



Edgar Quispe Ccapacca

**Construção de padrões para geração de
malhas por decomposição hierárquica de
domínio**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro
Julho de 2015



Edgar Quispe Ccapacca

**Construção de padrões para geração de
malhas por decomposição hierárquica de
domínio**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha
Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Antônio Carlos de Oliveira Miranda
Universidade de Brasília

Prof. André Maués Brabo Pereira
Universidade Federal Fluminense

Prof. Hélio Côrtes Vieira Lopes
Departamento de Informática - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de julho de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Edgar Quispe Ccapacca

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidad Nacional de San Agustín (Arequipa, Perú). Suas principais áreas de interesse são: Análise de Estabilidade das Estruturas, Mecânica Computacional, Computação Gráfica e Geometria Computacional.

Ficha Catalográfica

Quispe Ccapacca, Edgar

Construção de padrões para geração de malhas por decomposição hierárquica de domínio / Edgar Quispe Ccapacca; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. - 2015.

v., 113 f. il. (color) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Malha quadrilateral. 3. Padrões de decomposição de domínio. 4. Padrões de geração de malha. 5. Parâmetros geométricos. 6. Parâmetros topológicos. 7. Condição de realizabilidade. 8. Condições essenciais. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título

À memória do meu pai.

Agradecimentos

A Deus, por me dar força para enfrentar os obstáculos que surgiram ao longo desta caminhada.

Ao CAPES e ao Tecgraf/PUC-Rio, pelos auxílios financeiros concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao professor Luiz Fernando Martha pela confiança, amizade, compreensão e pelas inúmeras revisões do trabalho.

Aos professores Antônio Miranda (UnB), André Pereira (UFF) e Hélio López (PUC-Rio) pelas inúmeras observações e sugestões para melhorar este trabalho.

Aos meus colegas do Tecgraf/PUC-Rio, por estarem sempre dispostos a ajudar e acima de tudo pela amizade.

Aos meus pais pelo apoio na minha decisão de fazer o mestrado, pela confiança depositada e alegria que sempre me proporcionaram.

Resumo

Ccapacca, Edgar Quispe; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Construção de padrões para geração de malhas por decomposição hierárquica de domínio.** Rio de Janeiro, 2015. 113p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho aborda-se a geração de malha quadrilateral sobre domínios delimitados por duas, três e quatro curvas de bordo, usando padrões de decomposição de domínio, os quais são aplicados sobre domínios que satisfazem um conjunto de condições chamadas de essenciais que permite a geração de malha sobre eles. No entanto, a metodologia desenvolvida pode ser estendida para ser aplicada sobre outras topologias de domínio. A ideia é decompor um domínio em subdomínios, cada subdomínio é decomposto de forma independente até que todos os subdomínios permitam gerar malha usando diretamente o algoritmo de mapeamento transfinito bilinear. A decomposição é feita pela criação de curvas internas fictícias que delimitarão os subdomínios. Estas curvas podem intersectar-se dando lugar a pontos de interseção, os quais são chamados de parâmetros geométricos e podem ser variados para mudar a geometria dos subdomínios com o propósito de melhorar a qualidade da malha gerada. Os subdomínios são delimitados por curvas que terão um número definido de subdivisões, isto será chamado de parâmetros topológicos e de cujos valores dependerá o tipo de decomposição aplicada nos subdomínios. Os padrões de decomposição foram projetados dando lugar aos padrões de geração de malha que têm valores definidos para seus parâmetros geométricos e topológicos. Desta forma é possível conhecer a topologia e o nível de decomposição hierárquica a priori. Os parâmetros topológicos podem ser variados dinamicamente para encontrar a topologia de malha de melhor qualidade sobre um domínio. Foram incluídos exemplos para mostrar a aplicabilidade da metodologia proposta.

Palavras-chave

Malha quadrilateral; padrões de decomposição de domínio; padrões de geração de malha; parâmetros geométricos; parâmetros topológicos; condição de realizabilidade; condições essenciais.

Abstract

Ccapacca, Edgar Quispe; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos (Advisor). **Template construction for mesh generation by hierarchical domain decomposition.** Rio de Janeiro, 2015. 113p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, it is discussed quadrilateral mesh generation using patterns of domain decomposition. Mesh generation is treated on domains delimited by two, three and four curves. Patterns of domain decomposition are applied to domains that satisfy a set of conditions called essential conditions. However, the approach developed can be applied to other domain topologies. Mesh generation begins with an initial domain decomposition, each subdomain also is independently decomposed until all the subdomains enable mesh generation using bilinear mapping. The decomposition is done by creating fictitious internal curves that demarcate the subdomains. These curves can intersect giving rise to points of intersection, which are called geometric parameters and can be varied to change the geometry of the subdomains in order to improve the quality of the generated mesh. The subdomains are bounded by curves, which have a defined number of subdivisions, this will be called topological parameters and of whose values depend the type of decomposition applied on subdomains. Patterns of decomposition were designed giving way to patterns of mesh generation that have values set for its geometric and topological parameters, in this way is possible to know the topology and the level of hierarchical decomposition a priori. Topological parameters were dynamically varied to show the possibility of finding various mesh topologies on a domain. Examples are included to show the applicability of the proposed methodology.

Keywords

Quadrilateral mesh; patterns of domain decomposition; patterns of mesh generation; geometric parameters; topological parameters; realizability condition; essential conditions.

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Revisão bibliográfica	18
1.2. Objetivos	20
1.3. Organização do texto	21
2. Base Teórica	23
2.1. Representação dual de uma malha quadrilateral	23
2.2. Domínio	24
2.2.1. Domínio base	24
2.2.2. Domínio realizável e irrealizável	24
2.3. Condições definidas sobre domínios	27
2.3.1. Condição de paridade	27
2.3.2. Condição de realizabilidade	28
2.3.3. Condições essenciais e não essenciais	29
2.3.4. Condição de triplo mapeamento bilinear	32
2.4. Padrões de decomposição de domínio	34
2.4.1. Tipos de padrões de decomposição de domínio	36
2.4.2. Parâmetros associados aos padrões de decomposição de domínio	37
2.5. Padrões de geração de malha	40
2.5.1. Padrão base	42
2.5.2. Grau de um padrão de geração de malha	42
2.6. Critérios a considerar no projeto de padrões de geração de malha	43

3. Projeto de Padrões de Geração de Malha Quadrilateral	46
3.1. Padrão de geração de malha Q1A -4 curvas- grau 1	47
3.2. Padrão de geração de malha Q2A -4 curvas- grau 1 e 2	51
3.3. Padrão de geração de malha Q3A -3 curvas- grau 1 e 2	55
3.4. Padrão de geração de malha Q4A -3 curvas- grau 2 e 3	60
3.5. Padrão de geração de malha Q5A -2 curvas- grau 3 e 4	65
4. Geração Dinâmica de Malha Quadrilateral usando Padrões	70
4.1. Geração baseada no padrão de decomposição Q1	71
4.2. Geração baseada no padrão de decomposição Q2	72
4.3. Geração baseada no padrão de decomposição Q3	73
4.4. Geração baseada no padrão de decomposição Q4	74
4.5. Geração baseada no padrão de decomposição Q5	75
5. Conclusões e trabalhos futuros	77
5.1. Conclusões	77
5.2. Trabalhos futuros	78
6. Referências Bibliográficas	79
A Outros Projetos de Padrões de Geração de Malha	80
A.1. Padrão de geração de malha Q2B -4 curvas- grau 1 e 2	80
A.2. Padrão de geração de malha Q3B -3 curvas- grau 1 e 2	83
A.3. Padrão de geração de malha Q4B -3 curvas- grau 1 e 2	88
A.4. Padrão de geração de malha Q5B -2 curvas- grau 2 e 3	92
B. Padrões para Geração de Malha Hexaedral	97
B.1. Padrões de decomposição 3d duais	98

B.2. Projeto de padrões de geração de malha hexaedral	99
B.2.1. Padrão de geração de malha H1A- grau 1	99
B.2.2. Padrão de geração de malha H2A- grau 1 e 2	103
B.2.3. Padrão de geração de malha H3A- grau 1	107
B.2.4. Padrão de geração de malha H4A- grau 1 e 2	110

Lista de figuras

Figura 1.1. Malha quadrilateral estruturada vs. malha quadrilateral não estruturada	16
Figura 1.2. Coordenadas paramétricas e curvas de bordo	18
Figura 1.3. Refinamento de malha quadrilateral usando templates de refinamento	19
Figura 2.1. Representação dual de malha quadrilateral	23
Figura 2.2. Exemplo de domínio delimitado por três curvas de bordo	24
Figura 2.3. Domínios com número mínimo de arestas	25
Figura 2.4. Domínio não realizável e realizável geometricamente	26
Figura 2.5. Decomposição de domínio que gera subdomínio irrealizável e realizável	26
Figura 2.6. Existência do dual sobre domínios que cumprem a condição de paridade	28
Figura 2.7. Mínimo número de subdivisões necessárias para decompor um domínio	28
Figura 2.8. Condição de triplo mapeamento bilinear sobre um domínio triangular	33
Figura 2.9. Exemplo da condição de triplo mapeamento bilinear	34
Figura 2.10. Padrões de decomposição de domínio para geração de malhas quadrilaterais	35
Figura 2.11. Padrões não duais complementados com padrões duais	37
Figura 2.12. Valores mínimo e máximo dos parâmetros topológicos de bordo associados a Q1, Q2 e Q3	39
Figura 2.13. Valores mínimo e máximo dos parâmetros topológicos de bordo associados a Q4 e Q5	40
Figura 2.14. Exemplo de padrão de geração de malha com definição de parâmetros	41
Figura 2.15. Relação entre padrão de geração de malha e a malha gerada por ele	41

Figura 2.16. Exemplo de diagramas de árvore de padrões de geração de malha	43
Figura 2.17. Variação da decomposição hierárquica por variação dos parâmetros topológicos internos	44
Figura 3.1. Padrão de geração de malha Q1A	48
Figura 3.2. Parâmetros geométricos propostos para o padrão de geração de malha Q1A	51
Figura 3.3. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q1A	51
Figura 3.4. Padrão de geração de malha Q2A	52
Figura 3.5. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q2A	55
Figura 3.6. Padrão de geração de malha Q3A	56
Figura 3.7. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q3A	59
Figura 3.8. Malha gerada com e sem teste prévio da condição de triplo mapeamento bilinear	60
Figura 3.9. Padrão de geração de malha Q4A	61
Figura 3.10. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q4A	64
Figura 3.11. Modelo real com um domínio de geometria alongada	65
Figura 3.12. Padrão de geração de malha Q5A	66
Figura 3.13. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q5A	69
Figura 4.1. Diálogo que permite variar dinamicamente os parâmetros geométricos e topológicos	71
Figura 4.2. Variação dos parâmetros geométricos de uma malha	71
Figura 4.3. Geração dinâmica baseada na decomposição Q1	72
Figura 4.4. Geração dinâmica baseada na decomposição Q2	73
Figura 4.5. Geração dinâmica baseada na decomposição Q3	74
Figura 4.6. Geração dinâmica baseada na decomposição Q4	75
Figura 4.7. Geração dinâmica baseada na decomposição Q5	76

Figura A.1. Padrão de geração de malha Q2B	81
Figura A.2. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q2B	83
Figura A.3. Padrão de geração de malha Q3B	84
Figura A.4. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q3B	88
Figura A.5. Padrão de geração de malha Q4B	89
Figura A.6. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q4A	92
Figura A.7. Padrão de geração de malha Q5B	93
Figura A.8. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha Q5B	96
Figura B.1. Notação para as malhas de superfície	98
Figura B.2. Padrões de decomposição para geração de malha hexaedral	99
Figura B.3. Padrão de geração de malha H1A	100
Figura B.4. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha H1A	103
Figura B.5. Padrão de geração de malha H2A	104
Figura B.6. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha H2A	107
Figura B.7. Padrão de geração de malha H3A	108
Figura B.8. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha H3A	110
Figura B.9. Padrão de geração de malha H4	111
Figura B.10. Decomposição hierárquica gerada pelo padrão de geração de malha H4A	113

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Padrão de decomposição usado sobre um domínio que satisfaz alguma condição essencial

35

La tarea no consiste en ver lo que nadie ha visto,
sino en pensar lo que todavía nadie ha pensado sobre
aquello que todos ven.

Arthur Schopenhauer