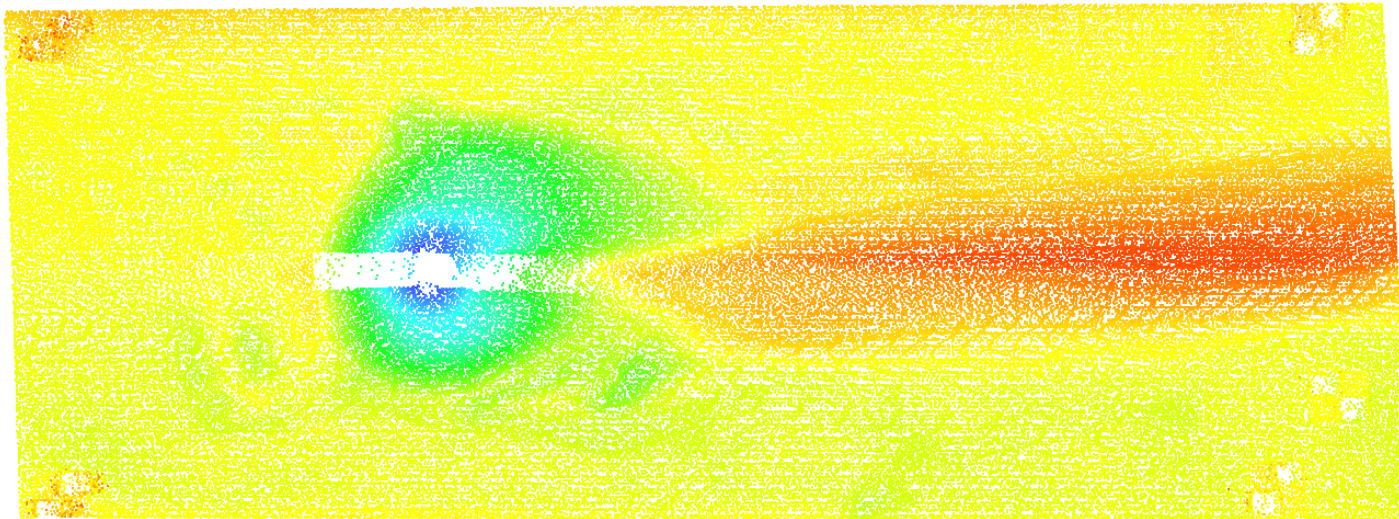
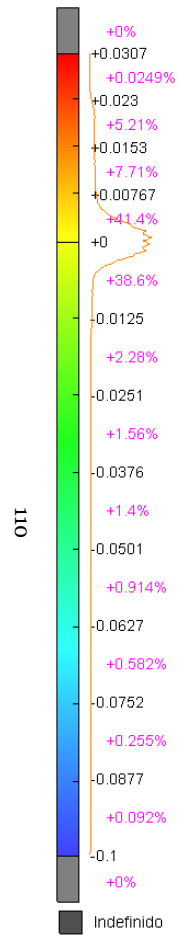
• Ensaio 13



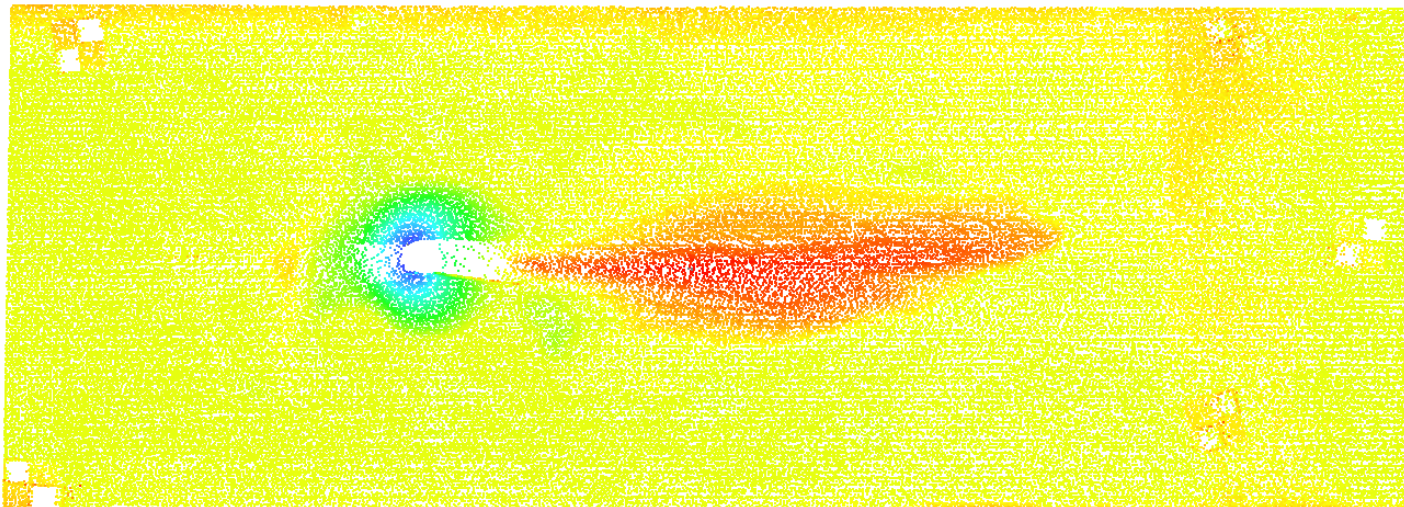
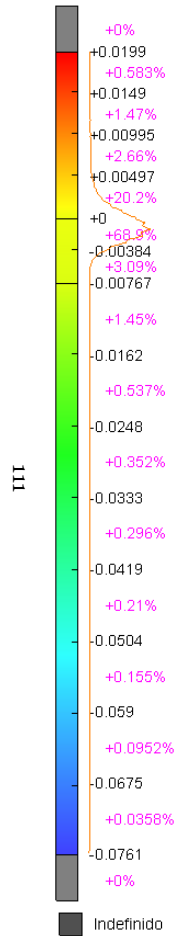
• Ensaio 14



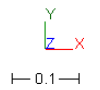
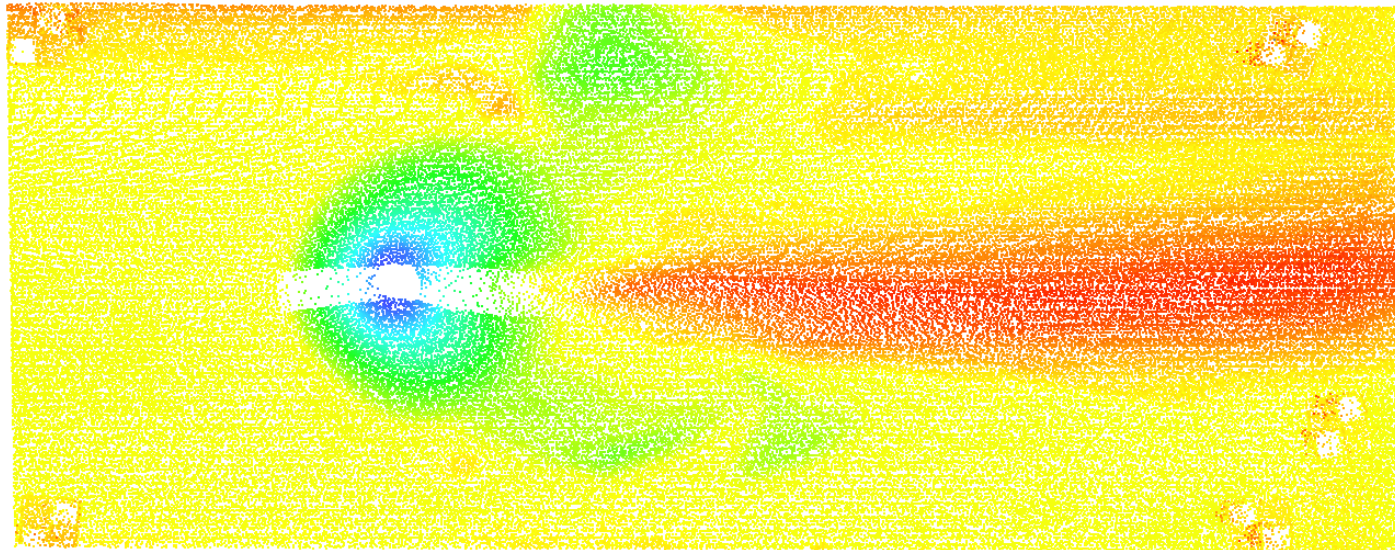
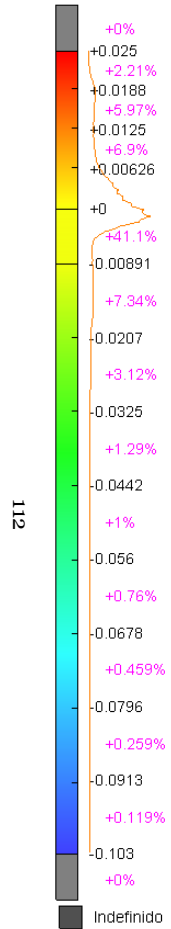
• Ensaio 15



• Ensaio 16

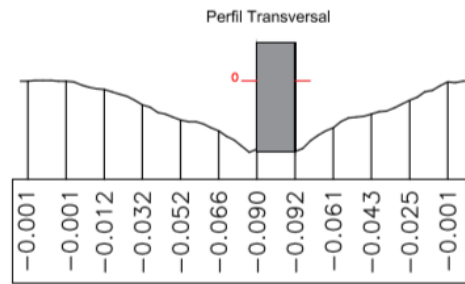
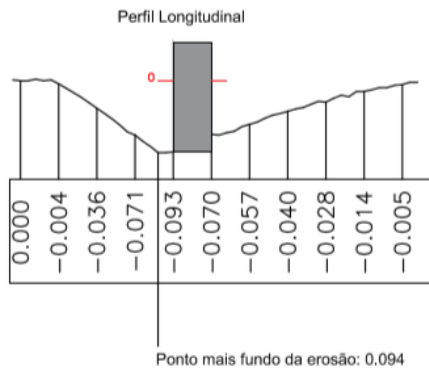


• Ensaio 17



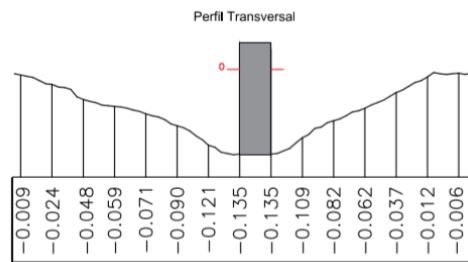
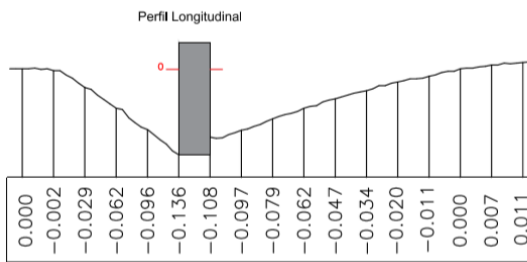
Apêndice A.2-Método de medição pontual (distanciômetro digital laser)

● Ensaio 1



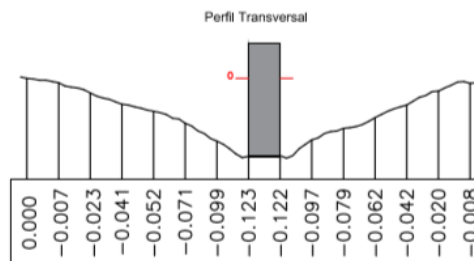
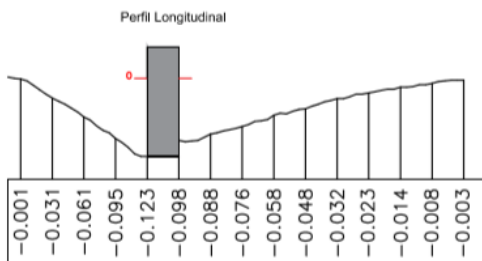
[m]
Escala:
0.1 m

● Ensaio 2



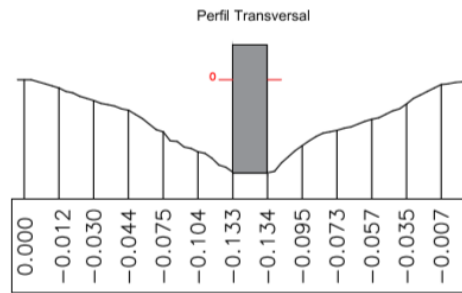
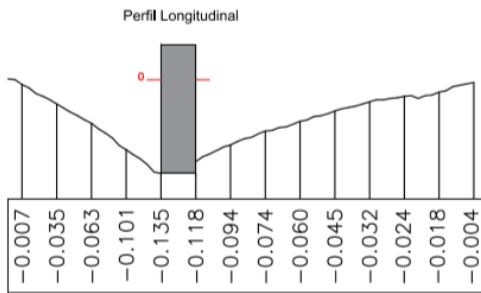
[m]
Escala:
0.1 m

● Ensaio 3



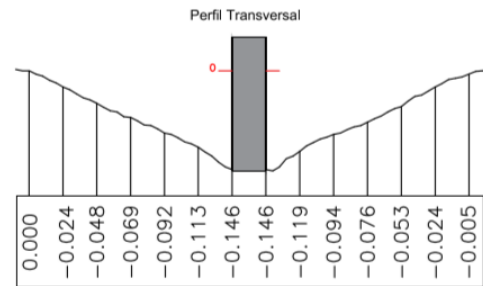
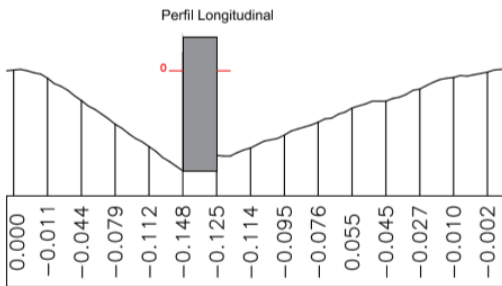
[m]
Escala:
0.1 m

● Ensaio 4



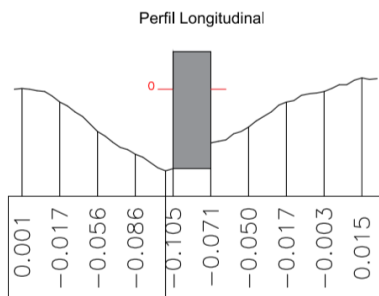
[m]
Escala:
0,1 m

● Ensaio 5

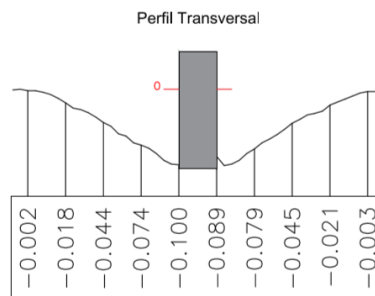


[m]
Escala:
0,1 m

● Ensaio 6

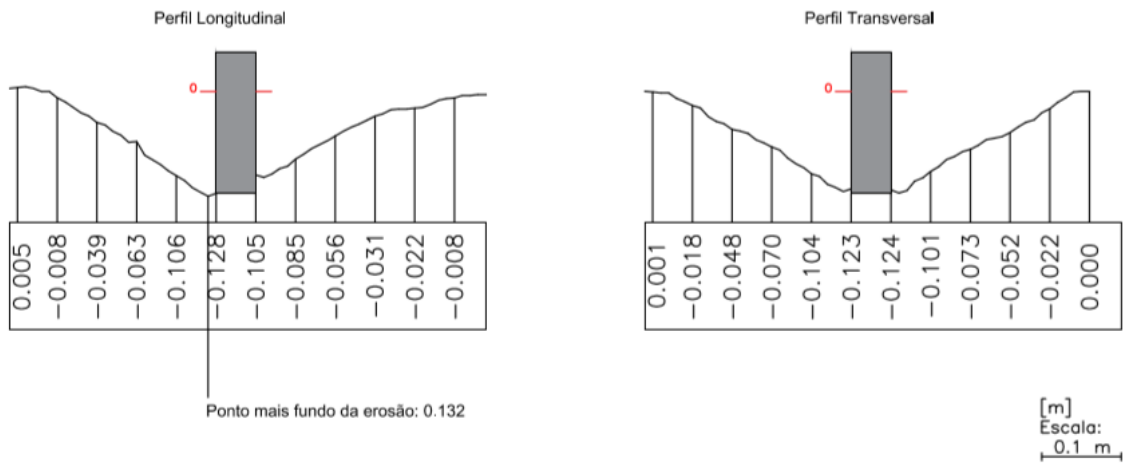


Ponto mais fundo da erosão: 0.108

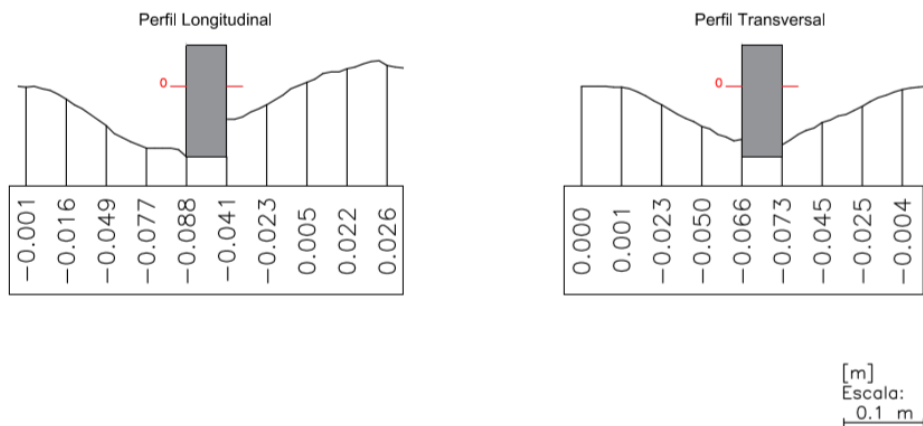


[m]
Escala:
0,1 m

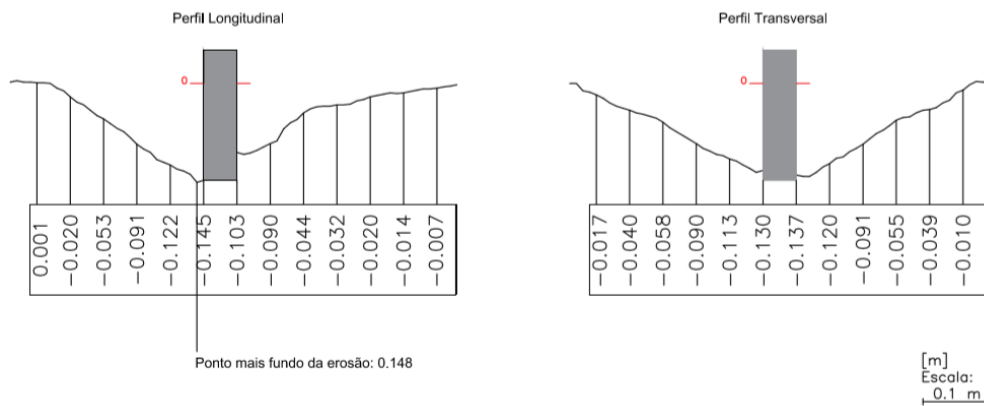
● Ensaio 7



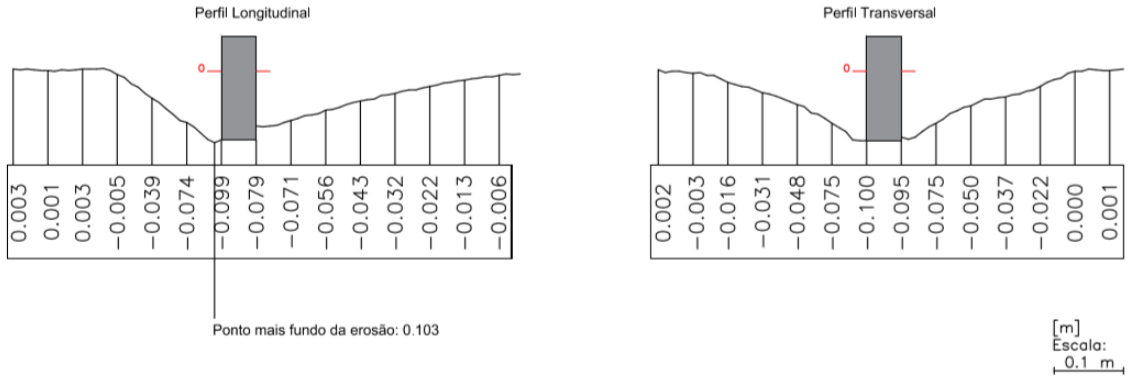
● Ensaio 8



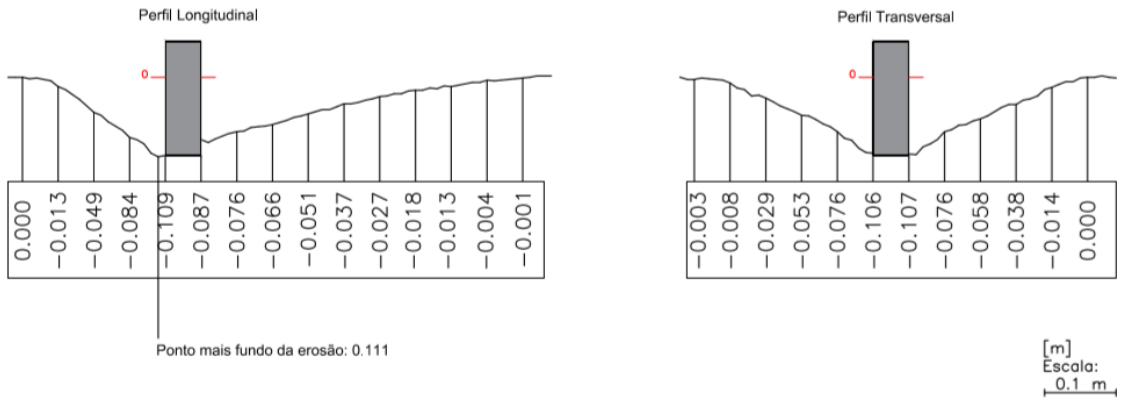
● Ensaio 9



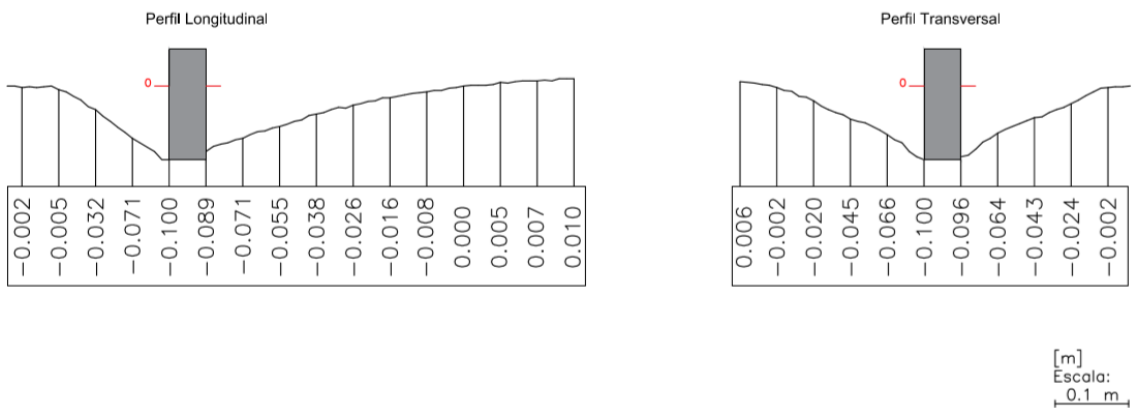
● Ensaio 10



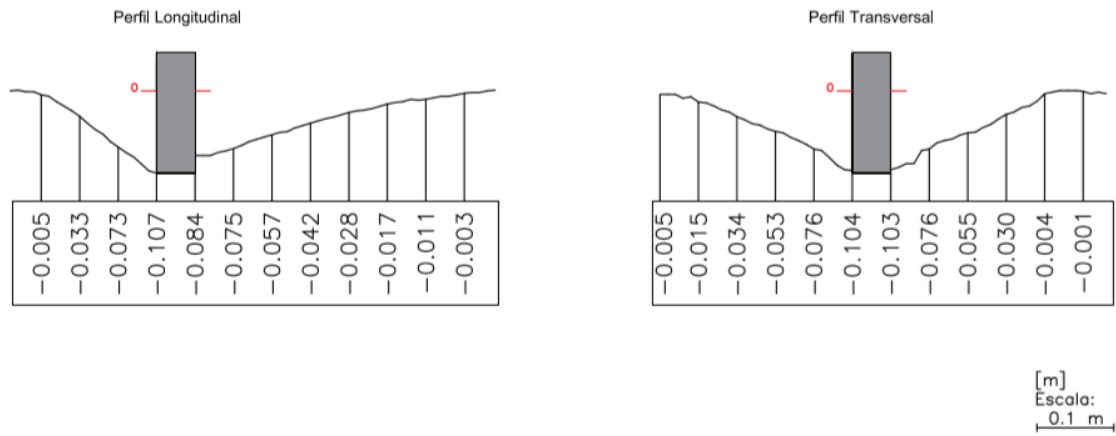
● Ensaio 11



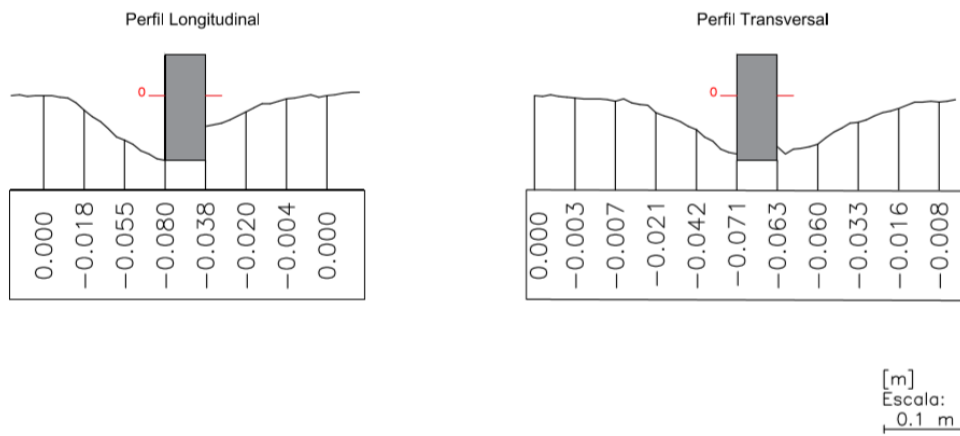
● Ensaio 12



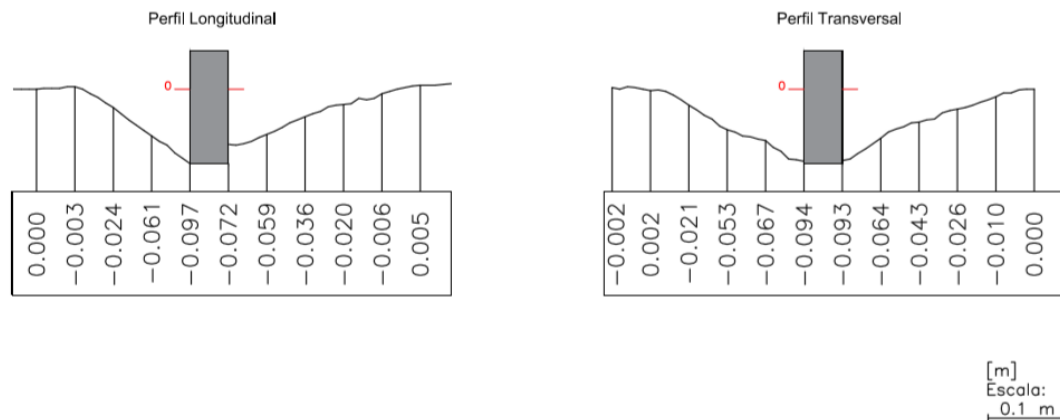
● Ensaio 13



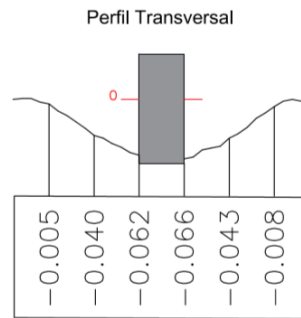
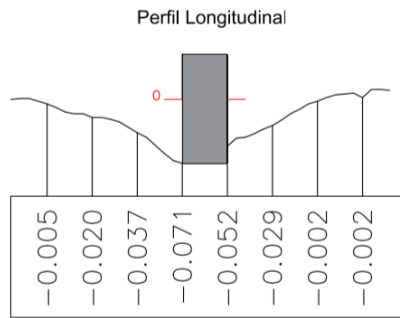
● Ensaio 14



● Ensaio 15

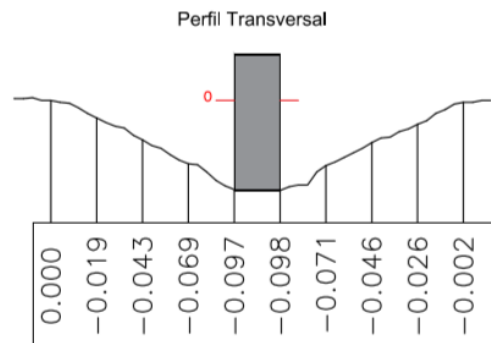
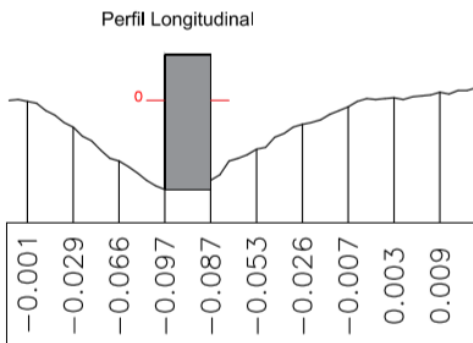


● **Ensaio 16**



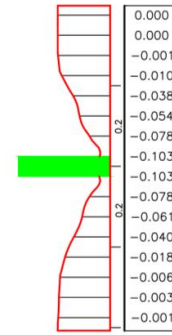
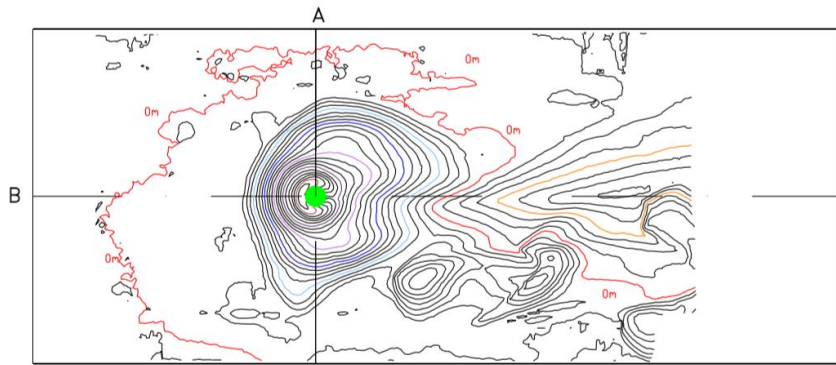
[m]
Escala:
0.1 m

● **Ensaio 17**



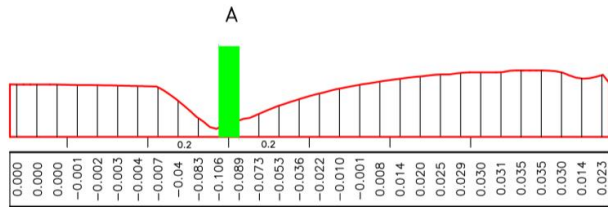
[m]
Escala:
0.1 m

Apêndice A.3-Método fotogramétrico



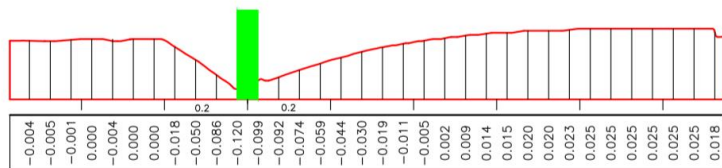
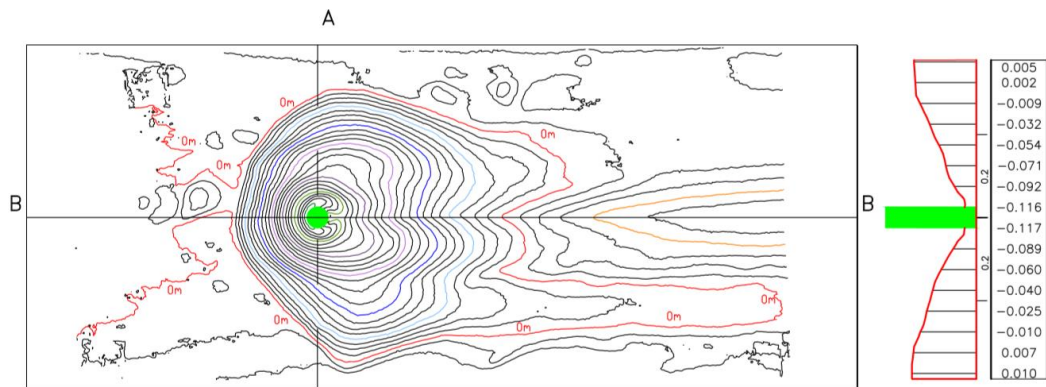
Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0.1 m



Ensaio 1





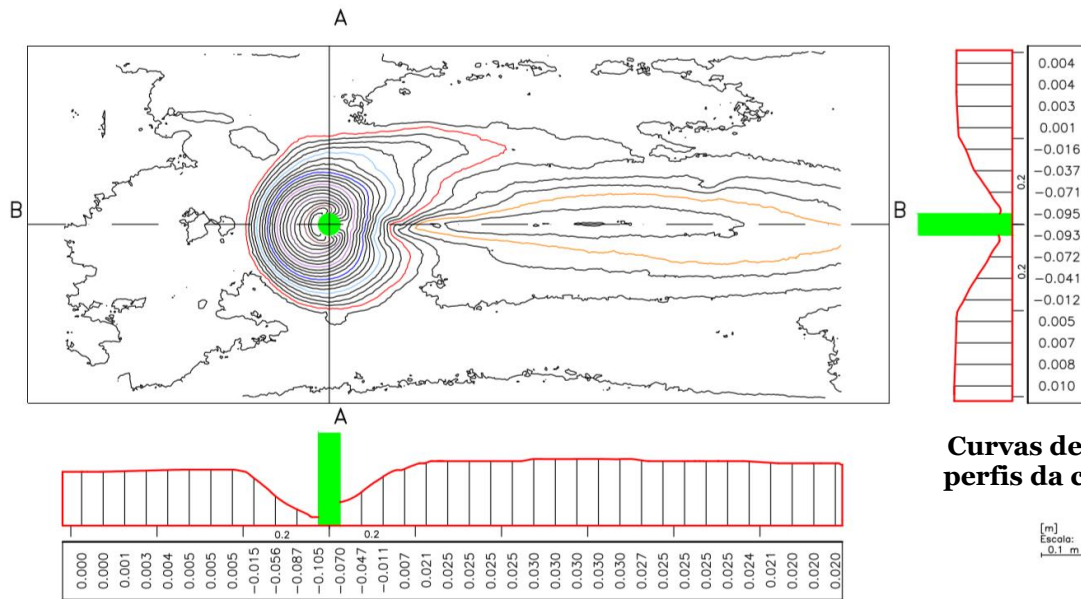
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m

Ensaio 2



Nuvem de pontos da cavidade de erosão

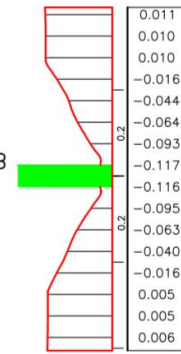
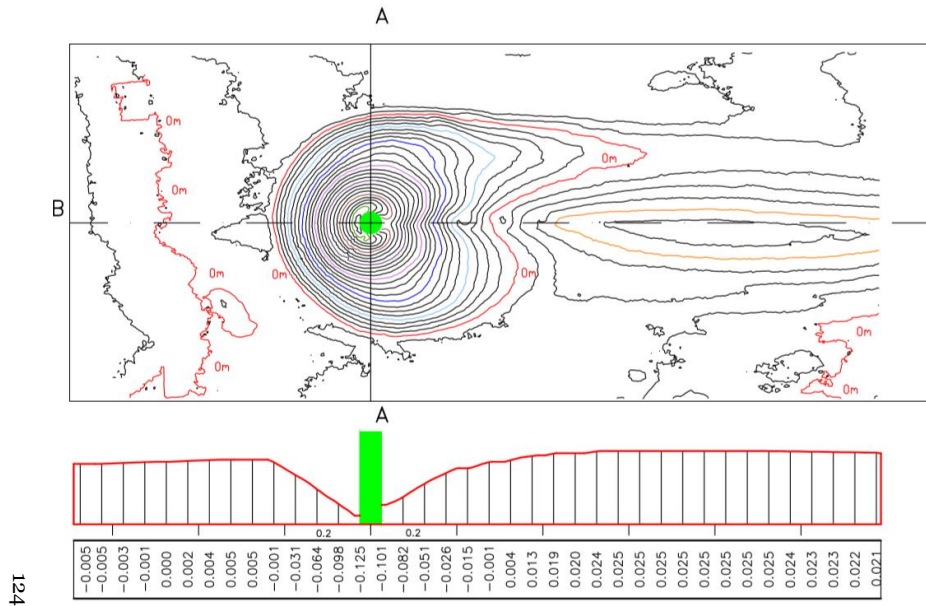


Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m

Ensaio 6





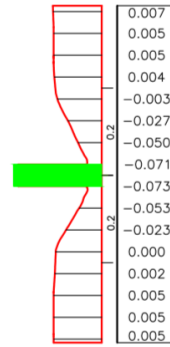
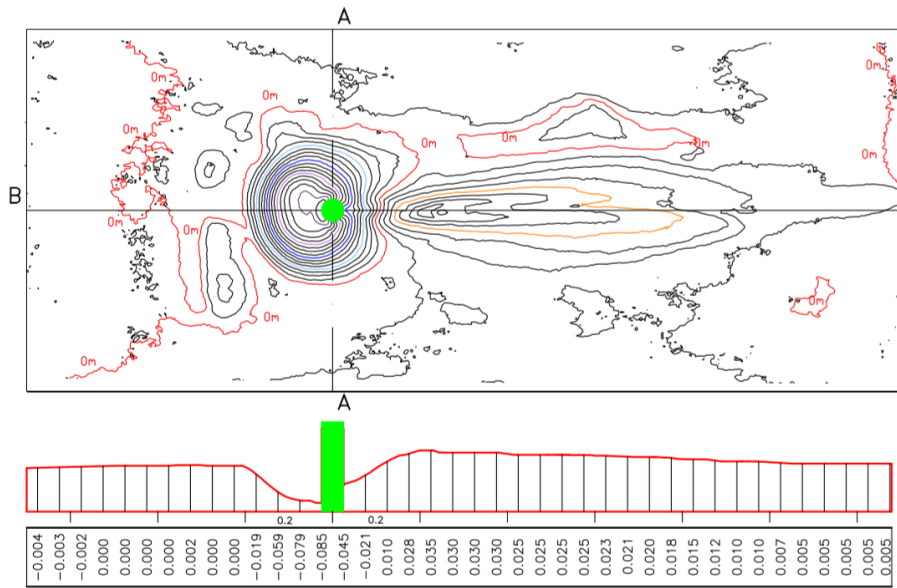
Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m.

Ensaio 7



Nuvem de pontos da cavidade de erosão

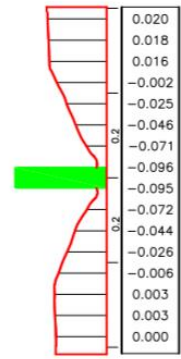
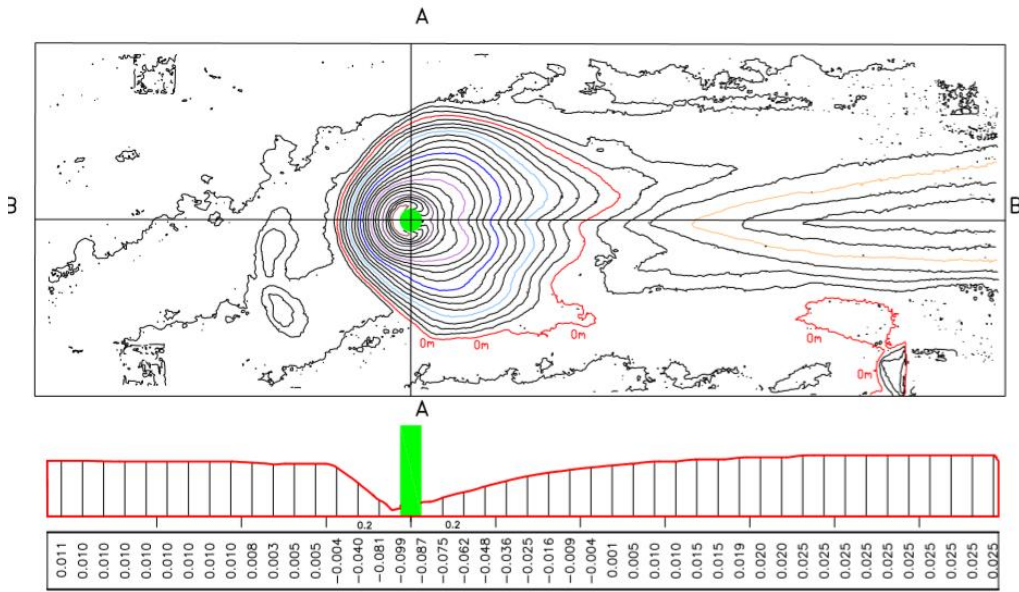


Curvas de nível e respetivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m

Ensaio 8





Curvas de nível e respectivos perfis da cavidade de erosão

[m]
Escala:
0,1 m

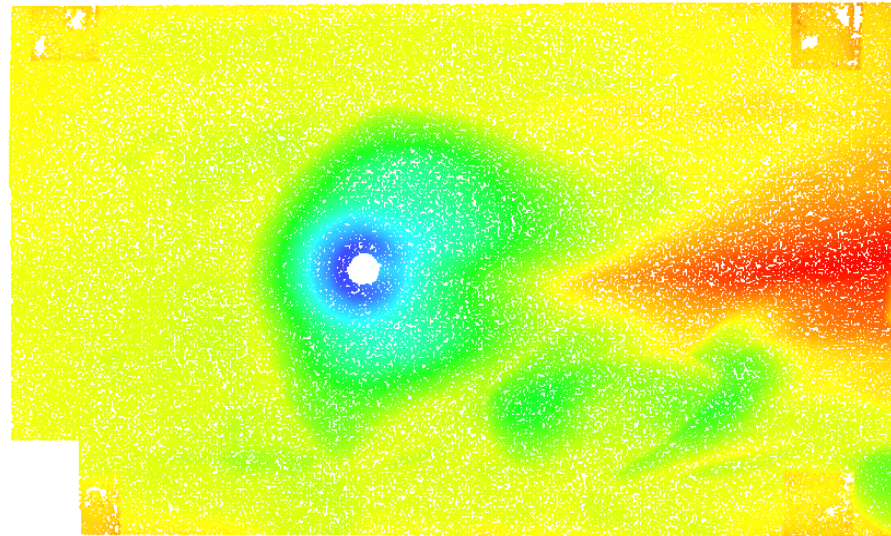
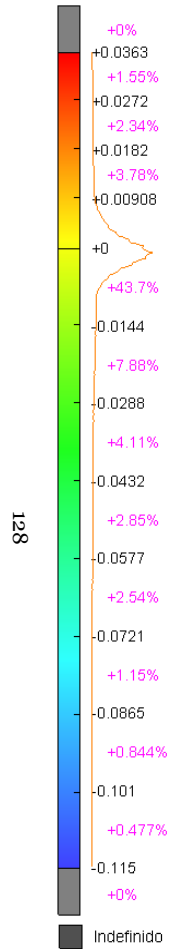
Ensaio 11



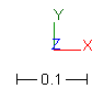
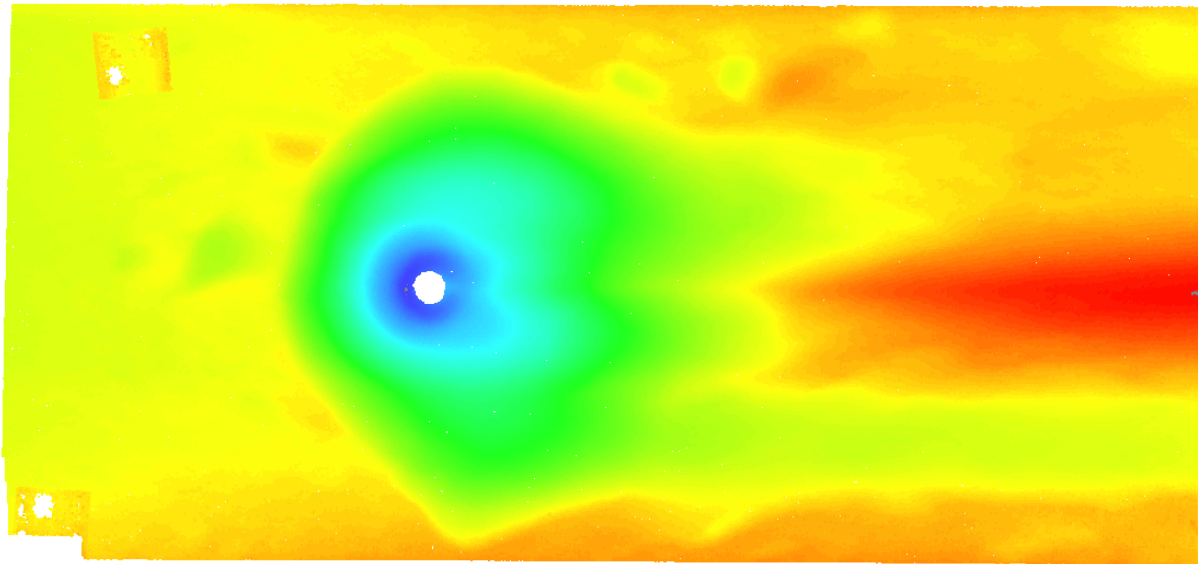
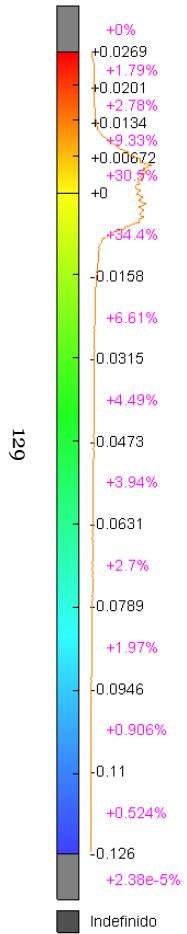
Nuvem de pontos da cavidade de erosão

Apêndice A.3.1-Método fotogramétrico (MDE)

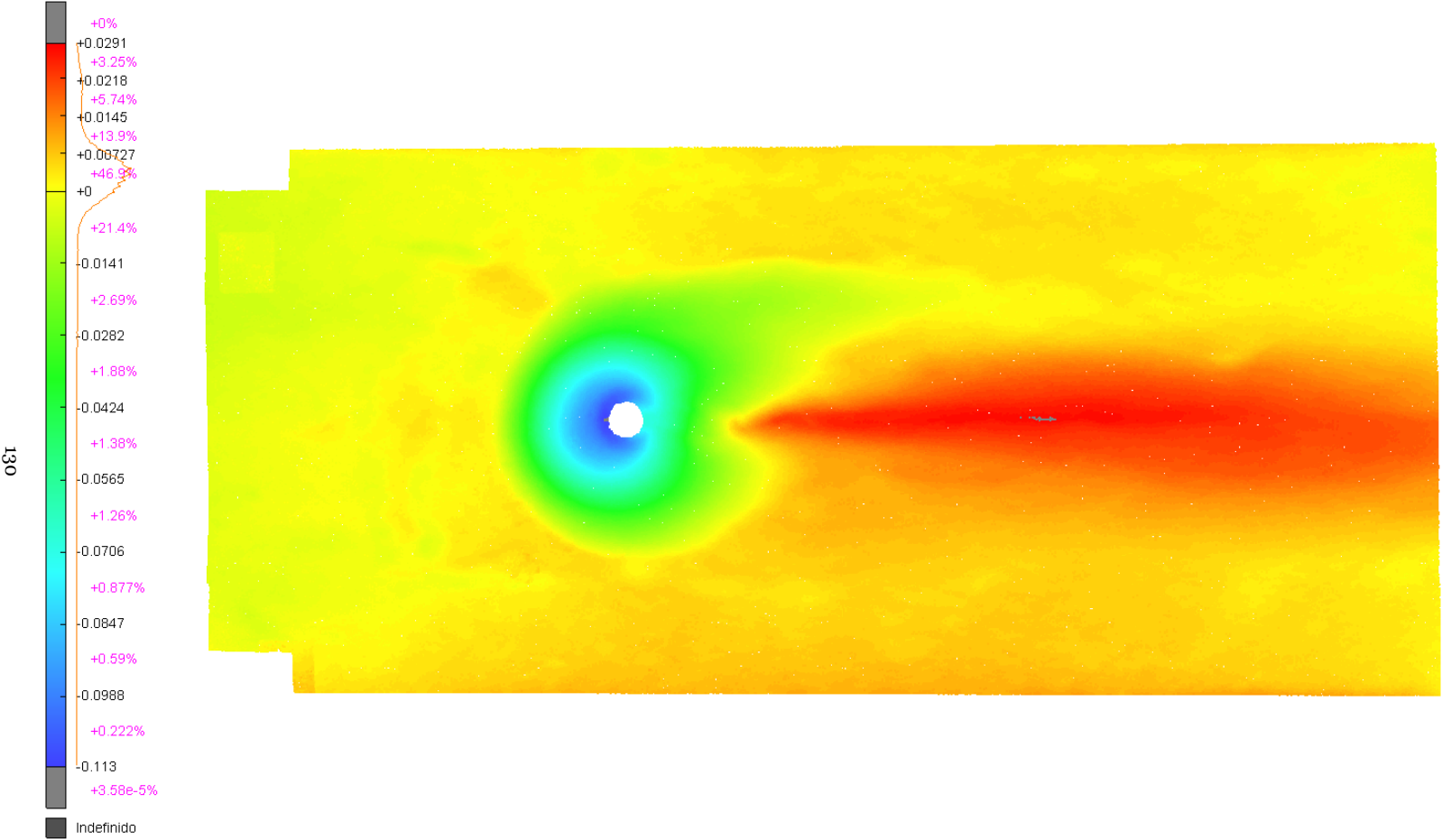
• Ensaio 1



• Ensaio 2

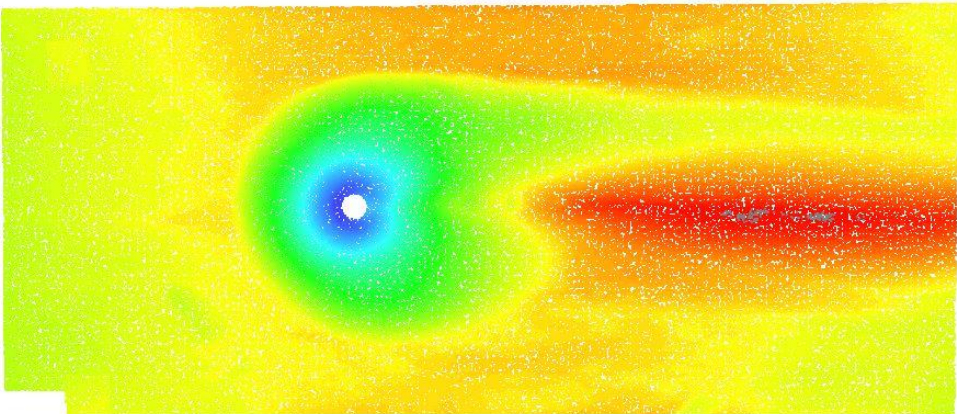
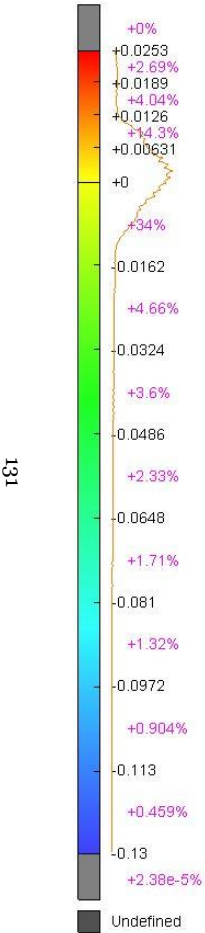


• Ensaio 6

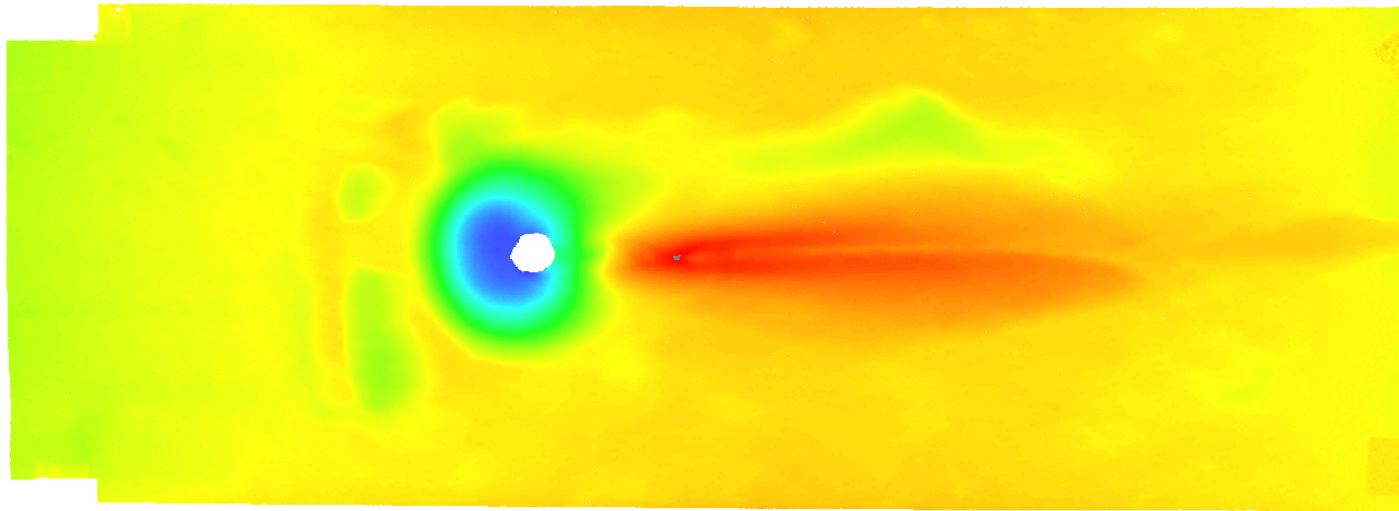
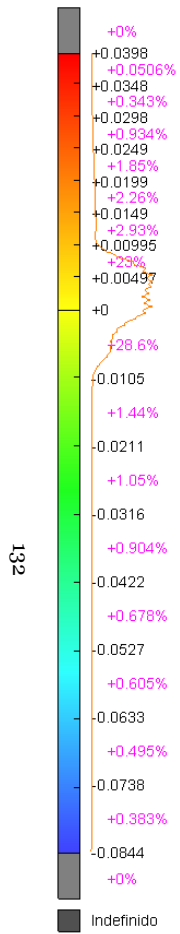


Y
Z X
H 0.08 H

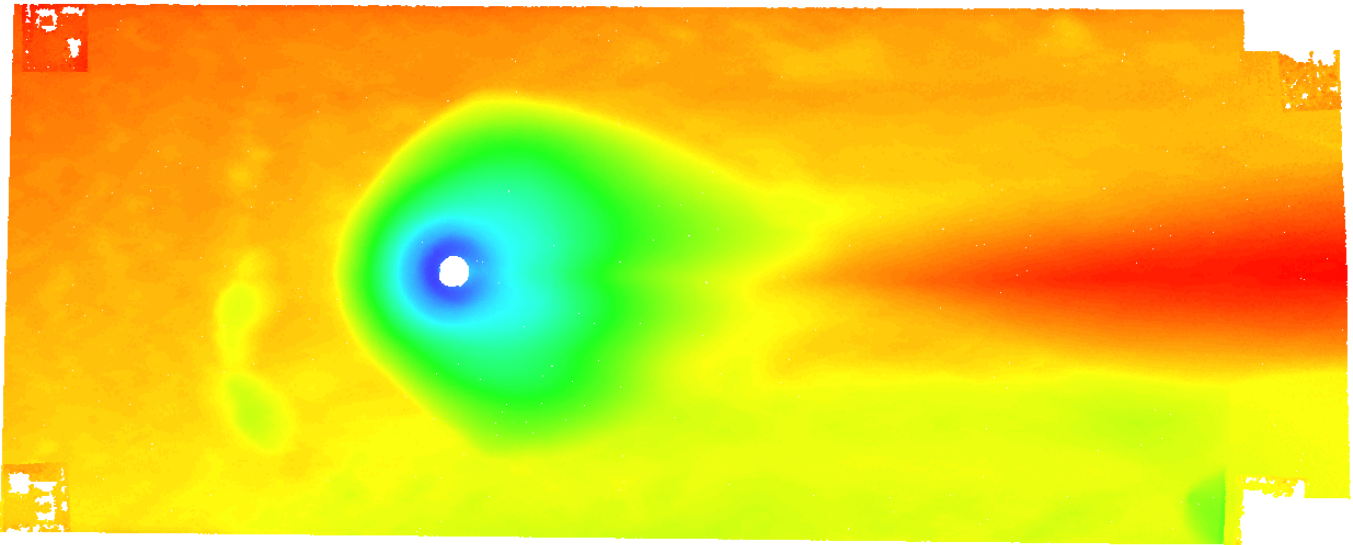
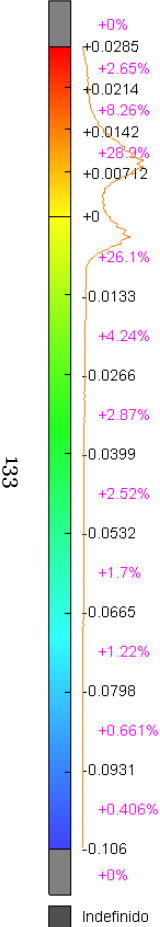
• Ensaio 7



• Ensaio 8



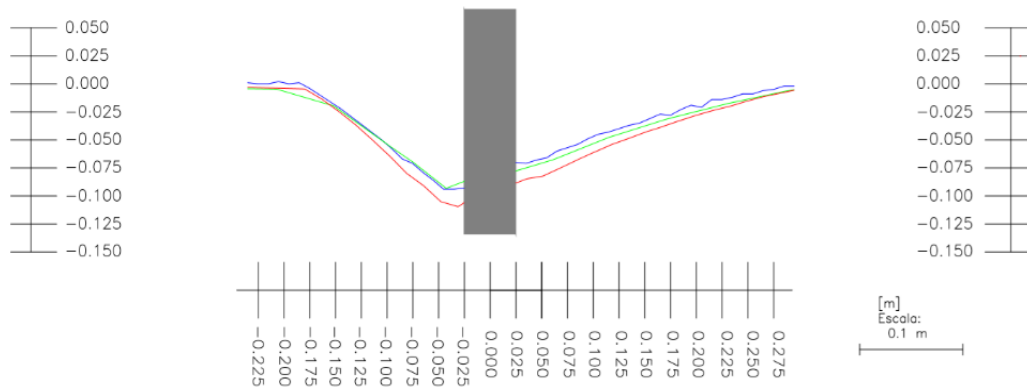
• **Ensaio 11**




Apêndice B.1-Comparação de perfis dos métodos de estudo

• Ensaio 1

Perfis longitudinais

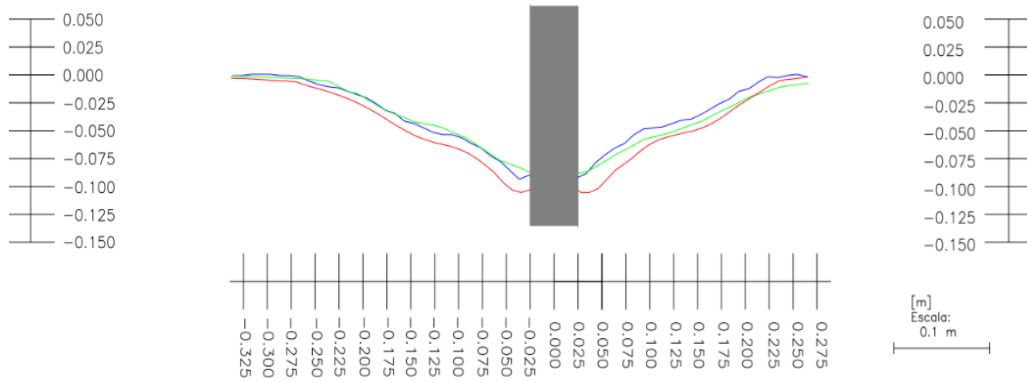


 Método fotogramétrico

 Medição pontual

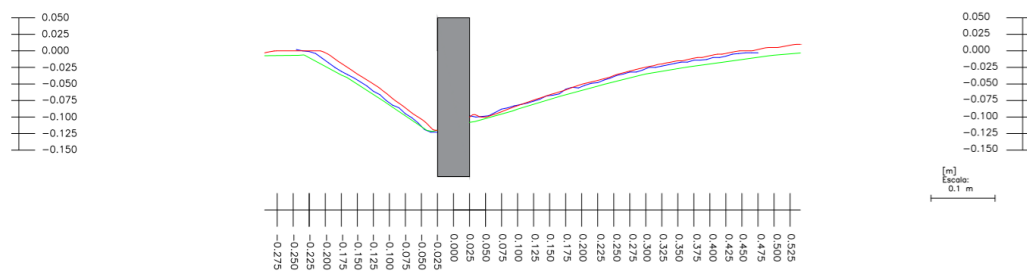
 Método de varrimento a laser

Perfis transversais





• Ensaio 2

Perfis longitudinais

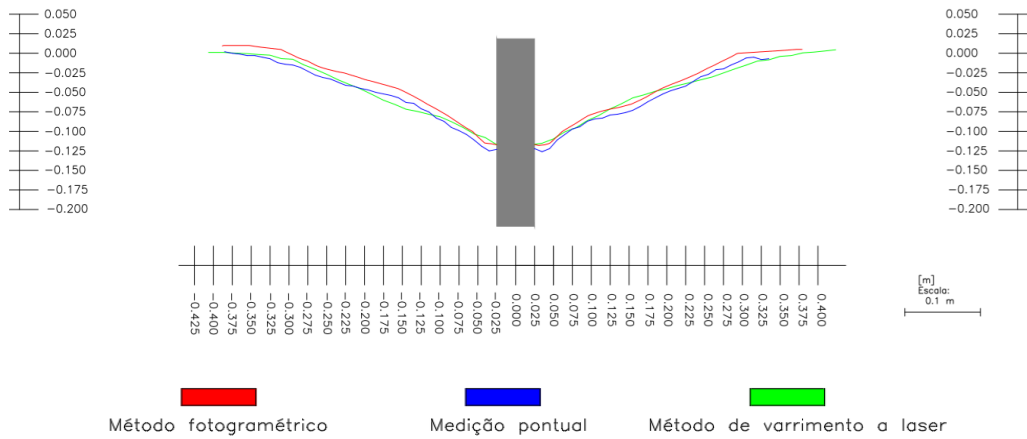


 Método fotogramétrico

 Medição pontual

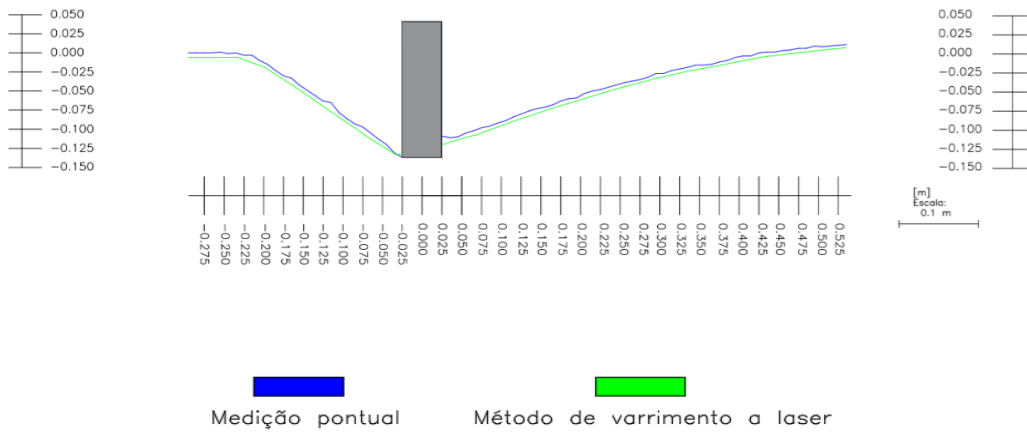
 Método de varrimento a laser

Perfis transversais

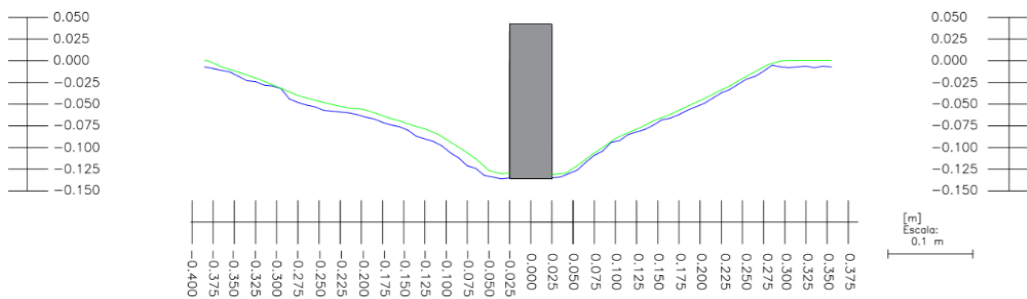


• Ensaio 3

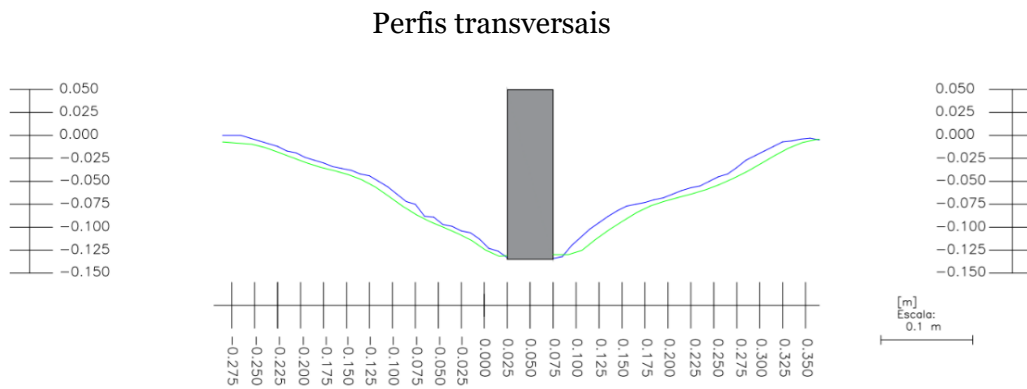
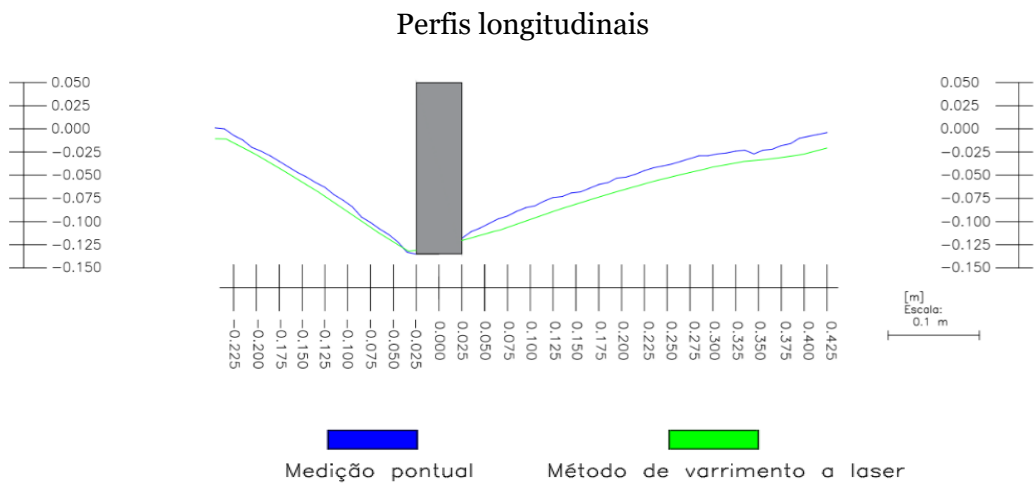
Perfis longitudinais



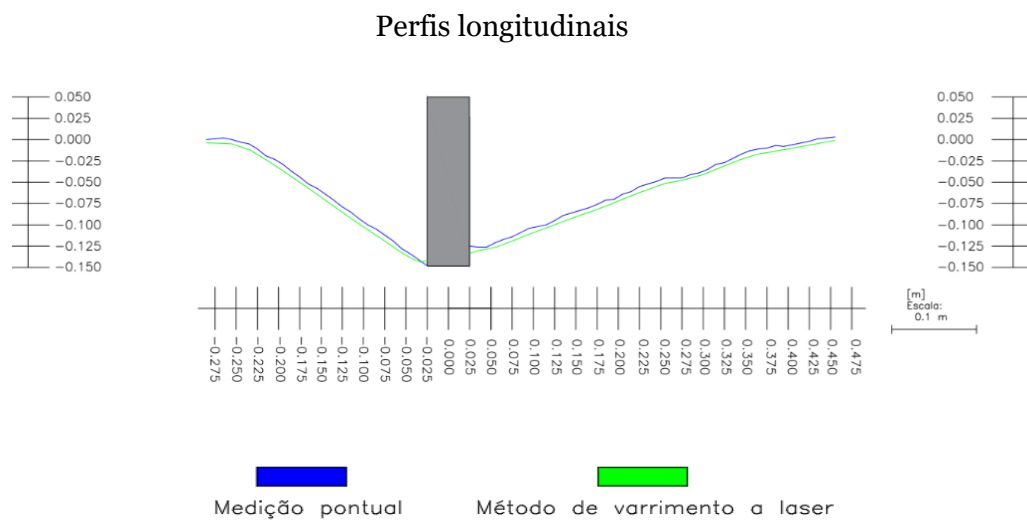
Perfis transversais



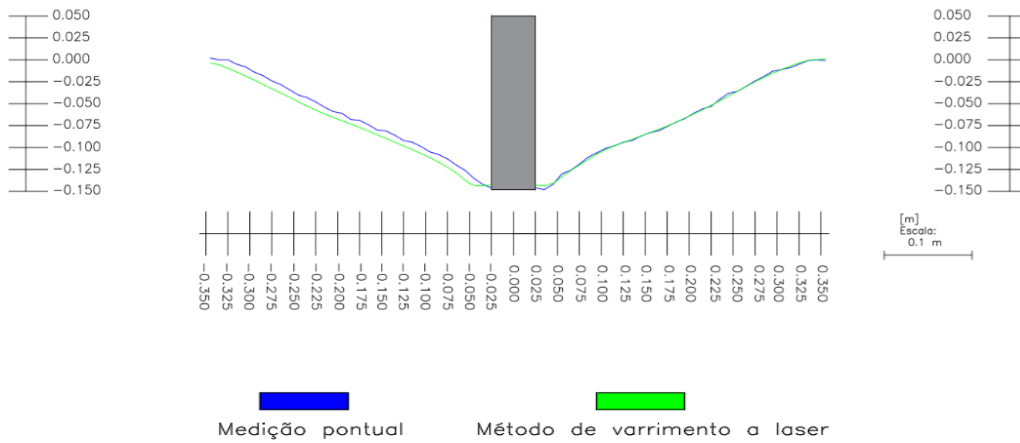
• Ensaio 4



• Ensaio 5

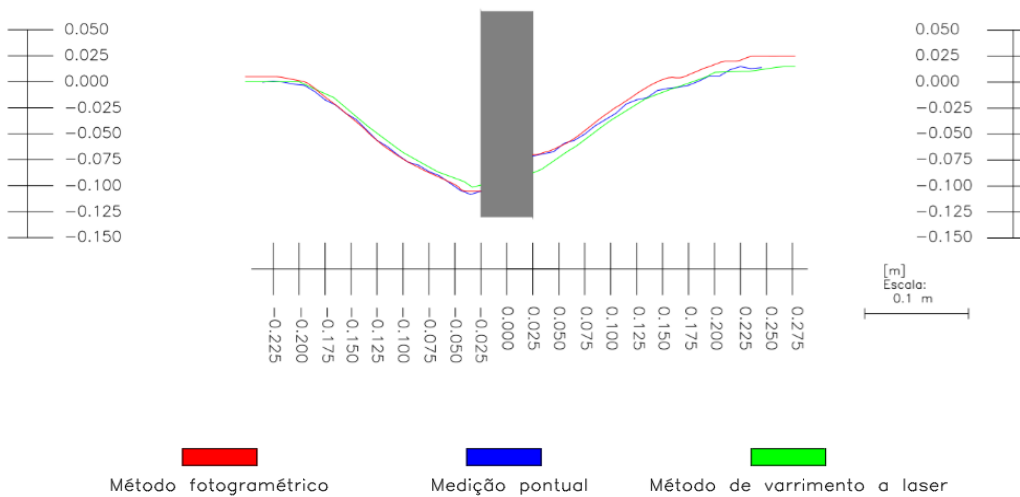


Perfis transversais

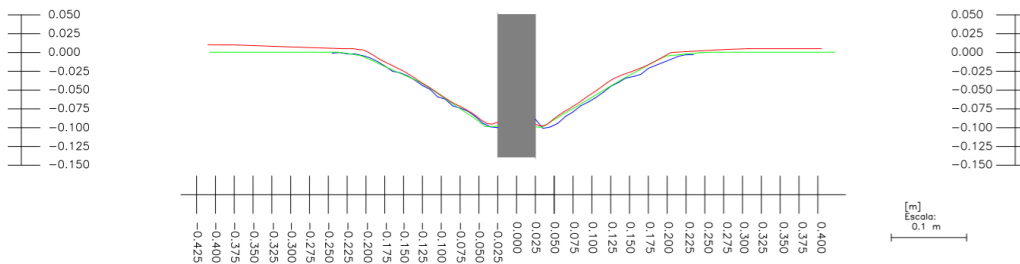


• Ensaio 6

Perfis longitudinais

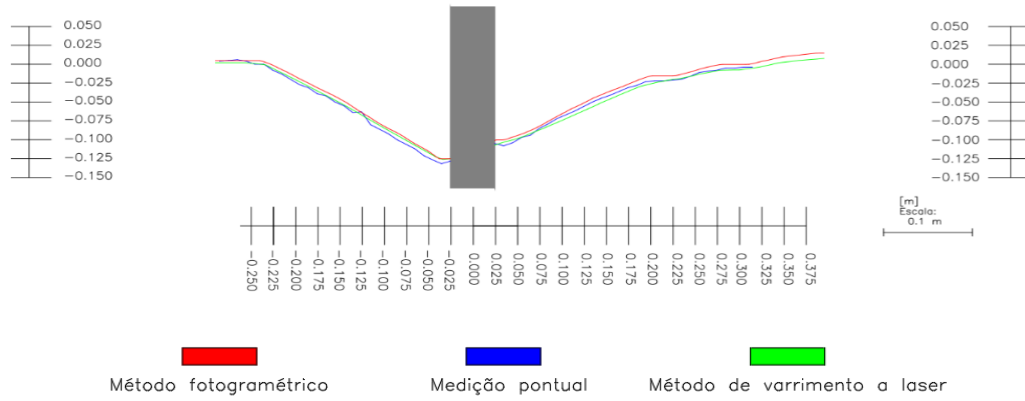


Perfis transversais

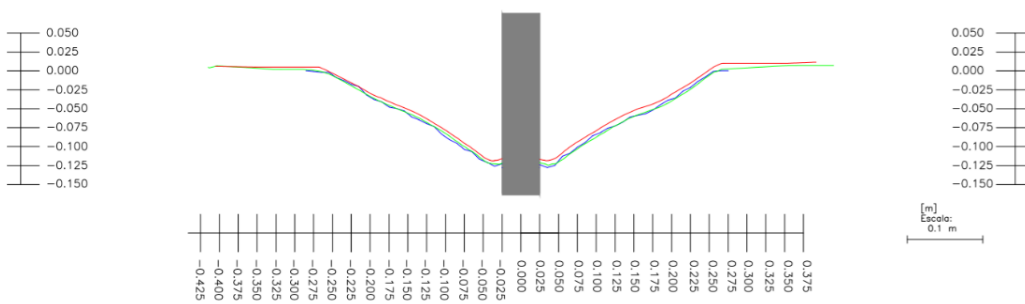


• Ensaio 7

Perfis longitudinais

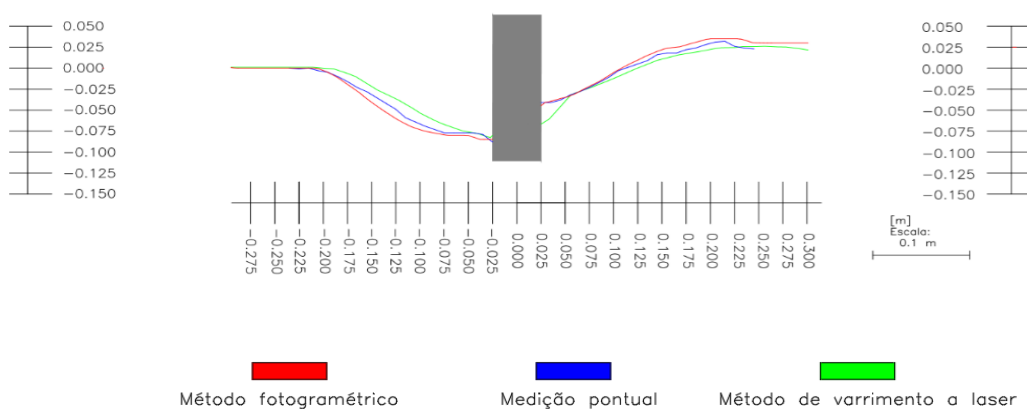


Perfis transversais

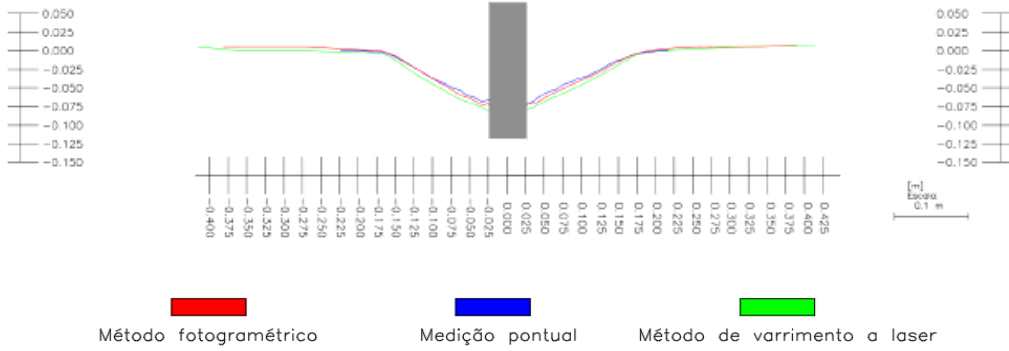


• Ensaio 8

Perfis longitudinais

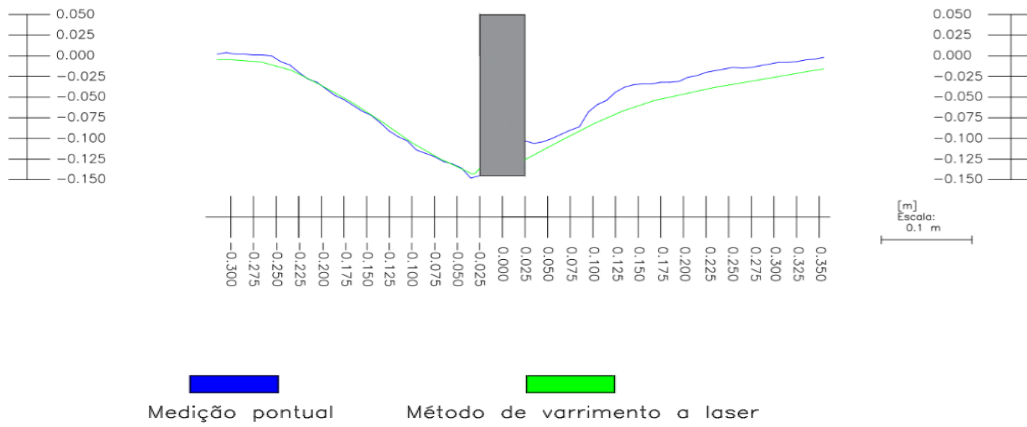


Perfis transversais

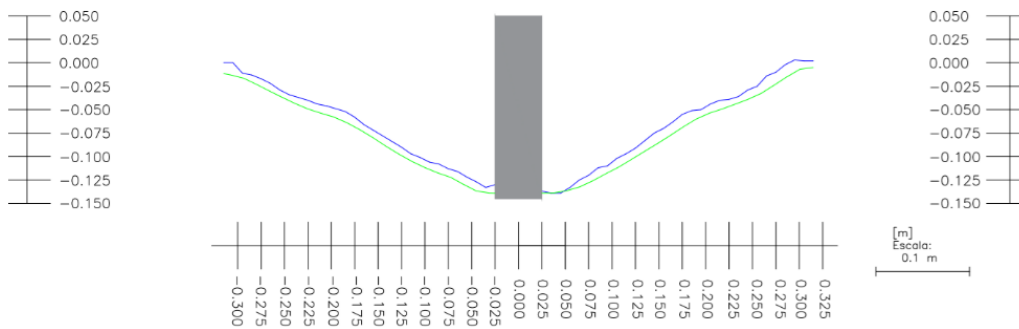


• Ensaio 9

Perfis longitudinais

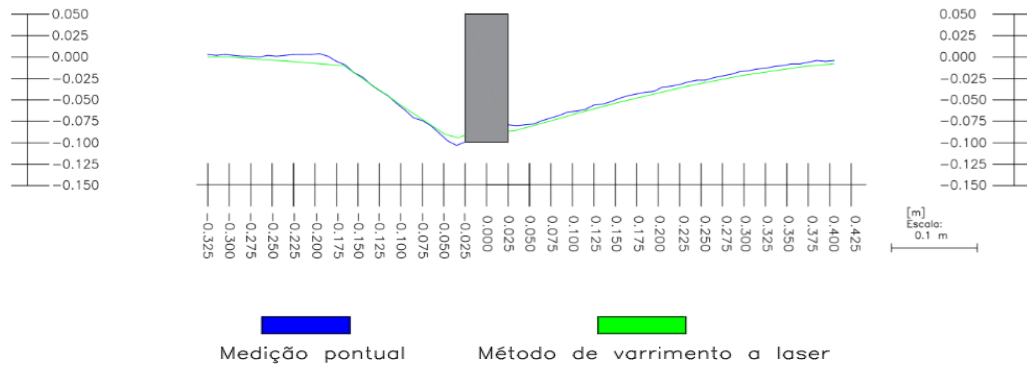


Perfis transversais

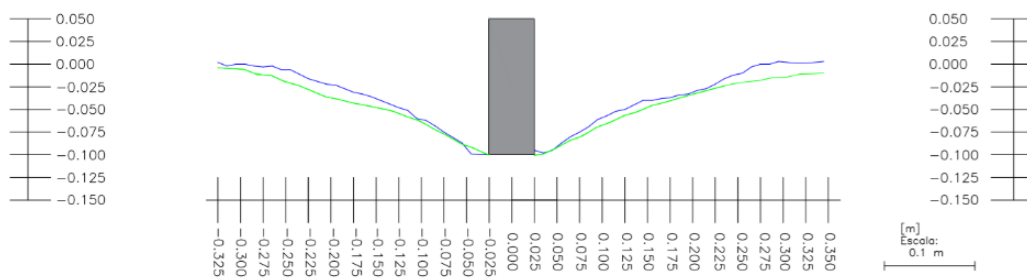


• Ensaio 10

Perfis longitudinais

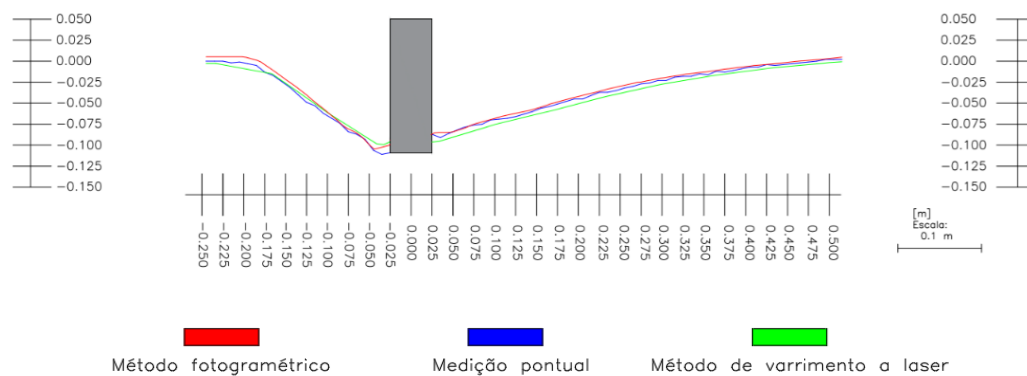


Perfis transversais

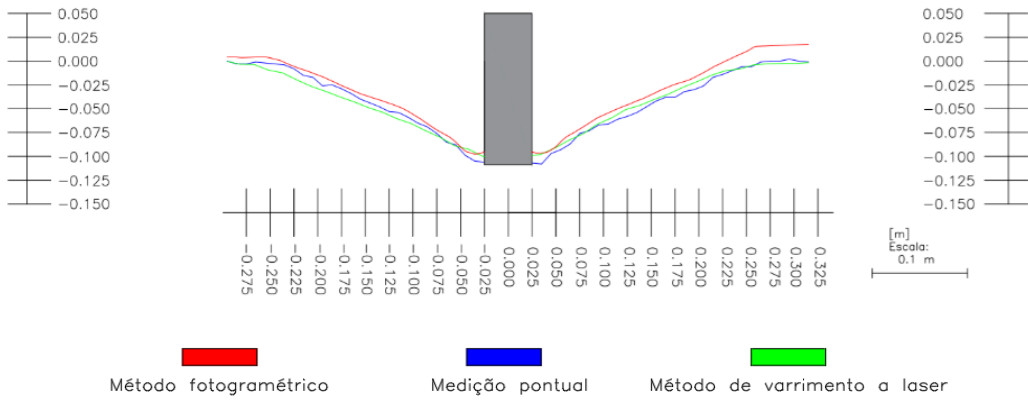


• Ensaio 11

Perfis longitudinais

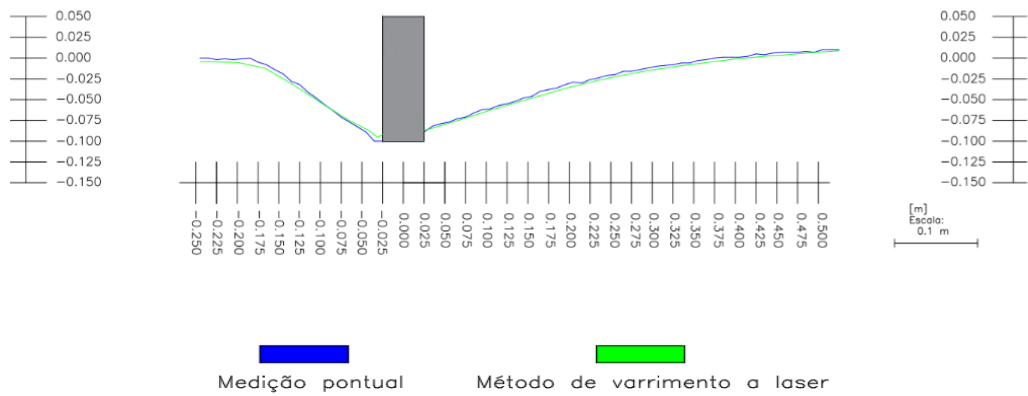


Perfis transversais

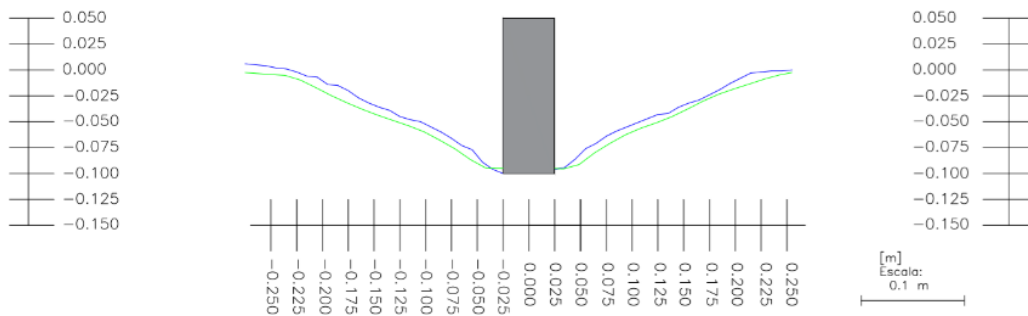


• Ensaio 12

Perfis longitudinais

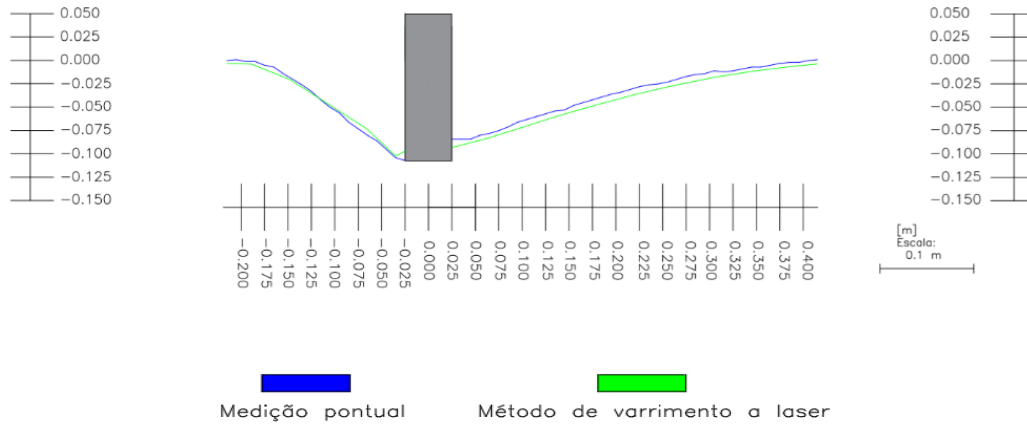


Perfis transversais

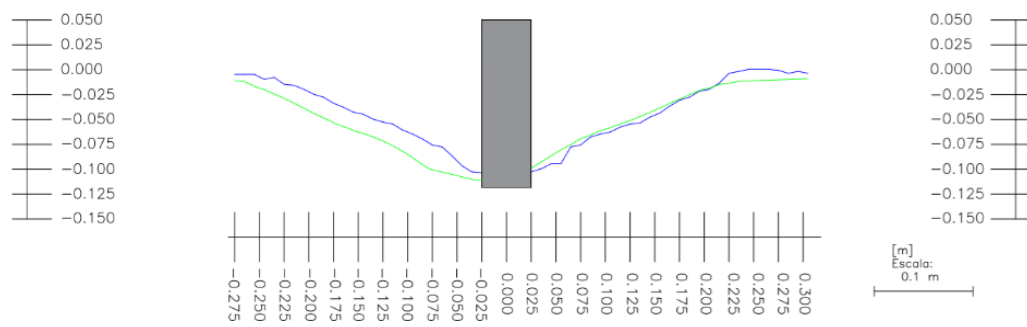


• Ensaio 13

Perfis longitudinais

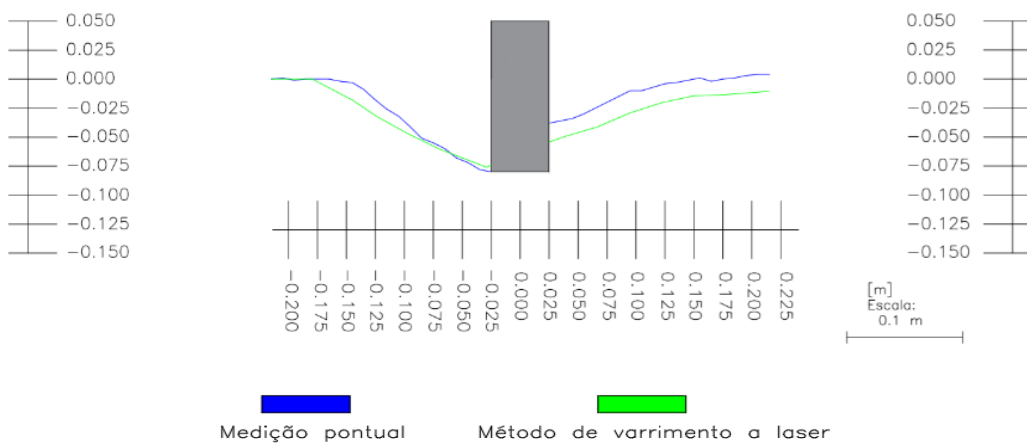


Perfis transversais

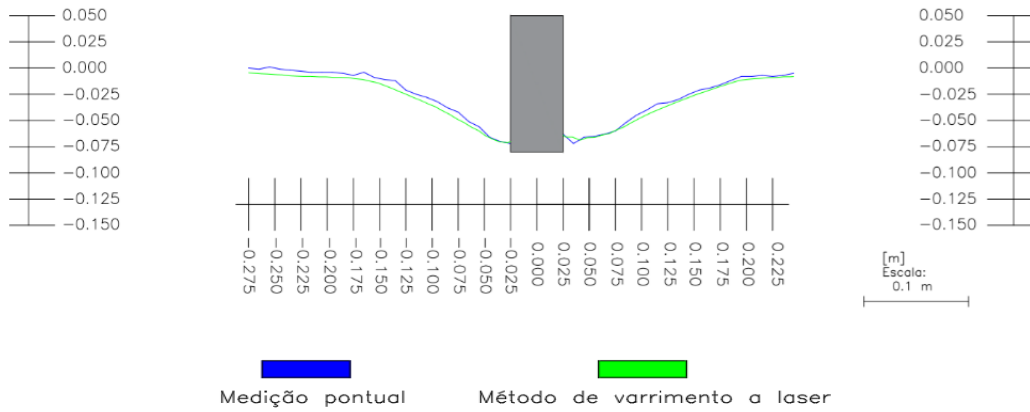


• Ensaio 14

Perfis longitudinais

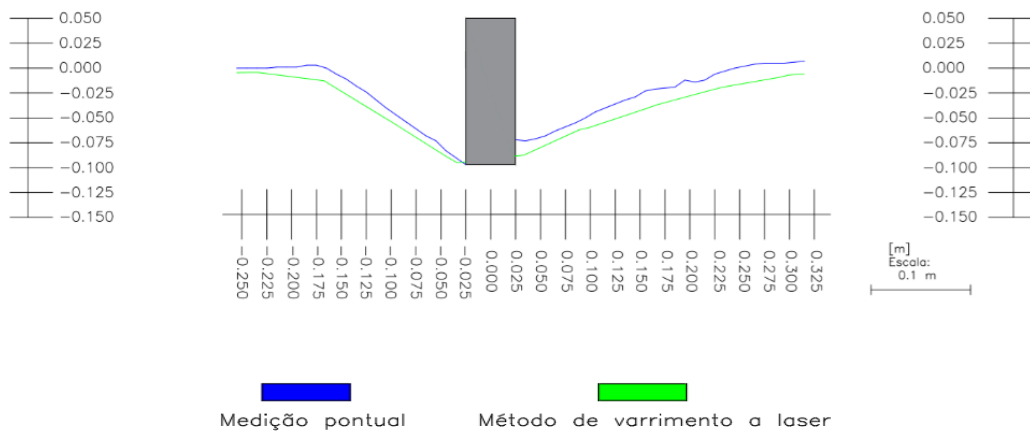


Perfis transversais

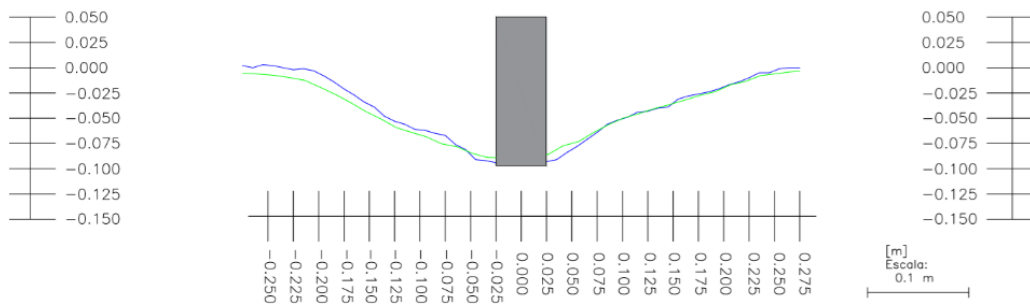


• Ensaio 15

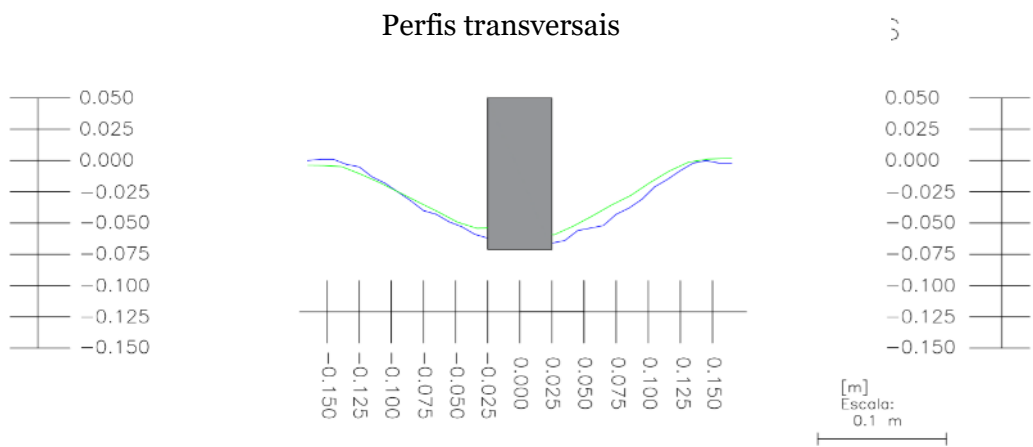
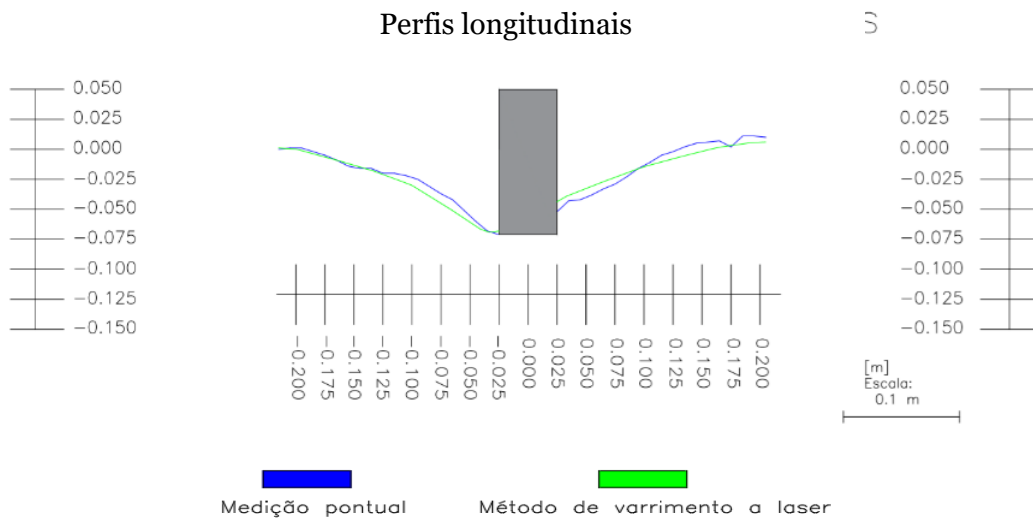
Perfis longitudinais



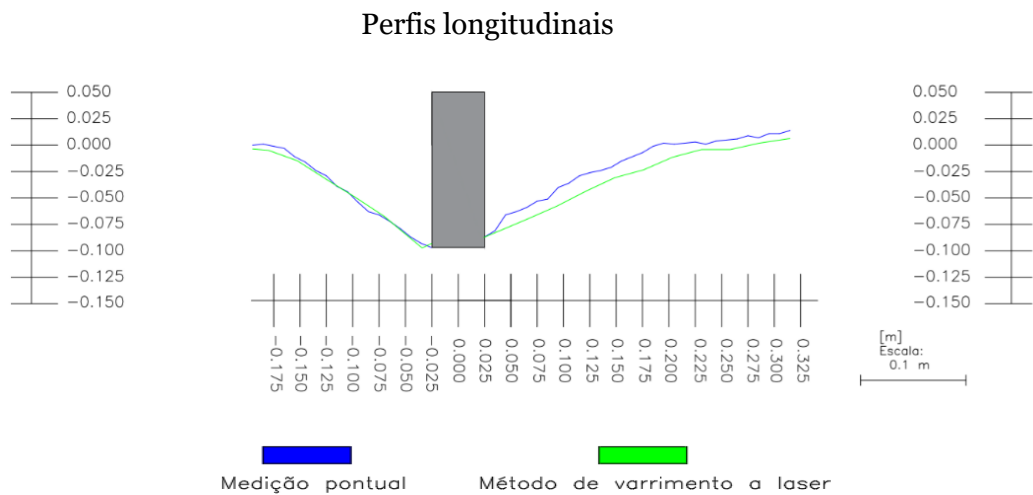
Perfis transversais



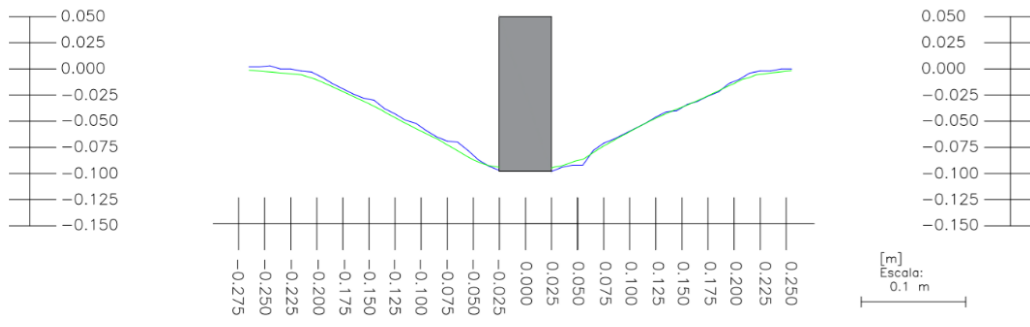
• **Ensaio 16**




• **Ensaio 17**



Perfis transversais



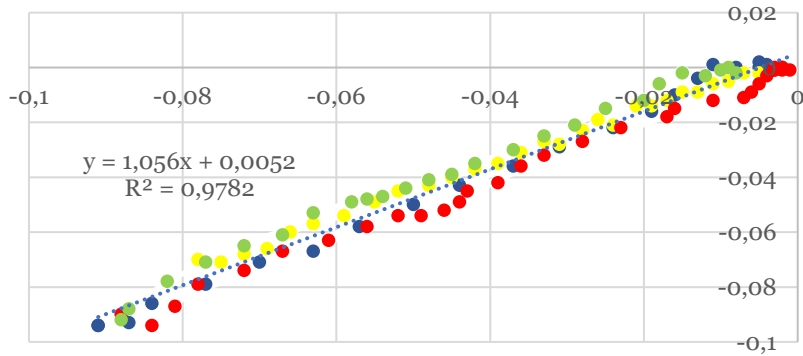
 Medição pontual

 Método de varrimento a laser

Anexo B.1.1-Gráficos de dispersão de cotas entre métodos

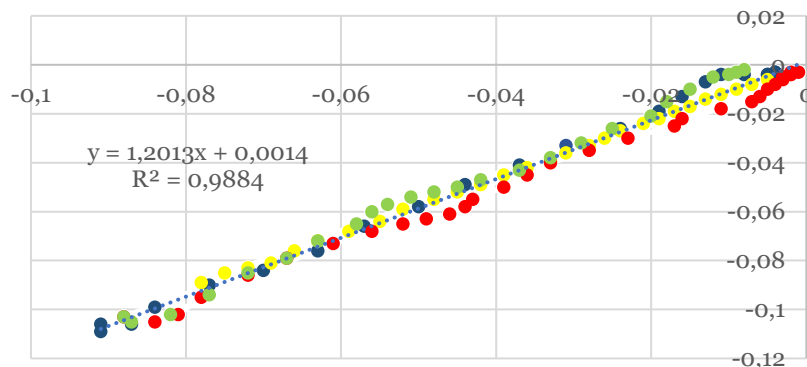
● Ensaio 1

Método varrimento a laser- Medição pontual



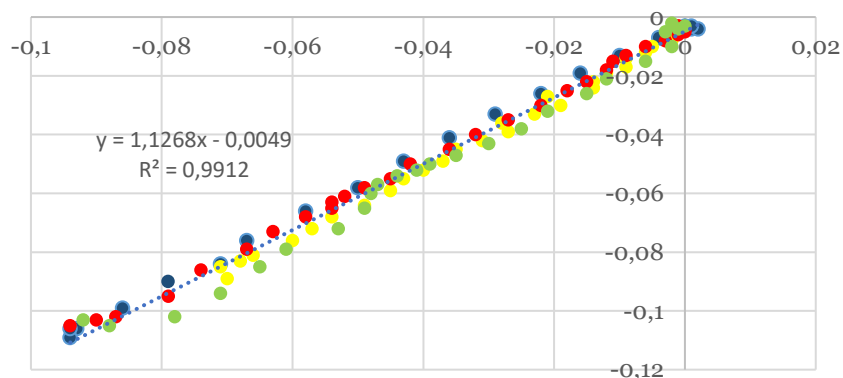
(valores em metros)

Método varrimento a laser- Fotogrametria



(valores em metros)

Método medição pontual- Fotogrametria

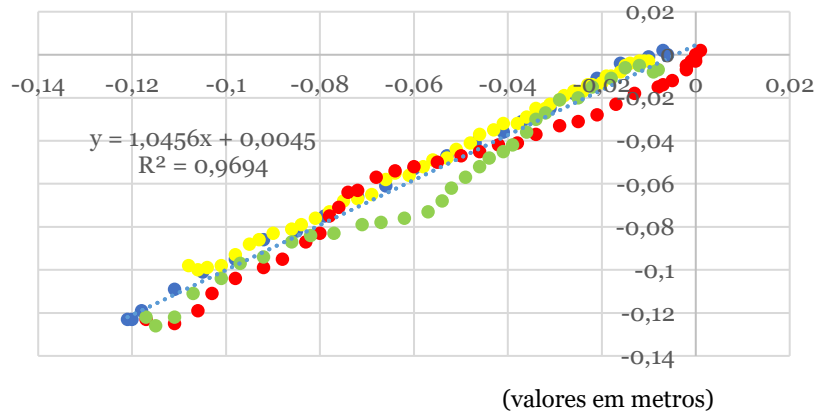


(valores em metros)

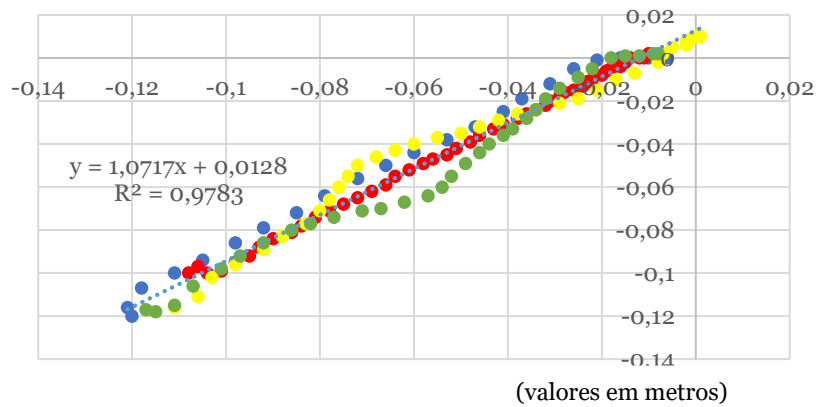
- Montante
- Jusante
- Margem direita
- Margem esquerda

● Ensaio 2

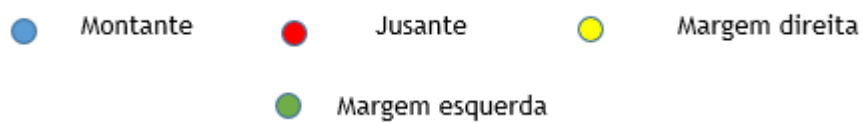
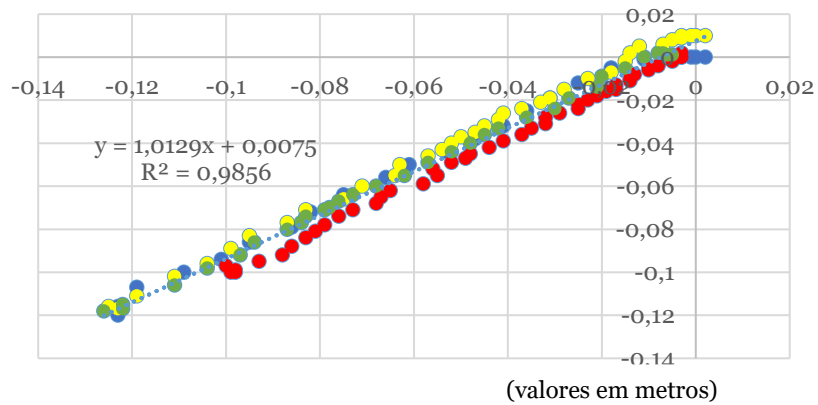
Método de varrimento a laser- Medição pontual



Método de varrimento a laser- Fotogrametria

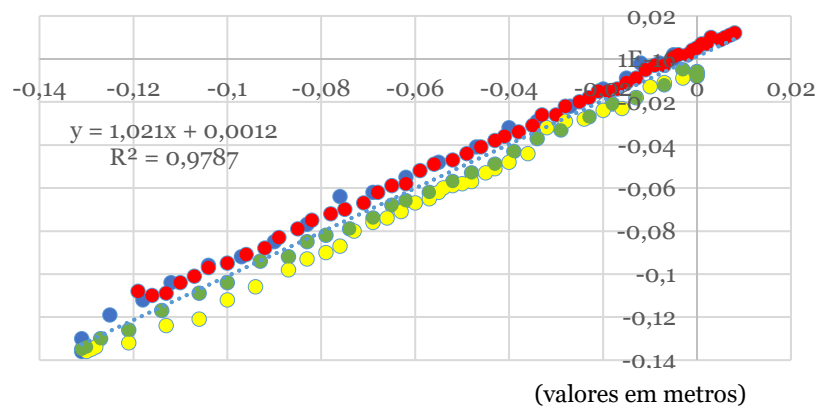


Método de medição pontual- Fotogrametria

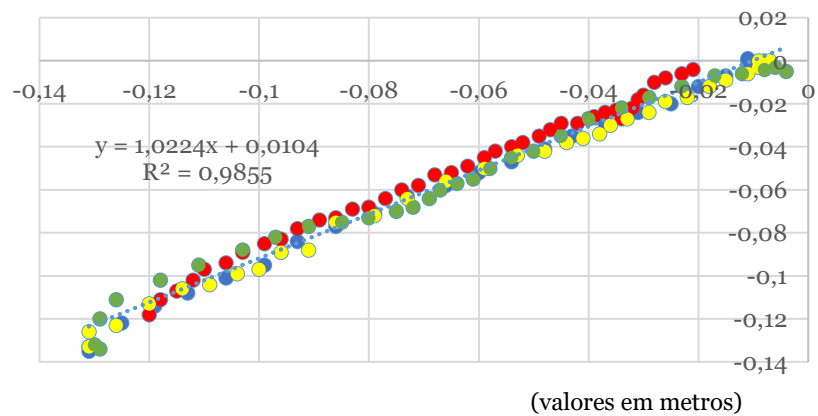


● **Ensaio 3 (a), 4 (b), 5 (c): Método de varrimento a laser- Medição pontual**

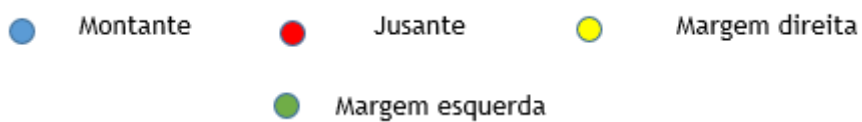
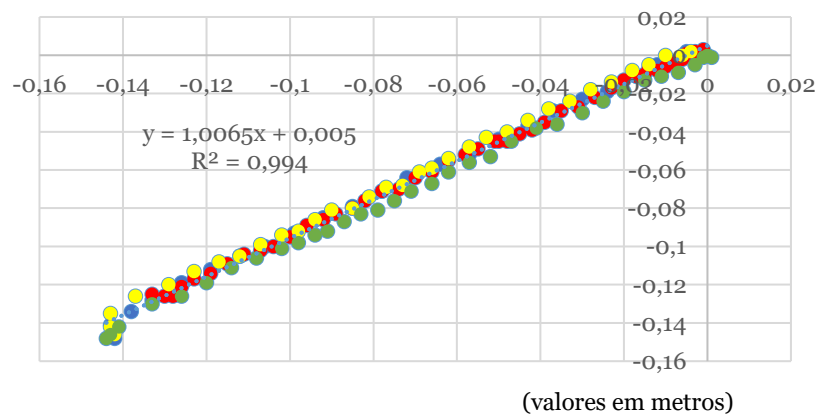
a)



b)

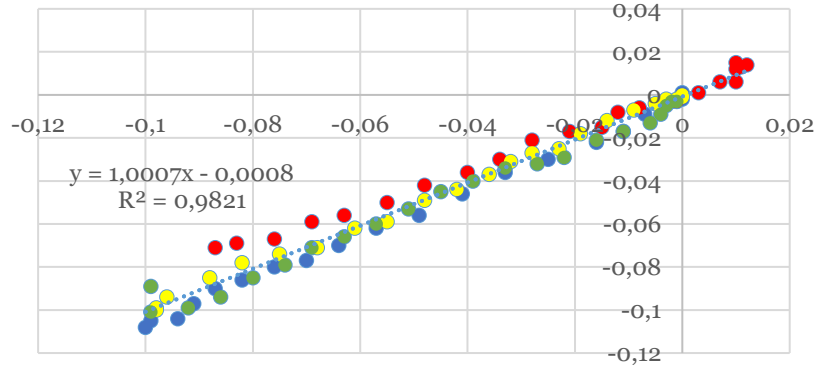


c)



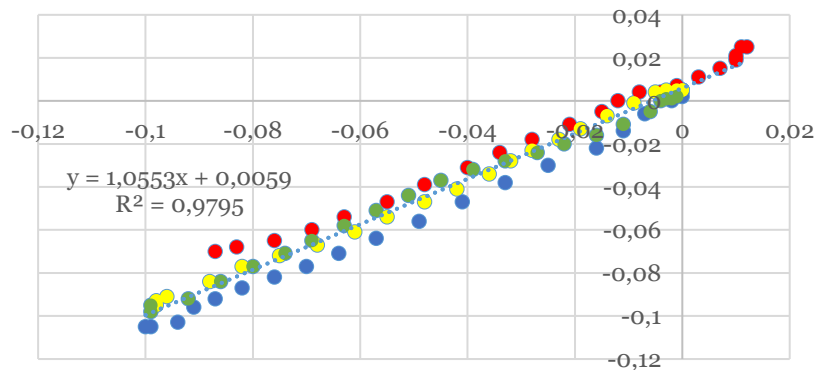
● Ensaio 6

Método de varrimento a laser- Medição pontual



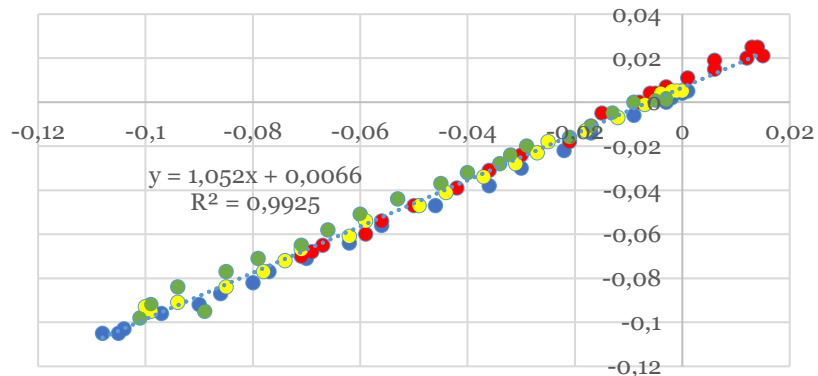
(valores em metros)

Método de varrimento a laser- Fotogrametria

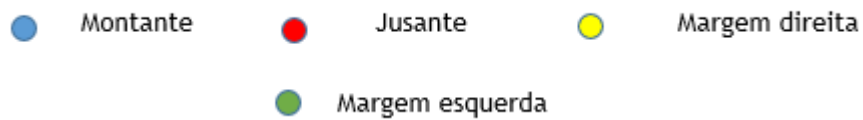


(valores em metros)

Método de medição pontual- Fotogrametria

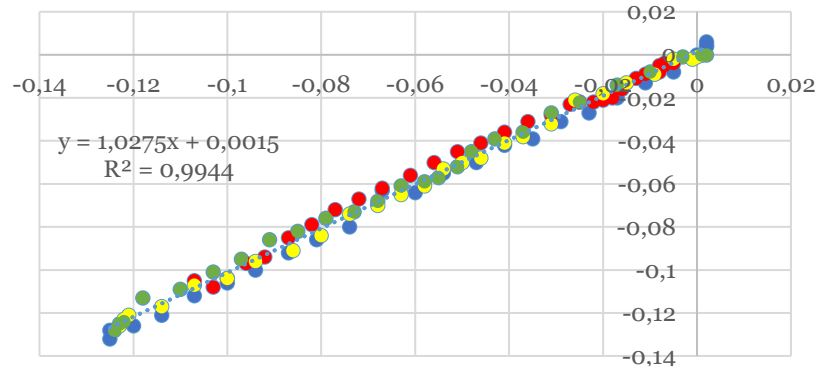


(valores em metros)



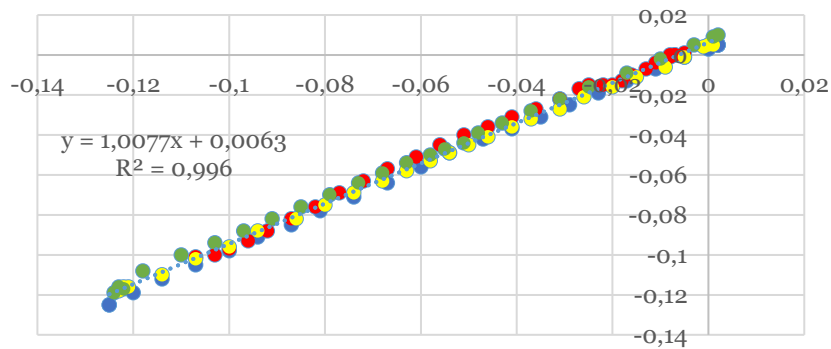
● Ensaio 7

Método de varrimento a laser- Medição pontual



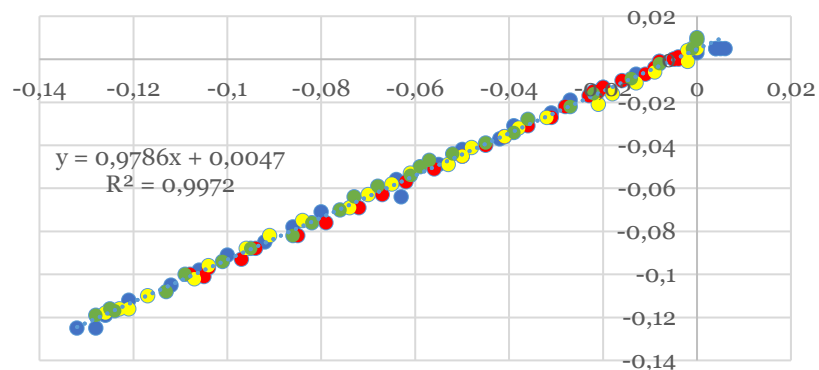
(valores em metros)

Método de varrimento a laser- Fotogrametria



(valores em metros)

Método de medição pontual- Fotogrametria

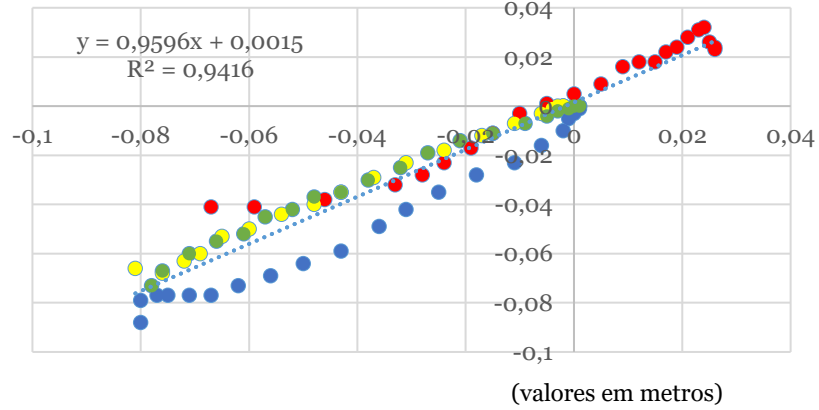


(valores em metros)

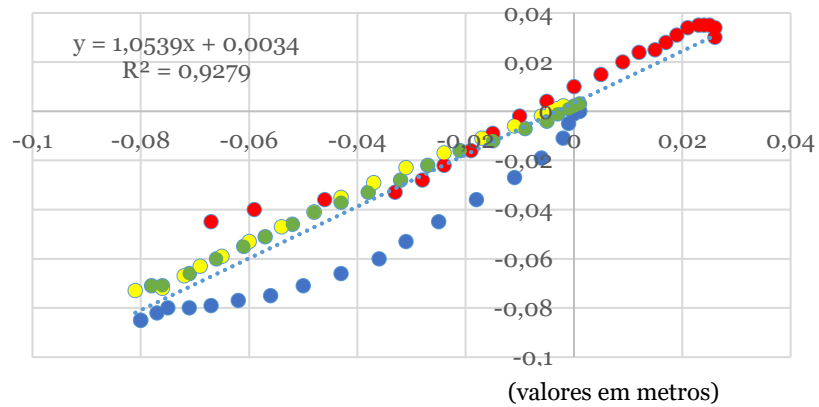
- Montante
- Jusante
- Margem direita
- Margem esquerda

● Ensaio 8

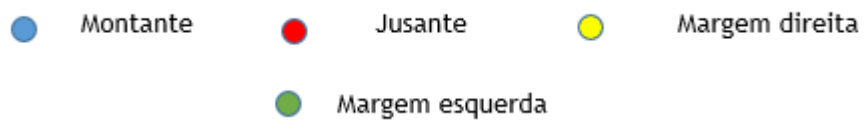
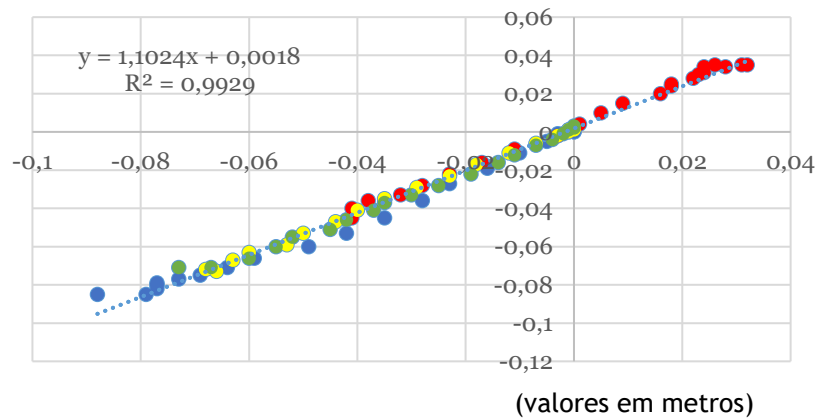
Método de varrimento a laser- Medição pontual



Método de varrimento a laser- Fotogrametria

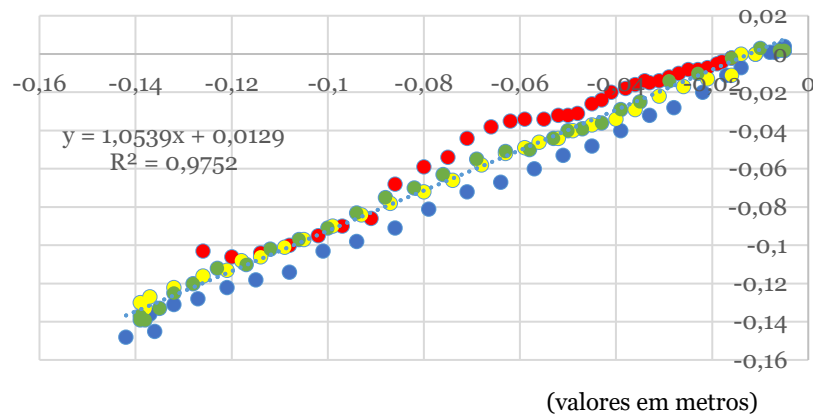


Método de medição pontual- Fotogrametria

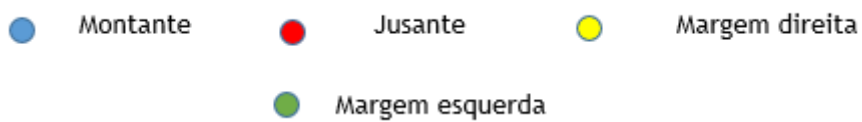
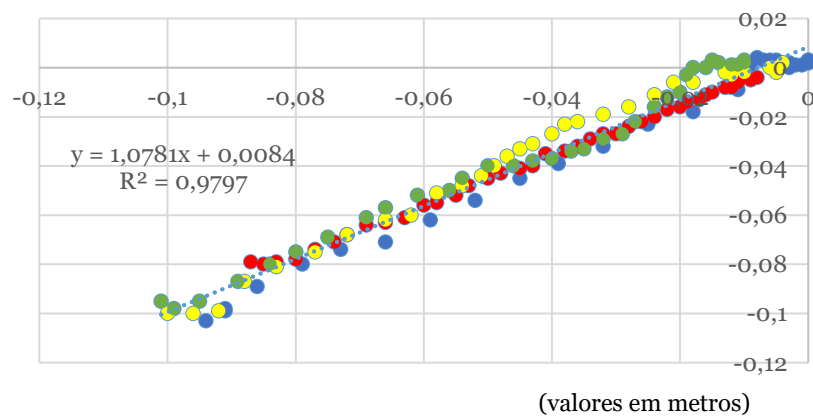


● **Ensaio 9 (a), 10 (b): Método de varrimento a laser- Medição pontual**

a)

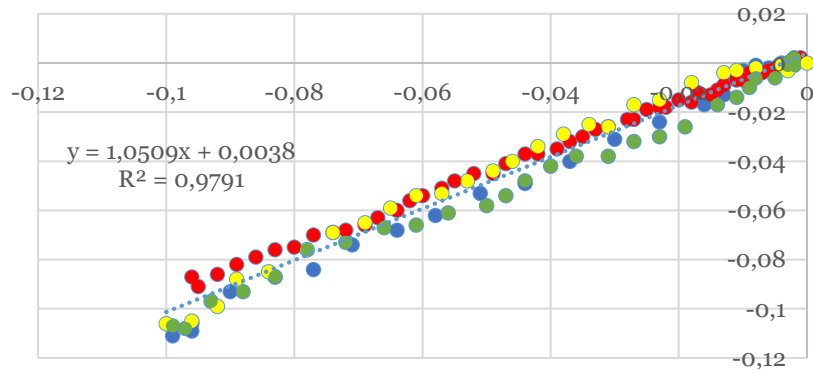


b)



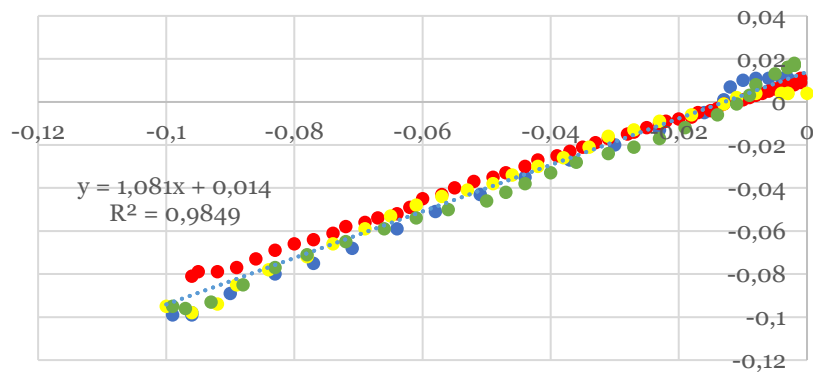
● Ensaio 11

Método de varrimento a laser- Medição pontual



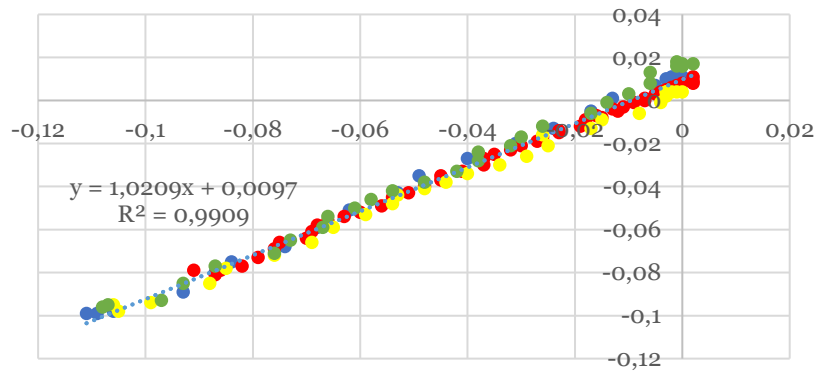
(valores em metros)

Método de varrimento a laser- Fotogrametria

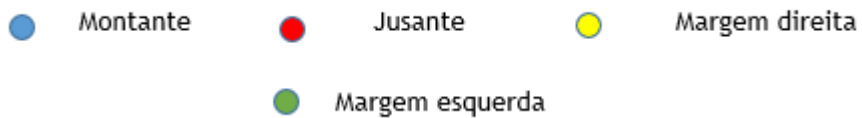


(valores em metros)

Método de medição pontual- Fotogrametria

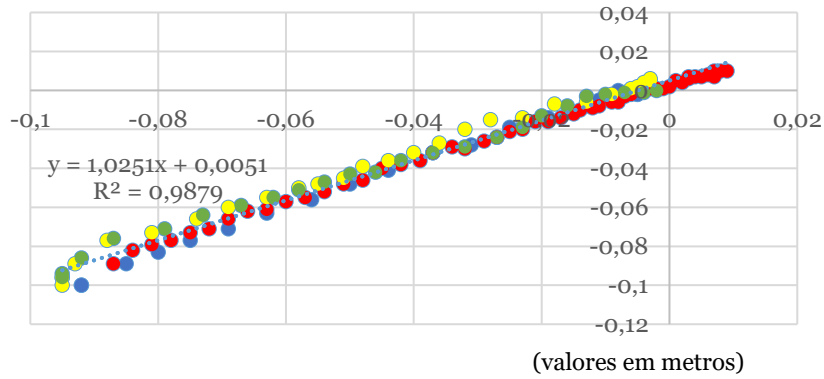


(valores em metros)

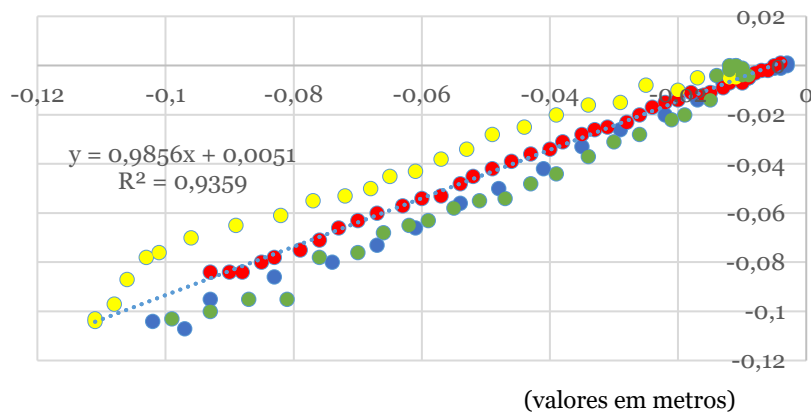


● **Ensaio 12 (a), 13 (b), 14 (c): Método de varrimento a laser- Medição pontual**

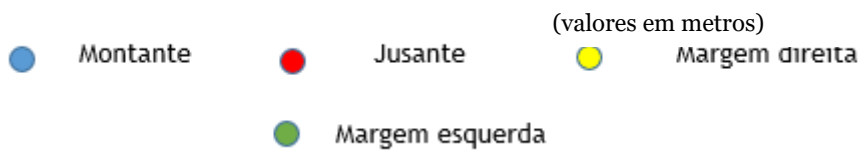
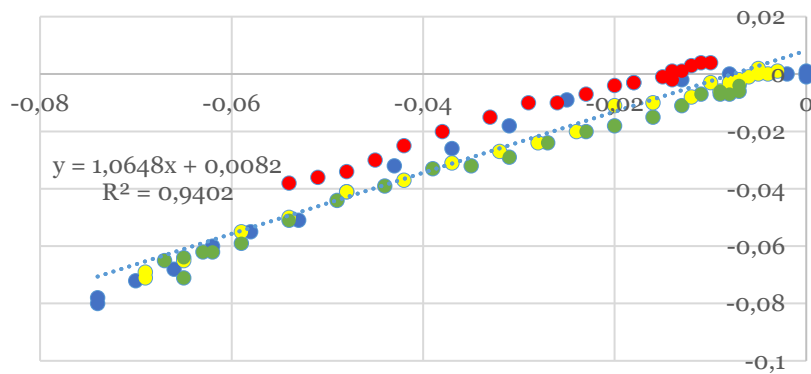
a)



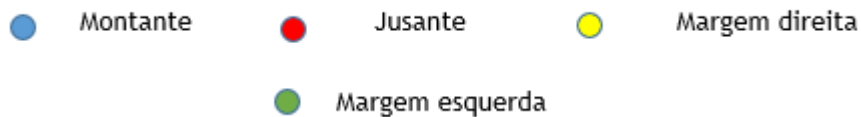
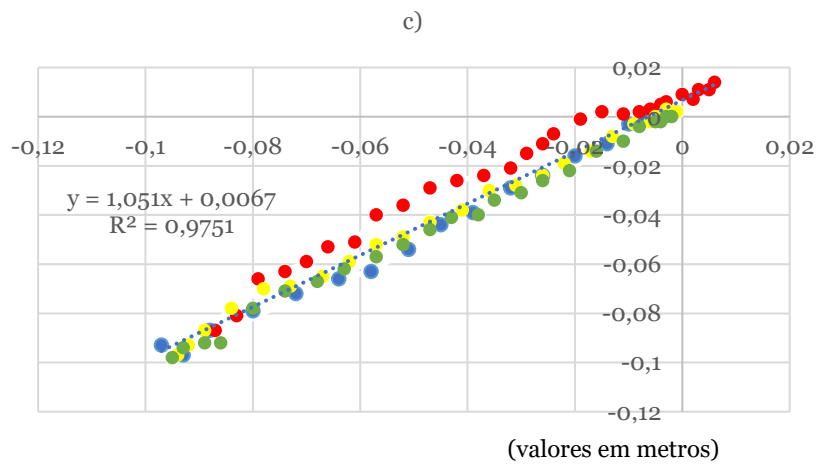
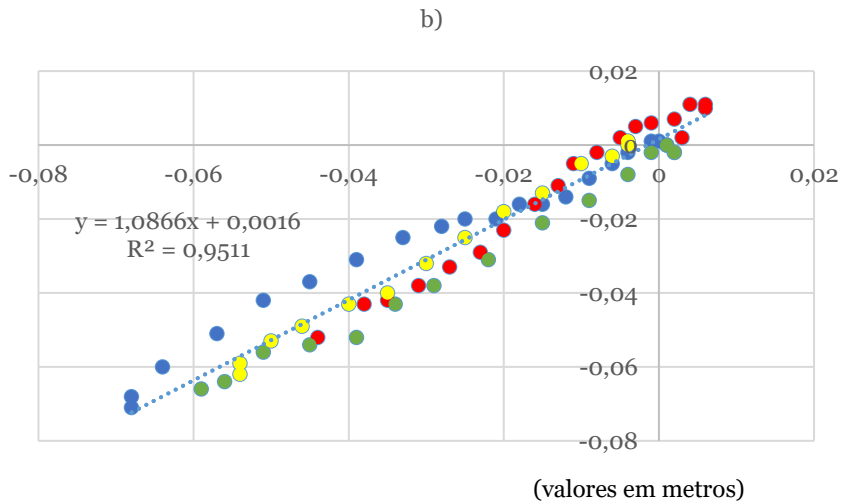
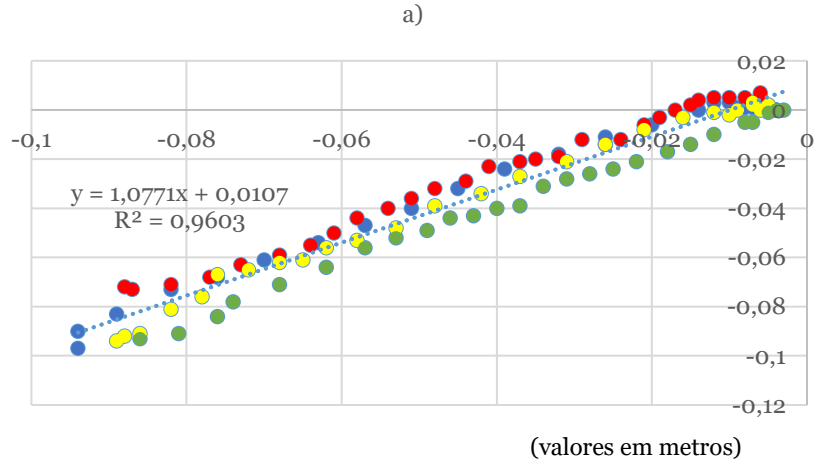
b)



c)



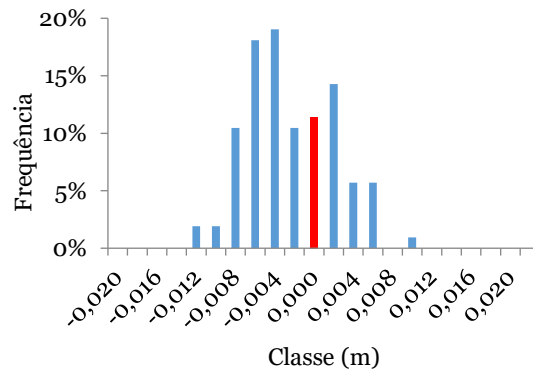
● **Ensaio 15 (a), 16 (b), 17 (c): Método de varrimento a laser- Medição pontual**



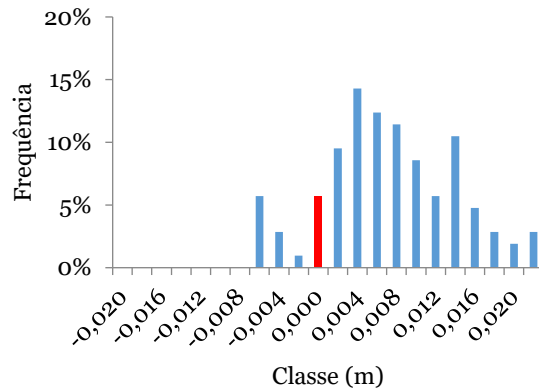
Anexo B.1.2-Histogramas de diferenças entre métodos

● Ensaio 1

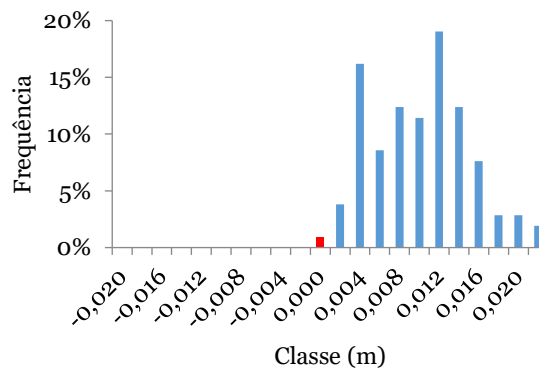
Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual



Dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria

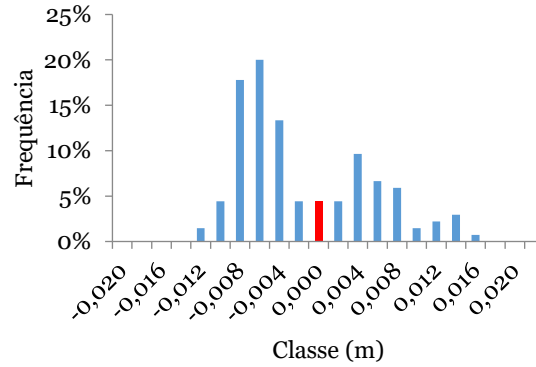


Dif. entre método de medição pontual e fotogrametria

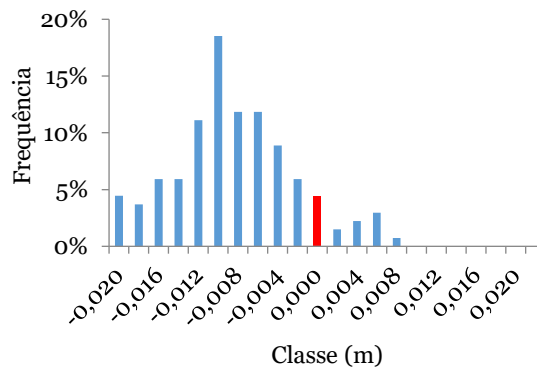


● Ensaio 2

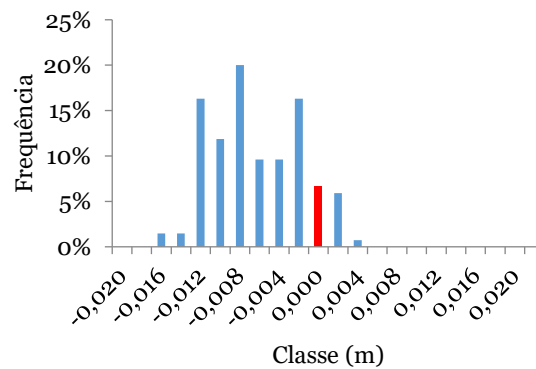
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



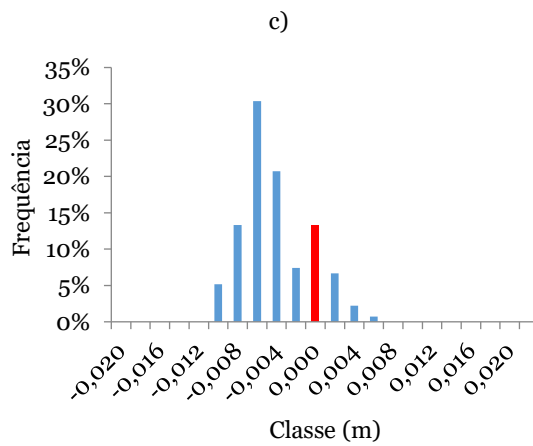
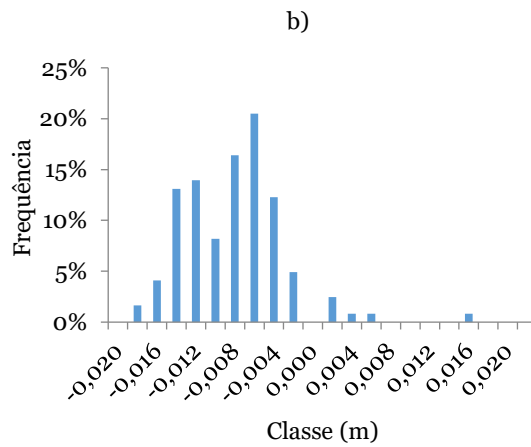
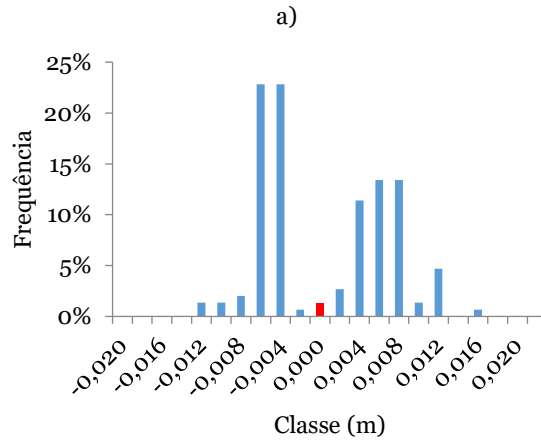
Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria



Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

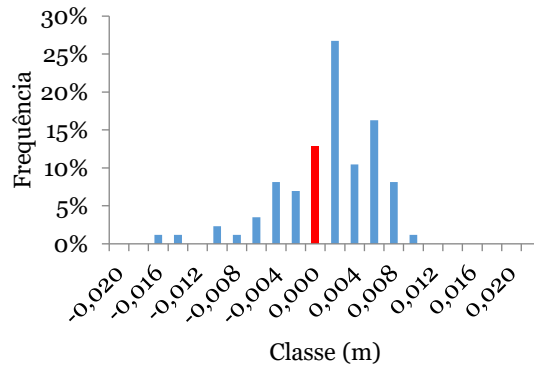


● **Ensaio 3 (a), 4 (b), 5 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

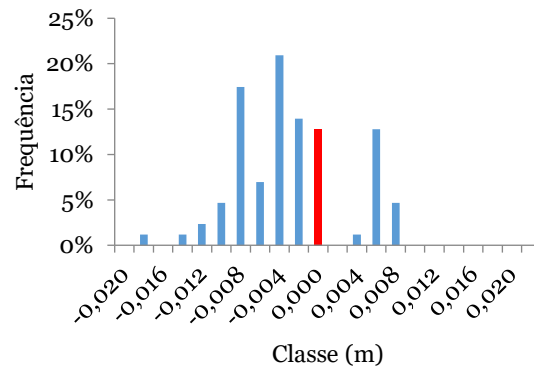


● Ensaio 6

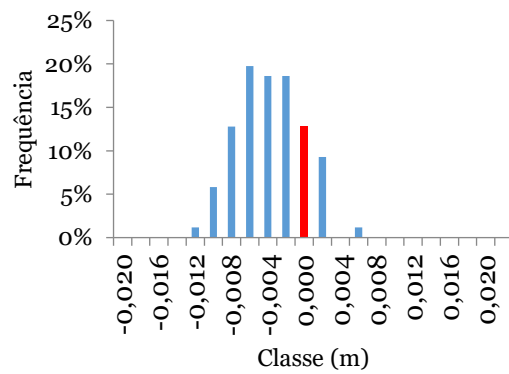
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria

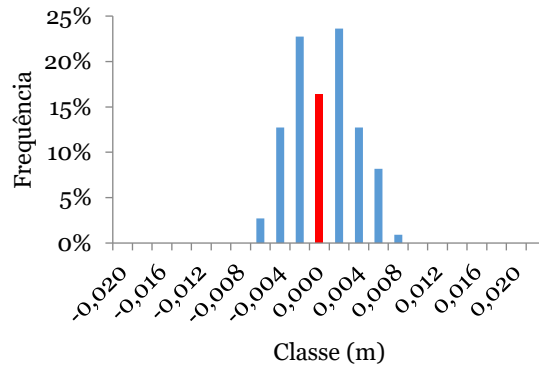


Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

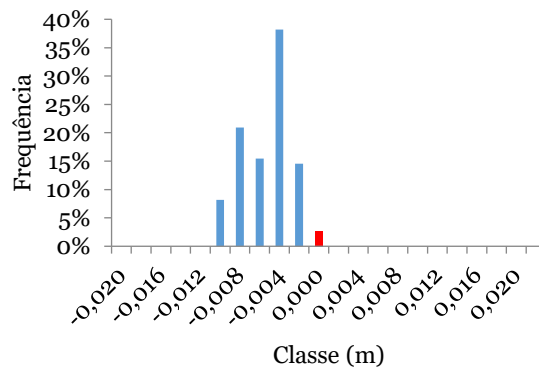


● Ensaio 7

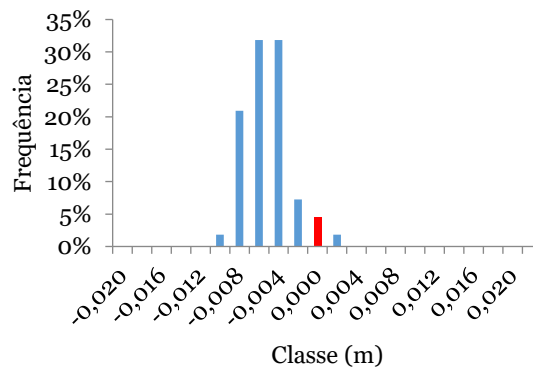
Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual



Dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria

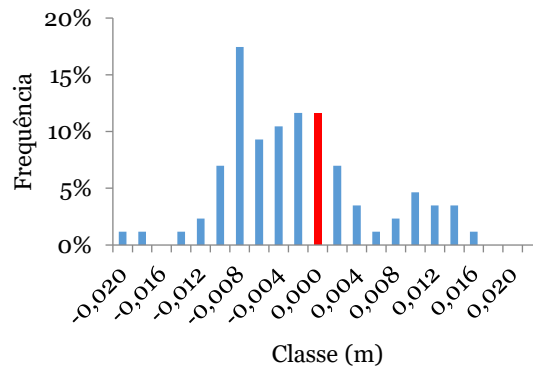


Dif. entre método de medição pontual e fotogrametria

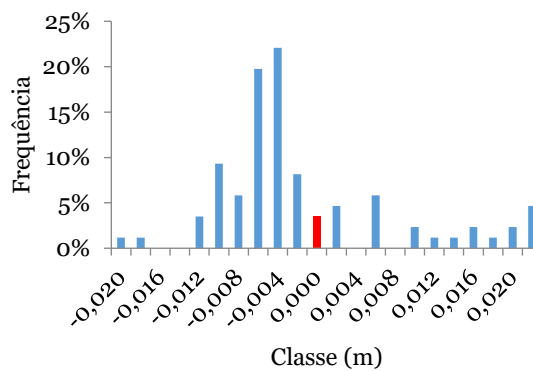


● Ensaio 8

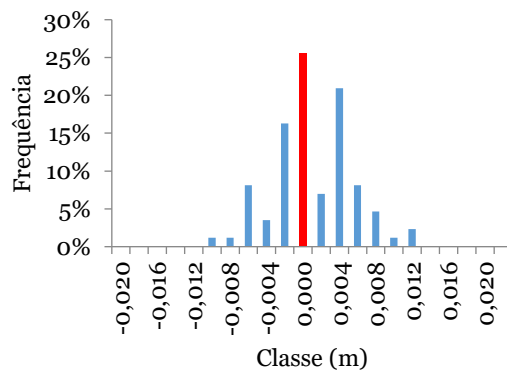
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



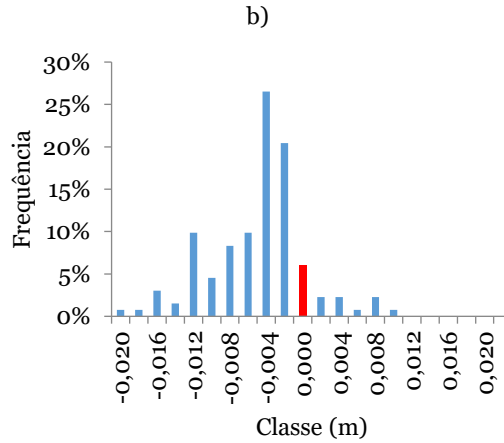
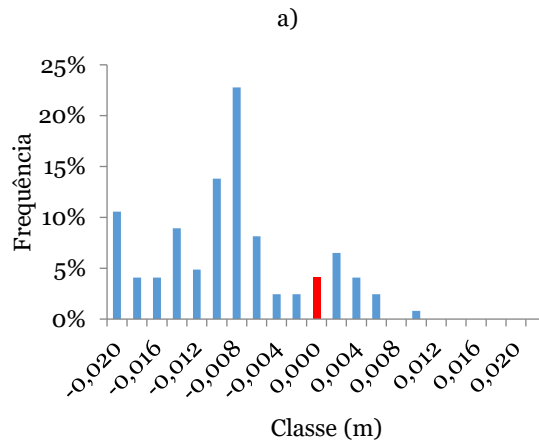
Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria



Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

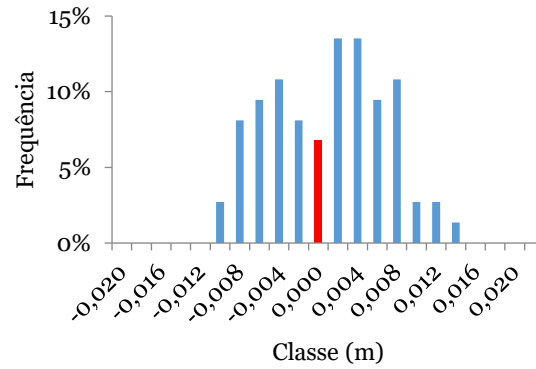


- **Ensaio 9 (a), 10 (b): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

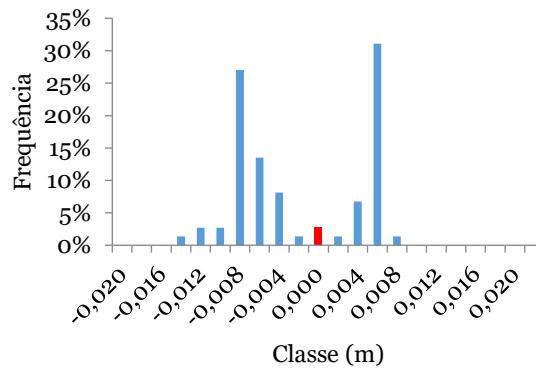


● Ensaio 11

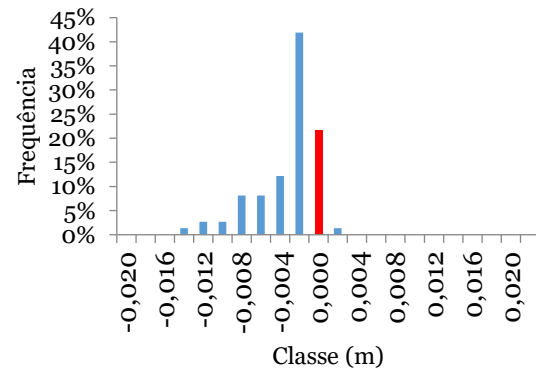
Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual



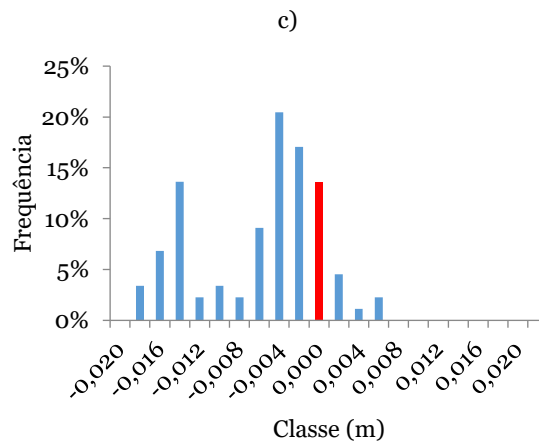
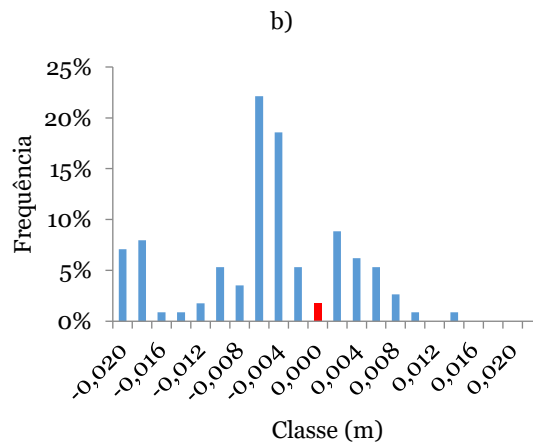
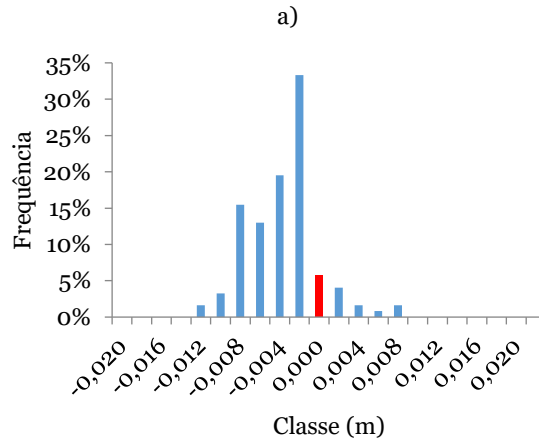
Dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria



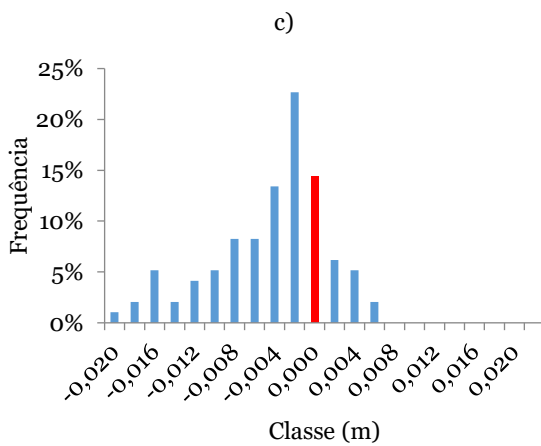
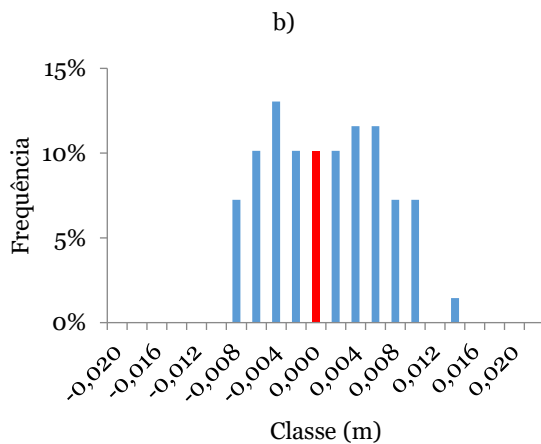
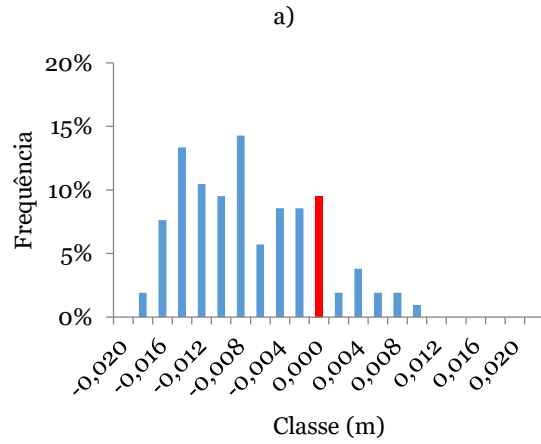
Dif. entre método de medição pontual e fotogrametria



● **Ensaio 12 (a), 13 (b), 14 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

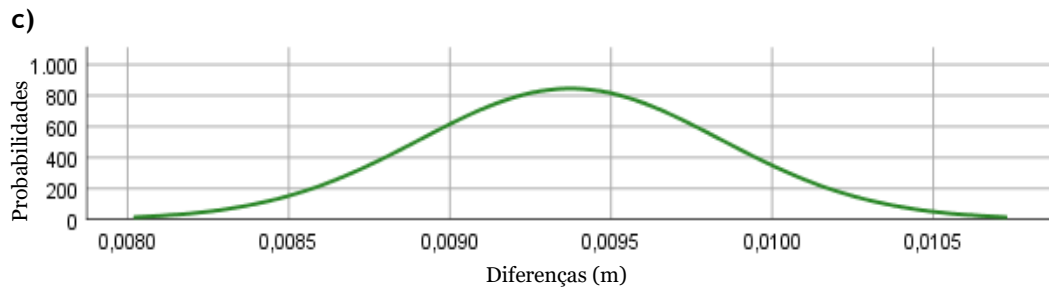
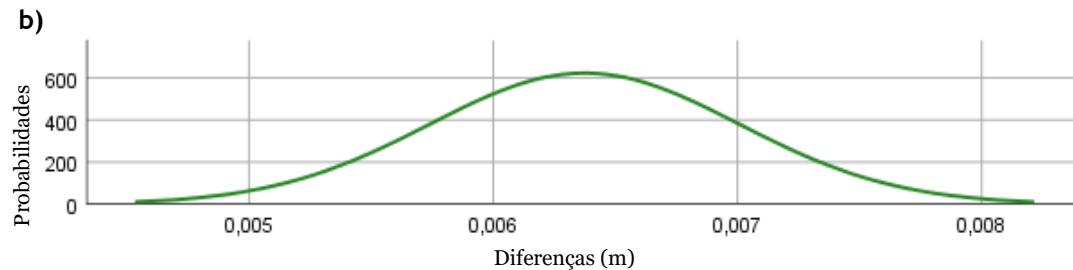
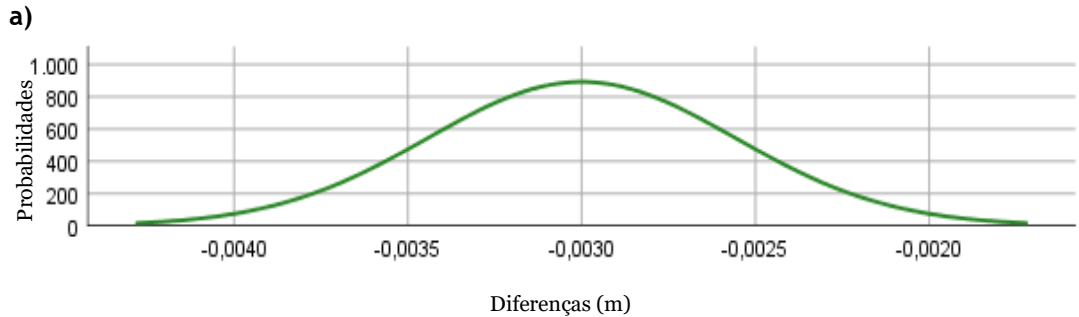


● **Ensaio 15 (a), 16 (b), 17 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

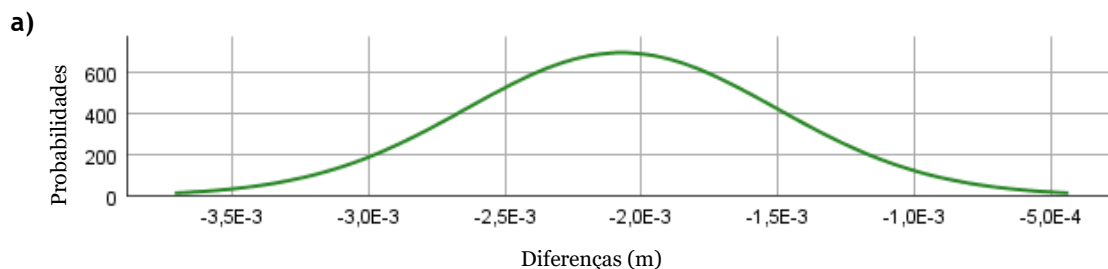


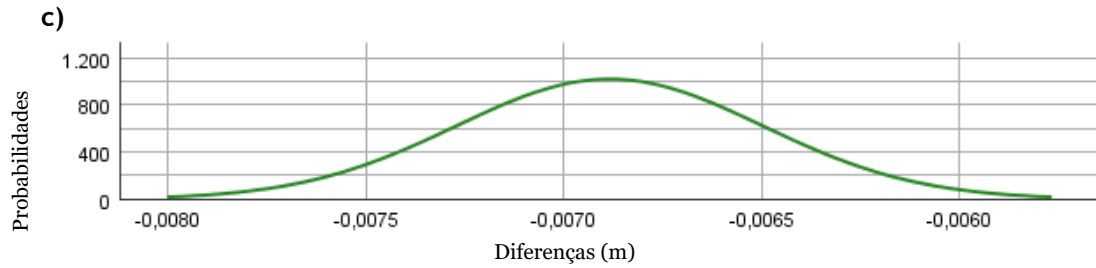
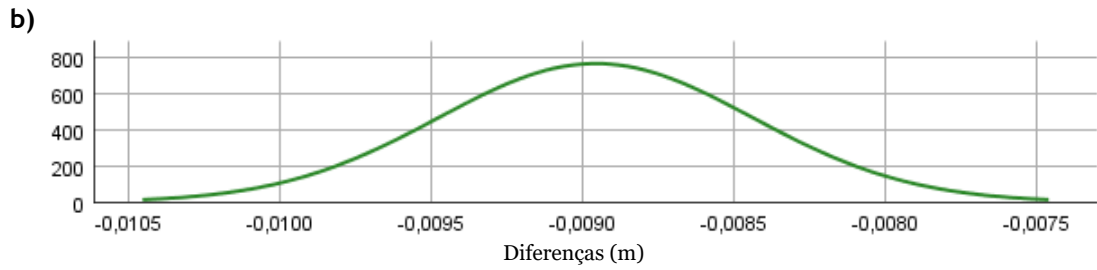
Anexo B.1.3-Gráficos de probabilidades de diferenças entre métodos

- **Ensaio 1: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**

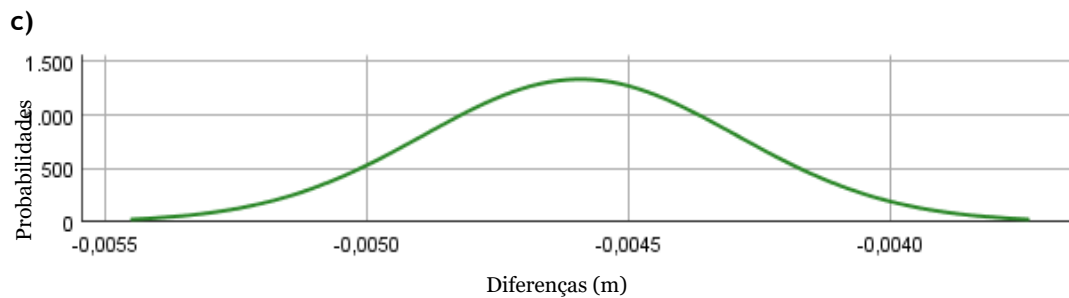
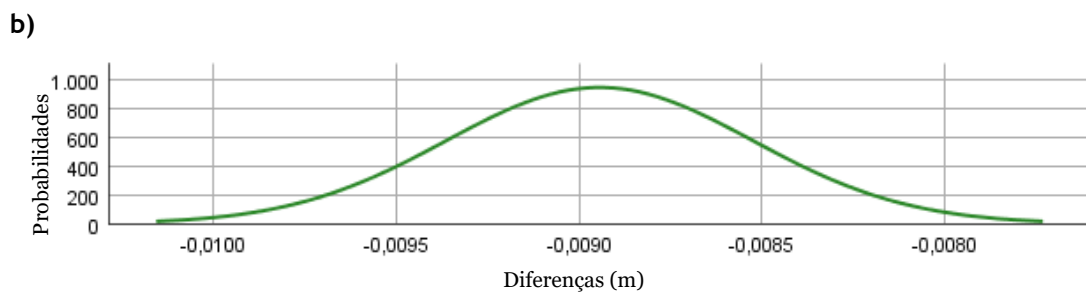
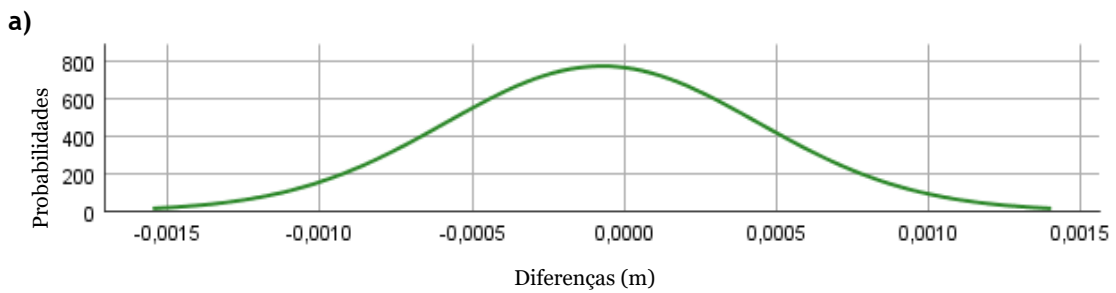


- **Ensaio 2: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**



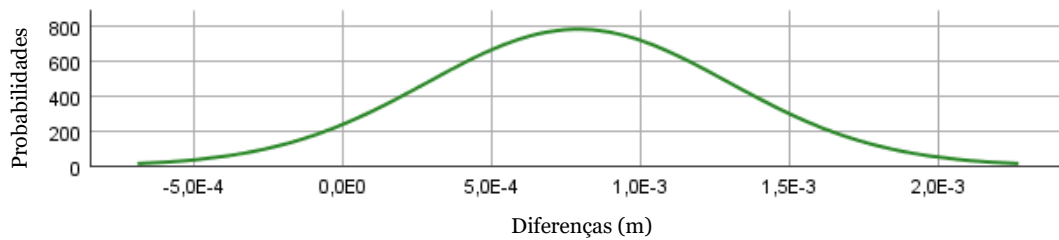


● **Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual: a) Ensaio 3; b) Ensaio 4; c) Ensaio 5**

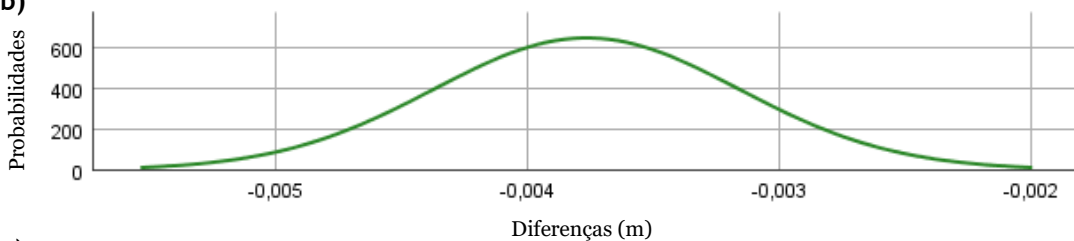


- **Ensaio 6: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**

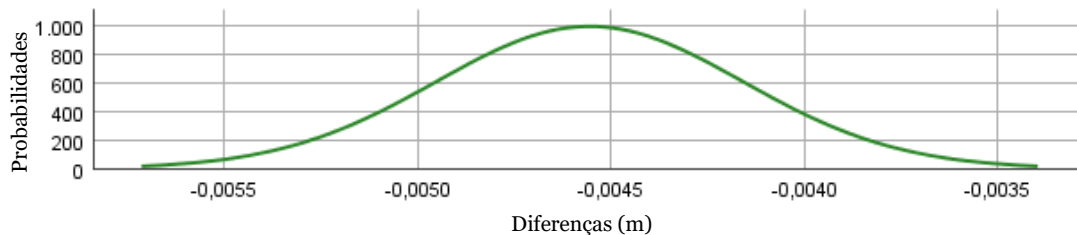
a)



b)

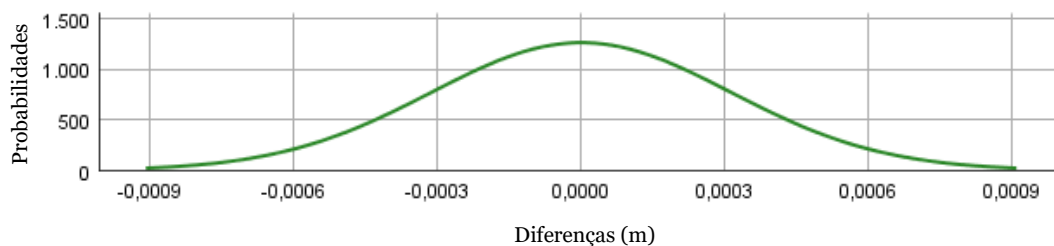


c)

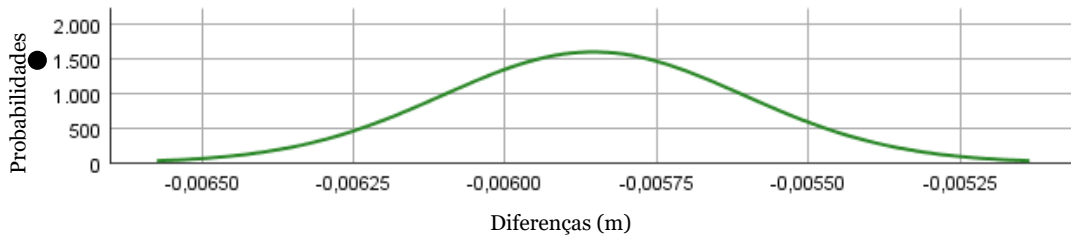


- **Ensaio 7: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**

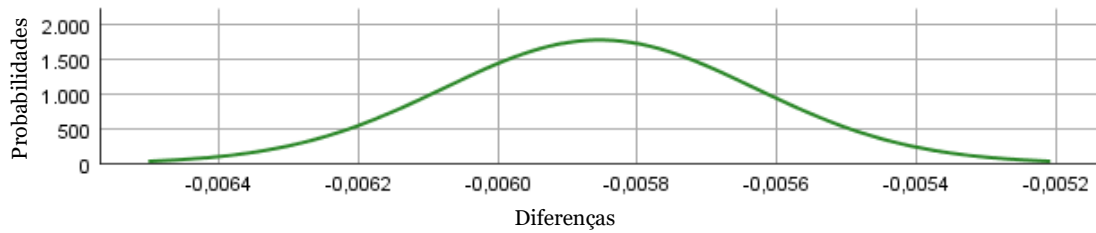
a)



b)

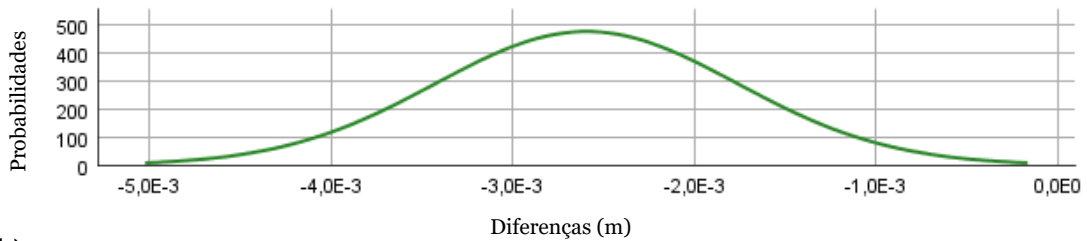


c)

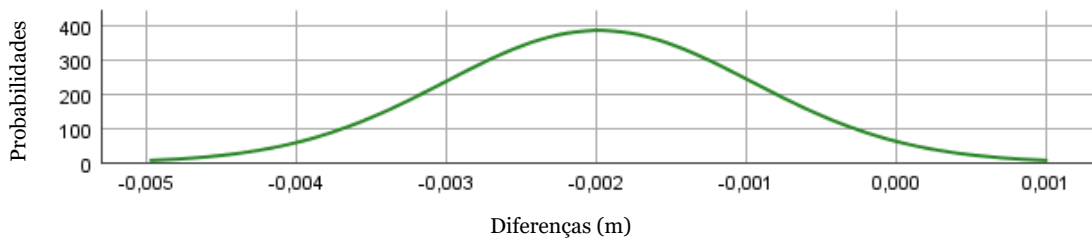


- **Ensaio 8: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**

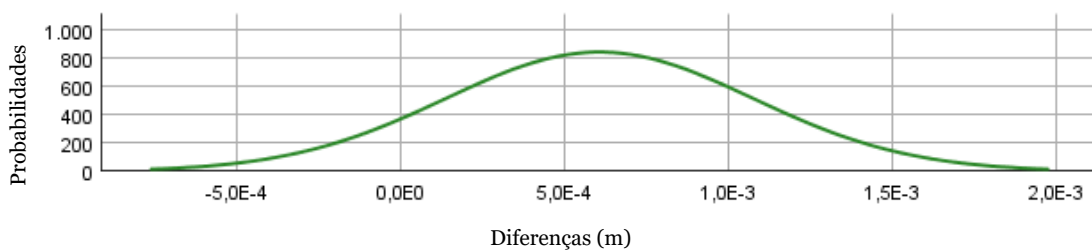
a)



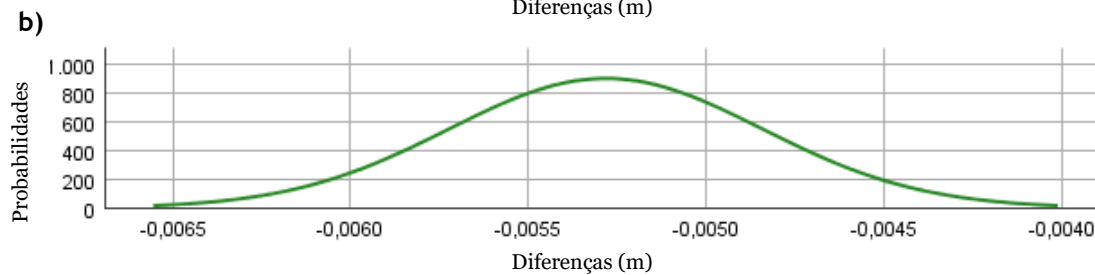
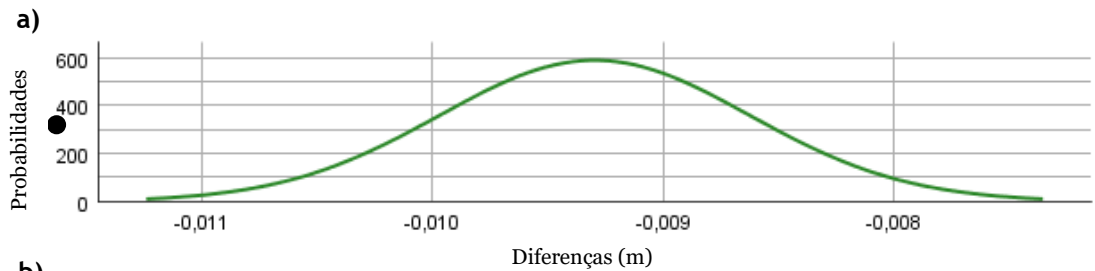
b)



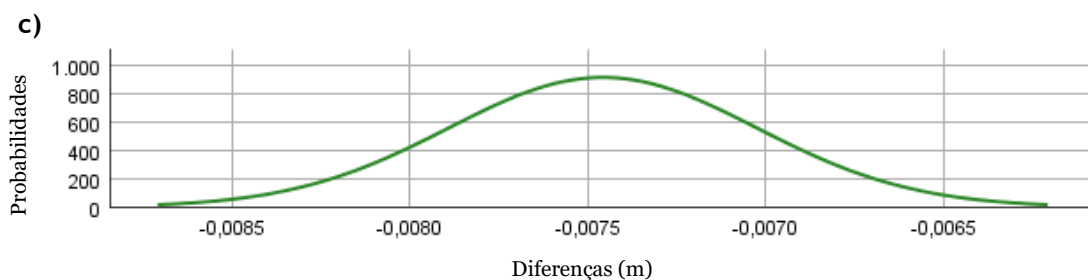
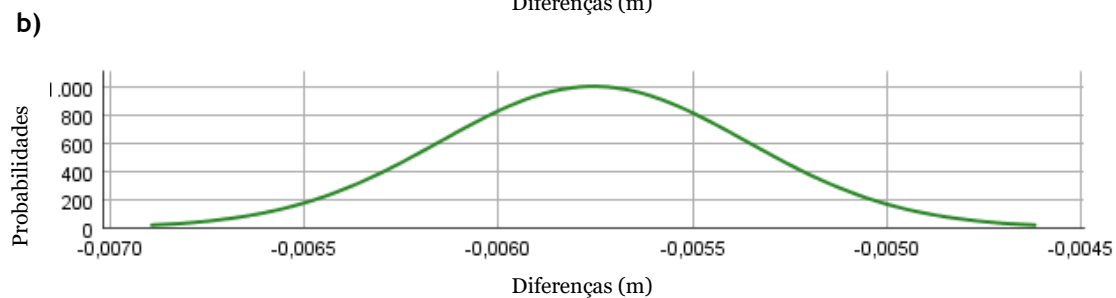
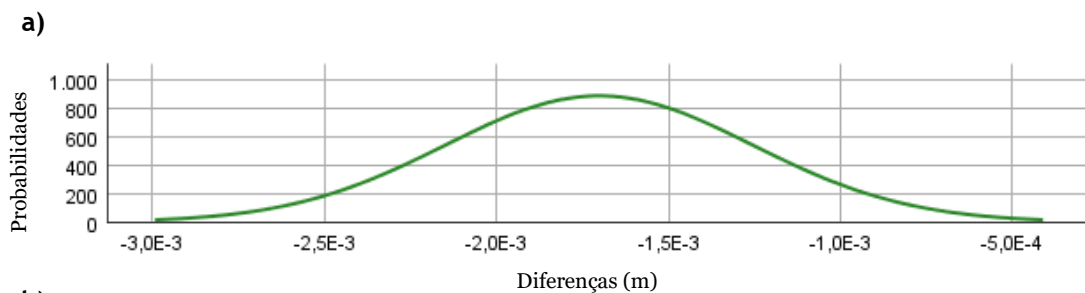
c)



- **Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual: a) Ensaio 9; b) Ensaio 10**

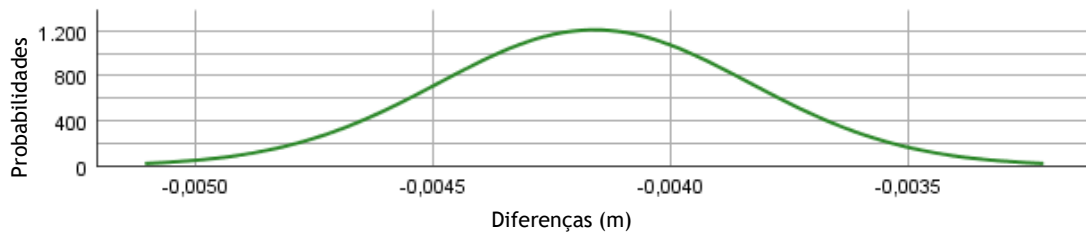


- **Ensaio 11: a) dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual; b) dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria; c) dif. entre método de medição pontual e fotogrametria**

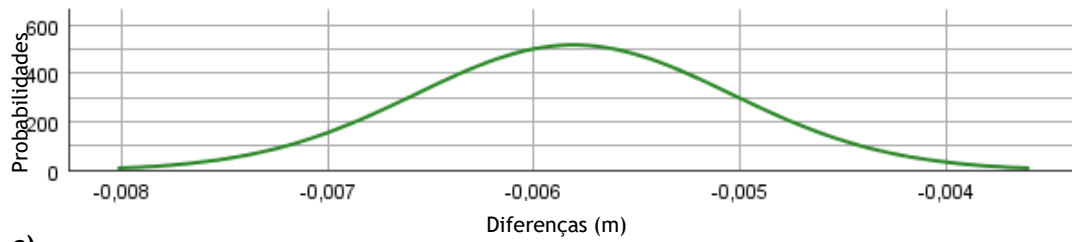


Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual: a) Ensaio 12; b) Ensaio 13; c) Ensaio 14

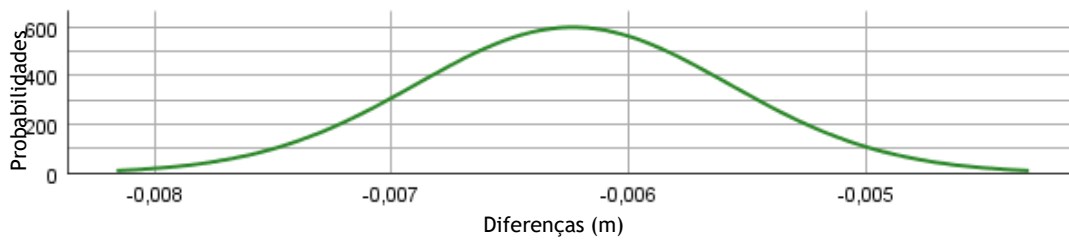
a)



b)

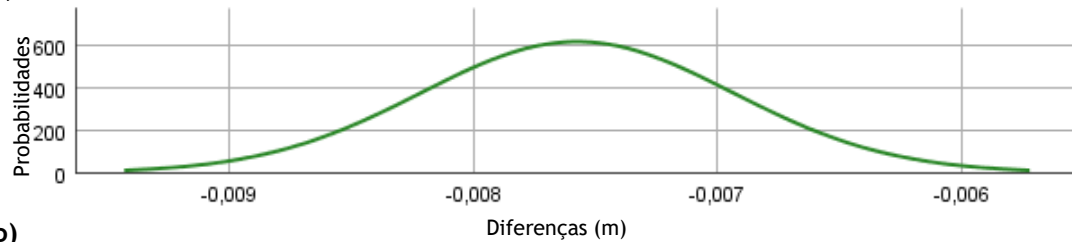


c)

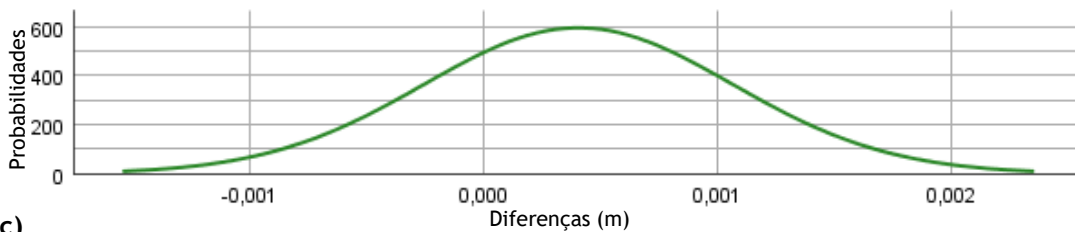


● **Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual: a) Ensaio 15; b) Ensaio 16; c) Ensaio 17**

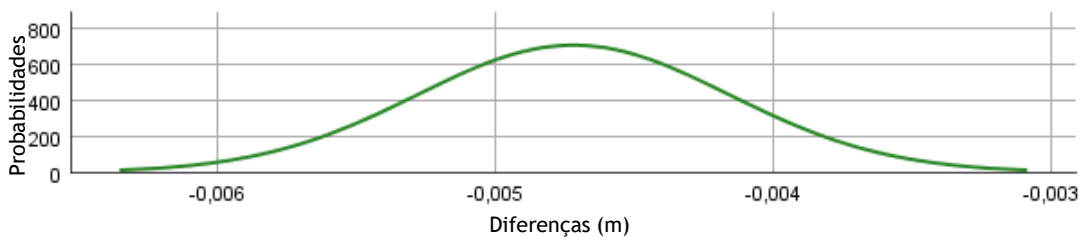
a)



b)

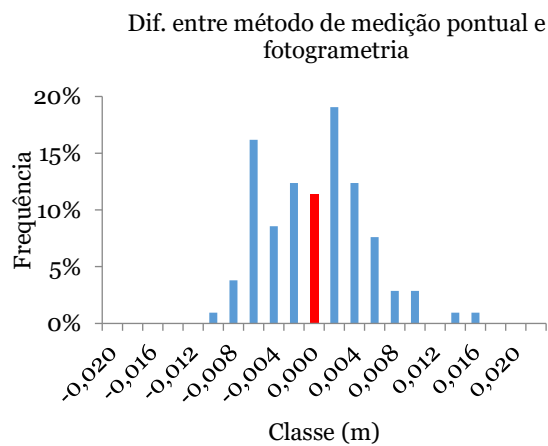
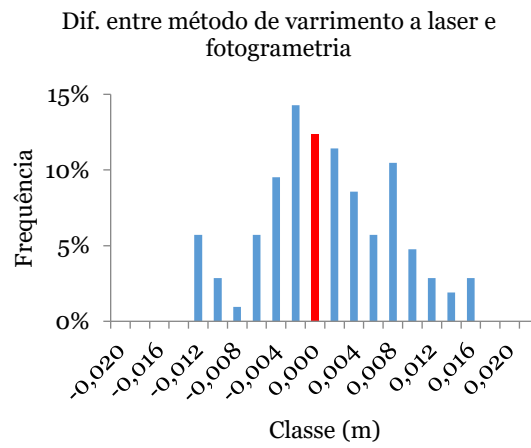
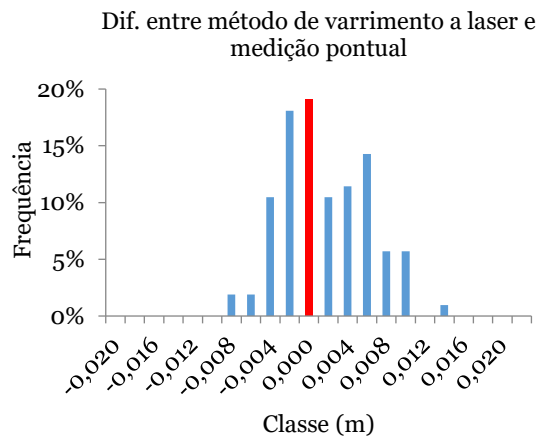


c)



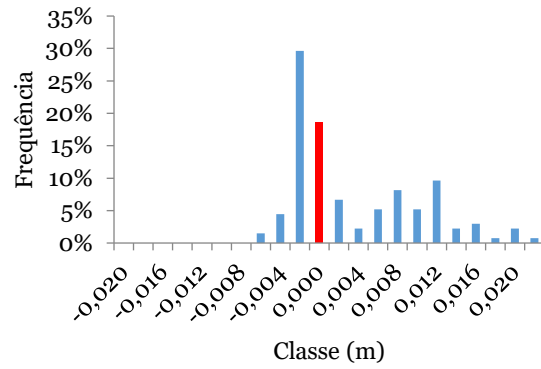
**Apêndice B.1.4-Histogramas de diferenças entre métodos
(correção de erro sistemático)**

● Ensaio 1

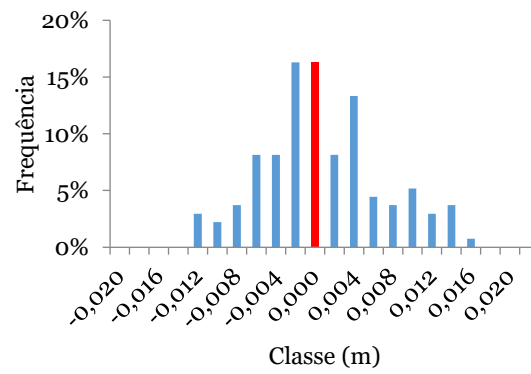


● Ensaio 2

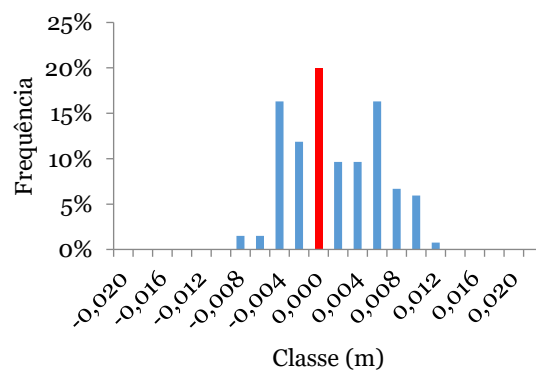
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



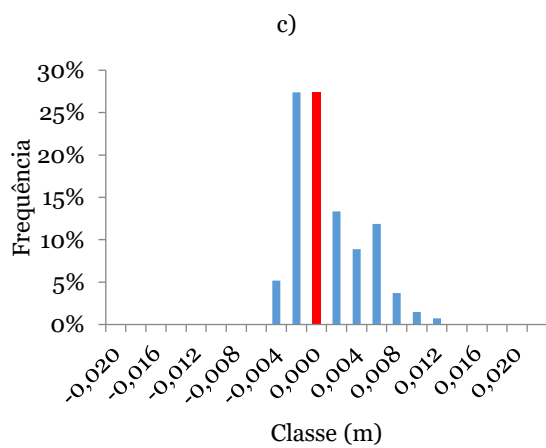
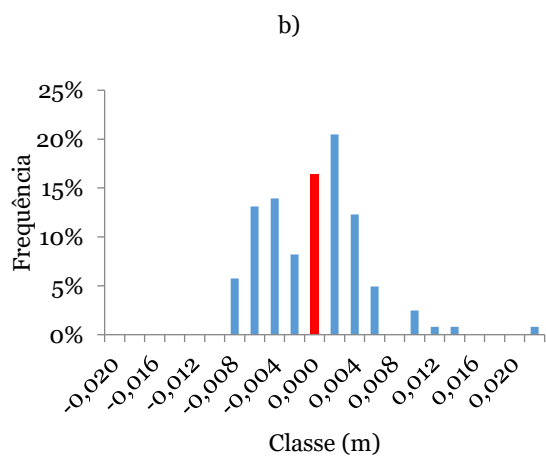
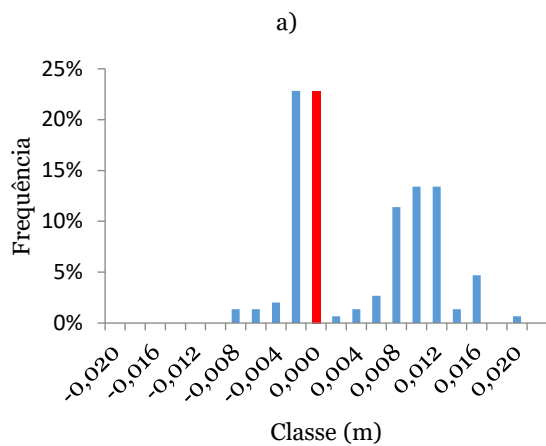
Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria



Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

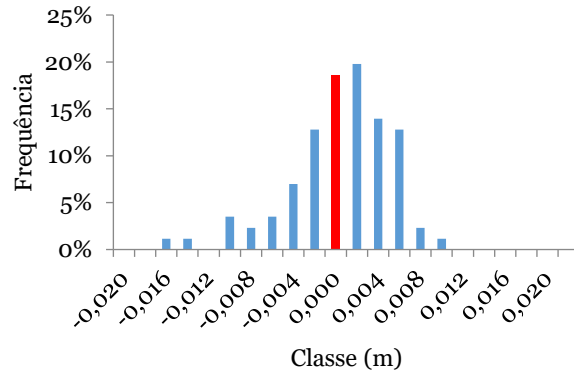


● **Ensaio 3 (a), 4 (b), 5 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

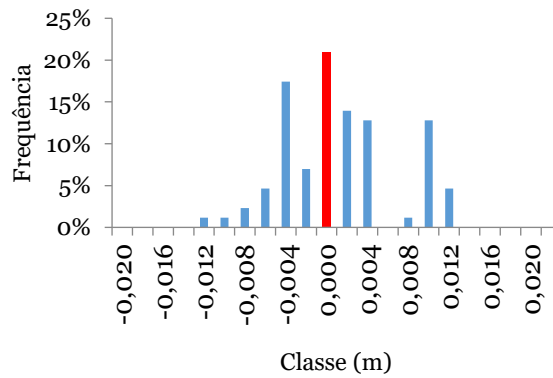


● Ensaio 6

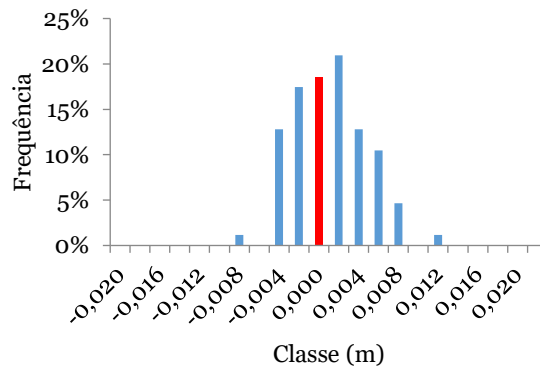
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria

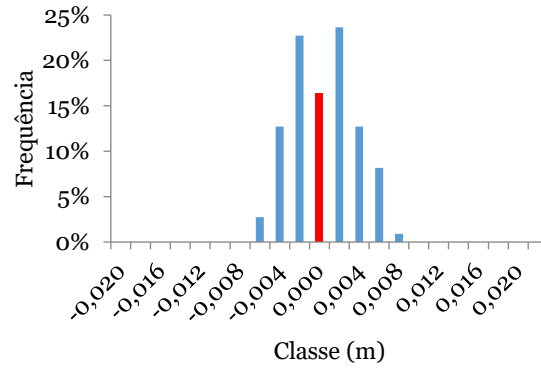


Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

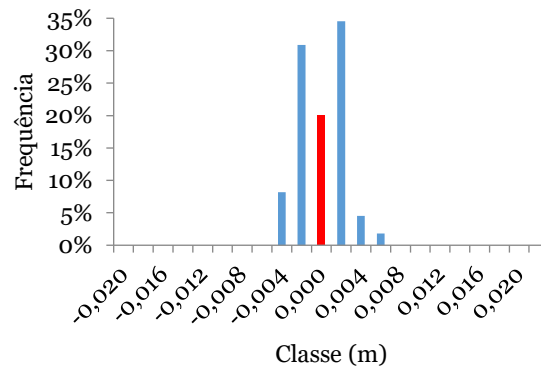


● Ensaio 7

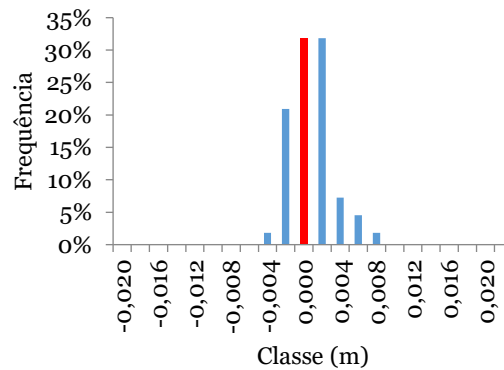
Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual



Dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria

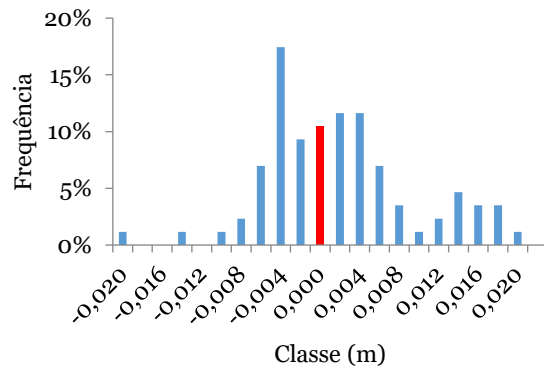


Dif. entre método de medição pontual e fotogrametria

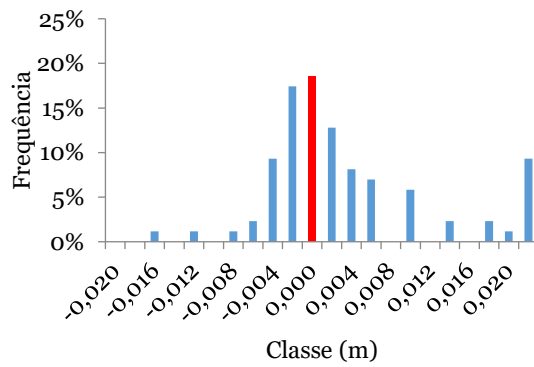


● Ensaio 8

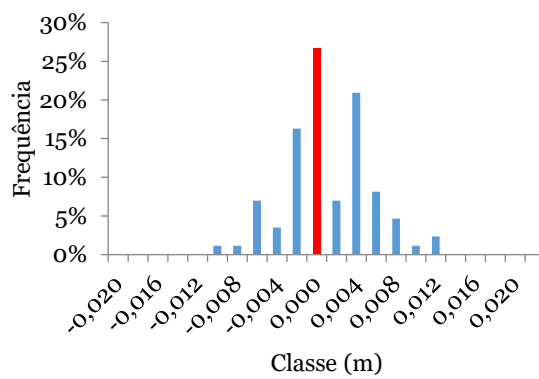
Dif. entre método de varrimento a laser e
medição pontual



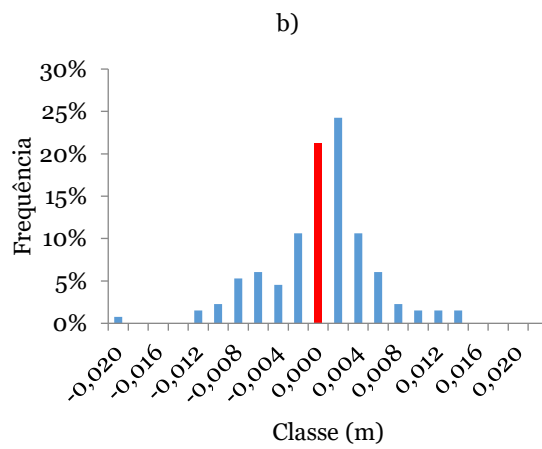
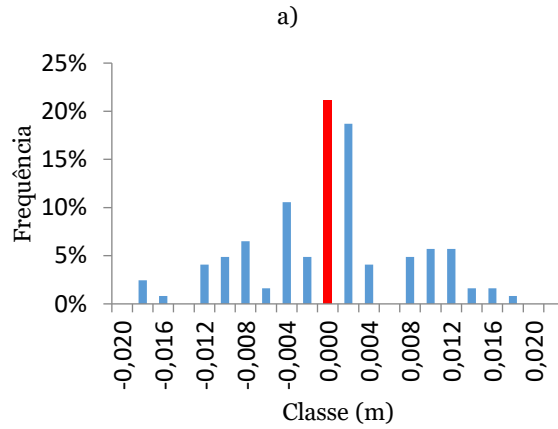
Dif. entre método de varrimento a laser e
fotogrametria



Dif. entre método de medição pontual e
fotogrametria

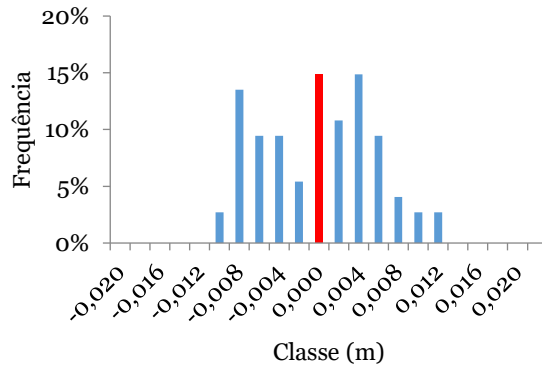


- **Ensaio 9 (a), 10 (b): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

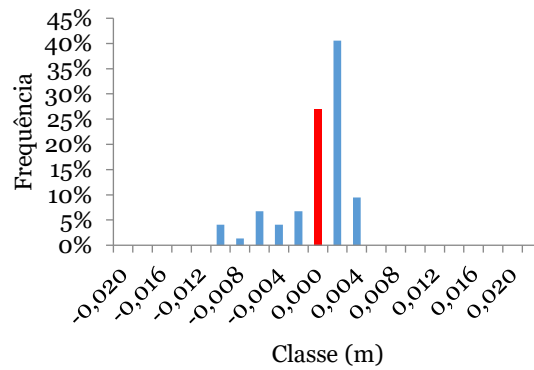


● Ensaio 11

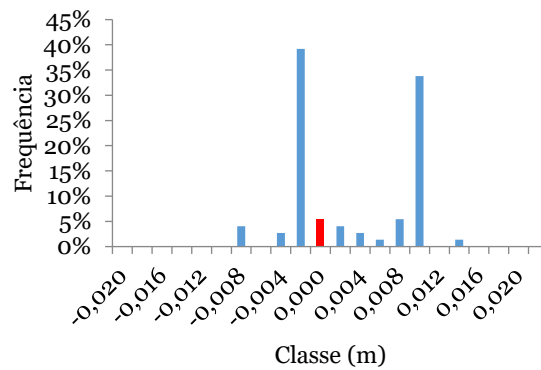
Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual



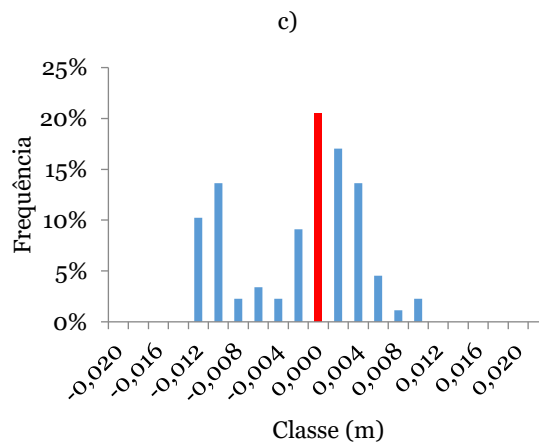
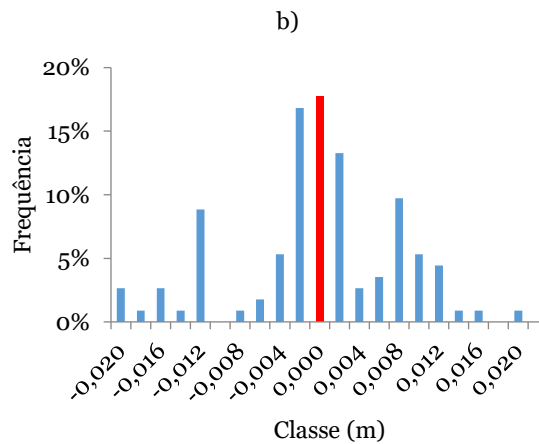
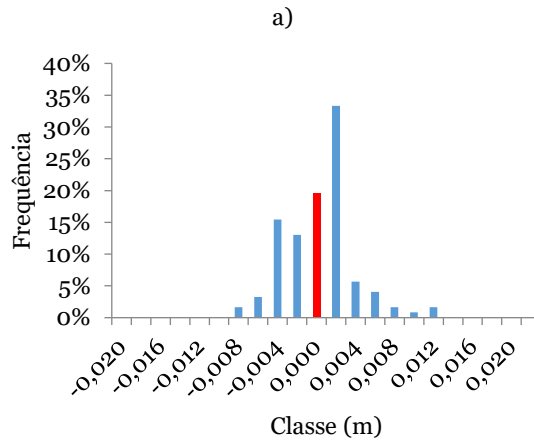
Dif. entre método de medição pontual e fotogrametria



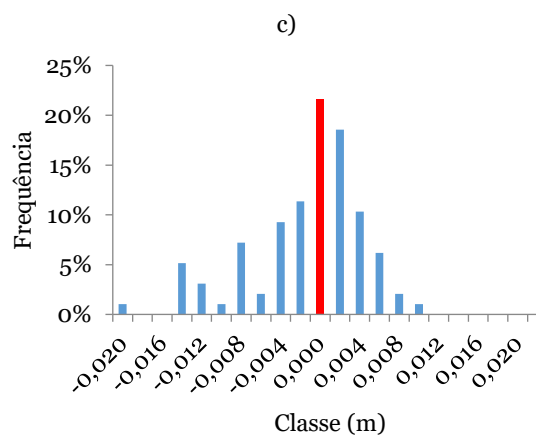
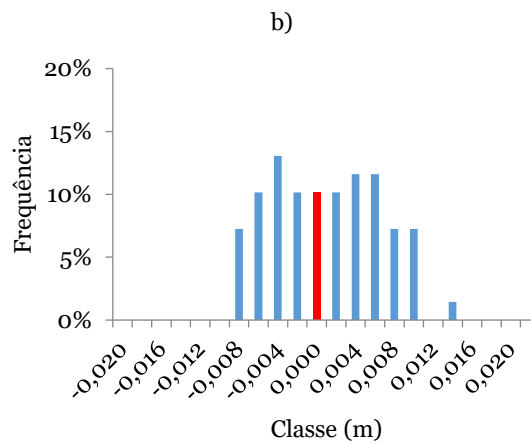
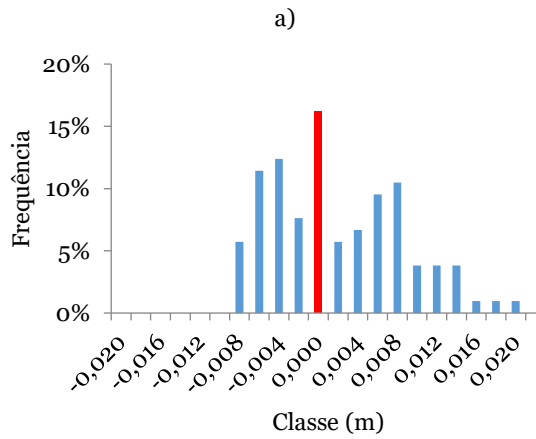
Dif. entre método de varrimento a laser e fotogrametria



● **Ensaio 12 (a), 13 (b), 14 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**

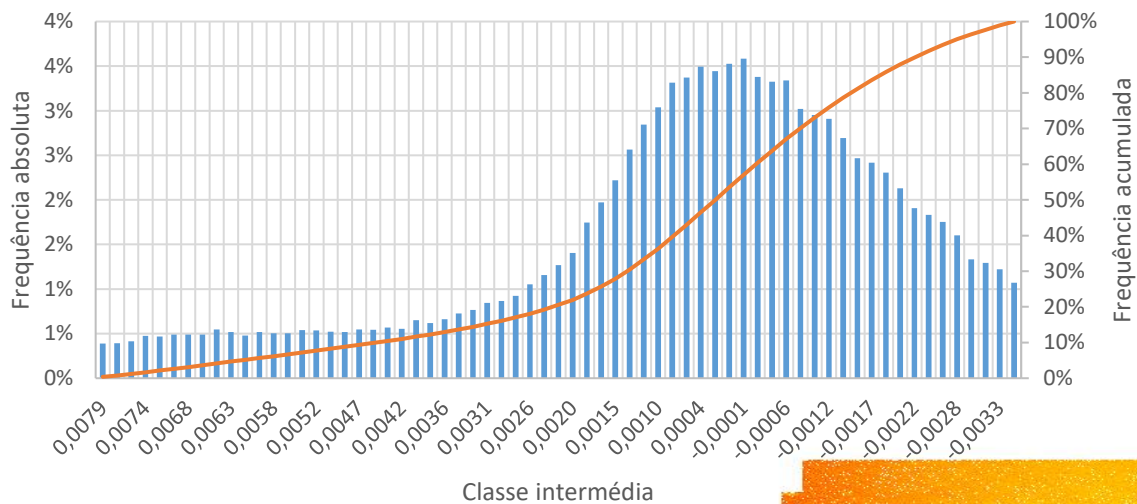


● **Ensaio 15 (a), 16 (b), 17 (c): Dif. entre método de varrimento a laser e medição pontual**



Apêndice C.1-Comparação de nuvens de pontos dos métodos de varrimento a laser e fotogrametria

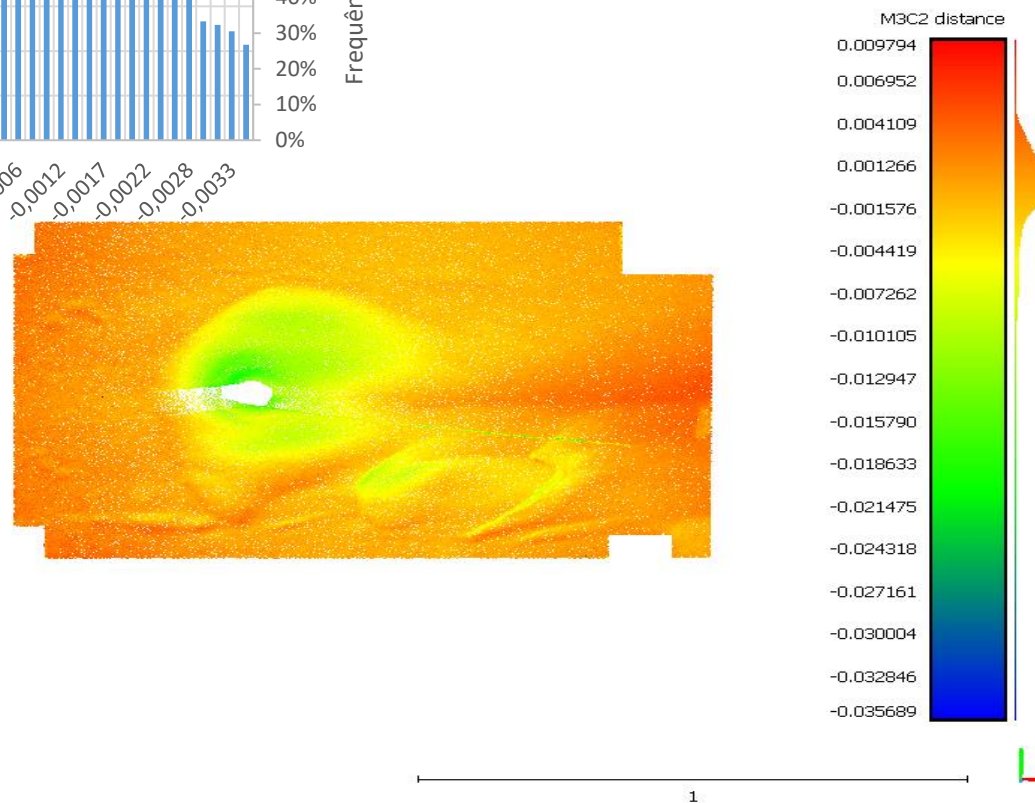
Ensaio 1- VL-FG (95%)



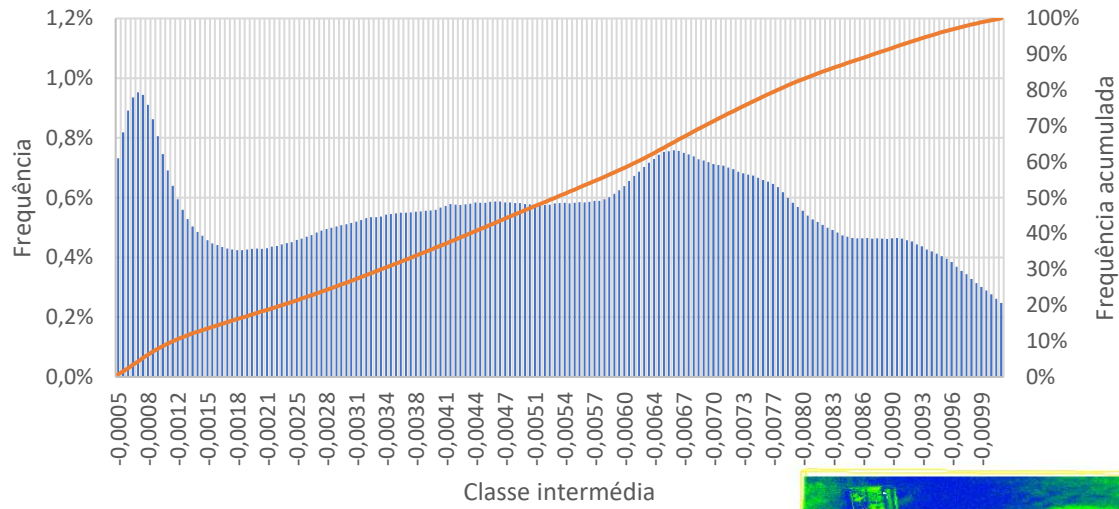
881

	Desvio Padrão	Variância	Mediana
Média	0,0026	$7 \cdot 10^{-6}$	0,0003

(Valores em metros)



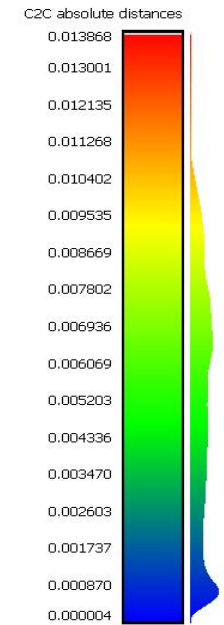
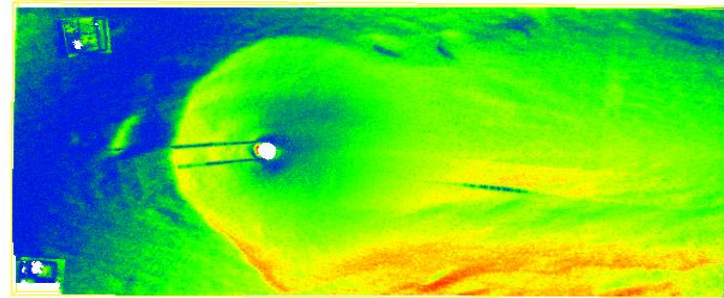
Ensaio 2- VL-Foto (95%)



681

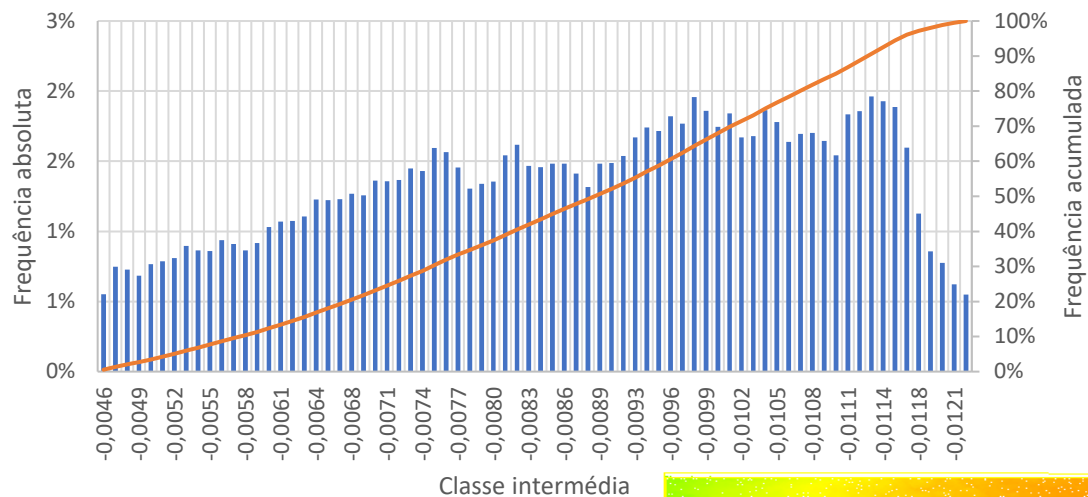
	Desvio Padrão	Mediana
Média	-0,0051	-0,0053

(Valores em metros)



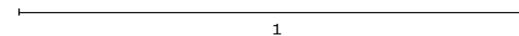
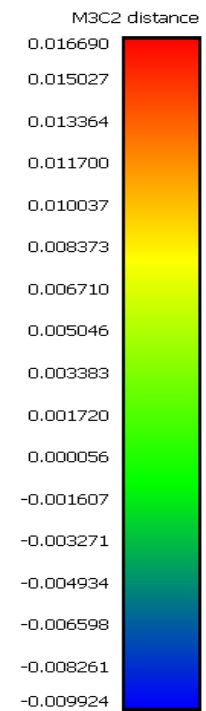
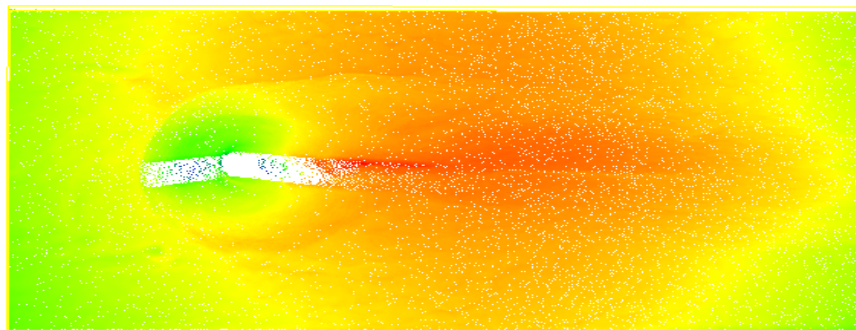
1

Ensaio 6- VL-Foto (95%)



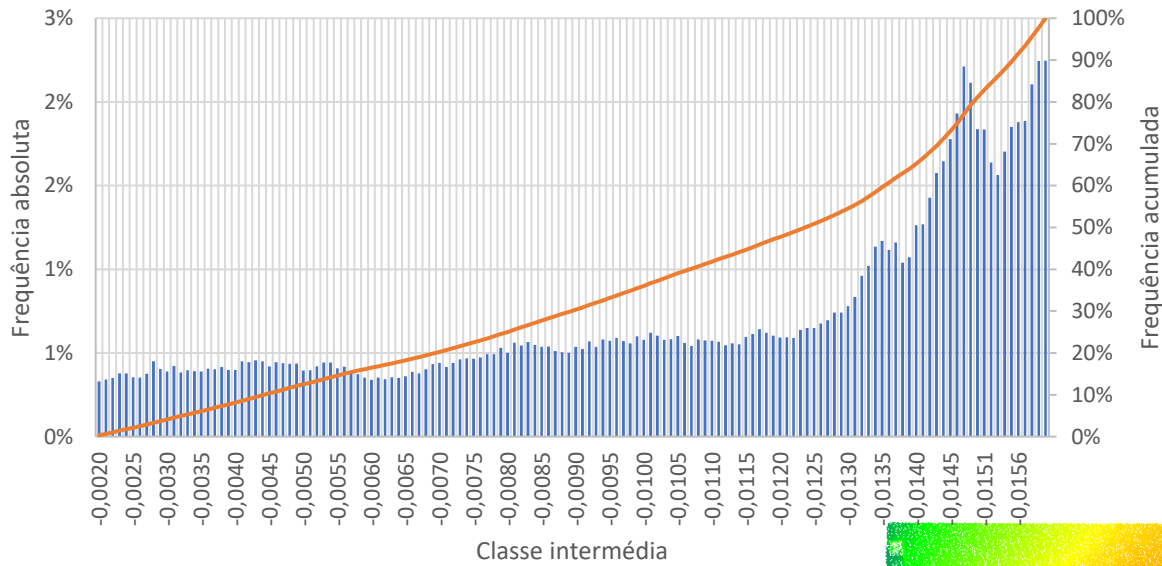
Média	Desvio Padrão	Variância	Mediana
-0,0088	0,0090	$8 \cdot 10^{-5}$	-0,0089

(Valores em metros)



061

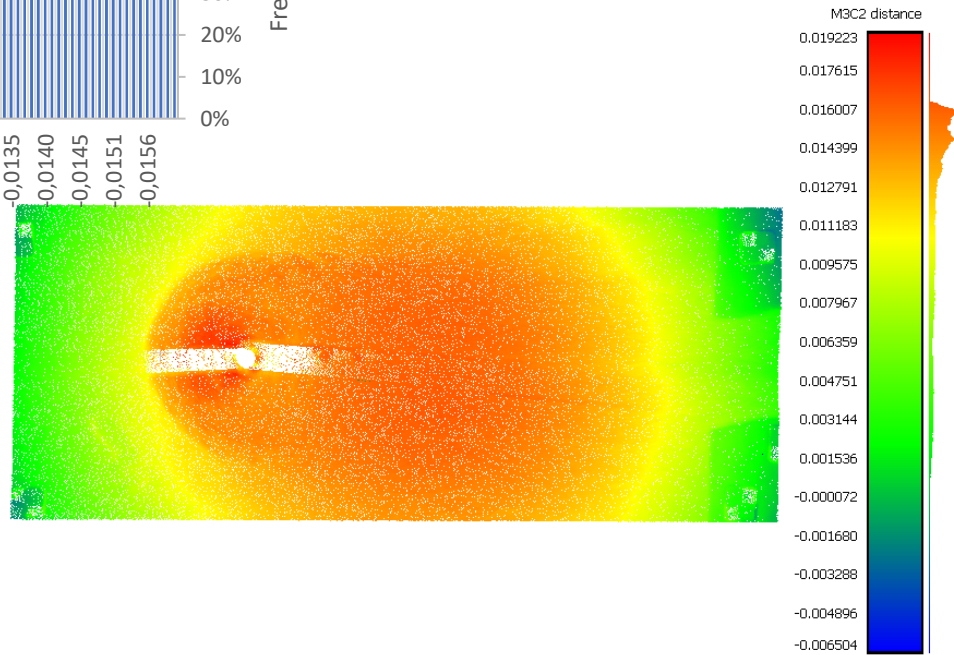
Ensaio 7- VL-Foto (95%)



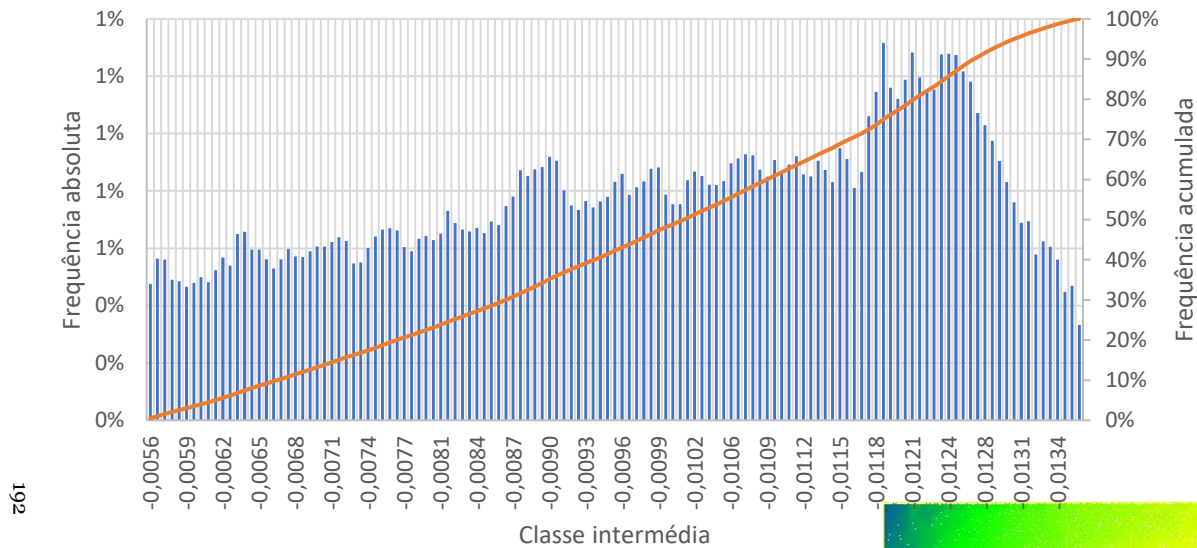
r6r

Média	Desvio Padrão	Variância	Mediana
-0,0109	0,0118	$1,4 \cdot 10^{-4}$	-0,0124

(Valores em metros)



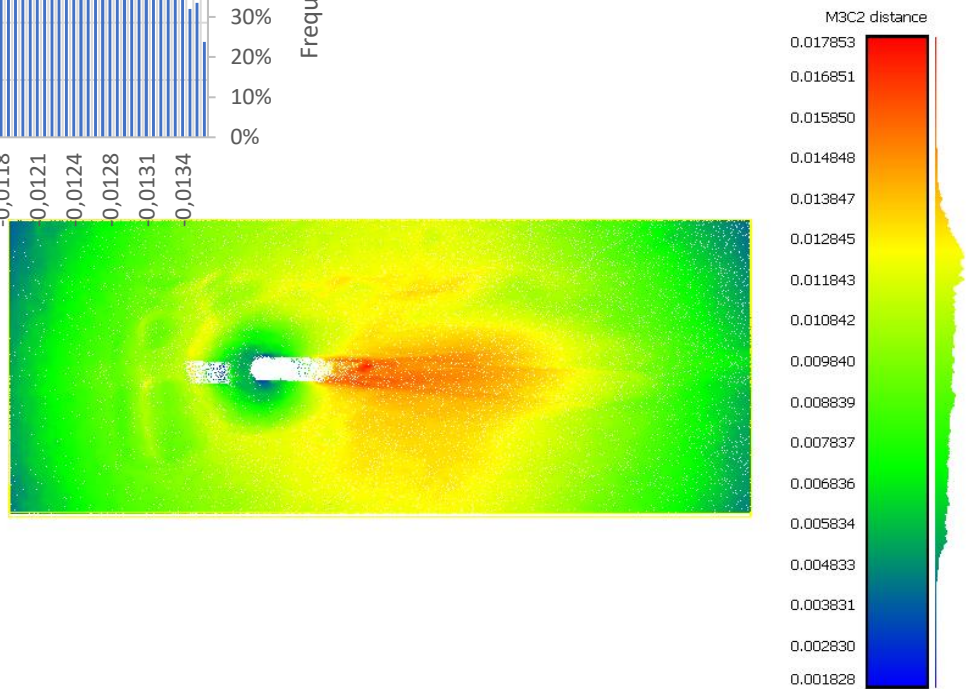
Ensaio 8- VL-Foto (95%)



192

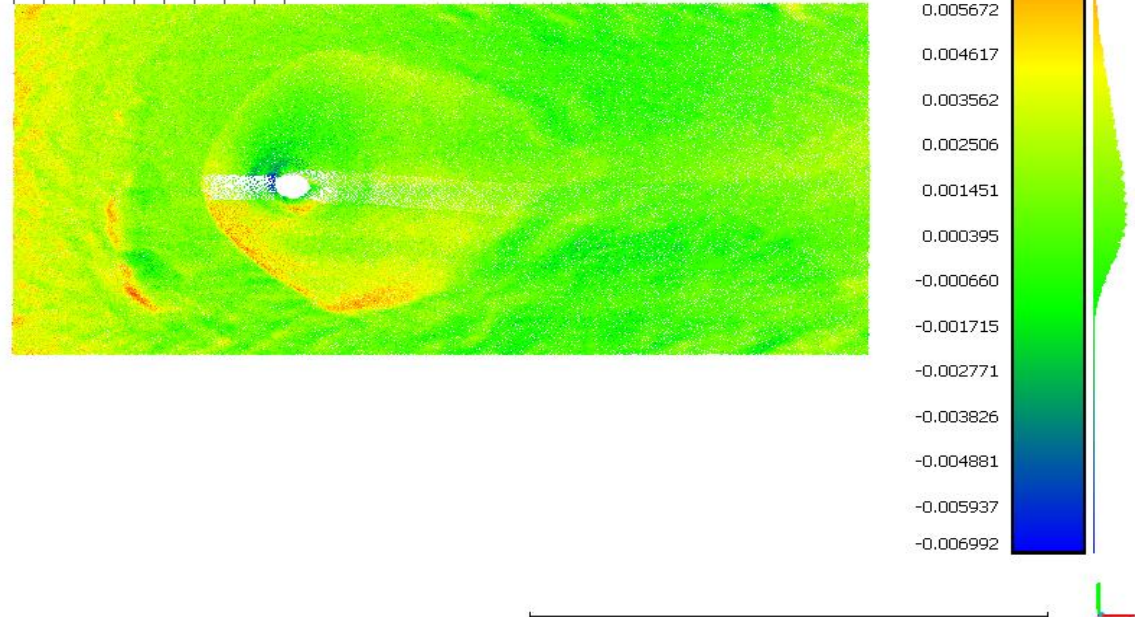
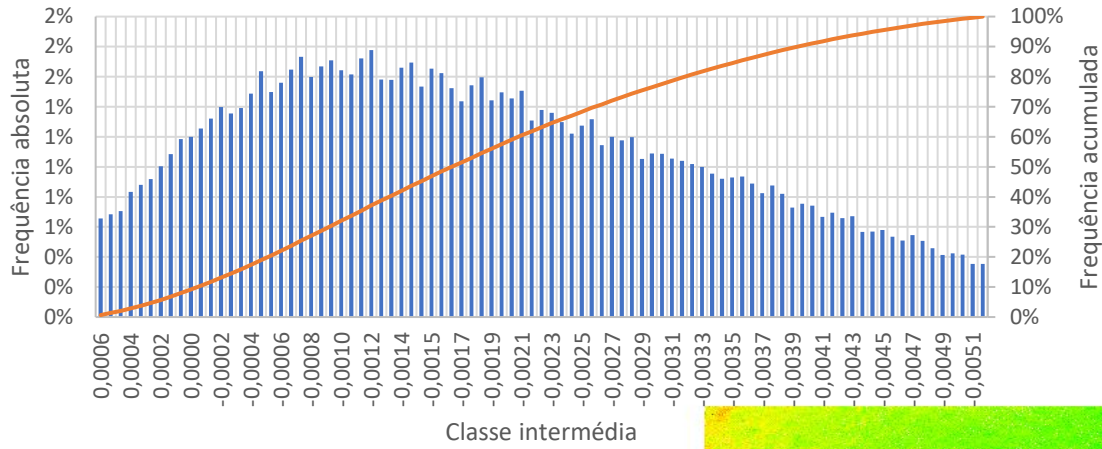
	Desvio Padrão	Variância	Mediana
 Média	0,0100	$1,1 \cdot 10^{-4}$	-0,0102

(Valores em metros)



1

Ensaio 11- VL-Foto (95%)



861

Média	Desvio Padrão	Variância	Mediana
-0,0016	0,0023	$5,3 \cdot 10^{-6}$	-0,0017

(Valores em metros)