



II CREEM
CONGRESSO
REGIONAL DE
ESTUDANTES DE
ENGENHARIA
MECÂNICA

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

21 A 25 DE AGOSTO
1995

ADAPTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL SINFLOW PARA O RECONHECIMENTO DE VOLUMES SÓLIDOS

Rodrigo Machado Lucianetti
SINMEC - Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC
Campus Universitário - Trindade
CEP 88040 - 900 - Florianópolis - SC

Orientadores: Clóvis Raimundo Maliska, Prof. Titular UFSC
João Flávio Vasconcellos, Doutorando UFSC

SUMÁRIO

É comum em problemas de transferência de calor e mecânica de fluidos ter-se domínios dotados de blocos sólidos em que o fluido em questão deve contorná-los. Uma maneira de se discretizar este tipo de domínio é a geração elíptica de uma malha não-ortogonal que exclua estes blocos. Porém este tipo de malha, além do problema intrínscico da não-ortogonalidade, tem dificuldade em refinar o local próximo ao contorno sólido, ainda mais se forem blocos com mudança brusca de geometria como os do tipo retangular. Ainda assim, neste tipo de discretização não se poderia analisar o problema de transferência de calor do conjunto fluido-sólido. Para resolver estes problemas foi proposto o objetivo deste trabalho, que consiste em adaptar a um código computacional já existente no laboratório, o SINFLOW, a habilidade de trabalhar com malhas que incluem os blocos sólidos. Desta maneira facilita-se a geração da malha para casos envolvendo blocos mapeados como retangulares no plano computacional e pode-se analisar a transferência de calor global no problema.

1. INTRODUÇÃO

O código SINFLOW é um código computacional destinado à solução de problemas de Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor para escoamento bidimensional ou tridimensional axissimétrico, laminar, propriedades constantes e incompressível. Aplicável a uma grande quantidade de geometrias complexas simplesmente conexa através de um sistema de coordenadas que se adapta com este domínio, utiliza a técnica dos volumes finitos para discretização das equações envolvidas.

Quando deseja-se resolver problemas envolvendo contornos sólidos retangulares ou mesmo domínios onde os contornos sólidos exigem malhas multiplamente conexas abaixo é muito difícil adaptar uma malha estruturada à geometria, principalmente se for importante obter resultados muito precisos junto as bordas do contorno onde é muito difícil refinar a malha.

A dificuldade de se trabalhar com malhas multi-conexas está no fato de, salvo certos casos, não ser possível a geração curvilínea de forma a obter um plano transformado retangular simplesmente conexo. Na figura 1 podemos visualizar um caso deste tipo onde, para adaptar uma malha coincidente com a fronteira gera-se no plano transformado uma malha multiplamente conexa, onde na realidade tem-se 6 blocos retangulares para solução.

Nestes casos é mais interessante adaptar uma malha única, isto é, que também inclua o bloco sólido ao domínio analisado eliminando o problema da geração da malha multi-conexa e, conseqüentemente, possibilitando a obtenção de resultados mais precisos junto ao contorno sólido. Para tanto deve-se indicar ao código os volumes da malha que constituem-se sólidos e forçar a condição de fluxo nulo neste volumes, além de especificar as

propriedades (que agora não são mais iguais para todos os volumes do problema) de cada um.

O objetivo deste trabalho engloba então a adaptação do código existente para o reconhecimento dos volumes sólidos e definição das propriedades e condições físicas, além da análise dos resultados obtidos através de uma comparação entre modelagem do domínio ortogonal e não-ortogonal. Esta última de duas maneiras:

- geração elíptica ao longo do escoamento e
- geração elíptica tipo polar.

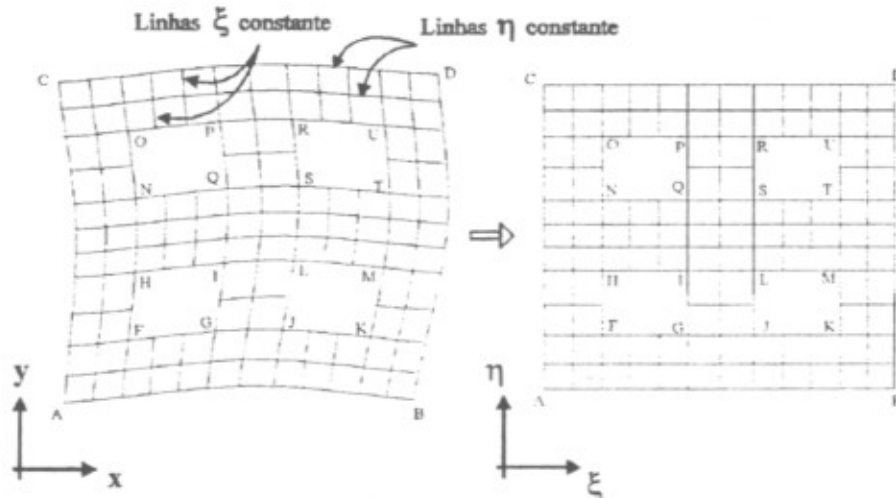


Figura 1 - Discretização em blocos - Domínio multi-conexo (plano físico e transformado)

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Para indicar ao programa quais volumes são sólidos e quais são fluidos criou-se uma variável lógica "solido" que atribui o requisito "false" se o volume referenciado é fluido e "true" se sólido. A informação inicial da(s) região(ões) sólida(s) é definida pelo usuário por blocos de volumes na subrotina de geração da malha. Com esta variável são definidas as propriedades e condição de fluxo nulo para a região sólida a partir de laços condicionais.

Em relação a condição de fluxo nulo nos volumes sólidos propôs-se zerar as velocidades u e v contravariante que são, em coordenadas generalizadas, as velocidades normais a superfície do volume.

Porém o coeficiente Γ , que assume o valor de μ (viscosidade) para as equações da conservação da quantidade do movimento (em x e y) e k/c_p (k =condutividade térmica e c_p =calor específico) para a equação da energia, precisa ser calculado nas interfaces entre sólido e fluido, todavia esta propriedade é armazenada no centro. Para tanto deve-se realizar uma média a partir dos valores pré-definidos no centro dos volumes que a compõem. Assim temos:

$$\frac{dLx^1 + dLx^2}{\Gamma_e} = \frac{dLx^1}{\Gamma_P} + \frac{dLx^2}{\Gamma_E}$$

Onde dLx^i e dLx^j são comprimentos ao longo dos eixos curvilíneos x^i e x^j ; e os índices "e", "P" e "E" representam Γ avaliado na face, no centro do volume referente e no centro do volume à direita deste, respectivamente (ver fig. 2). Logo, deve-se obter uma relação entre estes comprimentos e as coordenadas cartesianas. Isto é feito a partir das componentes do tensor métrico definidas abaixo para o caso tridimensional:

$$g_{ij} = \frac{\partial^2 x}{\partial x^i \partial x^j} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^i \partial x^j} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^i \partial x^j} \quad ; \quad i, j = 1..3$$

A expressão para um comprimento em x^i fica então:

$$dLx^1 = \sqrt{g_{11}} \Delta x^1$$

Escolhendo Δx^i e Δx^j unitários e chamando as componentes do tensor bidimensional de α , β e γ para g_{11} , g_{12} e g_{22} respectivamente temos definido os comprimentos necessários para generalizar a média já definida acima. Portanto, temos:

$$\Gamma_e = \frac{(\sqrt{\alpha_P} + \sqrt{\alpha_E}) \Gamma_P \Gamma_E}{(\sqrt{\alpha_P} \Gamma_E + \sqrt{\alpha_E} \Gamma_P)}$$

$$\Gamma_n = \frac{(\sqrt{\gamma_P} + \sqrt{\gamma_N}) \Gamma_P \Gamma_E}{(\sqrt{\gamma_P} \Gamma_N + \sqrt{\gamma_N} \Gamma_P)}$$

Desta forma tem-se definido o coeficiente Γ nas faces podendo ser implementado nas equações.

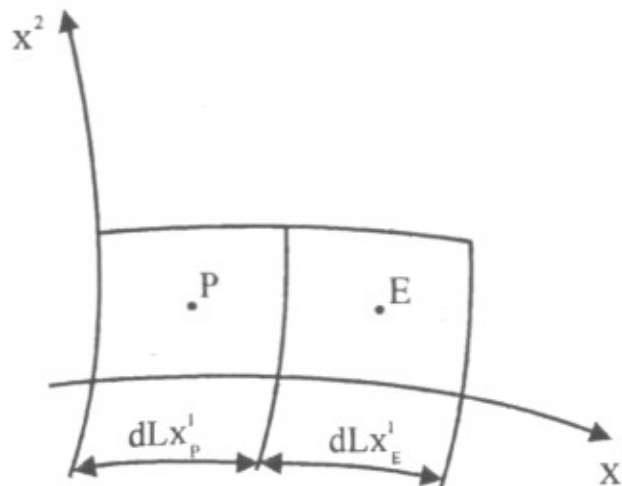


Figura 2 - Volumes em um sistema de eixos coordenados curvilineos.

3. FORMULAÇÃO DE PROBLEMA PRÁTICO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em vista toda a formulação formal acima partiu-se para a análise de um problema prático que consiste na comparação de escoamentos laminares (Reynolds=300) incompressíveis ao longo de placas planas paralelas dotadas de uma reentrância sólida retangular com diferentes modelagens de domínios de cálculo. Um detalhe das malhas utilizadas é mostrado sobre a região sólida na figura 3. Note que na malha com geração elíptica ao longo do escoamento (da esquerda) os volumes correspondentes a região do escoamento livre do contorno sólido são quase ortogonais enquanto na malha com geração elíptica tipo polar (da direita) esta característica ocorre nos volumes das bordas da região sólida. Esta característica típica de cada uma destas malhas não-ortogonais foi considerada para a comparação entre as diferentes regiões do escoamento com o modelo ortogonal.

Para estas condições foram obtidos campos para cada tipo de malha (ortogonal, ao centro; não-ortogonais, à direita, tipo polar e à esquerda, ao longo do escoamento) que representam as linhas de corrente. De forma a obter uma comparação bem nitida dos três casos foi feita uma superposição dos escoamentos, indicando tanto na região próxima ao contorno sólido quanto na região livre uma discrepância entre linhas de corrente equivalentes.

Na junção da malha ortogonal com a de geração não-ortogonal elíptica tipo polar nota-se que na região próxima ao contorno sólido, onde a malha é mais refinada, as linhas de corrente

de cada modelo são praticamente coincidentes. Este fato pode ser evidenciado melhor na figura 4 onde temos um *zoom* sobre esta região. Deste fato conclui-se que, assumindo a região refinada da malha não-ortogonal como solução (já que este modelo não foi afetado pela alteração no código), o modelo de domínio ortogonal com inclusão da região sólida aproxima bem o problema para as proximidades desta região. Todavia, nada pode ser afirmado com relação à região livre.

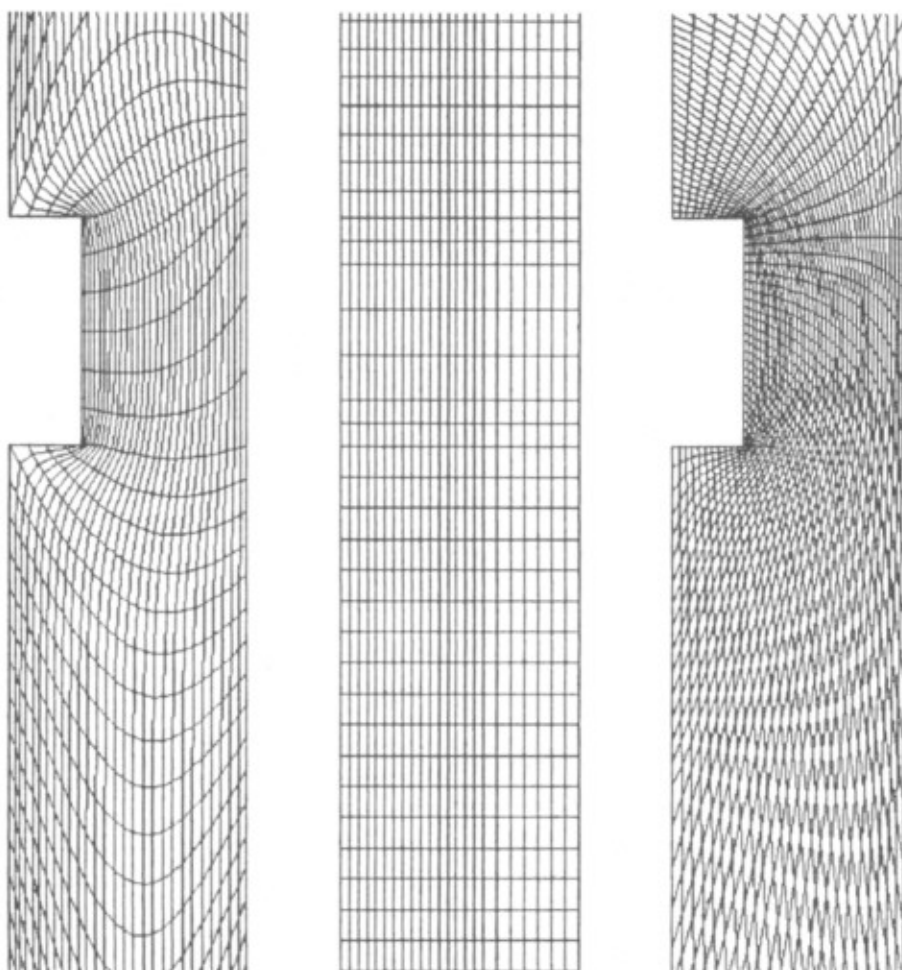


Figura 3 - Malhas: esquerda, geração elíptica ao longo do escoamento; meio, ortogonal com região sólida; direita, geração elíptica tipo polar.

No entanto, esta mesma análise vale para a junção entre a modelagem ortogonal do problema com a de geração elíptica ao longo do escoamento. Só que neste caso agora a região de melhor aproximação é a livre do contorno. Neste tipo de geração não-ortogonal a presença da reentrância sólida tende a curvar os volumes na direção perpendicular ao escoamento e com maior intensidade nos volumes próximos ao contorno tornando muito difícil o refino nesta local. Desta forma nos locais onde não ocorre a formação de vórtices e, em decorrência da forma dos volumes, as componentes "v" da velocidade praticamente coincidem com as contravariantes tem-se uma melhor precisão. Isto pode ser melhor observado na figura 5.

Sendo assim, conclui-se que a solução obtida a partir do método de confecção do domínio ortogonal com reconhecimento de volumes sólidos é a melhor maneira de se analisar escoamentos em geometrias com contornos retangulares. Também de grande importância é a possibilidade de se analisar o campo temperaturas e campo de pressões sobre a região sólida.



Figura 4 - Zoom, malha com geração elíptica tipo polar.



Figura 5 - Zoom, malha com geração elíptica ao longo do escoamento.

REFERÊNCIAS

- SINFLOW, "Código Computacional para a Solução de Problemas de Mecânica dos Fluidos em Geometrias Bidimensionais Arbitrárias" - Versão 1.01 - MP - 93 - 1, SINMEC/EMC/UFSC, Florianópolis, SC, (1993).
- Maliska, C.R., "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional - Coordenadas Generalizadas", Depto. de Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis, (1992).
- Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A e Mastin, C.W., "Numerical Grid Generation - Foundations and Applications", Elsevier Science Publishing Co., New York, (1985).

ADAPTAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL SINFLOW PARA O RECONHECIMENTO DE VOLUMES SÓLIDOS

Rodrigo Machado Lucianetti

SINMEC - Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor

Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC

Campus Universitário - Trindade

CEP 88040 - 900 - Florianópolis - SC

Orientadores: Clóvis Raimundo Maliska, Prof. Titular UFSC

João Flávio Vasconcellos, Doutorando UFSC

SUMÁRIO

É comum em problemas de transferência de calor e mecânica de fluidos ter-se domínios dotados de blocos sólidos em que o fluido em questão deve contorná-los. Uma maneira de se discretizar este tipo de domínio é a geração elíptica de uma malha não-ortogonal que exclua estes blocos. Porém este tipo de malha, além do problema intrínscio da não-ortogonalidade, tem dificuldade em refinar o local próximo ao contorno sólido, ainda mais se forem blocos com mudança brusca de geometria como os do tipo retangular. Ainda assim, neste tipo de discretização não se poderia analisar o problema de transferência de calor do conjunto fluido-sólido. Para resolver estes problemas foi proposto o objetivo deste trabalho, que consiste em adaptar a um código computacional já existente no laboratório, o SINFLOW, a habilidade de trabalhar com malhas que incluem os blocos sólidos. Desta maneira facilita-se a geração da malha para casos envolvendo blocos mapeados como retangulares no plano computacional e pode-se analisar a transferência de calor global no problema.

1. INTRODUÇÃO

O código SINFLOW é um código computacional destinado à solução de problemas de Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor para escoamento bidimensional ou tridimensional axissimétrico, laminar, propriedades constantes e incompressível. Aplicável a uma grande quantidade de geometrias complexas simplesmente conexa através de um sistema de coordenadas que se adapta com este domínio, utiliza a técnica dos volumes finitos para discretização das equações envolvidas.

Quando deseja-se resolver problemas envolvendo contornos sólidos retangulares ou mesmo domínios onde os contornos sólidos exigem malhas multiplamente conexas abaixo é muito difícil adaptar uma malha estruturada à geometria, principalmente se for importante obter resultados muito precisos junto as bordas do contorno onde é muito difícil refinar a malha.

A dificuldade de se trabalhar com malhas multi-conexas está no fato de, salvo certos casos, não ser possível a geração curvilínea de forma a obter um plano transformado retangular simplesmente conexo. Na figura 1 podemos visualizar um caso deste tipo onde, para adaptar uma malha coincidente com a fronteira gera-se no plano transformado uma malha multiplamente conexa, onde na realidade tem-se 6 blocos retangulares para solução.

Nestes casos é mais interessante adaptar uma malha única, isto é, que também inclua o bloco sólido ao domínio analisado eliminando o problema da geração da malha multi-conexa e, consequentemente, possibilitando a obtenção de resultados mais precisos junto ao contorno sólido. Para tanto deve-se indicar ao código os volumes da malha que constituem-se sólidos e forçar a condição de fluxo nulo neste volumes, além de especificar as propriedades (que agora não são mais iguais para todos os volumes do problema) de cada um.

O objetivo deste trabalho engloba então a adaptação do código existente para o reconhecimento dos volumes sólidos e definição das propriedades e condições físicas, além da análise dos resultados obtidos através de uma comparação entre modelagem do domínio ortogonal e não-ortogonal. Esta última de duas maneiras:

- geração elíptica ao longo do escoamento e

- geração elíptica tipo polar.

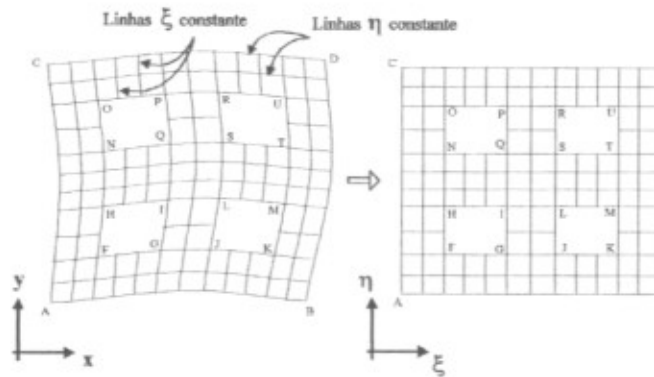


Figura 1 - Discretização em blocos - Domínio multi-conexo (plano físico e transformado)

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Para indicar ao programa quais volumes são sólidos e quais são fluidos criou-se uma variável lógica "solido" que atribui o requisito "false" se o volume referenciado é fluido e "true" se sólido. A informação inicial da(s) região(ões) sólida(s) é definida pelo usuário por blocos de volumes na subrotina de geração da malha. Com esta variável são definidas as propriedades e condição de fluxo nulo para a região sólida a partir de laços condicionais.

Em relação a condição de fluxo nulo nos volumes sólidos propôs-se zerar as velocidades u e v contravariante que são, em coordenadas generalizadas, as velocidades normais a superfície do volume.

Porém o coeficiente Γ , que assume o valor de μ (viscosidade) para as equações da conservação da quantidade do movimento (em x e y) e k/c_p (k =condutividade térmica e c_p =calor específico) para a equação da energia, precisa ser calculado nas interfaces entre sólido e fluido, todavia esta propriedade é armazenada no centro. Para tanto deve-se realizar uma média a partir dos valores pré-definidos no centro dos volumes que a compõem. Assim temos:

$$\frac{dLx^1 + dLx^2}{\Gamma_e} = \frac{dLx^1}{\Gamma_P} + \frac{dLx^2}{\Gamma_E}$$

Onde dLx^1 e dLx^2 são comprimentos ao longo dos eixos curvilíneos x^1 e x^2 ; e os índices "e", "P" e "E" representam Γ avaliado na face, no centro do volume referente e no centro do volume à direita deste, respectivamente (ver figura 2). Logo, deve-se obter uma relação entre estes comprimentos e as coordenadas cartesianas. Isto é feito a partir das componentes do tensor métrico definidas abaixo para o caso tridimensional:

$$g_{ij} = \frac{\partial^2 x}{\partial x^i \partial x^j} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^i \partial x^j} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^i \partial x^j} \quad ; \quad i, j = 1..3$$

A expressão para um comprimento em x^1 fica então:

$$dLx^1 = \sqrt{g_{11}} \Delta x^1$$

Escolhendo Δx^1 e Δx^2 unitários e chamando as componentes do tensor bidimensional de α , β e γ para g_{22} , $g_{12} = g_{21}$ e g_{11} respectivamente temos definido os comprimentos necessários para generalizar a média já definida acima. Portanto, temos:

$$\Gamma_e = \frac{(\sqrt{\alpha_P} + \sqrt{\alpha_E}) \Gamma_P \Gamma_E}{(\sqrt{\alpha_P} \Gamma_E + \sqrt{\alpha_E} \Gamma_P)}$$

$$\Gamma_n = \frac{(\sqrt{\gamma_P} + \sqrt{\gamma_N}) \Gamma_P \Gamma_E}{(\sqrt{\gamma_P} \Gamma_N + \sqrt{\gamma_N} \Gamma_P)}$$

Desta forma tem-se definido o coeficiente Γ nas faces podendo ser implementado nas equações.

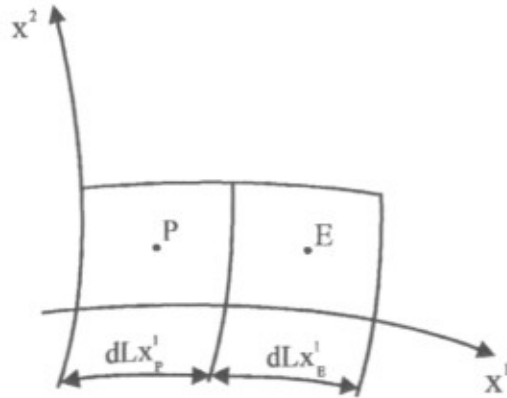


Figura 2 - Volumes em um sistema de eixos coordenados curvilíneos.

3. FORMULAÇÃO DE PROBLEMA PRÁTICO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Tendo em vista toda a formulação formal acima partiu-se para a análise de um problema prático que consiste na comparação de escoamentos laminares (Reynolds=300) incompressíveis ao longo de placas planas paralelas dotadas de uma reentrância sólida retangular com diferentes modelagens de domínios de cálculo. Um detalhe das malhas utilizadas é mostrado sobre a região sólida na figura 3. Note que na malha com geração elíptica ao longo do escoamento (da esquerda) os volumes correspondentes a região do escoamento livre do contorno sólido são quase ortogonais enquanto na malha com geração elíptica tipo polar (da direita) esta característica ocorre nos volumes das bordas da região sólida. Esta característica típica de cada uma destas malhas não-ortogonais foi considerada para a comparação entre as diferentes regiões do escoamento com o modelo ortogonal.

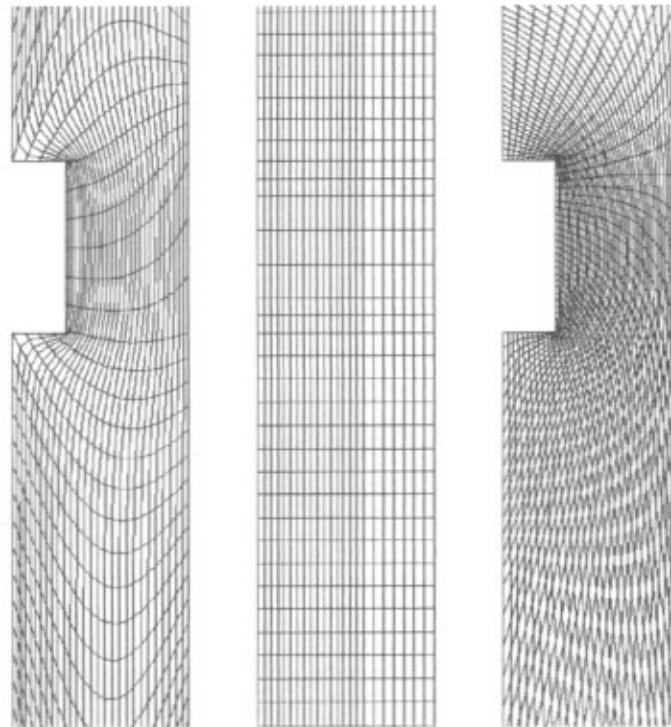


Figura 3 - Malhas: esquerda, geração elíptica ao longo do escoamento; meio, ortogonal com região sólida; direita, geração elíptica tipo polar.

Para estas condições foram obtidos campos para cada tipo de malha(ortogonal, ao centro; não-ortogonais, à direita, tipo polar e à esquerda, ao longo do escoamento) que representam as linhas de corrente. De forma a obter uma comparação bem nítida dos três casos foi feita uma superposição dos escoamentos, indicando tanto na região próxima ao contorno sólido quanto na região livre uma discrepância entre linhas de corrente equivalentes.

Na junção da malha ortogonal com a de geração não-ortogonal elíptica tipo polar nota-se que na região próxima ao contorno sólido, onde a malha é mais refinada, as linhas de corrente de cada modelo são praticamente coincidentes. Este fato pode ser evidenciado melhor na figura 4 onde temos um *zoom* sobre esta região. Deste fato conclui-se que, assumindo a região refinada da malha não-ortogonal como solução(já que este modelo não foi afetado pela alteração no código), o modelo de domínio ortogonal com inclusão da região sólida aproxima bem o problema para as proximidades desta região. Todavia, nada pode ser afirmado com relação à região livre.

No entanto, esta mesma análise vale para a junção entre a modelagem ortogonal do problema com a de geração elíptica ao longo do escoamento. Só que neste caso agora a região de melhor aproximação é a livre do contorno. Neste tipo de geração não-ortogonal a presença da reentrância sólida tende a curvar os volumes na direção perpendicular ao escoamento e com maior intensidade nos volumes próximos ao contorno tornando muito difícil o refino nesta local. Desta forma nos locais onde não ocorre a formação de vórtices e, em decorrência da forma dos volumes, as componentes "v" da velocidade praticamente coincidem com as contravariantes tem-se uma melhor precisão. Isto pode ser melhor observado na figura 5.



Figura 4 - Zoom, malha com geração elíptica tipo polar.



Figura 5 - Zoom, malha com geração elíptica ao longo do escoamento.

Sendo assim, conclui-se que a solução obtida a partir do método de confecção do domínio ortogonal com reconhecimento de volumes sólidos é a melhor maneira de se analisar escoamentos em geometrias com contornos retangulares. Também de grande importância é a possibilidade de se analisar o campo de temperaturas e campo de pressões sobre a região sólida.

REFERÊNCIAS

- SINFLOW, "Código Computacional para a Solução de Problemas de Mecânica dos Fluidos em Geometrias Bidimensionais Arbitrárias" - Versão 1.01 - MP - 93 - 1, SINMEC/EMC/UFSC, Florianópolis, SC, (1993).
- Maliska, C.R., "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional - Coordenadas Generalizadas", Depto. de Engenharia Mecânica - UFSC, Florianópolis, (1992).
- Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A e Mastin, C.W., "Numerical Grid Generation - Foundations and Applications", Elsevier Science Publishing Co., New York, (1985).