



## CÁLCULO DE VOLUMES – AVALIAÇÃO DE MÉTODOS E FERRAMENTAS

Leonor Veiga (1); Cristina Monteiro (1)

(1) Instituto Hidrográfico

[leonor.veiga@hidrografico.pt](mailto:leonor.veiga@hidrografico.pt) ; [cristina.monteiro@hidrografico.pt](mailto:cristina.monteiro@hidrografico.pt)

### Resumo

Dada a sua natureza multidisciplinar, o Instituto Hidrográfico (IH) possui a competência técnica e os meios operacionais necessários à realização de trabalhos de apoio a obras marítimas, combinando a aquisição e análise de dados que permitem a compreensão de fenómenos que afetam a dinâmica sedimentar.

De entre outras capacidades no âmbito do apoio às obras marítimas, o IH dá assessoria a projetos de dragagens, nomeadamente com a realização de levantamentos hidrográficos (LH) de elevada resolução para controlo das operações de dragagem, determinação e cálculo de volumes nas situações de planeamento, acompanhamento e verificação da dragagem, colheita, análise físico-química e classificação de sedimentos de acordo com a legislação em vigor para a gestão de dragados.

Neste artigo pretende-se estimar a grandeza do erro que se comete ao fazer o cálculo do volume de dragados e avaliar o erro associado à ferramenta de cálculo utilizada, tendo sido avaliados os *softwares* disponíveis no mercado: CarisGis®, ArcGis®, QGis, Surfer® e AutoCad Civil 3D®.

### Introdução

As dragagens são operações que se realizam regularmente em zonas marítimas ou fluviais, e têm como propósitos o alargamento de canais de navegação, ampliação de infraestruturas e manutenção das profundidades operacionais. Podem ter em vista outros benefícios: criar ou manter perfis de praia, escavar valas ou túneis, extrair minério, remover material contaminado com o objetivo de proteger o meio ambiente, entre outros.

Os levantamentos hidrográficos são um elemento-chave no acompanhamento dos trabalhos de dragagem, mas não só. São a base do cálculo de taxas de sedimentação e da verificação da sazonalidade no depósito de sedimentos.

A profundidade necessária que determina a navegabilidade em determinada zona depende de diversas condicionantes: calado máximo da embarcação, movimentos verticais, pé de piloto, precisão do LH, assoreamento entre dragagens e tolerância da dragagem.

A precisão do LH é dada pela incerteza na medição das profundidades, a qual se decompõe em incerteza horizontal, que se refere à incerteza na posição da profundidade e das obstruções detetadas, e em incerteza vertical (IV) que é o resultado da contribuição de várias fontes de incertezas sistemáticas, aleatórias e residuais, que se propagam na dimensão vertical (Veiga, 2010).

A tolerância da dragagem, valor máximo admissível para o desvio das profundidades finais relativamente à profundidade de dragagem estabelecida, depende do material a dragar (tipo de fundo), da profundidade de dragagem, da draga utilizada e de demais fatores. A tolerância da dragagem, porque variável, deve constituir sempre elemento do projeto de execução de uma dragagem, bem como do contrato estabelecido.

#### *Erro relativo no cálculo de volumes*

Os fatores que mais influenciam a precisão do cálculo de volumes são a irregularidade do fundo submarino, a densidade de informação e as incertezas na medição das profundidades (USACE, 2013). O efeito da irregularidade do fundo depende da densidade de informação resultante do levantamento, a qual depende, por sua vez, da resolução do LH (dimensão da célula ou distância entre valores de profundidade).



Levantamentos hidrográficos que cumpram a norma S44 da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) são classificados por ordens, cada uma das quais atende a um conjunto de requisitos, entre os quais está definida a máxima incerteza vertical admissível (MIVA). Para um determinado levantamento, a incerteza vertical ( $IV_{95\%}$ ) das profundidades reduzidas ( $d$ ), calculada para um nível de confiança de 95%, não pode exceder a  $MIVA = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$  da respetiva ordem (OHI, 2022). Para o mesmo nível de confiança, a incerteza no volume ( $IVol_{95\%}$ ) vem dada por:

$$IVol_{95\%}(m^3) = \text{área}(m^2) \cdot 2 \cdot IV_{95\%}(m) \quad \text{ou} \quad IVol_{95\%}(\%) = IVol_{95\%}(m^3) \cdot 100 / Vol(m^3) \Leftrightarrow$$

$$IVol_{95\%}(\%) = 200 \cdot IV_{95\%}(m) / d$$

Considerando profundidades até 40m, as incertezas verticais definidas na S44 (OHI, 2022) e as incertezas no volume variam tal como apresentado na Figura 1.

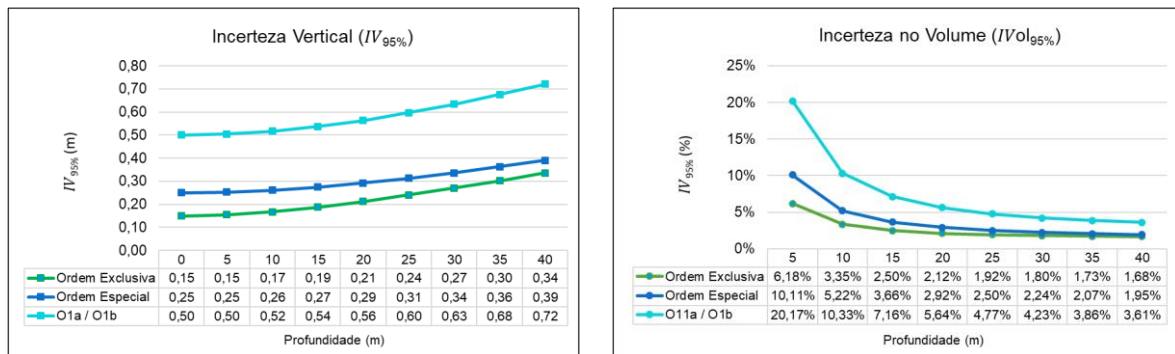


Figura 1. Incertezas verticais e incertezas no volume em função da Ordem do LH

## Avaliação das ferramentas de cálculo de volumes

### Metodologia

A avaliação das ferramentas de cálculo de volumes foi efetuada por comparação entre o volume calculado por cada *software* e o volume real, matematicamente conhecido, de uma superfície cónica (escolhida por se poder adaptar a situações de fundo real onde se verifica um assoreamento localizado). Para tal, efetuou-se a simulação de diversos levantamentos hidrográficos sobre superfícies cónicas, fazendo variar a resolução do levantamento e o declive do cone (a representar o declive médio do terreno), a partir dos quais foram calculados os erros relativos entre os volumes calculados por cada ferramenta e os volumes verdadeiros (conhecidos). Para o efeito, foram consideradas resoluções de 0,5m, 1m, 2m, 3m, 4m e 5m, declives de 26° e 45° (a que correspondem cones com altura igual a metade do raio e cones com altura igual ao raio, respetivamente) e adotado o modelo de interpolação *Triangular Irregular Network* (TIN), comum a todas as ferramentas.

### Resultados e Análise

Os gráficos apresentados na Figura 2 resumem os resultados obtidos. Por análise destes resultados, verifica-se que, de uma forma geral, para o declive de 45°, quanto melhor a resolução do LH, menor o erro relativo no cálculo do volume. Para o declive de 26° e para as melhores resoluções (dos 0,5m aos 3m) esta relação também se verifica. No entanto, e curiosamente, para resoluções de 4m e 5m o erro relativo do QGIS e do Surfer estabiliza.

Analisando as Figuras 1 e 2, conclui-se que, independentemente da Ordem do LH, para resoluções de 0,5m qualquer das ferramentas avaliadas é adequada ao cálculo de volumes. No entanto, degradando a resolução de LH, a escolha da ferramenta pode ser crítica.

Embora não apresentado, é de referir que se verificou que, para o mesmo programa, os resultados nos valores dos volumes são concordantes, se considerados métodos de interpolação distintos.

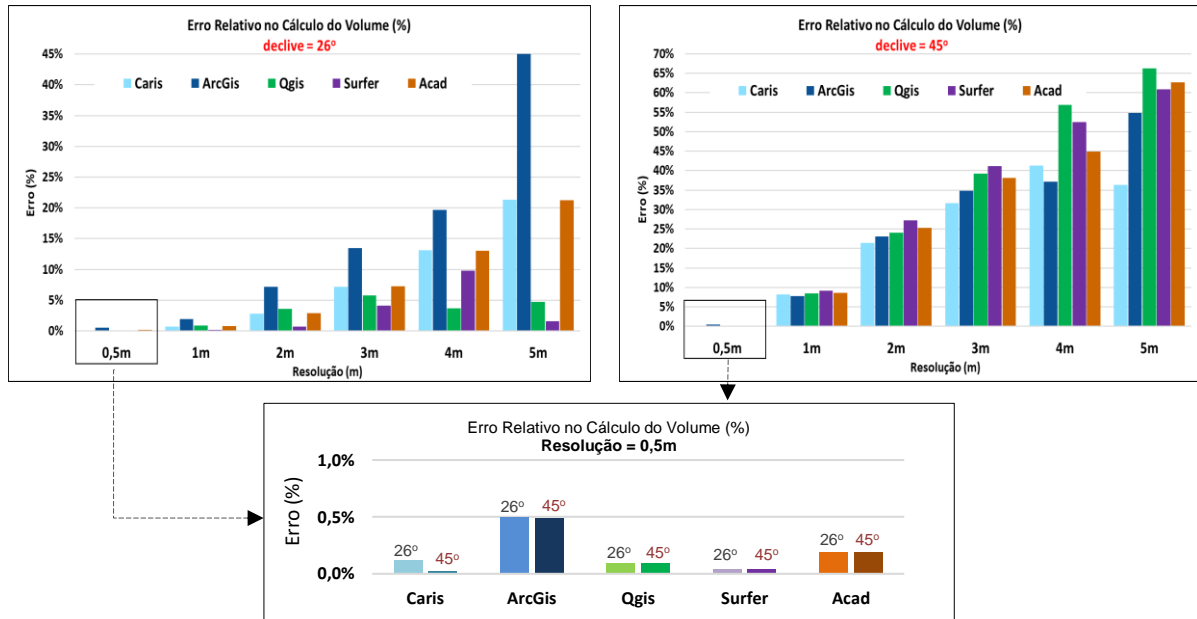
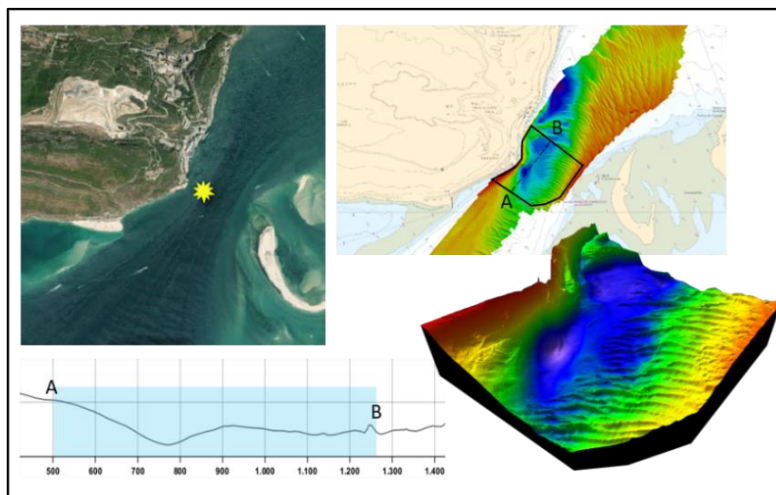


Figura 2. Erro relativo no cálculo do volume em função da resolução do LH

#### Avaliação da ferramenta de cálculo

Para avaliar, numa situação concreta, se cada uma destas ferramentas é adequada ao cálculo de volumes, há que definir o valor máximo admissível para o erro relativo do cálculo. Tendo em conta que para a profundidade de dragagem são definidas tolerâncias, da dragagem e do LH, a aceitação de um determinado valor para o erro relativo no cálculo do volume, terá de estar ligada ao que essas tolerâncias representam, em percentagem, do volume máximo de dragagem acertado por contrato (volume à profundidade de dragagem). O erro relativo admissível no cálculo do volume deverá, contudo, ser apenas uma parte pouco significativa das tolerâncias admitidas.

#### Caso de estudo



#### Setúbal – Rio Sado

LH Multifeixe - maio 2022  
Resolução: 0,5m  
Ordem exclusiva  
Profundidade min: 2,2m  
Profundidade máx: 46,0m  
Nº sondas: 2 059 779  
Área = 514 894 m<sup>2</sup>  
Declive máx = 23,7°  
Profundidade de dragagem: 25m

Figura 3. Caso de estudo – Rio Sado

Considerou-se o LH realizado no Rio Sado, com as características apresentadas na Figura 3. Vai ser realizada uma dragagem à profundidade de 25m e pretende-se avaliar se cada uma das ferramentas é adequada ao cálculo do volume a dragar.

Por consulta da Figura 2, verifica-se que para uma resolução de 0,5m, o erro relativo no cálculo do volume a dragar é inferior a 0,5%. Queremos verificar se este valor é inferior ao que as



tolerâncias do LH e da dragagem representam, percentualmente ao volume de contrato (volume à profundidade de 25m).

Sabe-se que a tolerância do LH é de 0,15m (incerteza vertical do LH - Ordem exclusiva) e que a tolerância da dragagem é de 0,30m (valor contratualizado).

Fez-se o cálculo do volume a dragar às profundidades de 25m (profundidade de dragagem), 24,85m (profundidade de dragagem subtraída da tolerância do LH) e 24,70m (profundidade de dragagem subtraída da tolerância da dragagem), utilizando cada uma das ferramentas. Estes volumes representam, em percentagem do volume máximo contratado, os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Tolerância dos volumes por influência das tolerâncias do LH e dragagem

	Caris Gis	Surfer	ArcGis	QGis	Acad
Tolerância do LH = 0,15m	2,087%	2,086%	2,093%	2,093%	2,090%
Tolerância da dragagem = 0,30m	4,14%	4,14%	4,15%	4,14%	4,15%

Constata-se que, para este caso concreto, o erro relativo no cálculo do volume, qualquer que seja a ferramenta utilizada, é bastante inferior aos valores calculados para as tolerâncias do LH e da dragagem. Assim, conclui-se que todas as ferramentas avaliadas são adequadas ao cálculo do volume a dragar.

### Conclusões e recomendações

A resolução do LH revela ser um fator importante em trabalhos de dragagem. Assim, entende-se poder recomendar que para o cálculo de volumes de dragados sejam realizados levantamentos hidrográficos com melhor resolução possível, garantindo, dessa forma, a aquisição de elevada densidade de informação, e consequente caracterização das situações inicial (pré dragagem) e final (pós dragagem) de forma rigorosa.

Garantida que esteja a adequada resolução do LH para um trabalho de dragagem, os programas avaliados utilizam métodos de cálculo de volumes adequados e fiáveis e cujos resultados são concordantes entre si, não sendo a ferramenta de cálculo um fator crítico na precisão final do cálculo de volumes. No entanto, para uma determinada resolução, ainda que se conclua que todas as ferramentas são adequadas ao cálculo do volume, a diferença dos valores obtidos pelas ferramentas, traduzida em valor monetário, pode revelar-se significativa.

A atribuição da Ordem do LH realizado para quantificação de dragados é importante, já que dessa classificação poderá depender a aceitação do erro relativo no cálculo dos volumes.

Conhecer a ordem de grandeza do erro no cálculo de volumes revela-se importante não só na situação típica de quantificação do volume dragado após a execução de uma dragagem, mas também na fase de planeamento dos trabalhos, na qual é conhecida a profundidade de dragagem e o declive médio do terreno, querendo-se decidir a resolução e a ordem do LH, por forma a obter-se um valor admissível para o erro no cálculo do volume, tendo em conta que nesta decisão estão envolvidos fatores económicos.

Este trabalho não constitui um estudo exaustivo, pretendendo, no entanto, apresentar uma proposta de metodologia de avaliação da ordem de grandeza dos principais erros envolvidos no cálculo de volumes, podendo ser um ponto de partida para desenvolvimentos futuros.

### Referências Bibliográficas

OHI (2022). *S44 - IHO Standards for Hydrographic Surveys*. 6<sup>a</sup> Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

Veiga, L., Silva, R., Artilheiro, F. (2010) – “Levantamentos hidrográficos para fins especiais: dragagens”. 1<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Instituto Hidrográfico, junho 2010.

USACE (2013). *Construction Dredging Measurement, Payment, and Clearance Surveys. Engineering and Design – Hydrographic Surveying*. U.S. Army Corps of Engineers.