

## GERAÇÃO DE MALHAS ANISOTRÓPICAS PARA MODELOS DE MARÉ

A. Mazzolari <sup>1,\*</sup>, A. Trigo-Teixeira <sup>2</sup>, M.A.V.C Araújo <sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>, CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Portugal

<sup>1</sup> andrea.mazzolari@ist.utl.pt; <sup>2</sup> trigo.teixeira@ist.utl.pt; <sup>3</sup> amelia.araujo@ist.utl.pt

\* autor para correspondência

### Abstract

As malhas não estruturadas fornecem um instrumento para a resolução das equações da hidrodinâmica de águas pouco profundas (Shallow Water Equations) associada ao Método dos Elementos Finitos, pois o nível de discretização pode diferir em várias ordens de grandeza, de acordo com o gradiente das variáveis presentes no modelo. As malhas isotrópicas são construídas a partir de funções de espaçamento escalares: como não são conhecidas direcções privilegiadas, o objectivo é os elementos terem formas regulares (i.e. triângulos equiláteros). As malhas anisotrópicas estão relacionadas com escoamentos que mostram uma direcção preferencial (i.e.: camadas limites, descontinuidades, asas e geometrias sujeitas a grandes variações do número de Mach e Reynolds), e que requerem a definição de parâmetros adicionais para a geração da malha, como sejam o coeficiente e a direcção de alongamento do elemento. No presente trabalho define-se e aplica-se um critério de geração de malhas anisotrópicas à discretização de batimétricas idealizadas sujeitas à inundaçãõ de maré. Os elementos da malha são alongados na direcção das curvas de nível do modelo digital de elevaçãõ do terreno, na direcção perpendicular ao gradiente do terreno. O objectivo desta aproximação é avaliar as vantagens e desvantagens do uso de uma malha anisotrópica, quando comparada com uma malha isotrópica obtida com a mesma função de espaçamento escalar, em termos da reprodução das batimétricas e da frente de inundaçãõ na modelaçãõ 2D com um modelo hidrodinâmico de maré.

*Key-words:* equações da hidrodinâmica de águas pouco profundas, geração de malhas, triângulos anisotrópicos, frente molhada.

### 1. Introdução

Um aspecto crítico na presente prática de modelaçãõ de escoamentos costeiros, estuarinos e fluviais é a definiçãõ de um modo eficiente de colocaçãõ dos nós da malha, que assegure a reproduçãõ satisfatória dos processos analisados e que ao mesmo tempo evite um excessivo peso computacional. As malhas não estruturadas fornecem um instrumento para a resolução das equações da hidrodinâmica de águas pouco profundas associada ao Método dos Elementos Finitos, pois o nível de discretização pode diferir em várias ordens de grandeza, de acordo com o gradiente das variáveis presentes no modelo.

Dois classes principais de malhas podem ser definidas de acordo com as propriedades dos seus elementos: malhas isotrópicas e malhas anisotrópicas. As primeiras são derivadas de funções de espaçamento escalares (NSF-Node Spacing Functions): como não são conhecidas direcções privilegiadas, o objectivo é os elementos terem formas regulares (i.e. triângulos equiláteros). As

malhas anisotrópicas estão, por seu turno, relacionadas com escoamentos que exibem um comportamento direccional importante (i.e. camadas limites, descontinuidades, asas e geometrias sujeitas a grandes variações do número de Mach e Reynolds), onde parâmetros de geração adicionais, como o coeficiente e direcção de alongamento, são necessários para a construção da malha.

Os métodos de triangulação usados para malhas isotrópicas (ver o trabalho de Owen, 1998) são aplicáveis também a malhas anisotrópicas: a triangulação de Delaunay (Vallet et al., 1991; Bossen and Heckbert, 1996; Castro-Diaz and Hecht, 1995); o método da frente de avanço, onde os elementos podem ser gerados um a um ou por camadas a partir da frente de avanço activa (Pirzadeh, 1994; Hassan et al., 1995; Garimella and Shephard, 2000), e técnicas híbridas (Cougny and Shepard, 1999). Estes algoritmos fornecem em geral um conjunto de opções para modificações na topologia local: a mais comum é a da inserção/remoção de um nó, movimento de um nó, troca de lados dos triângulos e amaciamento da variação de área dos elementos. No centro da consideração de condições anisotrópicas está o uso de um tensor métrico (Borouchaki et al., 1997a, 1997b), derivado de critérios a-priori ou a-posteriori: a métrica introduz o mapeamento do espaço físico no espaço de controlo, onde os elementos têm formas triangulares ideais, como triângulos equiláteros ou quadrados com lados unitários. Requisitos para anisotropia e isotropia coexistem com frequência em domínios com regiões de diferentes escalas espaciais, que requerem malhas mistas (Jansen et al., 2001).

Como exemplo de modelação hidrodinâmica anisotrópica, Cobby et al. (2003) modelou o escoamento fluvial com elementos alongados no leito, por forma a obter a concordância dos lados dos triângulos com as margens. Hasan et al. (2012) demonstrou que elementos quadrangulares alinhados com as batimétricas melhoram a previsão da propagação da maré num domínio estuarino. Como inconveniente, o uso de triângulos alongados pode estar associado a transições abruptas na área dos elementos, o que produz termos de truncatura de ordem superior (Hagen et al., 2000; 2001).

No campo das técnicas de modelação de inundação, a previsão precisa da inundação depende de vários factores, como são as incertezas relacionadas com os levantamentos batimétricos e do terreno, as variáveis e parâmetros de entrada do modelo, a discretização espacial, etc. (Merwade et al., 2008; Falcão et al., 2013). Em particular, uma malha bem construída pode contribuir para melhorar a qualidade da previsão das zonas inundadas. De facto, o modelo hidrodinâmico escolhido para o estudo de inundação tem um algoritmo que trata as zonas que cobrem e descobrem com a maré (wet and dry algorithm), e que classifica os elementos como molhados ou secos de acordo com esquemas numéricos pré-determinados (Medeiros and Hagen, 2013). Por forma a simular de forma realística o processo de inundação, a capacidade da malha em reproduzir as curvas de nível do modelo digital do terreno (DEM) é fundamental, dado que a evolução temporal das frentes de inundação e a estimação da extensão da área inundada são, em conjunto com a frequência de inundação, os resultados principais em que se baseiam os estudos de risco de inundação.

Na concepção de uma malha para simulação de escoamentos com “wet/dry”, o modelador deve considerar os seguintes, por vezes contrastantes, princípios (Donnel et al., 2006):

- manter a regularidade e continuidade das curvas de nível do modelo digital de terreno (DEM);
- manter uma diferença pequena entre a profundidade nos nós dentro do mesmo elemento;
- minimizar o numero de elementos que mudam de estado (molhado para seco ou seco para molhado) em cada passo de cálculo temporal;
- evitar o efeito dentes de serra, ou seja uma forma muito irregular na frente de avanço molhada (“saw tooth”);
- evitar elementos muito distorcidos;

- considerar números de Courant baixos na simulação.

Para resolver alguns destes problemas, neste trabalho propõe-se a introdução de um critério anisotrópico adicional ao recorrente critério isotrópico que é usado na discretização de batimetrias em águas muito pouco profundas e em zonas baixas. Os triângulos da malha são esticados na direcção das curvas de nível de uma batimetria idealizada. Uma simulação de maré em 2D com “wet/dry” é efectuada e as vantagens e inconvenientes da discretização anisotrópica avaliadas, em termos da reprodução das batimétricas, cálculo realístico da frente de inundação, peso computacional e estabilidade do modelo numérico. É também proposta uma comparação com o comportamento da malha isotrópica, gerada com base na mesma função de espaçamento escalar (NSF) em que se exclui o critério da anisotropia. A presente investigação pode contribuir para fazer luz sobre a relação que existe entre as propriedades geométricas da malha de cálculo e a simulação da inundação.

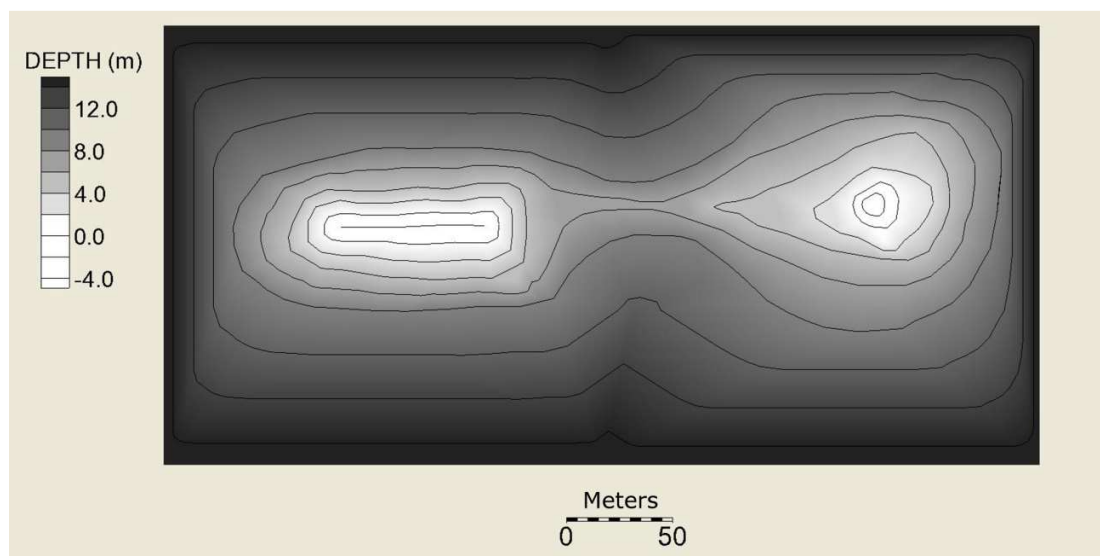


Figura 1. Geometria 1. Extensão do domínio e batimétricas.

## 2. Metodologia

### 2.1. Domínios idealizados

A técnica de geração de malhas anisotrópicas será testada para duas geometrias idealizadas. Nesta fase preliminar, fundos com batimetrias idealizadas e gradientes regulares são preferidos às batimetrias reais, dado que a reprodução das características requeridas dos elementos que são obtidas a partir da batimetria, são muito mais facilmente controláveis. Na primeira batimetria o fundo, representado na Figura 1, tem cotas variando entre -4 m a 15 m, (as cotas são consideradas positivas para baixo), e é caracterizada pela presença de duas zonas parcialmente imersas, uma na parte esquerda e outra na parte direita do domínio. Este exemplo reproduz de forma simplificada um domínio costeiro potencialmente exposto a um processo de wet/drying envolvendo uma grande parte do domínio, e será usado para testar a capacidade do gerador de malhas MESHGR (Mazzolari, 2013a) em criar elementos anisotrópicos de acordo com a NSF definida com base na batimetria.

A segunda batimetria idealizada é apresentada na Figura 2: corresponde a uma bacia semi-confinada com uma ilha central, ligada ao mar por uma embocadura. A malha gerada com base na geometria 2 será usada numa simulação de maré envolvendo wet/drying.

## 2.2 Geração de Malhas Anisotrópicas.

A introdução de um requisito de anisotropia dentro do processo de geração de malhas está de acordo com o conceito de geração que usa uma estratégia multi-critério (Mazzolari et al., 2012; Mazzolari et al., 2013b), em que a tarefa de concepção da malha é conseguida através de uma série de funções de espaçamento escalares obtidos de parâmetros físicos conhecidos do fenómeno a ser modelado, como a batimetria, as escalas espaciais principais e as características do escoamento. Condicionamentos computacionais podem também ser considerados. O elemento de anisotropia actua como um critério de discretização adicional, que pode ser sobreposto ao critério de isotropia existente. No MESHGR o parâmetro de isotropia, que estabelece o comprimento do lado do elemento pretendido em cada nó da malha de “background”  $i$ , é  $\rho_i$ , enquanto a informação sobre anisotropia é definida com base em três atributos: o coeficiente de anisotropia  $s_i$ , que controla a forma do elemento, e as duas componentes do vector de anisotropia,  $u_i$  e  $v_i$ , que estabelecem a direcção de alongamento. Quanto mais pequeno o coeficiente de anisotropia mais alongados são os elementos. Um valor  $s_i = 1$  define um triângulo equilátero. Uma direcção de alongamento paralela ao eixo dos xx corresponde  $u_i = 1$  e  $v_i = 0$ ; ao contrário, se  $u_i = 0$  e  $v_i = 1$  os elementos são alongados segundo a direcção do eixo dos yy. se  $u_i = v_i$  a direcção de alongamento é o bissector do primeiro e terceiro quadrante.

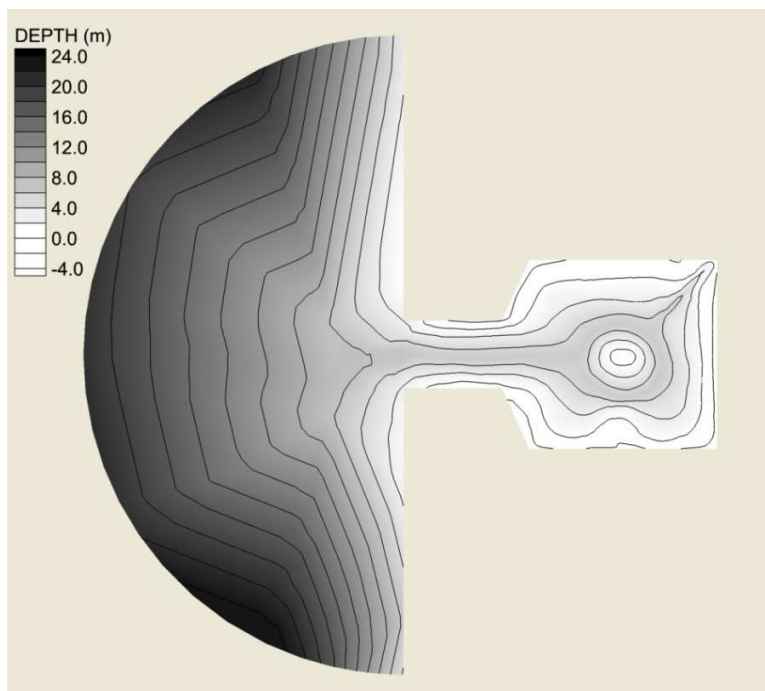


Figura 2. Geometria 2. Batimétricas para o caso de teste “wet/dry”.

### Geometria 1

Para a geometria 1, a malha de background da Figura 3, necessária ao MESHGR para obter os parâmetros mencionados, foi digitalizada manualmente, com 59 nós e 110 elementos.

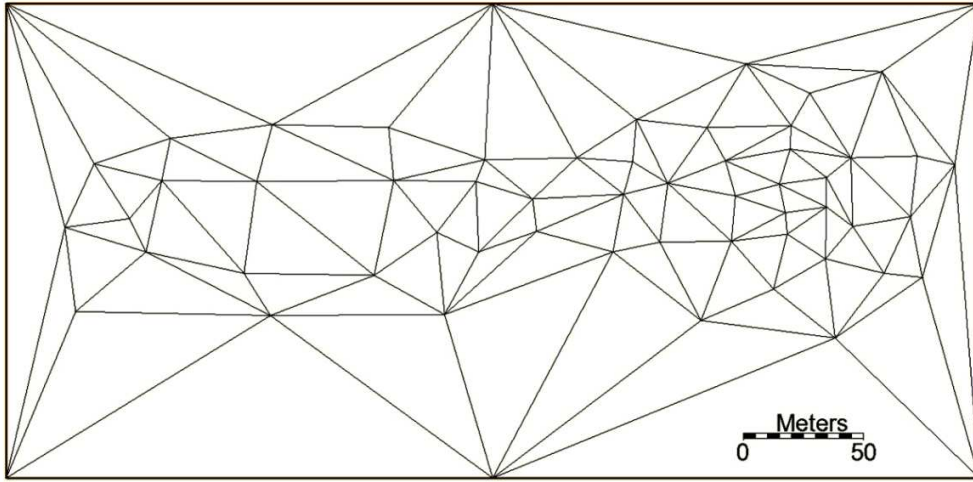


Figura 3. Teste 3. Malha de background. As fronteiras da malha coincidem com as fronteiras do domínio. Zonas de maior refinamento correspondem a áreas de maior curvatura das batimétricas.

Os nós da malha de background, que não correspondem aos pontos do levantamento batimétrico (scatter set), são mais densos onde a curvatura das batimétricas é maior. A função de espaçamento escalar NSF para o cálculo de  $\rho_i$  foi considerada constante e igual a 10 m. Os atributos anisotrópicos  $s_i$ ,  $u_i$  and  $v_i$  são variáveis e precisam de ser calculados de acordo com as funções NSF's que dependem da batimetria:  $s_i$  é considerado proporcional ao inverso do gradiente da batimetria, para que se tenham elementos mais pequenos onde o declive do fundo é maior, e vice versa:

$$s(x, y)_i = \frac{1}{|\nabla h(x, y)_i|} \quad (1)$$

onde  $(x, y)$  são as coordenadas cartesianas do nó  $i$  e  $h$  é a cota do fundo. No SMS (Surface-water Modeling Systems, 2013), que é usado como interface de suporte, a superfície batimétrica é representada por uma função linear interpolada por troços, que pode ser escrita por:

$$h(x, y) = a_j x + b_j y + c_j \quad (2)$$

sendo  $a_j$ ,  $b_j$  e  $c_j$  coeficientes escalares pertencentes ao elemento  $j$  da triangulação. Obtém-se:

$$\nabla h(x, y) = \left( \frac{\partial h}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial h}{\partial y} \hat{j} \right) = a_j \hat{i} + b_j \hat{j} \quad (3)$$

$\hat{i}$  e  $\hat{j}$  são os versores da direcção. Convém ter presente que o gradiente de uma função é um vector perpendicular às isolinhas da função.  $\nabla h$ , representado na Figura 4, mostra, como seria de esperar vectores perpendiculares às batimétricas.

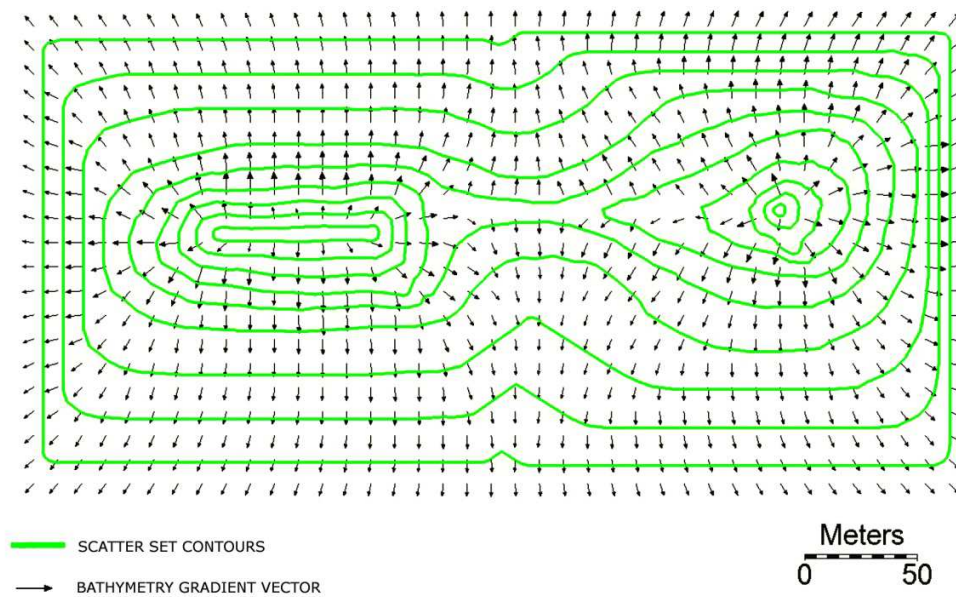
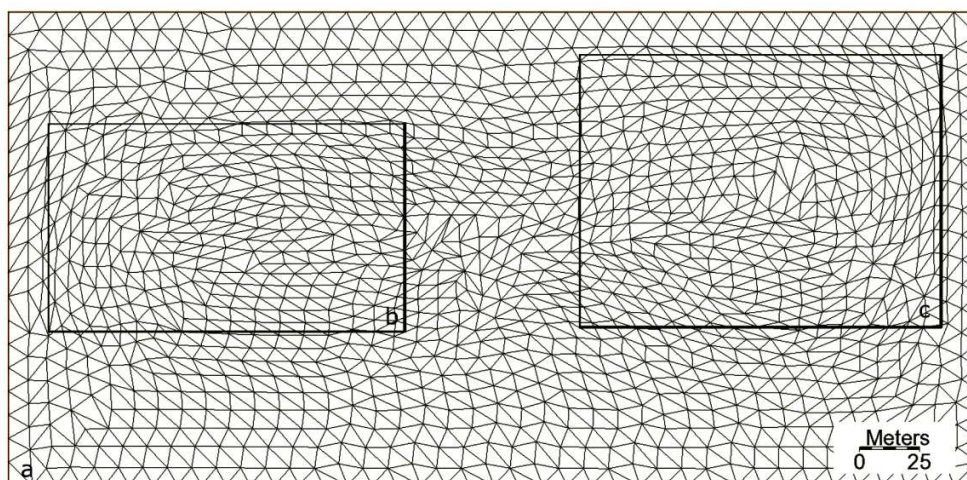


Figura 4. Geometria 1. Vector gradiente da batimetria representados sobre as batimétricas.

Para evitar formas muito distorcidas, os valores de  $|\vec{\nabla}h|^{-1}$  são transformados linearmente entre 0.5 (valor da alongação máxima) e 1 (condição de triângulo equilátero). A direcção de alongação é escolhida na perpendicular ao gradiente  $\vec{\nabla}h$ : consequentemente as duas componentes,  $\nabla h_x$  and  $\nabla h_y$ , são interpoladas na malha de background para obter  $u_i$  e  $v_i$  respectivamente.

Com estas especificações de entrada, a malha Mt1c (Figura 5) é gerada de acordo com a opção de "circulating" (a ordem pela qual o método da frente de avanço escolhe o próximo elemento a ser formado segue a sequência espacial dos segmentos na frente de avanço activa). Mt1c tem 1344 nós e 2566 elementos, e é mostrada antes das operações de pós-processamento para que se veja a posição original dos nós determinada pelas condições anisotrópicas impostas. Nas vistas ampliadas da figura comparam-se a orientação dos elementos com as batimétricas.



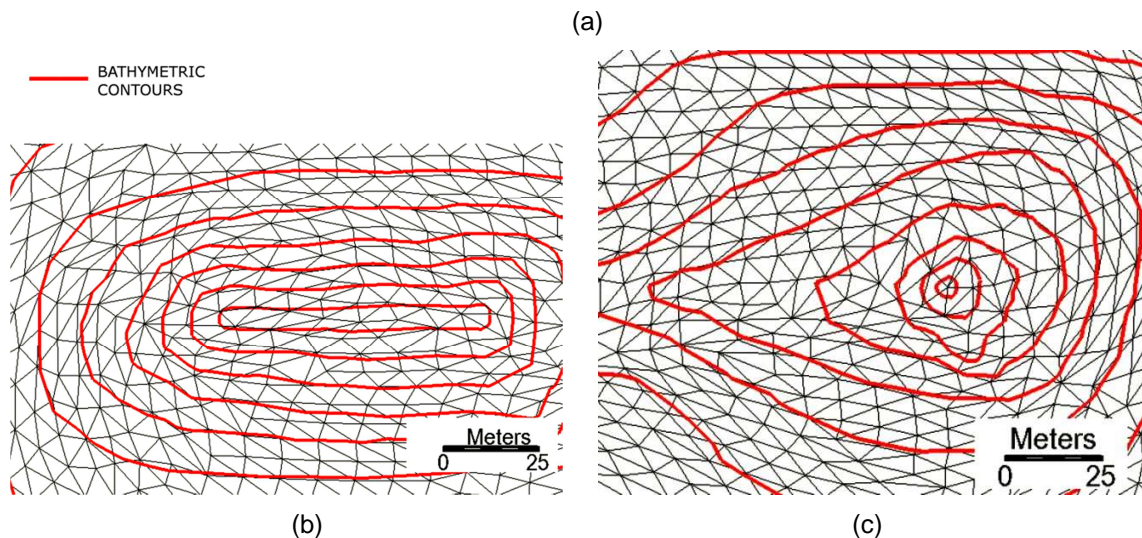


Figura 5. Geometria 1. (a) Malha Mt1c, gerada com a opção “circulating” na frente de avanço e com uma função de espaçamento escalar com o objectivo de obter elementos com 10 m de lado. O alongamento dos elementos é fixado na perpendicular ao gradiente da batimetria. (b) e (c): comparação entre a orientação dos elementos e a batimetria.

Na Figura 5(a) é possível observar que triângulos equiláteros se formam junto às fronteiras do domínio onde o fundo é plano, enquanto formas anisotrópicas aparecem na parte central, em correspondência com os altos gradientes da batimetria. A opção “circulating” no método da frente de avanço produz uma gradação regular das áreas dos elementos e da sua orientação, sem que haja transições bruscas de área ou elementos muito distorcidos. O alongamento dos elementos faz-se em geral segundo as batimétricas quando a curvatura destas é suave, como acontece nas batimétricas exteriores das Figuras 5(b) e 5(c), enquanto para as batimétricas mais interiores a direcção do alongamento passa a ser menos controlada. As limitações em gerar elementos bem orientados em correspondência com curvaturas pronunciadas das batimétricas podem ser ultrapassadas estabelecendo um critério que dependa da curvatura local: elementos mais pequenos são necessários onde o raio de curvatura das batimétricas é menor. Contudo esta opção não foi investigada em mais detalhe neste trabalho.

Para aumentar o nível de controlo sobre a malha final e melhorar a concordância entre a alocação dos elementos e as batimétricas, o posicionamento dos nós da malha de “background” deve ser feitos com critério: mais nós são necessários onde se pretende exercer mais controlo sobre o tamanho, forma e orientação dos elementos, principalmente quando a batimetria é muito irregular.

### Geometria 2

Dois critérios escalares são aplicados à geometria 2 para o tamanho dos elementos da malha: o primeiro é o inverso do gradiente da batimetria, de acordo com a relação:

$$\Delta x_1(x, y) = \frac{1}{|\nabla h(x, y)|} \quad (4)$$

$\Delta x_1$  representa a dimensão do elemento pretendido de acordo com o critério 1. O segundo critério tem como objectivo aumentar a densidade da malha nos locais do domínio onde a profundidade é próxima de zero:

$$\Delta x_2(x, y) = \max\{d|h(x, y)|; 10\} \quad (5)$$

onde  $|h(x, y)|$  é o valor absoluto da profundidade e  $d = 10$  um coeficiente de proporcionalidade.  $\Delta x_2(x, y)$  impõe um limite inferior de 10 m ao tamanho dos elementos para evitar uma malha muito

densa na zona onde a profundidade se aproxima de zero. A função de espaçamento escalar final NSF é o menor dos valores  $\Delta x_1$  e  $\Delta x_2$ , e é interpolada linearmente para os nós da malha de background para a determinação de  $\rho_i$ . Os coeficientes de anisotropia no MESHGR são calculados de acordo com o procedimento adoptado para a geometria 1. O valor de  $s_i$  pode variar entre 0.4 e 1. A malha obtida, Mt2AN (Figura 6) tem 10012 nós e 19649 elementos. Vistas mais detalhadas demonstram como a configuração dos elementos se tende alinhar com as batimétricas. Uma segunda malha, Mt2IS (que não se apresenta), foi gerada com a mesma NSF da Mt2AN, obtida como o menor valor entre  $\Delta x_1$  e  $\Delta x_2$  e para condições isotrópicas ( $s_i = 1$ ), resultando em 5706 nós e 11061 elementos. Importa notar a redução que se obteve em quase 50% no número de nós quando se passa de condições anisotrópicas para isotrópicas.

### 2.3 Modelo Hidrodinâmico

Foi realizada uma simulação hidrodinâmica com condições wet/drying usando o modelo ADCIRC-2DDI (Luettich et al., 1992; Luettich and Westerink, 2004), que é um modelo integrado na vertical para resolução das equações da hidrodinâmica de águas pouco profundas, com a aproximação de uma distribuição de pressões hidrostática. As equações em coordenadas esféricas são:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \left( \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{\partial (VH \cos \Phi)}{\partial \Phi} \right) / (R \cos \Phi) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \Phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \Phi} - \left( \frac{U \tan \Phi}{R} + f \right) V = - \frac{g}{R \cos \Phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\xi - \alpha \eta) + \frac{v_T}{H} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{\partial UH}{\partial \Phi} \right) - \tau_* U \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \Phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \Phi} + \left( \frac{U \tan \Phi}{R} + f \right) U = - \frac{g}{R} \frac{\partial}{\partial \Phi} (\xi - \alpha \eta) + \frac{v_T}{H} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left( \frac{\partial VH}{\partial \lambda} + \frac{\partial VH}{\partial \Phi} \right) - \tau_* V \quad (8)$$

onde  $\xi$  é a cota da superfície livre em relação ao Geóide,  $H = \xi + h$  a altura de água, onde  $h$  é a profundidade em relação ao Geóide,  $\lambda$  e  $\Phi$  a latitude e longitude,  $U$  e  $V$  as componentes da velocidade média na horizontal,  $R$  o raio da Terra,  $g$  a aceleração da gravidade,  $f$  o parâmetro de Coriolis,  $\eta$  o potencial Newtoniano de equilíbrio de maré,  $\alpha$  o factor de elasticidade da terra,  $v_T$  a viscosidade turbulenta horizontal,  $\tau_*$  o módulo da tensão de arrastamento no fundo, que no presente caso é proporcional à velocidade média de acordo com uma formulação linear:

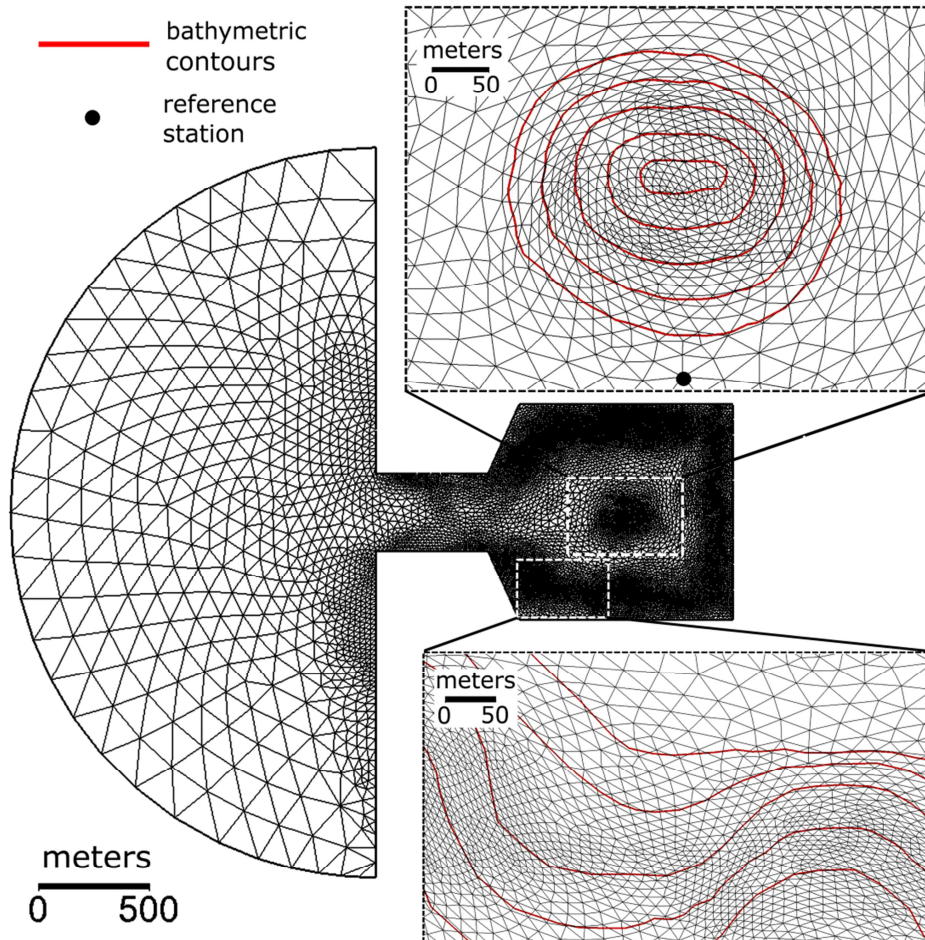


Figura 6. Geometria 2. Malha Mt2AN with the indication of the reference station location. Close-up views of the mesh compare the element alignment with the isobaths.

$$\frac{\tau_{*x}}{\rho_0} = C_f U \quad (9)$$

onde  $\tau_{*x}$  é a tensão de arrastamento no fundo na direcção  $xx$ ,  $\rho_0$  a massa volúmica do fluido e  $C_f$  um coeficiente de arrastamento linear, que é constante e foi fixado em 0.0025. Uma variação da superfície livre periódica, com uma amplitude de 1 m e um período semi-diurno de 12 horas e 25 min, é aplicada na fronteira oceânica de ambas as malhas Mt2AN e Mt2IS, durante 3 dias e um período de rampa de 1 dia. Um passo de cálculo temporal de 0.5 s foi adoptado inicialmente.

O algoritmo the wet/dry (Luettich and Westerink, 1999) está activo, por forma a calcular a extensão da area inundada numa base elemento a elemento, de acordo com os valores locais da cota da água e da velocidade do escoamento (Blain et al., 2010).

### 3. Resultados

A simulação com a malha isotrópica Mt2IS, para a configuração do modelo apresentado no parágrafo 2.3, foi completada com sucesso. Para a malha anisotrópica, o mesmo conjunto de parâmetros usados no caso isotrópico deu origem a instabilidades numéricas devido à presença de alguns elementos muito alongados. Aplicou-se então um amaciamento de Laplace a toda a malha

para relaxar a discretização original anisotrópica e o passo de cálculo foi baixado para 0.25 s de modo a obter uma simulação estável. Tendo em conta que a malha Mt2AN tem quase o dobro dos nós e elementos da malha Mt2IS, o tempo de cálculo para concluir a simulação em condições anisotrópicas é quase 4 vezes o do teste isotrópico.

As séries temporais do nível da água para as malhas Mt2AN e Mt2IS na estação de referência assinalada na Figure 6, estão representadas na Figure 7. Os níveis de água para condições isotrópicas e anisotrópicas coincidem, demonstrando que, com a presente configuração do modelo, a convergência dos níveis de água foi obtida; nesta situação, a introdução de um factor de alongamento no processo de geração da malha não influencia os níveis da água..

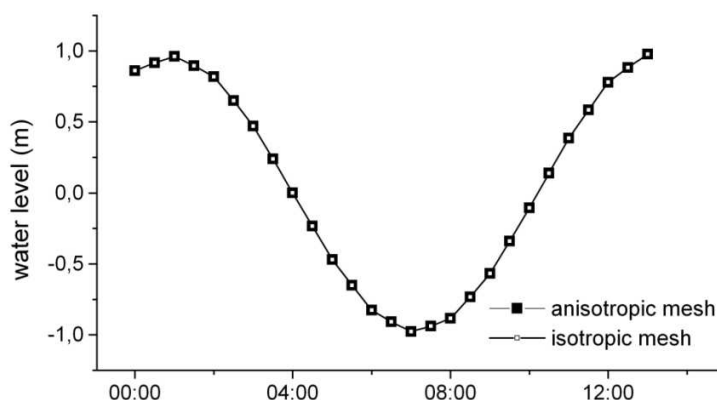


Figura 8. Nível da água em função do tempo na estação de referência.

Na Figura 8 compara-se a posição da frente de inundação para a malha Mt2AN com a posição da linha de nível do terreno mais próxima: a frente parece reduzir o efeito dos dentes de serra “saw tooth effect” que a frente de inundação apresenta frequentemente nestes casos. Acresce que, a concordância substancial que existe entre os limites da área de inundação simulada e a posição da batimétrica permite responder afirmativamente a uma das hipóteses principais deste trabalho: o alongamento dos elementos na direcção das curvas de nível do terreno fornece uma visualização realística da extensão da área de inundação, tornando mais similar ao que será na realidade. Esta propriedade pode reduzir a incerteza que resulta da discretização do modelo digital do terreno (DEM) durante o processo de modelação.

Se as linhas que representam as frentes de inundação das malhas Mt2AN e Mt2IS forem sobrepostas (Figura 9), pode afirmar-se que a frente de inundação da malha Mt2AN tem um andamento mais regular do que o da malha Mt2IS. Contudo, devido ao bom grau de refinamento obtido na zona que cobre e descobre e à batimetria relativamente simples e regular, a distância relativa das frentes de inundação está dentro do tamanho dos elementos da zona, um facto que sugere que a convergência foi obtida, para as duas discretizações propostas, também no cálculo da extensão da área inundada. Se esta análise for feita para sucessivas posições em cada passo de cálculo temporal, a evolução das frentes de inundação é coerente entre as duas malhas durante todo o ciclo de maré, demonstrando mais uma vez que ambas as malhas fornecem o mesmo nível de precisão.

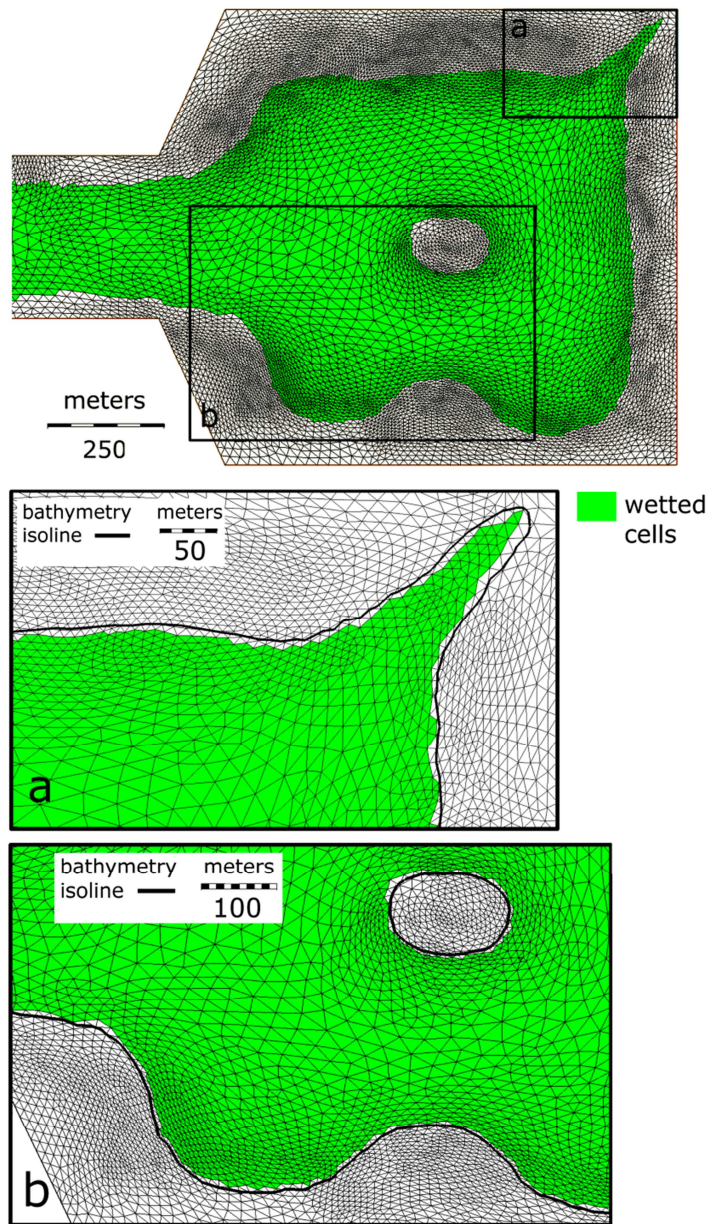


Figura 8. Frente de inundação para a malha Mt2AN. As ampliações (a) e (b) comparam a posição da frente de inundação com a da batimétrica próxima.

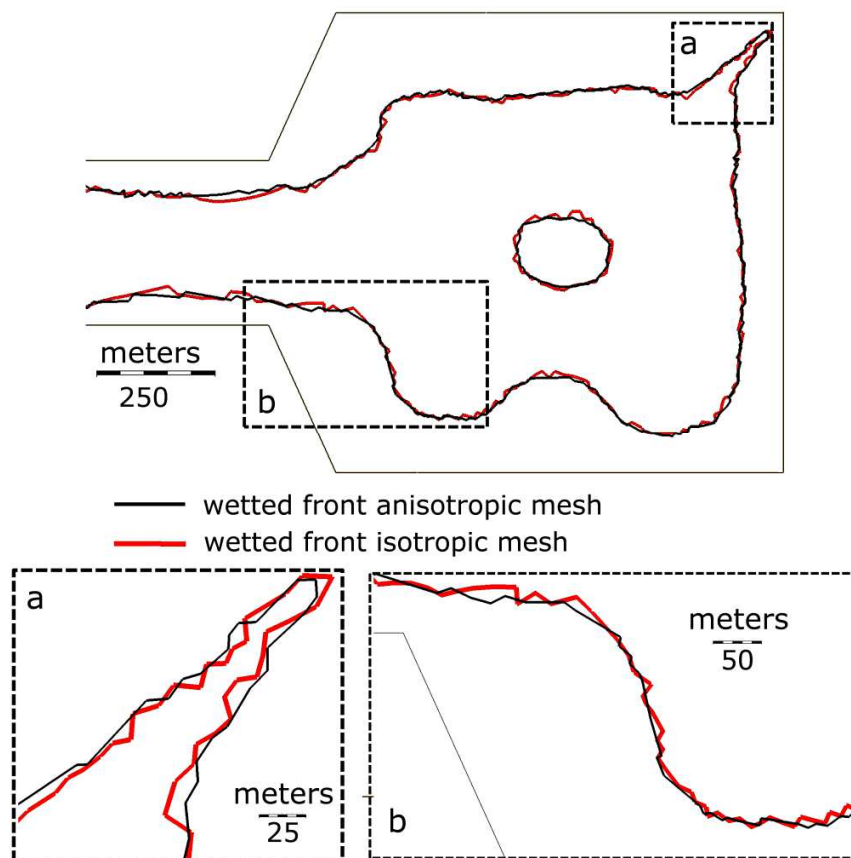


Figura 10. Comparação entre a posição da frente de avanço para a malhas isotrópicas e anisotrópicas, no mesmo tempo de cálculo temporal durante a simulação.

#### 4. Conclusões

Este trabalho teve por objectivo a identificação de novas geometrias para as malhas que permitam uma representação precisa da frente molhada em estudos de inundação. Muito embora os testes sejam limitados a geometrias costeiras idealizadas, pode concluir-se que o alongamento dos elementos da malha na direcção das batimétricas fornece uma visão mais realista da frente de inundação. A presença de elementos distorcidos na malha não influencia o cálculo do nível da água. Contudo, se a malha isotrópica tiver já uma discretização que permita a resolução das principais escalas da hidrodinâmica e da batimetria, a introdução da orientação anisotrópica dos elementos não fornece um melhoramento importante no cálculo da área de inundação ou dos níveis de água. Acresce que, as condições anisotrópicas impõem um custo computacional maior como consequência do maior número de nós presentes na malha de cálculo e do passo de cálculo temporal mais pequeno para que se tenha uma simulação estável.

#### Referências

- Blain, C. A., Linzell, R. S., Chu, P., Massey, C., 2010. Validation test report for the Advanced CIRCulation Model (ADCIRC) v45.11. NRL Memorandum Report, NRL/MR/7320/10-9205, Naval Research Laboratory, Washington, DC.
- Bossen, F. J., Heckbert, P. S., 1996. A pliant method for anisotropic mesh generation. 5th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, 63-76.

- Borouchaki, H., George, P. L., Hecht, F., Laug, P., Saltel, E., 1997a. Delaunay mesh generation governed by metric specifications. Part I: Algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design* 25, 61-83.
- Borouchaki, H., George, P. L., Mohammadi, B., 1997b. Delaunay mesh generation governed by metric specifications. Part II: Application examples. *Finite Elements in Analysis and Design* 25, 85-109.
- Castro-Diaz, M. J., Hecht, F., 1995. Anisotropic surface mesh generation. INRIA Research Report RR-2672.
- Cobby, D. M., Mason, D. C., Horritt, M. S., Bates, P. D., 2003. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes* 17, 1979-2000.
- Cougny, H. L. D., Shepard, M. S., 1999. Parallel unstructured grid generation. In: *Handbook of Grid Generation*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 24-1 et seq.
- Donnel, B. P., Letter, J. V., McAnally, W. H., et al., 2006. Users guide to RMA2 WES Version 4.5. U.S. Army Engineering Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory.
- Falcão, A.P., Mazzolari, A., Gonçalves, A.B., Araújo, M.A.V.C, Trigo-Teixeira, A. 2013. Influence of elevation modelling on hydrodynamic simulations of a tidally-dominated estuary. *Journal of Hydrology*. In press.
- Garimella, R. V., Shephard, M. S., 2000. Boundary layer mesh generation for viscous flow simulations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 49, 193-218.
- Hagen, S. C., Westerink, J. J., Kolar, R. L., 2000. One-dimensional finite element grids based on a localized truncation error analysis. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32, 241-262.
- Hagen, S. C., Westerink, J. J., Kolar, R. L., Horstmann, O., 2001. Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 35, 669-686.
- Hasan, G. M. J., van Maren, D. S., Cheong, H. F., 2012. Improving hydrodynamic modeling of an estuary in a mixed tidal regime by grid re\_ning and aligning. *Ocean Dynamics* 62, 395-409.
- Hassan, O., Probert, E. J., Morgan, K., Peraire, J., 1995. Mesh generation and adaptivity for the solution of compressible viscous high speed flows. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 38, 1123-1148.
- Jansen, K. E., Shephard, M. S., Beall, M. W., 2001. On anisotropic mesh generation and quality control in complex flow problems. 10th International Meshing Roundtable, Newport Beach, California. Sandia National Laboratories, 341-349.
- Luettich, R. A. J., Westerink, J. J., Sche\_ner, N. W., 1992. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Technical report DRP-92-6. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.
- Luettich, R. A., Westerink, J. J., 1999. Elemental wetting and drying in the ADCIRC hydrodynamic model: upgrades and documentation for ADCIRC version 34.XX. Contractors Report, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., March 1999, 8 p.
- Luettich, R. A., Westerink, J. J., 2004. Formulation and numerical implementation of the 2D/ 3D ADCIRC finite element model version 44.XX.

- Mazzolari, A., Trigo-Teixeira, A., Araújo, M.A.V.C. 2012. Two dimensional unstructured mesh generation for shallow water models based on the multi-criteria strategy. In: Proceedings of the II Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Lisbon, 329-332.
- Mazzolari, A. 2013a. Two dimensional unstructured mesh generation applied to shallow water models. PhD thesis. Instituto Superior Tecnico, Technical University of Lisbon.
- Mazzolari, A., Trigo-Teixeira, A., Araújo, M.A.V.C. 2013b. A multi-criteria meshing method applied to a shallow water model. In: Proceedings of the 12th International Coastal Symposium, Plymouth, April 2013. Journal of Coastal Research, SI 65, 1170-1175.
- Medeiros, S.C., Hagen, S.C., 2013. Review of wetting and drying algorithms for numerical tidal flow models. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 71, 473–487.
- Merwade, V., Oliveira, F., Arabi, M., Edleman, S., 2008b. Uncertainty in flood inundation mapping: 632 currents issues and future directions. Journal of Hydrologic Engineering, 7, 608–620.
- Owen, S. J., 1998. A survey of unstructured mesh generation technology. Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, 239-267.
- Pirzadeh, S., 1994. Viscous unstructured three-dimensional grids by the advancing layers method. In: In proceedings of the 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-94-0417, Reno, NV, January 1994.
- Surface-water Modeling System, 2013. SMS User Manual 11.1. Accessed 10.2.2013.
- Vallet, M. G., Hecht, F., Mantel, B., 1991. Anisotropic control of mesh generation based upon Voronoi type methods. In: Numerical Grid Generation in Computational Fluid Dynamics and Related Fields. A. S. Arcilla, J. Häuser, P. R. Eiseman and J. F. Thompson (Eds.), Elsevier Science Publisher B.V. Amsterdam, 93-103.