

Relatório de Pesquisa

Título do projeto de pesquisa: Desenvolvimento de código de CFD para cálculo de separação de cargas

Bolsista: Cassiano Tecchio

Orientador: Eng. Ms. Edson Basso

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2013 a Julho de 2014

Resumo

No presente projeto de pesquisa foram criadas rotinas numéricas de suavização de malhas para cálculo de alijamento de cargas de aeronaves. Estas rotinas têm como objetivo melhorar a qualidade dos elementos de uma malha computacional não estruturada. Inicialmente, o método de suavização laplaciana foi utilizado em uma malha triangular onde os seus nós internos foram suavizados. Foram adotadas três métricas de qualidade de triângulos: ângulo mínimo, razão de raios e razão média. Os resultados mostram que a suavização laplaciana bidimensional é capaz de aumentar a qualidade global de uma malha, além de torná-la mais homogênea, independente da métrica adotada. Posteriormente, um método de otimização híbrido foi desenvolvido a fim de manipular uma malha de múltiplos blocos tetraédrica num contexto tridimensional não-estruturado.

1. Introdução

Com o intuito de reduzir o tempo gasto em geração de malhas computacionais, uma nova tecnologia está sendo estudada, designada por malhas *Chimera*. *Chimera* na mitologia grega é a figura de um mostro onde seu corpo é formado por diferentes partes de vários animais [1]. Em CFD, malhas *Chimera* formam o domínio de simulação por meio da união das malhas dos elementos sólidos [1]. Tomando uma geração de malha isolada para cada elemento, faz-se necessário realizar a conectividade entre as diversas malhas a fim de se obter uma única malha final. A região de conectividade entre as malhas é uma região que deve conter elementos de alta qualidade e que seja de transição suave entre as malhas, ou seja, não tenha

elementos distorcidos, os quais podem acarretar erros para o cálculo do escoamento naquela região. Além disso, sabe-se que ensaios que envolvem alijamento de cargas são caros e requerem grande infraestrutura e equipe especializada. Uma maneira para tratar problemas de simulação não-estacionária é a utilização de malhas *Chimera*. Para tanto, um código de suavização de malhas foi programado a fim de realocar nós que formem elementos distorcidos. Com a programação do código de suavização para malhas *Chimera*, simulações dinâmicas podem ser realizadas com economia de tempo considerável, tendo em vista que a presença de tal ferramenta não demandará a construção de uma nova malha para cada elemento para cada passo de tempo. Apenas uma realocação nodal será realizada do tempo t para o tempo $t + \Delta t$ na malha conectividade, permitindo simulação dinâmica mais eficiente. Portanto, o objetivo do trabalho de iniciação científica se concentra na construção de rotinas computacionais capazes de realocarem nós de volumes distorcidos a fim de que erros no cálculo do escoamento sejam minimizados e análises de corpos com movimentos relativos sejam realizadas de maneira rápida.

2. Material e Métodos

2.1 Suavização Laplaciana Bidimensional e Tridimensional

Diversas abordagens e métodos têm sido desenvolvidos a fim de aumentar a qualidade de malhas computacionais [4]. Algoritmos de otimização de malhas podem ser separados em dois grupos: locais ou globais. Algoritmos de suavização local são geralmente utilizados para uma rápida otimização da qualidade da malha.

O método mais conhecido de suavização é a suavização Laplaciana simples, o qual move cada vértice para o centroide da figura determinada pelos nós circundantes. Esse método é computacionalmente barato, no entanto, não possui nenhum mecanismo que garante o aumento da qualidade dos elementos da malha. Por outro lado, um aumento da qualidade global da malha é verificado para malhas bidimensionais. A equação associada à realocação nodal para malhas bidimensionais pode ser expressa da seguinte forma:

$$x_i = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^M x_j ; \quad (1)$$

onde M é o número total de nós que se conectam com o nó i e x_i são as coordenadas espaciais de cada vértice. Não existe criação ou remoção de nenhum nó da malha, dessa forma, não há alteração topológica da malha.

Sob um contexto de malhas de múltiplos blocos, adota-se uma analogia das arestas dos elementos com molas. As arestas dos tetraedros funcionam como molas e são relaxadas no tempo usando um esquema de passo no tempo explícito, até um equilíbrio de forças ser estabelecido [2]. A equação associada à realocação nodal para malhas tridimensionais é dada pela seguinte expressão [2]:

$$\Delta x_i = \Delta t \frac{1}{ns_i} c \sum_{j=1}^{ns_i} (x_j - x_i); \quad (3)$$

onde ns_i representa o total de pontos no entorno do nó i , c denota a constante elástica da mola, x_i a coordenada do ponto, Δt é o parâmetro de relaxamento e Δx_i é a variação da posição do nó i entre dois passos de tempo consecutivos.

2.2 Métricas de Qualidade de forma de triângulos e tetraedros

Seja t um triângulo com vértices v_1 , v_2 e v_3 . Sendo a a área do triângulo t e $l_{ij} = |v_j - v_i|$, $1 \leq i < j \leq 3$ sendo os comprimentos das arestas de t e α_i sendo o ângulo interno associado ao vértice i . A métrica de forma $\sigma_{\min}(t)$ é definida como sendo o mínimo valor de σ_i , $i = 1, 2, 3$ onde $\sigma_i = \sin^2(\alpha_i)$. De forma a normalizar a métrica de qualidade $\sigma_{\min}(t)$, adota-se a relação $\sigma(t) = (4/3)\sigma_{\min}(t)$ [10]. A métrica de forma de razão de raios $\rho(t)$ é definida como sendo a razão entre dois valores de raio inscrito, $2r_{in}$, ao triângulo t e um valor de raio circunscrito, r_{circ} , a t . A métrica de forma $\mu(t)$, denominada por razão média, é uma medida da taxa de deformação de uma circunferência inscrita ao triângulo equilátero de área a quando transformada em uma elipse inscrita em t . As métricas apresentadas acima, $\sigma_{\min}(t)$, $\rho(t)$ e

$\mu(t)$ são normalizadas de forma que somente valores entre 0 e 1 possam ser atribuídos aos mesmos, incluindo 0 e 1. No caso de valor zero, tem-se um triângulo com seus nós coplanares e para valor um tem-se um triângulo equilátero. O conceito geométrico de cada métrica é mostrado pela figura a seguir.

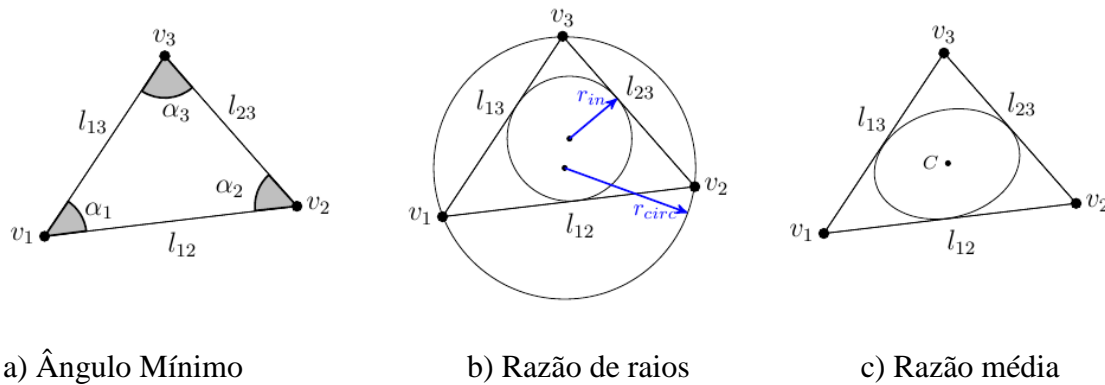


Figura 1. Métricas de qualidade de forma para triângulos de ângulo mínimo, razão de raios e razão média.

Seja T um tetraedro com vértices P_1, P_2, P_3 e P_4 . Sendo V o volume do tetraedro T e $L_{ij} = |P_j - P_i|$, $1 \leq i < j \leq 4$ sendo os comprimentos das arestas de T e θ_i sendo o ângulo interno associado ao vértice i . A métrica de forma $\sigma_{\min}(T)$ é definida como sendo o mínimo valor de σ_i , $i = 1, 2, 3, 4$ onde $\sigma_i = \sin(\theta_i / 2)$. De forma a normalizar a métrica de qualidade $\sigma_{\min}(T)$, adota-se a relação $\sigma(T) = (9 / \sqrt{6}) \sigma_{\min}(T)$. A métrica de forma de razão de raios $\rho(T)$ é definida como sendo a razão entre três valores de raio inscrito, $3r_{in}$, ao tetraedro T e um valor de raio circunscrito, r_{circ} , a T . A métrica de forma $\mu(T)$, denominada por razão média, é uma medida da taxa de deformação de uma esfera inscrita a um tetraedro regular de volume V quando transformada num elipsoide inscrito a T . As métricas apresentadas acima, $\sigma_{\min}(T)$, $\rho(T)$ e $\mu(T)$ são normalizadas de forma que somente valores entre 0 e 1 possam ser atribuídos aos mesmos, incluindo 0 e 1. No caso de valor zero, tem-se um tetraedro com seus nós coplanares e para valor um tem-se um tetraedro regular. O conceito geométrico de cada métrica é mostrado pela figura a seguir.

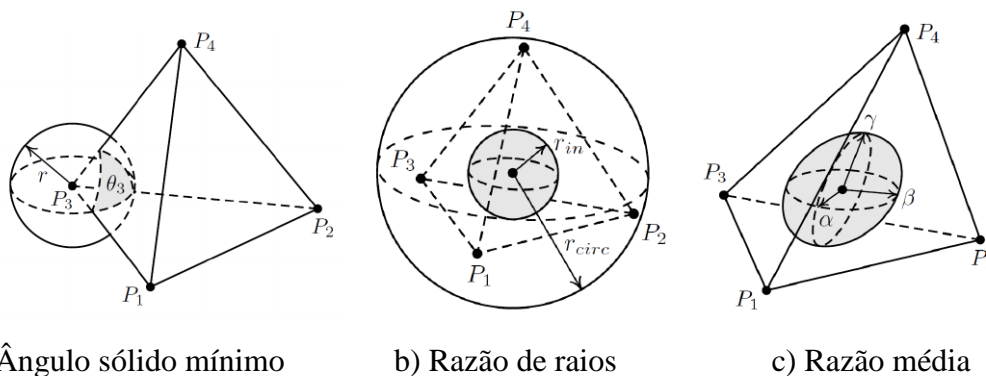


Figura 2. Métricas de qualidade de forma para tetraedros de ângulo sólido mínimo, razão de raios e razão média.

2.3 Método de Otimização Proposto

Para malhas tetraédricas, a presença de elementos distorcidos ou de baixa qualidade torna o problema de elemento geometricamente inválido em processos de otimização de malhas mais severo [13]. A fim de evitar a criação de elemento inválido em aplicações de otimização de malhas envolvendo suavização Laplaciana, um algoritmo híbrido baseado em um acoplamento entre alteração topológica local e suavização Laplaciana é apresentado neste trabalho. A estrutura geral de funcionamento do código é ilustrada pela Fig. 3 em forma de diagrama de blocos. Inicialmente o algoritmo calcula a qualidade da submalha inicial. A próxima etapa do algoritmo está relacionada com a identificação dos elementos distorcidos. Como um elemento padrão, adota-se que um elemento com qualidade inferior à 0.3, mensurada através da métrica de razão raios, é classificado como sendo distorcido. Dessa forma, o algoritmo encontra n elementos distorcidos presentes na submalha em análise e os armazena em uma lista. A terceira etapa contempla o cálculo dos seis ângulos de diedro do elemento T_i da lista.. Com o conhecimento dos ângulos de diedro associados à T_i , o algoritmo exclui da submalha alguns elementos selecionados da vizinhança de T_i , incluindo o elemento T_i e criando assim um poliedro Υ no interior da malha, o qual representa uma região do domínio computacional sem elementos. Posteriormente, a região do poliedro Υ no interior da malha é preenchida com elementos tetraédricos através de um algoritmo de reconstrução baseado em uma adaptação do método de avanço de fronteira. Após a reconstrução, verifica-se se o elemento em análise, T_i , é o último da lista. Caso não seja, o

algoritmo busca o próximo elemento da lista, T_{i+1} , e refaz o processo a partir do cálculo do ângulo de diedro. Por outro lado, caso o elemento em análise seja o último da lista, $T_i = T_n$, o código segue para a suavização Laplaciana tridimensional e, por fim, realiza o cálculo da qualidade da submalha final.

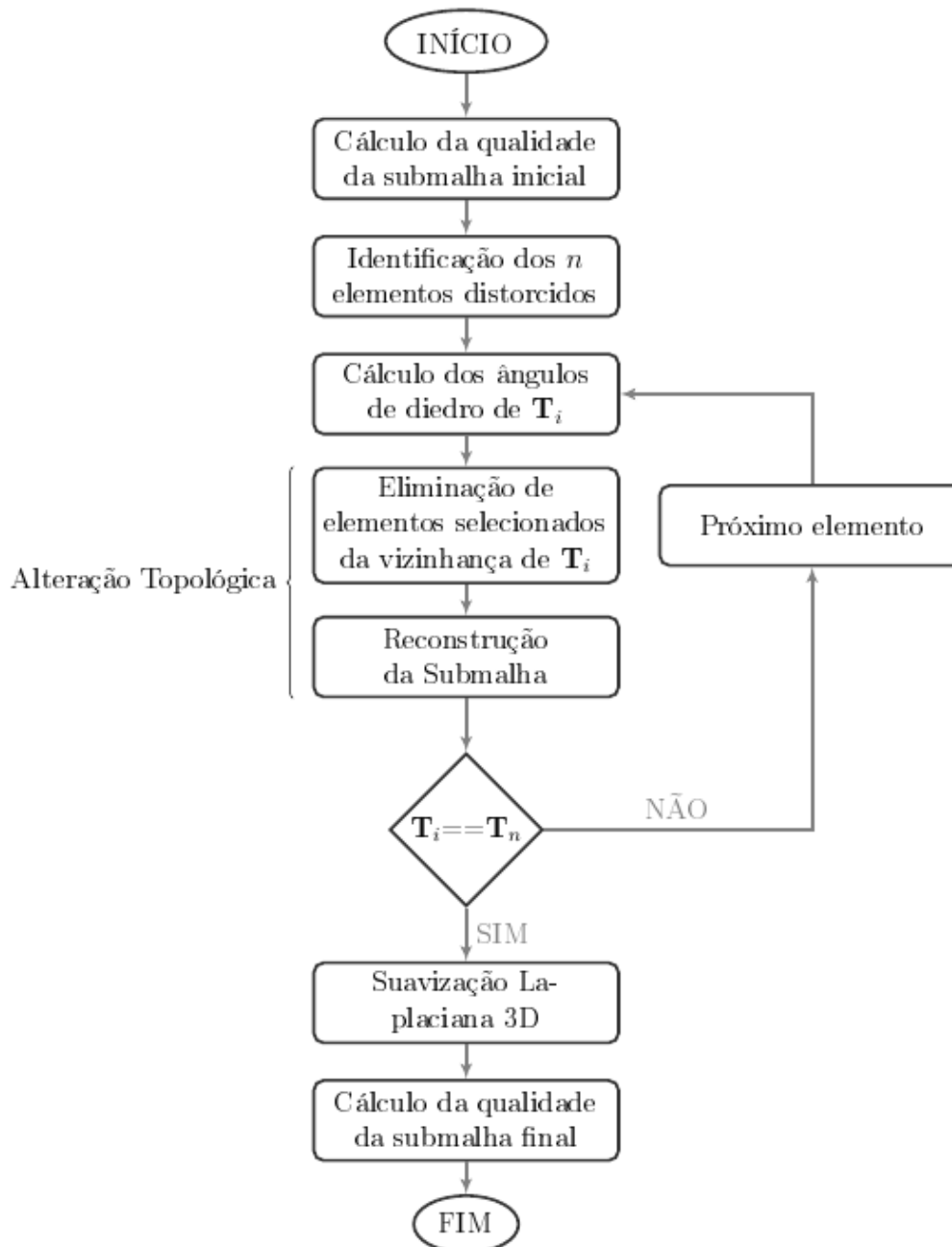
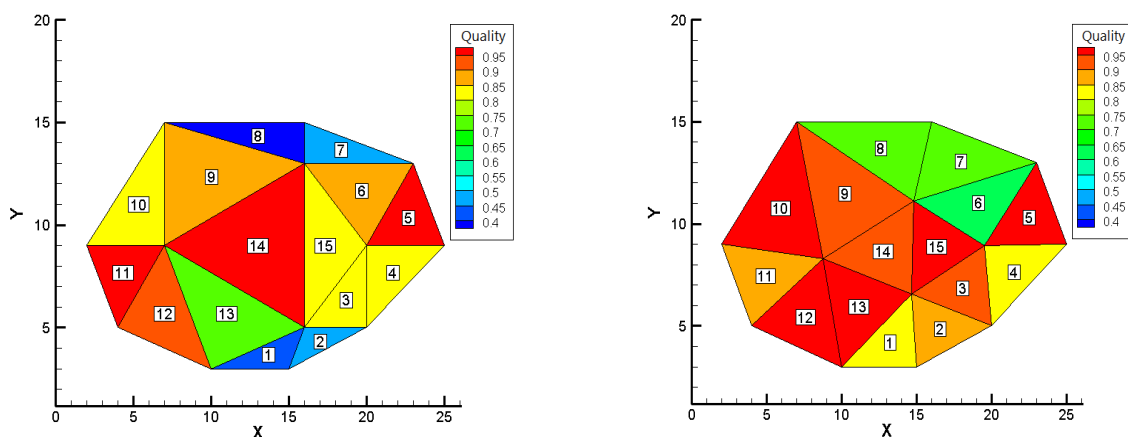


Figura 3. Diagrama de blocos do algoritmo híbrido baseado em acoplamento entre suavização Laplaciana e alteração topológica local para malhas tetraédricas de múltiplos blocos não-estruturadas.

3. Resultados

3.1 Otimização Bidimensional

A malha bidimensional não estruturada é mostrada na Fig. 4, a qual é composta por 15 elementos e 13 vértices. Somente os 4 nós internos são realocados. A Fig. 4 a) mostra a qualidade inicial da malha mensurada pela qualidade de razão de raios e a Fig. 4 b) evidencia, após 6 iterações, a qualidade da malha após aplicação do processo de suavização Laplaciana. A Fig. 4 evidencia que alguns elementos têm sua qualidade diminuída, tais como elementos 4 e 16. No entanto, a tabela 2 mostra que um aumento da qualidade global da malha foi alcançado por meio da realocação nodal. Além do mais, os desvios padrões associados às métricas de qualidade foram diminuídos, o que pode ser traduzido como uma malha final mais homogênea em relação à inicial. Por fim, além do aumento da qualidade média e da diminuição do desvio padrão, evidencia-se um aumento da qualidade associada ao elemento de menor qualidade após a suavização laplaciana.



a) Qualidade da malha antes da suavização b) Qualidade da malha após suavização

Figura 4. Qualidade da malha mensurada pela métrica de razão de raios.

Tabela 1. Estatísticas relacionadas à qualidade da malha antes de suavização laplaciana.

	Min	Max	Média	Desvio Padrão
Ângulo mínimo	0,06275	0,85333	0,51105	0,26779
Razão de raios	0,38624	0,98885	0,75938	0,21618
Razão média	0,36679	0,98974	0,78438	0,20798

Tabela 2. Estatísticas relacionadas à qualidade da malha após suavização laplaciana.

	Min	Max	Média	Desvio Padrão
Ângulo mínimo	0,26229	0,88162	0,61483	0,1979
Razão de raios	0,64743	0,98778	0,87648	0,11063
Razão média	0,69541	0,98903	0,88866	0,098

3.1 Otimização Tridimensional

A malha de múltiplos blocos tridimensional não estruturada utilizada neste trabalho consiste em um cubo com uma esfera em seu interior, onde a superposição das malhas foi realizada. A figura abaixo mostra a qualidade inicial dos elementos da malha teste.

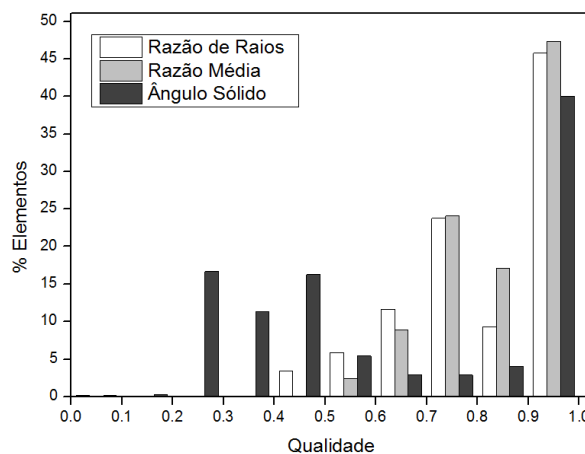


Figura 4. Qualidade dos elementos da malha para razão de raios, razão média e ângulo sólido.

Tabela 3. Valores de máximos, mínimos, média e desvio padrão para métricas de qualidade para tetraedros antes do processo de otimização.

	Min	Max	Média	Desvio Padrão
Razão de Raios	4,40E-06	0,98037	0,81331	0,14944
Razão Média	6,17E-04	0,98174	0,84625	0,1172
Ângulo Sólido	1,17E-05	0,95096	0,64162	0,28583

Tabela 4. Distribuição dos elementos para cada intervalo de qualidade para a métrica de razão de raios antes do processo de otimização.

Qualidade	0-0,1	0,1-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
Num. Elem.	3	0	76	130	258	526	207	1014

Apesar da qualidade média dos elementos ser de 0,81331 pelo critério de razão de raios, a Tab. 2 mostra a presença de três elementos com qualidade entre 0 e 0,1. Esses elementos são elementos potenciais para criação de elementos geometricamente inválidos na aplicação de suavização Laplaciana e, portanto, devem ser excluídos da malha. A Tab. 5 mostra a distribuição dos elementos para cada intervalo de qualidade para a métrica de razão de raios após o processo de alteração topológica.

Tabela 5. Distribuição dos elementos para cada intervalo de qualidade para a métrica de razão de raios após alteração topológica.

Qualidade	0-0,1	0,1-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
Num. Elem.	0	0	76	130	258	526	207	1014

Nota-se pela Tab. 5, a qual mostra a distribuição de elementos para cada intervalo de qualidade para a métrica de razão de raios, que os três elementos de qualidade inferior a 0,3 foram eliminados da malha e não houve variação da distribuição dos demais elementos em termos de qualidade.

Tabela 6. Valores de máximos, mínimos, média e desvio padrão para métricas de qualidade para tetraedros após alteração topológica e suavização laplaciana.

	Min	Max	Média	Desvio Padrão
Razão de Raios	0,3593	0,9891	0,8234	0,1321
Razão Média	0,4765	0,9909	0,8581	0,1010
Ângulo Sólido	0,129	0,9506	0,6295	0,2412

A tabela 6 mostra os valores de máximos, mínimos, média e desvio padrão para as métricas de qualidade de razão de raios, razão média e ângulo sólido após cinco iterações. Nota-se um pequeno aumento da qualidade média dos elementos para razão de raios e razão média devido à alta qualidade inicial da malha. No entanto, o valor de qualidade mínima está acima da qualidade de referência de 0,3 para razão de raios. Com isso, elementos fontes de erro associados à baixa qualidade de discretização espacial são eliminados do domínio de cálculo.

4. Conclusões

Inicialmente, o método de suavização Laplaciana foi implementado em uma malha bidimensional a fim de avaliar sua eficácia e efetividade em realocar nós para aumento da qualidade geral de uma malha triangular não-estruturada. Constatou-se que, embora alguns elementos tenham suas qualidades individuais diminuídas, o método de suavização Laplaciana é capaz de elevar a qualidade média geral de uma malha triangular não-estruturada bidimensional. Verifica-se, também, a efetividade e eficácia do método de suavização Laplaciana bidimensional para malhas triangulares não-estruturadas, uma vez que a qualidade média geral é aumentada com convergência numérica utilizando apenas seis iterações. Posteriormente, apresentou-se um algoritmo híbrido de otimização de malhas de múltiplos blocos não-estruturadas tridimensionais baseado em um acoplamento entre a suavização Laplaciana e uma alteração topológica local. Buscou-se avaliar a sua efetividade e eficácia por meio de um caso teste de uma malha constituída de dois blocos: uma esfera e um cubo. Observou-se que o método age de maneira eficaz na seleção dos elementos distorcidos presentes na submalha, eliminando-os e reconstruindo a malha de forma a respeitar os critérios de validade geométrica. Ressalta-se a eficácia do método de eliminação proposto, uma vez que o impacto proporcionado pela eliminação de elementos da vizinhança de um elemento distorcido é suave, mantendo a topologia no entorno de um elemento distorcido mesmo com outro conjunto de elementos. Por conseguinte, constata-se a efetividade do algoritmo híbrido de otimização proposto, o qual permite a aplicação da suavização Laplaciana tridimensional de forma geometricamente válida.

Referências

- [1] PIO, D.M., “Desenvolvimento de Código de CFD Para Malhas de Múltiplos Blocos para Aplicações Aeroespaciais”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Vale do Paraíba, 2010.
- [2] LÖHNER, R., “Applied CFD Techniques. An Introduction Based on Finite Element Methods”, John Wiley & Sons, 2001.

- [3] MALISKA, C.R., “Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”, Rio de Janeiro, LTC, 1995.
- [4] FREITAG, L. JONES, M. PLASSMANN P., “An Efficient Parallel Algorithm for Mesh Smoothing”, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory, Computer Science Department, The University of Tennessee, 1996.
- [5] HANSEN, G. A. DOUGLASS, R. W. ZARDECKI, “A. Mesh Enhancement: Selected Elliptic Methods, Foundations and Applications”, Los Alamos National Laboratory, USA, Imperial College Press, 2005.
- [6] MOL. C. L. L. “Ajuste da Malha Triangulada Resultante das Operações Booleanas de um Modelador de Sólidos”, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- [7] DOMPIERRE, J. LABBÉ, P. GUIBAULT, F. et al., “Proposal of Benchmarks for 3D Unstructured Tetrahedral Mesh Optimization”. Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable, pp. 459_478, Sandia National Laboratories: Williamsburg, VI, USA, 1998.
- [8] BATISTA, V. H. F., “Geração de Malhas Não-Estruturadas Tetraédricas Utilizando um Método de Avanço de Fronteira”. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [9] LIU, A. JOE, B. “Relationship between Tetrahedron Shape Measures”, BIT, v. 34, pp. 268_287, 1994.
- [10] JOE, B. “Shape Measures for Quadrilaterals, Pyramids, Wedges and Hexahedra”. Zhou Computing Services Inc. Abbotsford, BC, Canada, 2008.
- [11] SCHNEIDER, P. J. EBERLY, D. H. “Geometric Tools for Computer Graphics” Elsevier Science, 2003.
- [12] ERICSON, C. Real Time. “Real Time Collision Detection”. Elsevier, 2005.



[13] FREITAG, L.A. GOOCH, C.A., 1997. “Tetrahedral Mesh Improvement Using Swapping and Smoothing”. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, pp. 3979-4002.

Artigos submetidos:

“Mesh Improvement for Multiblock Grids in Store Separation Problems”. Artigo submetido e aceito em sua versão final para o VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2014. Uberlândia-MG.

“An Effective Hybrid Algorithm For Mesh Improvement In Store Separation Problems.” Resumo submetido para o 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Belém-PA, 2014.

Agradecimentos

Ao programa institucional de bolsas de iniciação científica do Instituto de Aeronáutica e Espaço, PIBIC-IAE, que, por meio do CNPq, forneceu suporte financeiro para realização dessa pesquisa.