

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**VISUALIZAÇÃO CIENTÍFICA EM MECÂNICA  
DOS FLUIDOS**

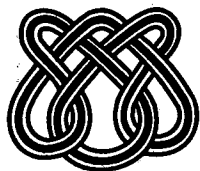
**ANDRÉ LUIZ MARTINS  
MARIA CRISTINA FERREIRA DE OLIVEIRA  
ROSANE MINGHIM**

**Nº 34**

---

**NOTAS**

---



***Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos***

**VISUALIZAÇÃO CIENTÍFICA EM MECÂNICA  
DOS FLUIDOS**

**ANDRÉ LUIZ MARTINS  
MARIA CRISTINA FERREIRA DE OLIVEIRA  
ROSANE MINGHIM**

**Nº 34**

**NOTAS DO ICMSC  
Série Computação**

ICMSC - INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS DE SÃO CARLOS  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

NOTAS DO ICMSC

**Visualização Científica em  
Mecânica dos Fluidos**

André Luiz Martins

Laboratório de Aeronaves

SEM - EESC - USP

Maria Cristina Ferreira de Oliveira

Rosane Minghim

SCE - ICMSC - USP

Fevereiro de 1997

## **Resumo**

*Este relatório apresenta um levantamento bibliográfico sobre métodos e técnicas de Visualização Científica aplicadas à Mecânica dos Fluidos. Tomando-se por base a proposta de Delmarcelle e Hesselink [Del95] que apresenta uma base conceitual para o problema, fundada em princípios de Semiótica, as diversas abordagens encontradas foram classificadas de acordo com seus níveis de representatividade: elementares, locais ou globais. O levantamento realizado indica que o material existente na área diz respeito principalmente a representações elementares que tendem a simular procedimentos experimentais. Propostas inovadoras surgem para representações globais, capazes de transmitir o comportamento geral de escoamentos fluídicos com poucas entidades gráficas, diminuindo o problema do congestionamento visual. Representações para campos tensoriais ainda são escassas devido à relativamente recente disponibilidade de grandes volumes desse tipo de dados, graças ao desenvolvimento de técnicas de simulação numérica. Conclui-se também que o meio científico dedicado à Mecânica dos Fluidos emprega muito poucas técnicas recentemente desenvolvidas para interpretação dos dados, mesmo as já disponíveis e testadas. Com o advento de bibliotecas de visualização de baixo custo, acredita-se que essa tendência esteja na iminência de ser revertida. Neste relatório são incluídos também exemplos que ilustram o uso de algoritmos disponíveis em uma dessas bibliotecas na visualização de fluidos.*

## **Abstract**

*This report presents a bibliographic survey on Scientific Visualization methods and techniques applied to Computational Fluid Dynamics. Based on the proposal by Delmarcelle e Hesselink [Del95] which presents a conceptual framework for the problem using Semiotics, several approaches researched were classified according to their levels of representation: elementary, local or global. The survey indicates that most of the results in the field concern mainly elementary representations, which tend to simulate experimental procedures. Inovative proposals for global presentation increase slowly, and are capable of conveying general fluid flow behaviour with less graphical entities, reducing the well-known problem of visual overhead. Tensor fields representations are scarce, due to the comparatively recent availability of great quantities of this sort of data, as a result of the development of numerical simulation technology. It is also argued that the community of Fluid Dynamics professionals employs only a few of the recently developed techniques, even those already tested and available. With the proliferation of low cost visualization libraries, it is expected that this trend will change. In this report, a few examples of fluid visualization developed by the authors are included that use one of these visualization libraries.*

## 1. Introdução.

Mecânica dos Fluidos é uma disciplina que afeta diretamente uma grande parcela dos problemas físicos observados em ciência e engenharia. As relações entre fluidos e o meio em que estão inseridos têm implicações das mais variadas, nos mais diferentes níveis de grandeza. Desde problemas de projeto e análise em engenharia (aerodinâmica, termodinâmica, hidráulica, etc.) até o escoamento de fluidos orgânicos em sistemas biológicos e as relações entre o estado da atmosfera e o ecossistema do planeta; a gama de aplicações abrange desde o absolutamente prático até o profundamente teórico. Em síntese, observa-se que o comportamento de sistemas fluidicos apresenta conseqüências que vão muito além do estudo de sua própria mecânica.

Independente da maneira como são realizados (teórica ou experimentalmente), e do escopo que abrangem, os estudos em Mecânica dos Fluidos sempre envolvem a observação de inúmeras variáveis em espaços multidimensionais contínuos e, portanto, apresentam o potencial de gerar grandes conjuntos de dados multivariados os quais, por sua vez, podem gerar problemas complexos de visualização.

Esse potencial tornou-se uma realidade ao longo das últimas três décadas. Por um lado, o avanço das técnicas experimentais de medição permite resoluções espaciais cada vez maiores. No entanto, a grande fonte de dados relativos a análises de problemas fluidicos tem sido a disponibilidade crescente de potência computacional suficiente para a solução numérica das equações de movimento/estado que descrevem o comportamento de fluidos. Antes do advento de processadores eletrônicos, a solução desses sistemas de equações diferenciais parciais não lineares era praticamente impossível. Assim, dentro da disciplina genericamente referida por CFD (“Computational Fluid Dynamics” - Dinâmica dos Fluidos Computacional), a resolução espacial e o tipo de dados que podem ser obtidos passaram a depender apenas da potência computacional disponível para a solução em tempo útil.

Como exemplo da complexidade dos dados envolvidos, pode-se citar a análise do escoamento aerodinâmico em aplicações aeroespaciais, que tipicamente envolve a obtenção de quatro a cinco variáveis escalares/vetoriais independentes. No caso de simulações numéricas típicas, atualmente esses dados podem ser obtidos sobre uma quantidade de pontos da ordem de mais de um milhão [De195]. Levando-se em conta que a capacidade máxima dos supercomputadores atuais ainda impõem limitações de modelagem (de turbulência, por exemplo) ao invés da solução direta das equações gerais e que, mesmo assim, simulações complexas para uso corrente em engenharia ainda são quase inviáveis, é possível vislumbrar o aumento da utilização desses métodos e, portanto, também da quantidade de dados a serem analisados em aplicações futuras, paralelamente ao aumento do desempenho dos processadores. [Hen90] traz uma grande coletânea sobre o estado da arte em CFD para aplicações aeroespaciais.

É evidente que a análise desses grandes conjuntos de dados vem exatamente de encontro às propostas da Visualização Científica enquanto disciplina [Bro92], ou seja, “tornar visível o invisível” de maneira a possibilitar o entendimento local ou global de um determinado fenômeno a partir de conjuntos de dados que o descrevam. A criação de mapeamentos/representações capazes de transmitir, dentro das limitações humanas, a maior quantidade de dados da melhor maneira possível é o objetivo principal da Visualização Científica.

Com isso em vista, esta nota técnica foi baseada em uma pesquisa bibliográfica sobre o estado da arte da Visualização Científica aplicada à Mecânica dos Fluidos. Algumas exceções à parte, devido à vastidão de material existente sobre o tema, procurou-se concentrar o trabalho sobre as aplicações mais usuais de Mecânica dos Fluidos, ou seja, aquelas que envolvem o escoamento de fluidos newtonianos [Fox85], que são aqueles mais frequentemente encontrados em aplicações tecnológicas. A seção 2 faz um levantamento das principais técnicas de visualização em Mecânica dos Fluidos. A seção 3 tece as conclusões alcançadas durante o desenvolvimento deste texto. O apêndice A apresenta exemplos de programas desenvolvidos pelos autores para alguns casos de visualização de dados de simulação de comportamento de fluidos.

## 2. Pesquisa Bibliográfica e Observações.

### 2.1 Bases Teóricas e Conceituais

Delmarcelle e Hesselink [Del95] estabeleceram de maneira concisa uma base para a interpretação, classificação e análise de técnicas de visualização científica aplicada à Mecânica dos Fluidos, no intuito de unificar a abordagem sem associar tipos de técnicas a tipos de problemas. Em vista de sua generalidade, o referido artigo foi adotado como base para classificar e avaliar as técnicas e métodos pesquisados no presente trabalho. Os parágrafos seguintes sintetizam os principais tópicos estabelecidos.

O trabalho de Delmarcelle e Hesselink centraliza-se no conceito de que, embora as relações entre as diversas técnicas de Visualização Científica não sejam ainda inteiramente entendidas, o mesmo não acontece com o problema genérico da *representação de uma entidade através de uma imagem mental*. Esse último problema tem sido estudado extensivamente há muito tempo em disciplinas como Lógica, Lingüística, Psicologia e Sociologia. Aqueles autores propõem, então, que resultados dessas disciplinas consagradas sejam aplicados à Visualização Científica, uma vez que, a menos da aplicação de técnicas computacionais, é o mesmo problema da *representação* que está em questão. Dessa maneira, é proposto um modelo conceitual para a Visualização Científica baseado nos conceitos de Semiótica, a ciência dos signos. A Semiótica, tratada de maneira formal por Pierce [Pie77], é a parte da Lógica que trata das relações entre qualquer entidade a ser representada (significante) e a entidade que a representa (signo), seja qual for a natureza das duas partes ou o meio sensorial através do qual esta relação ocorre.

A Semiótica classifica os signos em três tipos básicos: *ícone*, *índice* e *símbolo*. Um *ícone* é baseado em uma semelhança, ou mimetismo, entre o objeto e sua representação. Ele não é, entretanto, afetado pelo objeto propriamente dito, nem mantém uma conexão dinâmica com o mesmo. Um *índice* é um signo que se refere ao objeto que denota pelo fato de ser diretamente afetado pelo mesmo, ou seja, existe uma relação causal entre o signo e a entidade representada. Um exemplo típico seria um relógio. Um *símbolo* relaciona-se com a entidade que representa através de uma convenção arbitrária. Por exemplo, a correspondência estabelecida entre a forma das letras no alfabeto romano e os seus sons é essencialmente arbitrária. Embora toda representação seja passível de ter mais de uma classificação,

Delmarcelle e Hesselink colocam as representações usadas tipicamente em Mecânica dos Fluidos como *ícones*, pois mantêm uma relação de semelhança ou mimetismo com o fenômeno real. Uma vez que a classificação como ícone nem sempre é bem definida e, além disso, a convenção estabelecida pelo jargão de computação gráfica define *ícone* como um “elemento gráfico de topologia definida e possíveis atributos geométricos variáveis”, o presente trabalho adota o termo genérico *representação* (ao invés do original *ícone*).

Dentro dessa classificação dos signos é possível definir-se os *níveis intrínsecos de informação* que pode ser transmitida através de uma dada representação, ou seja, *o quanto* a representação transmite sobre a entidade representada. Os níveis de informação dividem as diferentes representações possíveis numa mesma circunstância em três tipos:

(i) *Representação elementar*: é aquela que transmite informação sobre a entidade representada apenas *exatamente* na região do domínio de interesse que ocupa. Por exemplo, representar velocidade num certo ponto de um fluido em movimento através de uma seta com uma extremidade no ponto informa a velocidade *naquele ponto apenas*.

(ii) *Representação local*: transmite informação sobre a entidade representada na região do domínio de interesse que ocupa *e inerentemente em uma certa região adjacente*. A expressão “inerentemente” é necessária para deixar claro que a representação local não é apenas um conjunto de representações elementares sobre uma região de interesse. Um exemplo consiste em marcar pontos críticos de um campo vetorial através de “*glyphs*”<sup>1</sup> associados a determinado fenômeno, o que fornece uma indicação do comportamento do campo próximo àquele ponto.

(iii) *Representação global*: consiste de uma representação capaz de transmitir *eficientemente* as características do fenômeno em observação sobre todo o domínio de interesse. O requisito de eficiência vem do fato que, teoricamente, cada ponto do domínio pode ser associado a uma representação elementar, porém isso fatalmente resultará em uma representação visualmente congestionada (“*cluttered*”); assim, a representação global deve ser simples, com um nível mais alto de abstração. Um exemplo é a visualização da topologia de um campo vetorial (vide Item 2.2.3), através da qual o comportamento do campo completo pode ser inferido.

Aplicações de Visualização em Fluidos. Os autores identificam três principais campos de aplicação das representações, considerados indispensáveis:

(a) *Aumento do Conhecimento do Processo Físico*: obviamente, a possibilidade de visualizar o fenômeno de diferentes maneiras permite um maior discernimento dos fatores envolvidos e suas relações. Além disso, no caso de CFD, certas grandezas que não são visualizáveis experimentalmente

---

<sup>1</sup> Um “*glyph*” é um “objeto” cuja aparência é afetada por atributos de um dado de entrada ao qual está associado. Esse objeto pode ser uma entidade geométrica, um conjunto de dados (“*dataset*”), ou uma imagem gráfica.

(tais como tensões ou vorticidade) podem ser incluídas no modelo visual e associadas a características gráficas.

(b) *Refinamento de Métodos Computacionais e/ou Experimentais*: tanto em procedimentos experimentais quanto de simulação computacional (CFD), a visualização de resultados intermediários permite descobrir eventuais discrepâncias dos modelos/métodos adotados, que podem ser corrigidas numa re-execução dos procedimentos, num processo iterativo de refinamento.

(c) *Validação de Métodos Computacionais*: estes podem ser validados e avaliados através da visualização comparativa com outros métodos e resultados experimentais. Esta aplicação é diretamente relacionada, por exemplo, à validação de modelos de turbulência adotados em CFD.

Variáveis Envolvidas. Conforme citado na Introdução, resultados em Mecânica dos Fluidos geralmente envolvem grandes conjuntos de dados multivariados. Os tipos de dados são, em geral, *campos escalares, vetoriais e tensoriais simétricos*, distribuídos continuamente sobre espaços bidimensionais ou tridimensionais. As Tabelas 1 a 3 apresentam algumas das variáveis mais comuns encontradas em problemas de escoamento fluido.

$\rho$	densidade
P	pressão
T	temperatura
h	entalpia

**Tabela 1 - Campos escalares em escoamentos fluidicos.**

$\mathbf{v}$	velocidade
$\mathbf{m} = \rho\mathbf{v}$	densidade de quantidade de movimento
$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$	vorticidade
$\mathbf{g} = \nabla s$	gradiente de um escalar $s$

**Tabela 2 - Campos vetoriais em escoamentos fluidicos  
(vetores em negrito).**

$\epsilon_{ik}$	tensor de taxa de deformação local
$\sigma'_{ik}$	tensor de tensões viscosas
$\sigma_{ik}$	tensor completo de tensões
$\Pi'_{ik}$	tensor de densidade de fluxo de momento reversível
$\Pi_{ik}$	tensor de densidade de fluxo de momento

**Tabela 3 - Campos tensoriais em escoamentos fluidicos.**



Da mesma forma que em [Del95], o presente trabalho não aborda a visualização de variáveis escalares em detalhe, uma vez que técnicas e métodos consagrados, advindos de outras aplicações de visualização (p. ex., linhas e superfícies de contorno), são igualmente utilizadas e utilizáveis para fluidos. Uma introdução resumida à visualização de dados escalares é apresentada no próximo item. Este trabalho aborda mais detalhadamente a visualização de campos vetoriais e tensoriais em problemas de Mecânica dos Fluidos, apresentando seus principais aspectos a partir do item 2.3.

## 2.2 Visualização de Campos Escalares

Dados escalares, como os mencionados na Tabela 1, são visualizados em Mecânica dos Fluidos de forma similar às demais aplicações que envolvem esse tipo de informação. As técnicas principais envolvem traçado de contorno em 2D e de superfícies de nível em 3D. A primeira delas permite identificar valores de interesse em visualizações bidimensionais, e a segunda apoia a descrição do comportamento dos valores de interesse num volume, para imagens estáticas.

Dados escalares bidimensionais podem ser visualizados de diversas formas [Bro92]. Essas incluem traçado de contornos (isolinhas), sombreamento discreto, mapeamento por cores, visualização superficial ("*height fields*" e *height fields* suavizados). Algumas dessas técnicas se prestam à visualização de mais de dois escalares ao mesmo tempo. Por exemplo, pode-se representar um campo escalar por *height fields* e um segundo por sombreamento.

Dados escalares tridimensionais são usualmente visualizados através de superfícies de nível ("*isosurfaces*"). Conjuntos de dados escalares volumétricos podem ser considerados de dimensão 4 e representados por uma função de 3 variáveis:

$$w = f(x,y,z)$$

onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as coordenadas dos pontos no espaço 3D e  $w$  é o valor simulado (ou amostrado) naquele ponto.

A criação de superfícies de nível envolve a execução de um processo para mapear esse conjunto 4D, visualizando o comportamento do dado em certas 'regiões' ou 'valores' críticos, e plotando a superfície dada por:

$$k = f(x,y,z)$$

onde  $k$  (constante) é o valor sob análise.

Algumas vantagens das *isosurfaces* incluem a possibilidade de observação de estrutura nas medições ou simulações, além de permitir a geração e análise em tempo real na maioria do hardware disponível para geração de imagens. Com o uso de *isosurfaces*, entretanto, perde-se a informação do conteúdo do conjunto de dados fora dos valores de interesse.

Um dos métodos mais clássicos de reconstruir superfícies a partir de conjuntos 3D de escalares genéricos é o *Marching Cubes* [Lor87]. Esse algoritmo toma uma malha ("*grid*") regular 3D com valores definidos nas intersecções. Essa malha é sub-dividida em *voxels* com os vértices nas

intersecções. Então, cada valor de interesse ( $k$ ) é comparado com os valores dos vértices. Para *voxels* que possuem valores maiores e menores do que  $k$ , assume-se que a superfície de nível intercepta o *voxel*. Uma tabela de casos indica os possíveis tipos de intersecção e a triangulação correspondente em cada caso. A triangulação completa em todo o domínio define a superfície de nível. Os exemplos de visualização incluídos no Apêndice A ilustram o uso de traçado de isolinhas e isosuperfícies de pressão em visualização.

## 2.3 Representação de Campos Vetoriais

### 2.3.1 Representações Vetoriais Elementares

As representações elementares para campos vetoriais estão entre as primeiras implementadas no meio da Visualização Científica em Mecânica dos Fluidos [Hen90]. Isso ocorre porque as primeiras tendências na área foram de reproduzir ou simular técnicas experimentais, a maioria das quais fornece apenas informações básicas sobre o escoamento do fluido (vide Item 2.1). Ao longo do texto será destacada, gradualmente, essa semelhança com técnicas experimentais.

Ícones Puntuais (*glyphs* ou “*hedgehogs*”). No meio científico, a representação mais tradicional e intuitiva para uma entidade vetorial atuante num determinado ponto de um domínio consiste em atribuir um segmento de reta orientado ao ponto em questão, com direção e sentido do vetor e, em geral, comprimento proporcional à magnitude do vetor (ou seja, “desenhar um vetor”). Em Mecânica dos Fluidos, no caso de um campo de velocidades, essa seria uma técnica análoga à colocação de “*tufits*”<sup>2</sup>, uma técnica experimental consagrada. Assim, a técnica computacional equivalente é escolher uma certa quantidade de pontos representativos do escoamento (domínio) e atribuir a cada um deles um *glyph*, ou ícone orientado, na direção do campo vetorial naquele ponto, por exemplo, velocidade local. Muitas formas de *glyphs* e ícones teoricamente adequados para esse tipo de representação vêm sendo estudadas nos últimos anos, conforme pode ser observado em [Sch96] (Cap.5, p.155), mas a eficácia da maioria ainda é discutível, particularmente no caso tridimensional.

Segundo a conclusão de Delmarcelle e Hesselink [Del95] e aquelas observadas na grande maioria dos trabalhos relativos à visualização de campos vetoriais pesquisados no presente trabalho, a representação por ícones puntuais é útil para domínios bidimensionais, porém não é prática para situações tridimensionais. Isso ocorre devido a uma série de motivos, principalmente o congestionamento visual (“*visual clutter*”) observado quando os *glyphs*/ícones se sobrepõem desorganizadamente devido à projeção na imagem 2D final, tornando impossível extrair a estrutura intrínseca do campo vetorial. Isso é exemplificado com clareza em [Del95] (p.138). Outro problema ocorre na possível ambigüidade da projeção final dos *glyphs*, pois em geral um segmento de reta projetado num plano pode corresponder a várias posições da mesma linha no espaço, gerando problemas de orientação.

Apesar desses problemas, acredita-se que o uso de ícones puntuais não deve ser dispensado como ferramenta prática e de baixo custo, principalmente para campos bidimensionais ou secções

---

<sup>2</sup> Pequenos pedaços de linha que se orientam conforme a velocidade local no escoamento.

projetadas de campos tridimensionais. Um trabalho recente nesse tipo de técnica é o de Dovey [Dov95], que trata de um método para a visualização de campos vetoriais através de *glyphs*. Esse trabalho considera a redistribuição de pontos (“*resampling*”) necessária para uma visualização uniforme no caso de malhas de pontos irregulares e/ou curvilíneas, típicas de aplicações em CFD ou experimentos concentrados em determinada região do campo vetorial. Para executar as interpolações necessárias, são adotados conceitos de funções aproximadoras de elementos finitos, aplicadas aos elementos de volume (3D) ou área (2D) que constituem a malha. Para o *resampling*, dois métodos diferentes são propostos. O primeiro, referido como “sobre o espaço físico”, pressupõe a imposição de uma malha “desejada” de pontos do campo e um processo de busca (através de “*hierarchical bounding boxes*”) para definir em que elementos da malha cada um dos pontos desejados se localiza. O segundo método, referido como “sobre o espaço paramétrico”, assume necessária uma distribuição de probabilidade uniforme de localização de pontos amostrados sobre todo o domínio, definindo portanto uma certa densidade de pontos (por volume ou área), a qual define a quantidade de pontos a serem amostrados em cada elemento da malha. A partir disso, e de uma distribuição de probabilidade (de inserção de um novo ponto) que depende da forma de cada elemento, pontos são distribuídos aleatoriamente sobre cada elemento da malha. O primeiro método garante uma distribuição uniforme de pontos, porém o processo de busca envolvido o torna mais dispendioso que o segundo, o qual, com bons resultados, se presta melhor a aplicações interativas.

A interpolação baseada em funções gerais e conceitos de elementos finitos pode ser útil também em outras aplicações (ex., integrações para obtenção de “*streamlines*”); outra vantagem destacada é a de que os ícones pontuais são uma técnica barata que permite interatividade em tempo real. Uma proposta interessante seria o uso de *glyphs* associados a um dispositivo virtual do tipo sonda, que permitisse explorar o campo vetorial interativamente.

Linhas de Escoamento. Representações que envolvem linhas atravessando o domínio são mais abrangentes, uma vez que implicam numa “interpolação mental” dos valores envolvidos. Para campos vetoriais em escoamento de fluidos, temos alguns casos específicos que são descritos abaixo.

Dado um campo vetorial  $\mathbf{v}$  (de velocidades, por exemplo), dependente da posição  $\mathbf{x}$  no domínio e do tempo  $t$ ,  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ , podemos definir as seguintes linhas características do campo vetorial [Fox85]:

(i) *Trajetórias* (“*particle traces*”). Supondo-se que o campo seja de velocidades, uma trajetória seria a linha percorrida após um intervalo  $\Delta t$  por uma partícula sem massa inserida no instante inicial  $t_0$ , num ponto  $\mathbf{x}_0$  do domínio. O conjunto das posições  $\mathbf{x}$  da partícula que definem a trajetória é, portanto, a solução da equação:

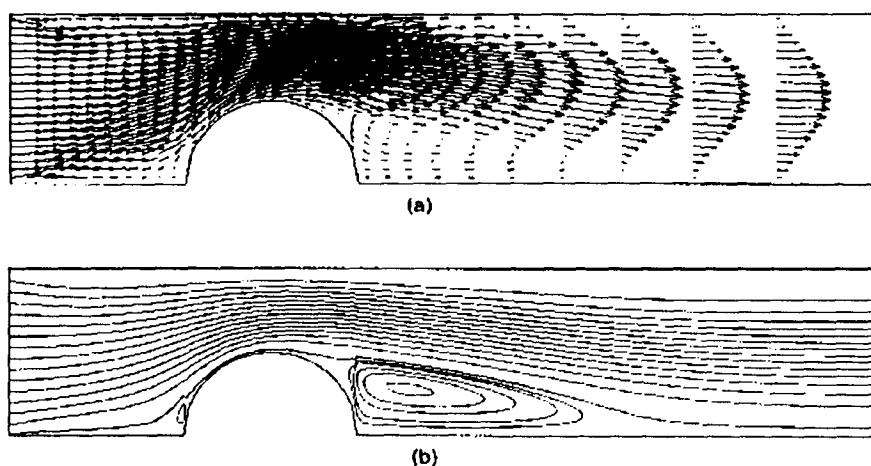
$$d\mathbf{x}/dt = \mathbf{v}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

Experimentalmente, uma trajetória num campo de velocidades poderia ser obtida, por exemplo, injetando-se no ponto  $\mathbf{x}_0$  uma partícula de pequena massa (uma pequena bolha, por exemplo) e tirando-se uma fotografia de longa exposição do escoamento.

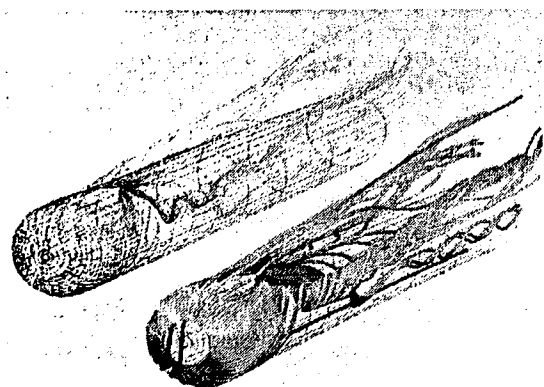
(ii) *Linhas de emissão* (“*streaklines*”): uma “*streakline*” é formada ligando-se as posições, num instante  $t = t_0 + \Delta t$ , de partículas que foram seqüencialmente emitidas de um ponto  $x_0$  a partir do instante  $t_0$ . Experimentalmente, poderia ser obtida com uma fotografia do escoamento no tempo  $t$ , após a emissão contínua de bolhas ou fumaça. A animação de *streaklines* ao longo do intervalo  $\Delta t$  permite visualizar o desenvolvimento do escoamento local no tempo.

(iii) *Linhas de corrente* (“*streamlines*”): uma linha de corrente corresponde à solução da Equação 1 no espaço, num dado instante  $t_0$  fixo. A “*streamline*” é uma linha partindo de  $x_0$  e tangente ao campo vetorial em todos os pontos.

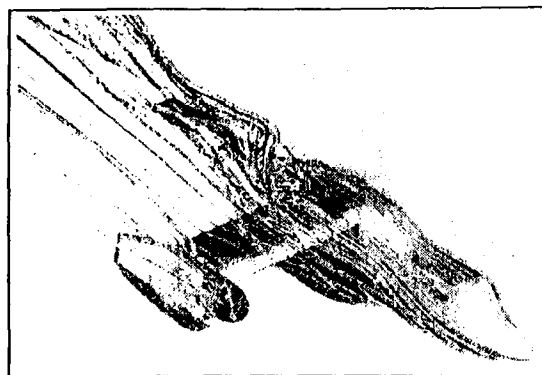
Os três tipos de linhas de escoamento são coincidentes *apenas se* o escoamento ou campo vetorial for constante no tempo, ou seja, estacionário. Reafirma-se que essas linhas são representações elementares, pois definem as condições do campo vetorial apenas nos pontos que percorrem. No entanto, as linhas de escoamento são muito mais eficientes que ícones pontuais para transmitir características gerais do escoamento, sendo capazes de gerar representações úteis com muito menos congestionamento visual. A Figura 1, extraída de um trabalho em CFD deixa bastante claras as eventuais vantagens das linhas de escoamento sobre o uso de *glyphs*, mesmo para o caso bidimensional relativamente simples de uma secção no plano de simetria de um duto com um obstáculo hemisférico. Um exemplo tridimensional pode ser visto na Figura 2 [Del95], na qual vórtices ao redor de um cilindro de ponta hemisférica num escoamento livre tornam-se bastante evidentes. Outro exemplo de utilização prática recente é apresentado na Figura 3 [Tsz96], correspondente ao campo de velocidades em torno de uma aeronave, obtido por solução numérica das equações de Navier-Stokes de camada fina.



**Figura 1** - Visualização por *glyphs* (a) em comparação a *streamlines* (b).



**Figura 2** - *Streamlines* para as velocidades de um escoamento externo tridimensional [Del95].

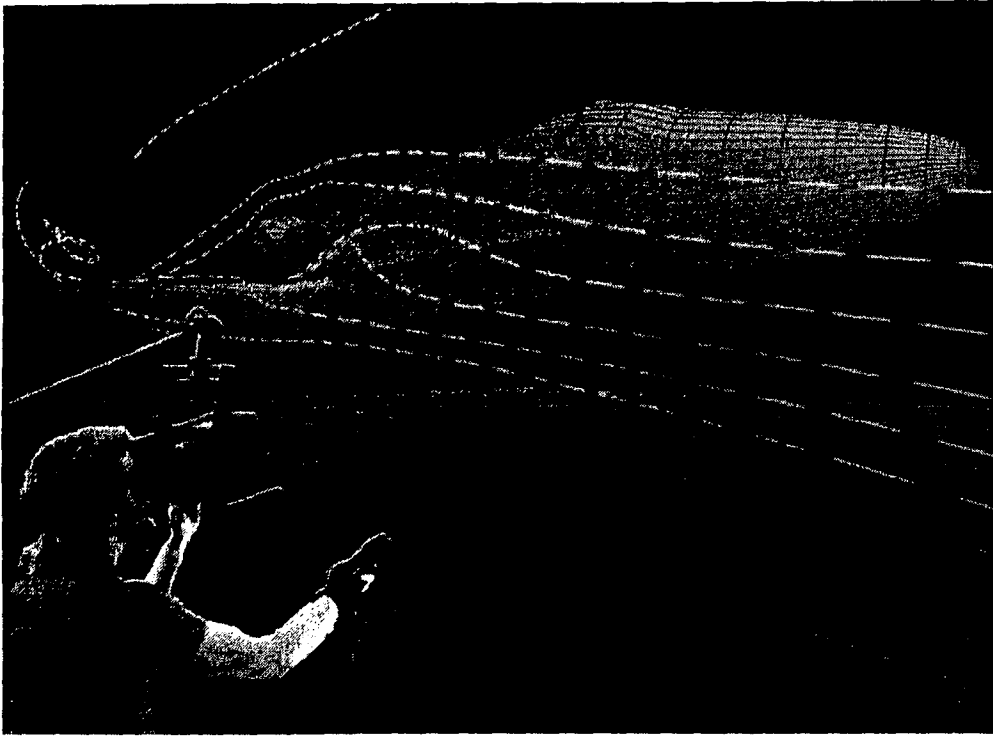


**Figura 3** - Visualização do campo de velocidades em torno de uma aeronave por *streamlines* [Tsz96].

A geração de linhas de escoamento implica em integração da Equação (1) para diferentes condições iniciais. Para o caso geral de conjuntos de dados discretos, devem ser usados esquemas de interpolação e integração numéricos. Delmarcelle e Hesselink [Del95] destacam que essa é uma grande fonte de erros de visualização. Técnicas de integração numérica de primeira ordem, tais como a de Euler, são inadequadas para a maioria dos casos, sendo necessários esquemas do tipo Runge-Kutta de segunda ordem, pelo menos. É necessário um grande controle dos passos de integração na proporção das dimensões características das diferentes regiões do escoamento, tais como regiões de grande turbulência e/ou variação de velocidade, para que resultados irreais não ocorram. Os problemas envolvidos no processo de integração são evidenciados em [Sch96]. Todos esses processos elevam o custo da visualização de linhas de escoamento consideravelmente em relação a ícones pontuais.

A visualização de linhas de emissão, ou *streaklines*, possui maior sentido na interpretação de fenômenos transientes quando associada à animação, na qual o desenvolvimento da linha no espaço ao longo do tempo pode ser apreciado, tal como em uma situação experimental. Uma abordagem não convencional ao problema foi adotada por Bryson e Levit [Bry92], que propõem um sistema interativo de realidade virtual no qual o usuário/analista se utiliza de um monitor estereoscópico “*head-mounted*” (do tipo “óculos”) e de uma interface *Dataglove*, uma luva capaz de transmitir comandos sinalizados manualmente. O usuário é, dessa forma, inserido num ambiente virtual tridimensional no qual pode interagir espacialmente com o escoamento, neste caso para aplicações aeroespaciais (num túnel-de-vento virtual). Por comandos manuais, o usuário é capaz de explorar o problema com translações e rotações, além de poder definir pontos de emissão de *streaklines* e observar seu desenvolvimento no tempo, de qualquer ângulo possível (Figura 4). Um aspecto importante do trabalho é o de processamento em tempo real das imagens, que exige tanto o armazenamento de soluções intermediárias quanto a obtenção imediata de outras. Delmarcelle e Hesselink [Del95] destacam que o sistema é dotado de uma arquitetura distribuída de processamento, na qual as integrações das *streaklines* são efetuadas por um supercomputador e transmitidas a uma estação gráfica para renderização, em tempo real. Esta proposta é um exemplo extremo da ligação entre as representações vetoriais elementares e

técnicas experimentais, no qual permite-se que resultados de CFD sejam avaliados e comparados em bases semelhantes às de um experimento.

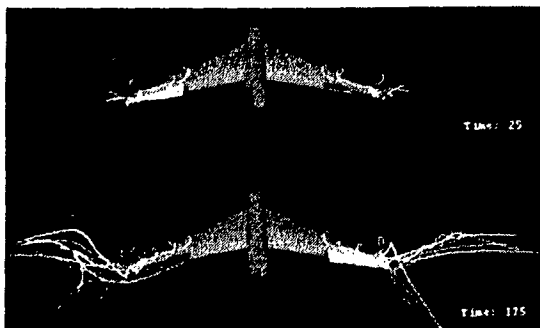


**Figura 4** - Ambiente virtual para visualização interativa de “streaklines” [Bry92].

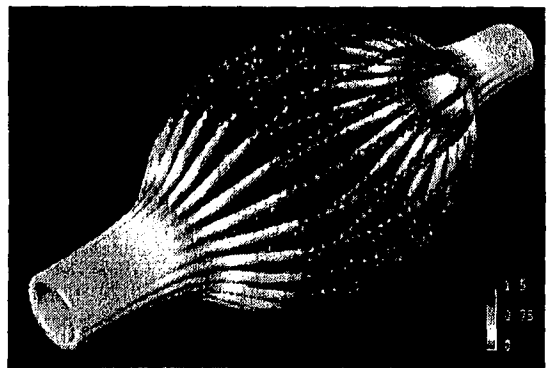
Uma abordagem mais convencional foi proposta por Lane [Lan94], que descreve a implementação e testes do sistema UFAT - *Unsteady Flow Analysis Toolkit* (“Toolkit” para Análise de Escoamentos Transientes), para visualização de *streaklines* ao redor de configurações aeroespaciais. A proposta aborda problemas inerentes à obtenção de linhas de escoamento, tais como a freqüente necessidade de um grande número de intervalos de integração (alta resolução) e os esquemas de integração em si, os quais são propostos como Runge-Kutta adaptativos de segunda ou quarta ordem, de acordo com a necessidade/complexidade. O sistema possibilita animação interativa distribuída (em rede), através do contato à distância entre a estação gráfica de saída e sistemas de grande capacidade de armazenamento que transmitem grandes quantidades de dados pré-processados, em tempo real. Outras facilidades usuais são oferecidas (apresentação paralela de escalares, compatibilidade com diferentes ambientes gráficos, etc.), demonstrando bons resultados em diversos exemplos de aplicação. A Figura 5 apresenta resultados do UFAT para uma configuração de um avião de transporte supersônico.

Em termos de capacidade de transmissão de informação visual, o poder das linhas de escoamento pode ser aumentado acrescentando-se uma certa espessura na região adjacente às linhas, formando fios espessos ou tubos (Figura 2). Uma proposta desse tipo foi feita por Brill et al [Bri94], na qual a percepção visual seria aumentada pelo uso de “*streamballs*”. Nesta técnica, baseada no conceito de “*metaballs*”, pontos das linhas de interesse são obtidos por um método de integração adequado, a intervalos que expressem a intensidade vetorial local, ou seja, quanto maior a intensidade, maiores serão os intervalos entre pontos de interesse obtidos (usando-se intervalos de tempo constantes num campo de velocidades, por exemplo). A cada um desses pontos é associado um campo potencial idêntico; a

extração de uma eqüipotencial do campo total define superfícies fechadas centralizadas nos pontos. O efeito visual das superfícies é semelhante ao de “gotas” esféricas de fluido: em regiões de maior intensidade e/ou divergência do campo vetorial, as gotas se separam; caso contrário, se fundem em tubos envolvendo as linhas de corrente, ou mesmo feixes de tubos formando superfícies espessas (Figura 6). Embora os autores afirmem que o resultado permite menor congestionamento da representação final, acredita-se que ocorra justamente o inverso em escoamentos com elevada divergência, nos quais a representação poderia resultar em uma nuvem de esferas distribuídas no espaço, incapaz de transmitir qualquer noção de direção ou intensidade do campo. Uma solução alternativa seria a animação das esferas, associada a recursos interativos de rotação e controle de parâmetros em tempo real.



**Figura 5** - Quadros de animação de *streaklines* gerados pelo sistema UFAT [Lan94].

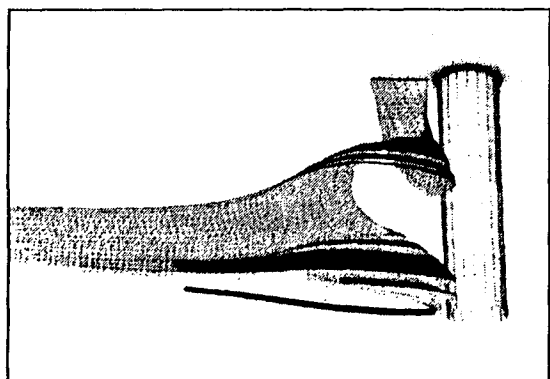


**Figura 6** - *Streamballs* [Bri94].

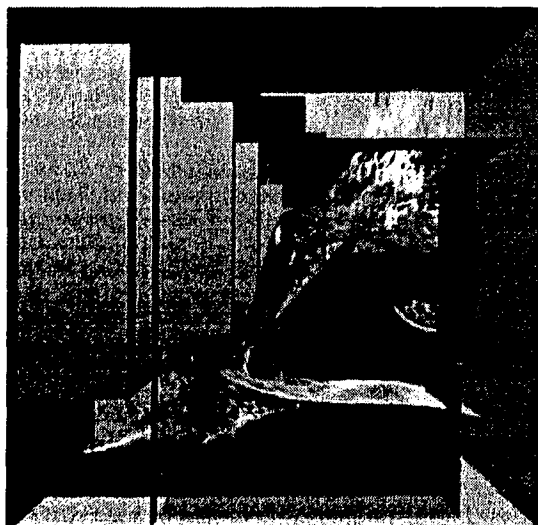
Superfícies de escoamento (“streamsurfaces”). Corresponde à extensão lógica do conceito de linhas de escoamento. Enquanto para cada linha de escoamento temos um ponto de origem  $x_0$ , uma superfície de escoamento seria gerada ao traçarmos as linhas de escoamento para cada um dos infinitos pontos de um segmento de linha de origem, ou seja, um conjunto contínuo de pontos de origem  $\{x_0\}$ . O equivalente experimental para um campo de velocidades seria a emissão de várias partículas adjacentes numa mesma linha simultaneamente, que seriam convecionadas pelo escoamento, desenvolvendo uma superfície.

Obviamente, não é possível nem desejável desenvolver linhas de escoamento para infinitos pontos. Delmarcelle e Hesselink [Del95] citam um algoritmo que desenvolve uma superfície a partir de um número finito de pontos ao longo de uma linha, integrando linhas de escoamento para cada um dos pontos simultaneamente; a cada passo de avanço espacial das linhas, o algoritmo gera uma superfície poligonal entre linhas adjacentes por “tiling”. Caso ocorra divergência significativa do escoamento, novos pontos de geração de linhas são inseridos na frente de avanço da integração, evitando assim polígonos muito grandes e imprecisos; caso a divergência ultrapasse um certo limite, uma frente independente de avanço é definida, “bifurcando” a superfície de escoamento. Um exemplo é dado na Figura 7.

Uma abordagem não convencional à geração de *streamsurfaces* foi proposta por van Wijk [Van93], com o conceito de “*surface particles*”, ou partículas de superfície. Esta técnica combina características de superfícies de escoamento e sistemas de partículas distribuídas: partículas são renderizadas como pequenos pedaços de superfície sendo convecionados pelo escoamento/campo vetorial. A posição das partículas é determinada por integração semelhante à de linhas de escoamento, aplicada a dois pontos da partícula: isto é o suficiente para definir um versor normal à partícula, utilizado para sombreado na renderização, o qual fornece noção da orientação local da partícula de superfície. Quando iniciada a integração do campo para várias partículas adjacentes inicialmente orientadas numa linha de emissão, o conjunto das partículas transmite a noção de uma superfície única; a medida que o campo vetorial diverge, as partículas se separam, evidenciando a ocorrência de dispersão (Figura 8). O autor propõe, ainda, um procedimento de renderização adequado para produzir animações a um custo relativamente baixo, uma vez que sistemas de partículas requerem movimento para transmitir a noção de um campo vetorial. Através dos resultados apresentados, observa-se que o método é mais adequado para representações qualitativas, principalmente para campos vetoriais que apresentem divergência acentuada, nos quais observa-se grande dispersão das partículas.



**Figura 7** - *Streamsurface* gerada por *tiling* entre linhas de escoamento adjacentes [Del95].



**Figura 8** - Visualização do campo de velocidades convectivo no interior de um aparelho de TV [Van93].

Texturas. Texturas anisotrópicas, que apresentam orientação numa certa direção, podem ser utilizadas para visualizar campos vetoriais de diversas maneiras. Delmarcelle e Hesselink [Del95] classificam as texturas com essa aplicação como representações elementares, uma vez que transmitem informações apenas sobre os pontos que cobrem, sem levar em conta quaisquer modelos propositais de comportamento local.

Van Wijk [Van91] foi o primeiro autor identificado nesse levantamento bibliográfico a atacar o problema da criação de texturas adequadas à visualização científica. Definindo *textura* como sendo a variação local das propriedades visuais de uma superfície, o autor estabelece que as técnicas de síntese de texturas utilizadas até então para produzir imagens realísticas (texturas naturais, etc.) não eram adequadas a aplicações científicas, principalmente devido à falta de uma relação biunívoca entre as



características da textura e os parâmetros que controlam sua geração. Sendo assim, defende que o objetivo do realismo deve ser substituído pelo da expressividade; variações nos dados representados devem produzir variações claras e proporcionais na textura correspondente. Com base nisso, o autor propõe a técnica de “*spot noise*” para a geração de texturas estocásticas controláveis, um equivalente gráfico das funções randômicas “*shot noise*”, amplamente utilizadas em engenharia. Através das relações entre os domínios do espaço e da frequência, é possível provar que a textura proposta pelo autor corresponde à convolução (ou filtragem) de padrões de manchas deterministicamente definidas contra ruído branco. O controle da geometria dos padrões de manchas permite controlar diretamente as características da textura final. De especial interesse para campos vetoriais é a visualização do escoamento sobre superfícies paramétricas, onde o padrão de manchas proposto como o mais adequado é o de elipses alongadas na proporção da magnitude da velocidade local e de eixo maior orientado na direção do campo. Van Wijk apresenta uma aplicação interessante para as velocidades ao redor do casco de um navio, apresentado na Figura 9.

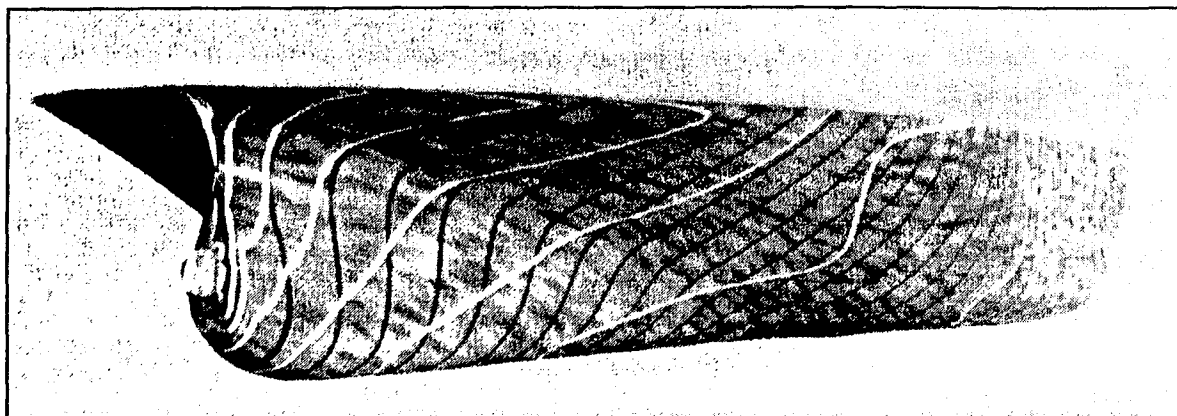
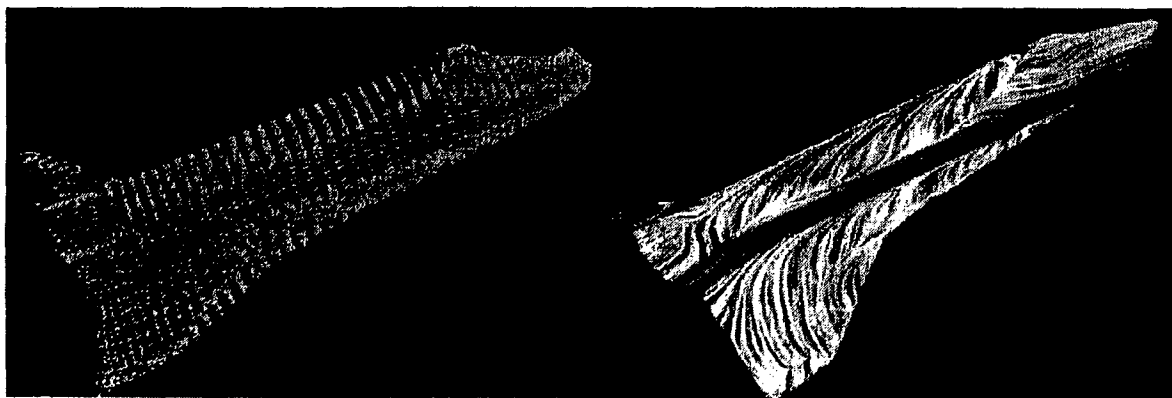


Figura 9 - Visualização de velocidades adjacente ao casco de um navio por *spot noise* [Van91].

Cabral e Leedom [Cab93] propuseram a técnica de LIC - *Linear Integral Convolution* - para a geração de texturas para representar campos vetoriais bidimensionais, semelhante ao *spot noise* de van Wijk. Ao invés de padrões de manchas, os autores empregam trechos de *streamlines* de comprimento limitado, calculados localmente por integração numérica em torno de vários pontos do campo. Esse procedimento gera um filtro que pode ser sobreposto sobre qualquer textura de entrada, gerando uma textura direcional, o que equivale à convolução entre os segmentos de *streamlines* distribuídas e a textura de entrada. As principais vantagens alegadas sobre o *spot noise* são a captura de regiões de grande curvatura do campo vetorial com precisão, além da possibilidade da aplicação sobre qualquer textura básica (inclusive fotografias ou figuras) e não apenas ruído branco. São apresentadas as condições e o algoritmo adotado para a integração local de *streamlines*, inclusive detecção de eventuais pontos críticos (campo vetorial nulo). De especial interesse é a apresentação de um algoritmo para representar a direção do campo vetorial através da animação da textura com filtros de movimento periódico. Finalmente, são sugeridos procedimentos para pós-processamento da textura final, além das condições necessárias a uma extensão do método para três dimensões.

Forsell [For94] propõe um aperfeiçoamento da técnica de LIC no tocante a vários aspectos, com aplicação específica a campos vetoriais. Em primeiro lugar, a técnica foi efetivamente implementada para gerar texturas sobre superfícies paramétricas tridimensionais genéricas, tais como aquelas resultantes de métodos de CFD. Dessa maneira, torna-se possível visualizar o campo sobre a superfície de um objeto tridimensional, tal como uma aeronave. O procedimento consiste numa simples conversão de coordenadas físicas para coordenadas computacionais da malha (*grid*), via Jacobiano, e uma parametrização em duas coordenadas, obtendo-se um plano sobre o qual aplica-se LIC levando-se em conta as componentes do campo vetorial tangentes ao mesmo; a forma original é então recomposta por uma técnica (genérica) de mapeamento inverso. Um exemplo dado naquele trabalho é uma análise do escoamento na superfície de um ônibus espacial (Figura 10). Também foi abordado o problema da animação para indicação de direções no campo. Nesse caso, torna-se necessário adaptar o método sugerido por Cabral e Leedom para uma malha irregular, alterando-se os comprimentos do filtro de convolução em razão inversa às dimensões locais da malha, evitando-se assim magnitudes aparentes errôneas. Finalmente, foi elaborado um método para indicar não apenas a direção vetorial por animação, mas também a magnitude local, associando maiores velocidades locais aparentes às maiores intensidades; isso foi obtido através de deslocamentos locais de fase da função filtro em função da magnitude local do campo. No entanto, essa última implementação não foi plenamente testada devido a limitações de hardware disponível. Como futuras extensões do trabalho, a autora sugere a aplicação a malhas não-estruturadas e campos transientes e/ou tridimensionais.



**Figura 10** - Visualização de velocidades na superfície de um ônibus espacial por textura gerada por LIC. Comparação com *hedgehogs* [For94].

De Leew e van Wijk [Lee95] apresentam propostas de desenvolvimento do conceito *de spot noise*. No referente à técnica em si, é proposto um esquema de deformação mais elaborado das manchas circulares em função da magnitude vetorial local, que passa a levar em conta a curvatura e a divergência local, tornando-se, portanto, capaz de representar regiões de elevada curvatura com mais clareza, numa proposta semelhante à LIC de Cabral e Leedom [Cab93]. Além disso, propõe-se o uso de pré-filtragem das manchas básicas para eliminar baixas frequências na textura final, indesejáveis por diminuírem a clareza. São também descritos esquemas possíveis para a utilização de “hardware” gráfico e tratamento de dados dispostos em organizações (*grids*) irregulares. Os autores alegam que a técnica é capaz de representar magnitudes do campo vetorial adequadamente, ao contrário da LIC. Finalmente, sugere-se

que um esquema semelhante poderia ser aplicado a manchas tridimensionais, obtendo-se uma textura 3D por renderização volumétrica.

Finalmente, a discussão sobre texturas pode ser complementada destacando-se conclusões paralelas observadas em [Del95] e [Van91]: o uso de texturas fornece uma representação qualitativa do campo vetorial, não se prestando a medições quantitativas precisas. No entanto, entendemos que a não necessidade de execução de complexas integrações numéricas como as necessárias para obtenção de linhas de escoamento coloca as texturas como alternativa prática, tendo em vista várias simplificações possíveis através de “rendering” por hardware gráfico. Além disso, permitem estabelecer correlações visuais com muitas técnicas experimentais que também produzem texturas e, portanto, uma possibilidade de rápida identificação qualitativa de características paralelas e conflitantes na validação de análises por CFD.

Técnicas mistas e/ou não convencionais. A presente pesquisa revelou alguns métodos de representação elementar de escoamentos/campos vetoriais que mereceriam um parágrafo a parte, devido ao uso simultâneo de muitas técnicas diferentes ou devido ao emprego de abordagens não usuais. Três trabalhos são descritos a seguir.

Hall [Hal93] apresenta uma proposta não convencional de visualização de campos vetoriais bi- e tridimensionais através de mapeamento por cor. A proposta baseia-se na premissa de que o ser humano é capaz de, após algum treinamento, discernir cores com precisão suficiente e extrair mais de uma informação a partir de uma cor observada; nesse caso, cada conjunto de magnitude, direção e sentido possíveis para um vetor é atribuído a uma cor diferente. Essa atribuição é feita utilizando-se um mapeamento baseado em uma esfera sólida de raio unitário cuja cor varia contínua e suavemente por todo seu volume (ou em um círculo, no caso 2D). Uma vez normalizado o campo vetorial com base na maior magnitude do campo (de forma que todos os vetores tenham módulo no intervalo  $[0,1]$ ), os vetores de cada ponto de interesse do domínio são associados ao centro da esfera, de forma que cada vetor diferente apontará para uma cor diferente no interior do volume da esfera. Embora proponha diferentes variações de cor para o mapeamento, o autor toma por base uma esfera cuja superfície tem variação espectral de cor ao redor do “equador”, variando linearmente o tom em função da posição azimutal para a cor preta no “pólo norte” e a cor branca no “pólo sul”. Nos pontos interiores à superfície (magnitudes menores que 1) a “pureza” da cor, ou seja, a proporção de tom cinza varia linearmente da superfície para o centro da esfera, onde o cinza puro representa magnitude zero.

O autor propõe o uso de renderização volumétrica (“*ray casting*”) para obter a representação no caso 3D, na qual máscaras de transparência/opacidade e secções do volume permitiriam realçar ou isolar características e regiões de interesse (por exemplo, tornando transparentes os pontos com vetores fora de uma determinada faixa de direções de interesse, portanto tornando visível apenas o caso oposto). Um exemplo é apresentado na Figura 11 para o escoamento 2D na secção de simetria de uma câmara de combustão de um turbojato. Acredita-se que grande vantagem da proposta é a possibilidade de eliminação do problema de congestionamento visual, uma constante para campos vetoriais 3D. O maior problema da proposta de Hall é a premissa do trabalho em si: conforme observado por Brodliet al [Bro92], variações lineares de parâmetros de cor não são, em geral, “percebidas” linearmente (falta de

percepção linear), uma vez que os diferentes tons interferem uns nos outros. Assim, combinações de parâmetros de cor que produzam percepção linear ainda são objeto de estudo [Rob88, Mey80]. Outro problema é a grande variação da capacidade de percepção da cor que ocorre entre os indivíduos, que prejudica a padronização do procedimento. Por outro lado, acredita-se que, ainda assim, a técnica pode ser útil uma vez que o usuário adquira certo treinamento no reconhecimento de padrões por comparação aos resultados de outras técnicas, para casos especiais de validação, conforme sugerido pelo autor. Além disso, a prática no uso da técnica pode ajudar a melhor compreender o problema da percepção linear de cores.

Ebert et al [Ebe94] apresentam três diferentes métodos para renderização volumétrica e animação de campos de velocidade em escoamentos. Os métodos propostos são baseados na geração de texturas tridimensionais com elevado grau de realismo, com o aspecto de fumaça translúcida em escoamento. Os modelos de iluminação são baseados no conceito de Blinn/Kajiya, descrito em detalhe em [Wat92], que inclui, em geral, contribuições da densidade do meio, reflexividade do material e as posições das fontes de luz e do observador. Os métodos, apresentados em ordem inversa de complexidade, são:

- \_ renderização com modelo complexo de iluminação, para obtenção de maior realismo;
- \_ renderização com modelo simplificado de iluminação, porém com maior flexibilidade das funções transferência de cor e opacidade empregadas, possibilitando a elaboração de “máscaras” para realçar ou isolar regiões de interesse do domínio;
- \_ renderização rápida com modelo básico de iluminação, adequado para “*previews*” e elaboração de animações.

Os autores defendem que o realismo da imagem final é uma das características mais importantes para facilitar a visualização qualitativa de escoamentos de fluidos, enfatizando que os pacotes para visualização de fluidos atualmente disponíveis não empregam tal recurso. Destacam a variação de detalhes possibilitada com o ajuste de parâmetros de renderização e iluminação. Entendemos que *realismo* é um fator desejável na visualização em Mecânica dos Fluidos, principalmente para efetuar “validação qualitativa” de análises de CFD por comparação com resultados experimentais; no entanto, acreditamos que o enfoque dado pelos autores à questão do realismo é excessivo, carecendo de uma visão mais ampla sobre o problema científico em si. Justificamos essa observação por acreditar que *superar as limitações da observação experimental é um dos principais objetivos da Visualização Científica* e alcançar esse objetivo envolve também a geração de representações abstratas, e não apenas de simulações realísticas. Por outro lado, entendemos que um aspecto positivo desse trabalho é a abordagem flexível para renderização volumétrica de escoamentos, que oferece alternativas práticas em direção à interatividade e recursos de animação.

Finalmente, Max et al [Max94] apresentaram várias propostas para visualização de campos de velocidade tridimensionais em regiões próximas a (ou sobre) superfícies de contorno arbitrárias utilizando técnicas variadas. As superfícies em questão não estão necessariamente relacionadas ao campo vetorial, como ocorre com as *streamsurfaces*. Quatro diferentes técnicas foram implementadas:

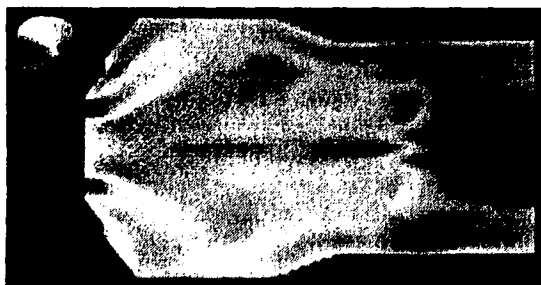
- (<sup>1</sup>) geração de uma textura tridimensional semelhante à *spot noise* de van Wijk [Van91]. Posições são aleatoriamente selecionadas no espaço dentro do domínio definido por uma distância  $D$

arbitrária da superfície de contorno; a cada posição é atribuído um plano (da obtenção de um versor normal) que contém o vetor local, sobre o qual são renderizadas manchas circulares alongadas difusamente de acordo com a magnitude local (“*motion blurred*”) de maneira semelhante àquela abordada em [Van93]. Sugere-se um procedimento para emprego de *hardware* para renderização e renovação de linhas ocultas. Um exemplo é apresentado na Figura 12.

(<sup>2</sup>) Linhas de escoamento projetadas sobre a superfície de contorno. A integração do campo vetorial é feita por uma versão adaptativa do algoritmo de Euler. Foram elaborados algoritmos para o gerenciamento da distribuição das linhas e controle de seus comprimentos, além de testadas várias formas diferentes de projeção das linhas sobre a superfície. Tendo em vista os resultados, os autores demonstram que, em geral, o processo de projeção provoca distorções que prejudicam a percepção intuitiva da natureza do escoamento; esse problema não ocorre apenas para superfícies tangenciais ao campo vetorial, ou seja, *streamsurfaces*.

(<sup>3</sup>) Geração de uma textura tridimensional pela distribuição aleatória de linhas tangentes ao campo vetorial no interior de elementos de volume, numa região do espaço dentro do domínio definido por uma distância *D* arbitrária da superfície de contorno. As imagens resultantes mostram uma textura anisotrópica de aparência “fibrosa”, semelhante a maços agrupados de linhas (“*line bundles*”). Tom, saturação e posições são perturbados aleatoriamente no volume, ou associadas a intensidades escalares.

(<sup>4</sup>) Representação do campo vetorial próximo à superfície através de linhas semelhantes a cabelos, ou pelos presos perpendicularmente à superfície. Propõe-se uma interpolação local ponderada entre o vetor normal à superfície nos pontos de interesse e o vetor/velocidade a uma distância definida da superfície, gerando-se segmentos de linhas tangentes a ambas as direções. O controle dos parâmetros de interpolação (associada à “rigidez” aparente dos cabelos) é sugerido como meio de adequação da representação, além da cor local e da opacidade.



**Figura 11** - Visualização de um campo de velocidades por mapeamento por cores [Hal93].



**Figura 12** - “Spot noise” tridimensional, campo de velocidades [Max94].

Os autores esclarecem que o objetivo do trabalho não é propor técnicas necessariamente “melhores” do que outras mais convencionais, mas sim contribuir para a variedade de ferramentas visualização disponíveis, eventualmente mais adequadas para diferentes áreas de aplicação. Entendemos que esse tipo de contribuição é importante, uma vez que a *variabilidade* das técnicas é necessária para a

evolução da Visualização Científica, pois é premissa para que ocorra um processo de “seleção natural” das técnicas entre os usuários, inseridos nos mais diferentes meios de pesquisa.

### 2.3.2 Representações Vetoriais Locais

Conforme discutido no Item 2.1, representações locais são aquelas que inerentemente transmitem informação sobre os pontos do domínio que ocupam e sobre pontos numa região adjacente. Delmarcelle e Hesselink [Del95] introduzem a abordagem a representações locais para campos vetoriais em fluidos com o conceito de *pontos críticos*. Esses são pontos que correspondem a singularidades na solução das equações diferenciais parciais que regem o escoamento de fluidos, nas quais a magnitude do campo é nula e as declividades das linhas de corrente que ali convergem são indeterminadas. Geralmente, correspondem a pontos do escoamento nos quais importantes características do comportamento do fluido são definidas, tais como separação de camada limite, pontos/regiões de adesão, bolhas de separação, centros de vórtices, etc.

Em escoamentos bidimensionais, os pontos críticos se dividem em seis tipos básicos, cada qual com seu padrão característico do campo vetorial adjacente (vide [Del95], p. 145). Em três dimensões, os possíveis campos adjacentes aos pontos críticos correspondem a combinações dos seis tipos de campos bidimensionais, definidos em três planos perpendiculares e intersectantes no ponto crítico. Em qualquer dos dois casos, *glyphs* podem ser adotados para cada tipo de ponto crítico bidimensional, e os casos tridimensionais podem ser representados por sobreposição ou combinação de *glyphs* 2D, renderizados sobre os três planos perpendiculares. Um exemplo típico é apresentado em [Del95], p. 147, para o campo de velocidades em torno de um cilindro de ponta hemisférica. São apresentadas referências a procedimentos computacionais para extração de pontos críticos de conjuntos de dados vetoriais.

Outras representações locais apresentadas por Delmarcelle e Hesselink [Del95] são os conceitos de “*streamribbons*” (faixas de escoamento) e “*streamtubes*” (tubos de escoamento); ambas são capazes de transmitir a configuração local do escoamento/campo vetorial ao redor e ao longo de linhas de escoamento. “*Streamribbons*” nada mais são que superfícies de escoamento estreitas, semelhantes a fitas, definidas pela geração de duas linhas de escoamento próximas; além do posicionamento e direção que seriam também representados pelas linhas isoladas, uma *streamribbon* também transmite a noção espacial de divergência local do campo vetorial, onde a “fita” torna-se mais larga, assim como as componentes de rotação do campo na região adjacente, observada pelo aspecto de uma “fita torcida”. Em campos vetoriais que apresentam divergência excessiva esse conceito de *streamribbons* deve ser descartado, uma vez que o aumento excessivo da largura da fita não permite a expressão adequada da taxa de rotação. Nesses casos, é possível gerar uma *streamribbon* de largura fixa ao longo de uma linha de escoamento, em torno da qual é produzida uma superfície cuja rotação local por unidade de comprimento da linha de escoamento será dada pela integração da vorticidade local na direção da linha, regida pela equação:

$$d\phi/ds = \frac{1}{2} \omega \cdot \mathbf{v}/|\mathbf{v}|; \quad (2)$$

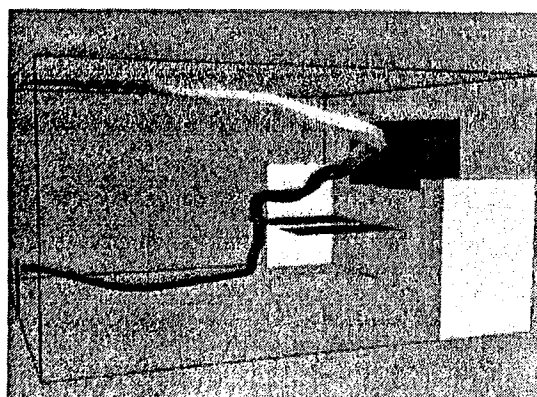
onde  $\omega$  é o vetor de vorticidade local,  $v$  é o vetor do campo em questão (velocidade, por exemplo) e  $s$  é o comprimento na direção da linha de escoamento.

Uma aplicação interessante é apresentada por Pagendarm e Gerhold [Pag95], na qual *streamribbons* representando resultados de simulação são sobrepostas a imagens reais de padrões de superfície obtidos experimentalmente. A aplicação da técnica permitiu, por exemplo, observar um vórtice localizado através da “torção das fitas”, reflexo do qual era indicado pelo experimento (Figura 13).

Um *streamtube* ideal seria uma superfície de escoamento gerada a partir de uma curva fechada arbitrária; a solução numérica corresponde à utilização de um polígono fechado de  $N$  lados, sendo o *streamtube* gerado pela integração de linhas de escoamento a partir dos  $N+1$  vértices desse polígono, de maneira idêntica a uma *streamsurface* genérica. Outra interpretação seria a associação de  $N$  *streamribbons* adjacentes. Para campos de velocidade, a representação por *streamtubes* para regime estacionário tem bastante significado intuitivo, uma vez que as “paredes” dos tubos formados serão sempre tangentes à velocidade local (tubo de corrente). Isso significa que a vazão de massa no interior do tubo é constante. A presença de divergência do escoamento é denotada pela dilatação local do tubo, variando sua área transversal. Seria o equivalente de uma técnica experimental “fictícia” na qual um tubo elástico ideal e sem massa seria inserido no escoamento, sustentado por uma das pontas e orientando-se pela massa de fluido que o atravessa. Em [Del95] são apresentadas comparações entre os resultados obtidos para *streamribbons*, *streamtubes* e linhas de escoamento convencionais. A Figura 14 apresenta um *streamtube* para o escoamento convectivo no interior de uma sala na qual a cor codifica pressão local.



**Figura 13** - *Streamribbons* identificam um vórtice local, por sobreposição a uma foto de um experimento [Pag94].



**Figura 14** - Visualização do escoamento convectivo numa sala através de um *streamtube*. Cores codificam pressão local [Del95].

Entendemos que *streamribbons* e *streamtubes* são representações locais as quais, apesar de envolverem alguma abstração, são bastante intuitivas, ao mesmo tempo em que transmitem informações mais complexas que linhas simples de escoamento. Além disso, o fato de inerentemente apresentarem superfície ajuda a percepção em imagens tridimensionais.

### 2.3.3 Representações Vetoriais Globais

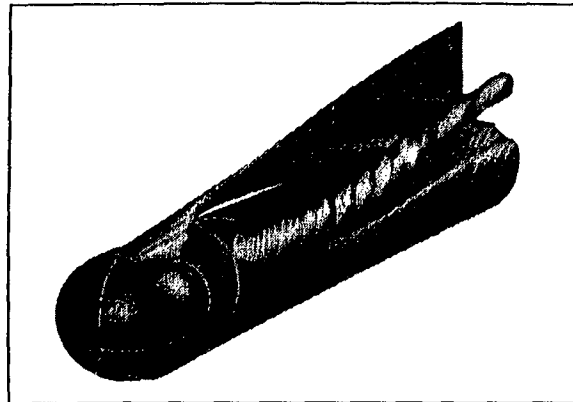
Um campo vetorial de um escoamento não pode, em geral, ser visualizado como um todo apenas acrescentando-se grandes quantidades de representações elementares e locais em muitos pontos do domínio, devido ao inevitável congestionamento visual decorrente. Além disso, o reconhecimento de características importantes passaria a depender dos pontos escolhidos para introduzir as representações; no caso geral, muitas dessas características poderiam ser perdidas durante a análise dos dados visualizados, levando a conclusões errôneas, principalmente para escoamentos complexos. Conforme Delmarcelle e Hesselink [Del95], existe a necessidade evidente de maior abstração na representação: as características chave do escoamento devem ser localizadas por algum algoritmo e então representadas simplificadamente, porém de uma forma que o comportamento geral do campo vetorial possa ser intuído a partir da visualização.

Helman e Hesselink [Hel94] propuseram a extração da topologia do campo vetorial, a qual seria definida localizando-se dois tipos de características chave: os *pontos críticos* do campo (vide Item 2.3.2) e as *linhas ou superfícies de corrente (streamlines)* que os interligam, num dado instante do tempo; esse conjunto corresponde à topologia da solução das equações diferenciais parciais que regem o escoamento. Todo o campo vetorial pode ser intuído a partir desta topologia, pois se sabe que o campo é tangente às linhas/superfícies de corrente e o comportamento geral do campo na região dos pontos críticos também é conhecido. Uma vez definida a “malha” de interligações entre os pontos e as linhas, todo o problema é contornado com poucas entidades geométricas.

Embora façam referência ao caso geral tridimensional da técnica, os autores abordam uma técnica específica para escoamentos tridimensionais *externos*, ou seja, ao redor de corpos imersos num fluido infinito em movimento, típicos de aplicações em aerodinâmica. Pelo algoritmo proposto, inicialmente são identificados os pontos críticos presentes na superfície do corpo em questão (através de um algoritmo citado). As superfícies de corrente que interligam esses pontos obviamente o fazem também sobre a superfície do corpo; as intersecções entre as superfícies de corrente e a do corpo definem, portanto, linhas de corrente que interligam os pontos críticos sobre o corpo. Dessa forma, o problema fica reduzido à superfície do corpo, facilmente parametrizada, e não a todo o domínio tridimensional, simplificando a identificação das linhas de corrente interligantes, ou seja, a definição da topologia superficial. A partir desse resultado, retorna-se ao problema tridimensional, extraindo-se as superfícies de corrente interligantes a partir das correspondentes linhas sobre o corpo por integração do campo vetorial, a qual progride em direção ao fluido livre partindo das linhas superficiais, de maneira semelhante à extração de uma *streamsurface*, descrita no Item 2.3.1. Adicionalmente, os autores sugerem um algoritmo adequado para a extração das *streamsurfaces*, para gerar superfícies triangularizadas por “*tesselation*”, empregando um procedimento de busca para definir a triangularização de menor custo possível. Além disso, são discutidas técnicas de corte (“*clipping*”) e máscaras adequadas para auxiliar a análise interativa de escoamentos complexos. Um resultado interessante é apresentado na Figura 15, na qual observam-se superfícies de escoamento correspondentes a linhas de separação global na superfície de um cilindro de ponta hemisférica em escoamento livre [Del95]. Os autores também fazem menção a aplicações bidimensionais da técnica, as



quais auxiliam no entendimento e interpretação da topologia. Problemas bidimensionais transientes também podem ser tratados gerando-se uma representação tridimensional, na qual a terceira dimensão seria o tempo, ao longo do qual a topologia se desenvolve.



**Figura 15** - Topologia do campo de velocidades de um escoamento externo com separação global [Del95].

Delmarcelle e Hesselink [Del95] citam ainda duas outras representações globais para campos vetoriais. A primeira seria a chamada *contração dos dados*, feita obtendo-se do campo vetorial uma grandeza escalar de interesse, a ser visualizada por técnicas convencionais adequadas (linhas e superfícies de contorno, mapeamento por cor, renderização volumétrica, etc.). Grandezas escalares envolvem menos informação a ser transmitida, de forma que podem ser elaboradas representações que ocupem todo o domínio mantendo ainda o congestionamento visual sob controle. Para campos de velocidade complexos, por exemplo, uma forma de contração de dados de interesse é a *densidade de helicidade* (“*helicity density*”), dada por:

$$H_d = \mathbf{v} \bullet \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

onde  $\mathbf{v}$  e  $\boldsymbol{\omega}$  são os campos vetoriais de velocidade e vorticidade, respectivamente. O valor  $H_d$  indica a vorticidade que ocorre na direção da velocidade, ou seja, a intensidade e presença de vórtices ao longo do escoamento. Uma segunda técnica sugerida é a *detecção de linhas centrais de vórtices* (“*vortex cores*”). As linhas centrais são linhas de escoamento em torno das quais se desenvolvem vórtices, que são entidades determinantes do escoamento como um todo. Sua localização fornece uma idéia das características gerais do campo, principalmente em escoamentos que desenvolvem grandes separações de camada limite (vide [Fox85]).

Entendemos que o uso de representações globais deveria ser, em muitos casos, o fruto final da análise de um problema de escoamento, ou pelo menos de um ciclo no processo iterativo de entendimento do fenômeno. As propostas acima são extremamente adequadas, e têm sido pouco utilizadas no meio de pesquisa em Mecânica dos Fluidos.

## 2.4 Representações de Campos Tensoriais

Em Mecânica dos Fluidos, o conceito mais intuitivo relacionado a campos tensoriais é o de tensões e deformações do fluido, em função dos esforços que o solicitam; aliás, uma das principais formas estabelecidas de diferenciação entre sólidos e fluidos está ligada a campos de tensão e deformação: sólidos deformam-se em função das tensões que sofrem, enquanto que fluidos têm sua *taxa de deformação em relação ao tempo* como função das tensões.

Embora esses sejam os conceitos mais naturais, muitas outras variáveis importantes em fluidos são dados tensoriais. Segundo Delmarcelle e Hesselink [Del95], propostas de representações de campos tensoriais em fluidos são menos numerosas que as vetoriais porque os conceitos envolvidos são mais complexos e menos intuitivos, exigindo maior abstração. Acrescentamos, ainda, outra razão: campos tensoriais em fluidos não são, em geral, obtíveis experimentalmente. Entretanto, a crescente utilização de técnicas de simulação computacional (CFD) nos últimos anos vem tornando prontamente disponíveis valores numéricos de campos tensoriais distribuídos em escoamentos tridimensionais, tornando o problema de sua visualização relativamente recente.

Devido à relação fundamental estabelecida pelo teorema de Cauchy [Fox85], a grande maioria dos tensores relacionados a fluidos são *simétricos*. Tensores simétricos são entidades exatamente equivalentes a três campos vetoriais ortogonais entre si. Um tensor simétrico de um escoamento tridimensional pode ser representado por uma matriz quadrada simétrica  $\mathbf{U}$ , de ordem três. Assim, o tensor pode ser representado por seus três autoversores  $\mathbf{e}_i$  e os correspondentes autovalores  $\lambda_i$ , formando dessa forma os três autovetores  $\mathbf{v}_i$ , onde:

$$\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{e}_i . \quad (4)$$

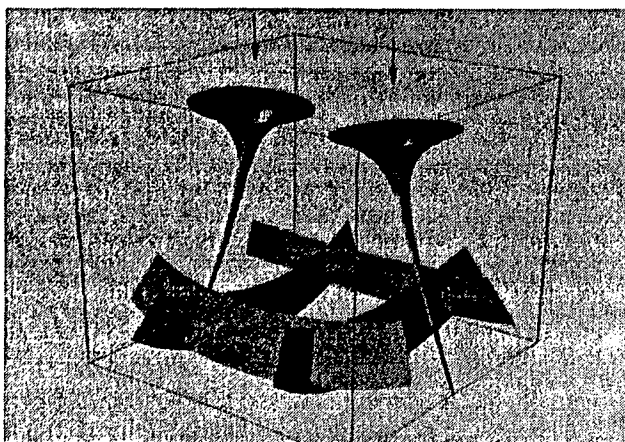
Os autovalores são sempre três valores em ordem crescente, ou seja,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ ; os três autovalores são chamados *maior*, *médio* e *menor*, respectivamente. Conclui-se, então, que visualizar o tensor  $\mathbf{U}$  equivale a visualizar os três campos vetoriais  $\mathbf{v}_i$  simultaneamente, de maneira adequada.

### 2.4.1 Representações Tensoriais Elementares

Ícones pontuais. Segundo Delmarcelle e Hesselink [Del95], a representação puntual típica para campos tensoriais tridimensionais é a atribuição de elipsóides aos pontos em questão, os eixos principais destes sendo proporcionais às magnitudes dos autovetores (módulo dos autovalores). Os autores destacam que, em comparação ao caso vetorial, esse tipo de representação sofre ainda mais de problemas de congestionamento visual, uma vez que os *glyphs* utilizados são necessariamente elementos volumétricos. Acrescentamos a observação de que o problema é agravado pelo fato de que *três* direções e magnitudes devem ser representadas simultaneamente, o que requer ainda mais clareza visual para transmitir informação adequada. Em conseqüência, poucos *glyphs* podem ser usados numa mesma imagem, reduzindo ainda mais a capacidade de transmitir a idéia de um campo contínuo quando comparados a representações vetoriais. Schroeder e Martin [Sch96] também citam a aplicação de elipsóides.

Entendemos que o uso de conjuntos de elipsóides pode ser inadequado para muitos casos, porém o método poderia ser útil com a utilização de algum dispositivo virtual do tipo sonda, que permitisse explorar o campo interativamente usando, por exemplo, um único elipsóide como um “cursor”, deformando-se em tempo real de acordo com os valores locais.

“Hyperstreamlines”. A melhor tradução para este termo seria “hiper-linhas de escoamento”. As hiper-linhas são uma abordagem elementar capaz de representar adequadamente a continuidade do bem como a simultaneidade dos três campos de autovetores. O procedimento consiste inicialmente em obter linhas de escoamento para um dos autovetores; a escolha do autovetor define a classificação da hiper-linha como menor, média ou maior (de acordo com os autovalores correspondentes). A partir disto, uma primitiva geométrica bidimensional é atribuída ao plano perpendicular de cada ponto da linha e deformada na direção dos dois autovetores locais restantes, proporcionalmente aos autovalores. Normalmente, a primitiva adotada é uma circunferência (deformável para elipse), ou uma cruz (cujos braços são alongados ou encurtados), a última gerando o tipo de hiper-linha conhecido como *hélice*. A hiper-linha tem um resultado visual final semelhante a um *streamtube*, pois apresenta volume. Cores podem ser utilizadas ao longo da hiper-linha para representar escalares, sendo normalmente usadas para codificar a magnitude do autovetor longitudinal à linha. Delmarcelle e Hesselink [Del95] discutem diversos aspectos e alternativas para a geração de *hyperstreamlines*, apresentando diversos exemplos de familiarização, utilizando inicialmente um problema para um sólido sob tensão, em regime elástico linear submetido a duas cargas puntuais. Este exemplo é apresentado na Figura 16, na qual hiper-linhas maiores partem das cargas em questão e hélices para os outros dois autovetores aparecem no interior do volume.



**Figura 16** - Campo tensorial de tensões no interior de um sólido submetido a duas cargas puntuais [Del95].

#### 2.4.2 Representações Tensoriais Locais

Nenhum tipo de representação tensorial local foi encontrado nesta pesquisa. Surge a questão do porquê: representações locais são difíceis de vislumbrar, ou são simplesmente desnecessárias? De maneira semelhante, Delmarcelle e Hesselink [Del95] afirmam que, até aquela data, também não haviam encontrado na literatura quaisquer propostas para a representação elementar de tensores por superfícies.

### 2.4.3 Representações Tensoriais Globais

Assim como para campos vetoriais, também pode ser definida uma forma de topologia para campos tensoriais, utilizável para representar os elementos chave do campo. Delmarcelle e Hesselink [De195] apresentam o problema como a evidenciação de pontos críticos/singulares no campo tensorial, de maneira semelhante ao caso vetorial. Relacionando alguns tipos de pontos críticos ao comportamento de hiper-linhas, os autores exemplificam os pontos nos quais um autovetor genérico  $v_i$  assume valor nulo, ou seja,  $\lambda_i = 0$ ; outros exemplos são aqueles nos quais pelo menos um dos autovalores transversais é nulo, reduzindo a seção transversal da hiper-linha correspondente a uma linha reta ou ponto, e os pontos onde os módulos dos autovalores transversais são idênticos, correspondendo a uma a seção transversal circular para a hiper-linha. Com base nesses pontos, os autores sugerem a utilização de superfícies “de contorno” correspondentes ao lugar geométrico dos vários tipos de pontos críticos no espaço. Novamente, exemplificam o procedimento para um campo de tensões num sólido em regime elástico linear.

Maiores detalhes sobre a extração de topologia de campos tensoriais podem ser encontrados em outro trabalho de Delmarcelle e Hesselink [De194], no qual o problema é contornado pela definição dos tipos possíveis de pontos críticos e de relações entre os mesmos. Os autores também abordam o problema da representação global de campos tensoriais transientes.

## 3. Comentários e Conclusões.

Com base nos resultados do presente trabalho, pudemos vislumbrar as seguintes conclusões:

(1) Conforme ficou evidente no Capítulo 2, os resultados da pesquisa bibliográfica mostraram que a grande maioria dos trabalhos encontrados concentra-se *em representações elementares e locais de campos vetoriais*. Excetuando-se alguns trabalhos, a maioria trata de técnicas e algoritmos de visualização que simulam resultados obtíveis experimentalmente ou, pelo menos, seguem a mesma filosofia geral. Esse fato pode ser decorrência de dois fatores concorrentes: em primeiro lugar, existe a herança natural que a visualização em Mecânica dos Fluidos traz da observação experimental, com inúmeras técnicas físicas consagradas; essa herança ainda reflete-se intensamente nos trabalhos atuais. Em segundo lugar, em muitos trabalhos é evidente a *carência de um modelo conceitual unificado* para visualização de fluidos, o qual traga a tona questões sobre os objetivos precisos da visualização, ou seja, os problemas realmente enfrentados em Mecânica dos Fluidos. Foi encontrado apenas um trabalho atual que aborda este último problema [De195], o qual foi inclusive adotado para estabelecer a classificação e organização usadas neste trabalho (vide Item 2.1).

(2) É dado muito pouco enfoque à geração de representações globais tanto em campos vetoriais quanto tensoriais, as quais são abordadas apenas nos trabalhos [De195] e [De194]. As representações globais encontradas, principalmente em técnicas de extração de topologia dos campos vetoriais/tensoriais, demonstraram ser muito poderosas para transmitir, de forma relativamente rápida, as características

gerais de um escoamento. Observamos, também, que ainda há muito por fazer para tornar as abordagens globais mais gerais, utilizáveis para diferentes casos de escoamento.

(3) À luz das conclusões (1) e (2), entende-se que as representações elementares/locais são tão importantes quanto as globais. Não se trata apenas da maior ou menor eficiência na transmissão de informação, mas sim da necessidade de que a análise científica passe por uma seqüência completa de etapas, partindo de representações elementares; estas, devido à sua semelhança com técnicas experimentais e simplicidade inerente, fornecem noções intuitivas subjetivas que, ao nosso ver, são imprescindíveis para fornecer ao analista um embasamento adequado à geração e compreensão de representações mais abstratas e práticas. Outro papel importante das técnicas de representação elementar é a possibilidade de gerar visualizações de resultados de análise numérica (CFD) com características semelhantes a resultados experimentais. Esse procedimento pode constituir um passo inicial de *validação qualitativa* dos resultados numéricos, o qual permite definir premissas para guiar e poupar esforços numa posterior validação quantitativa. Outro mérito importante de muitas representações elementares é seu baixo custo de obtenção e a possibilidade de interação com o usuário-analista através de animação e/ou dispositivos virtuais.

(4) De maneira geral, pôde-se observar, em vários pontos da pesquisa, a presença da máxima da Visualização Científica: “tornar visível o invisível”. Em Mecânica dos Fluidos, essa premissa é especialmente verdadeira para resultados de simulações numéricas, os quais permitem acesso direto a muitas entidades importantes que não podem ser observadas experimentalmente, como é o caso da maioria dos campos tensoriais em fluidos.

(5) Tendo em vista alguma experiência própria de um dos autores em aerodinâmica, observou-se que, pelo menos para aplicações aeroespaciais, existe uma defasagem/atraso considerável entre a criação de novas técnicas de visualização úteis e sua utilização em pesquisa nessa área. Técnicas mais antigas, tais como *glyphs* de vetores e linhas/superfícies de contorno, ainda predominam nos trabalhos de visualização de fluidos com aplicações aerodinâmicas. Em muitos casos, a aplicação simultânea de técnicas mais modernas poderia trazer esclarecimento e “insight” maiores. Em resumo: aparentemente, ocorre resistência considerável à aplicação de novas técnicas, sendo a visualização de dados geralmente tratada em segundo plano. Acreditamos que um maior contato deveria ser estabelecido entre o meio da Visualização Científica e muitos de seus usuários em Mecânica dos Fluidos.

(6) Finalmente, pudemos observar a grande extensão do tema em questão. Muitos outros trabalhos na área foram encontrados, além daqueles citados nas referências abaixo que, no entanto, não puderam ser abordados devido à limitação natural do escopo desta monografia. Existem outros tópicos muito importantes que poderiam ser incluídos em uma eventual extensão deste trabalho, tais como sistemas direcionados para visualização de escoamentos e processamento paralelo de análises numéricas e da geração de representações dos resultados.

## 4. Referências

- [Bri94] Brill, M.; Hagen, H.; Rodrian, H.C.; Djatschin, W.; Klimenko, S.V. - "Streamball Techniques for Flow Visualization", **Proceedings of Visualization 94**, IEEE Computer Society Press, 1994, pp.225-231 e CP-25.
- [Bro92] Brodlie, K.W.; Carpenter, L.A.; Earnshaw, R.A.; Gallop, J.R.; Hubbard, R.J.; Munford, A.M.; Osland, C.D.; Quarendon, P. (Editors) - **Scientific Visualization: Techniques and Applications**, Ed. Springer Verlag, 1992.
- [Bry92] Bryson, S.; Levit, C. - "The Virtual Wind Tunnel", **IEEE Computer Graphics and Applications**, Vol.26, no. 4, 1992, pp. 25-35.
- [Cab93] Cabral, B.; Leedom, L.(C.) - "Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution", **ACM Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series**, Vol. 27, Aug. 1993, pp. 263-272.
- [Del94] Delmarcelle, T.; Hesselink, L. - "The Topology of Symetric, Second Order Tensor Fields", **Proceedings of Visualization 94**, IEEE Computer Society Press, 1994, pp.140-147 e CP-15.
- [Del95] Delmarcelle, T.; Hesselink, L. (Editor: Gallagher, R.S.) - "A Unified Framework for Flow Visualization", **Computer Visualization: Graphics Techniques for Scientific and Engineering Analysis**, CRC Press, 1995, Cap.5, pp. 129-170.
- [Dov95] Dovey, D. - "Vector Plots for Irregular Grids", **Proceedings of Visualization 95**, IEEE Computer Society Press, 1995, pp.248-253 e CP-29.
- [Ebe94] Ebert, D.S.; Yagel, R.; Scott, J.; Kurzion, Y. - "Volume Rendering Methods for Computational Fluid Dynamics Visualization", **Proceedings of Visualization 94**, IEEE Computer Society Press, 1994, pp.232-239 e CP-26.
- [For94] Forsell, L.K. - "Visualizing Flow Over Curvilinear Grid Surfaces Using Line Integral Convolution", **Proceedings of Visualization 94**, IEEE Computer Society Press, 1994, pp.240-247 e CP-27.
- [Fox85] Fox, R.W.; MacDonald, A.T. - **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, Ed. John Wiley & Sons, 1985.
- [Hal93] Hall, P. - "Volume Rendering for Vector Fields", **The Visual Computer**, no.10, Ed. Springer Verlag, 1993, pp. 69-78.
- [Hel94] Helman, J.L.; Hesselink, L. - "Visualizing Vector Field Topology in Fluid Flows", **IEEE Computer Graphics and Applications**, Vol.11, no. 3, 1991, pp. 36-46.
- [Hen90] Henne, P. A. (Editor) - **Applied Computational Aerodynamics**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1990.
- [Lan95] Lane, D.A. - "UFAT - A Particle Tracer for Time-Dependent Flows", **Proceedings of Visualization 95**, IEEE Computer Society Press, 1995, pp.257-264 e CP-29.
- [Lee95] de Leew, W.C.; van Wijk, J.J. - "Enhanced Spot Noise for Vector Field Visualization", **Proceedings of Visualization 95**, IEEE Computer Society Press, 1995, pp.233-239.
- [Lor 87] Lorensen, W. E.; Cline, H. E. - "Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm", **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, vol. 21, 1987, pp. 163-169.
- [Max94] Max, N.; Crawfis, R.; Grant, C. - "Visualizing 3D Velocity Fields Near Contour Surfaces", **Proceedings of Visualization 94**, IEEE Computer Society Press, 1994, pp.248-255 e CP-28.
- [Mey80] Meyer, G.W.; Greenberg, D.P. - "Perceptual Color Spaces for Computer Graphics", **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, 1980, pp. 254-261.
- [Pag95] Pagendarm, H.-G.; Gerhold, T. - "Flow Visualization in a Hypersonic Fin/Ramp Flow", **Proceedings of Visualization 95**. IEEE Computer Society Press, 1995, pp.379-382 e CP-48.

- [Pie77] Pierce, C. S. - **Semiótica**, Coleção Estudos, Editora Perspectiva S.A., 1977.
- [Rob88] Robertson, P.K. - "Visualizing Color Gamuts: A User Interface for the Effective Use Of Perceptual Color Spaces In Data Displays", **IEEE Computer Graphics and Applications**, september 1988, pp.50-64.
- [Sch96] Schroeder, W.; Martin, W.; Lorensen, B. - **The Visualization Toolkit: An Object Oriented Approach to 3D Graphics**, Ed. Prentice Hall, 1996.
- [Tsz96] Tsze, C.T. - "Simulation and Analisis of V-22 Tiltrotor Aircraft Foward Flight Flowfield", **AIAA Journal of Aircraft**, Vol.33, No.2, 1996, pp.369-376.
- [Van91] Van Wijk, J.J. - "Spot Noise: Texture Synthesis for Data Visualization", **ACM Computer Graphics**, Vol. 25, no. 4, ACM Press, 1991, pp.309-318.
- [Van93] Van Wijk, J.J. - "Flow Visualization with Surface Particles", **IEEE Computer Graphics and Applications**, Vol. 13, no. 4, IEEE Press, 1993, pp.18-24.
- [Wat92] Watt, A.; Watt, M. - **Advanced Animation and Rendering Techniques: Theory and Practice**, ACM Press, Ed. Addison-Wesley, 1992, Cap.13, pp. 297-321.

# APÊNDICE A

## Visualização Científica em Dinâmica de Fluidos - Exemplos de Aplicação

### Introdução

Este Apêndice ilustra a aplicação de algumas técnicas clássicas de visualização de fluidos em dois contextos distintos: primeiramente é apresentada uma aplicação na visualização do escoamento de fluidos com superfícies livres com base nos dados gerados por um simulador em desenvolvimento no ICMSC-USP. O segundo exemplo aplica técnicas clássicas para a visualização de aspectos do comportamento de fluidos aerodinâmicos de interesse para pesquisadores do Laboratório de Aeronaves no Departamento de Mecânica da EESC-USP. Em ambos os casos, as visualizações foram criadas usando um software de visualização de baixo custo, o *VTK - Visualization ToolKit*. O VTK [Sch 96], lançado recentemente, consiste de uma biblioteca de objetos de dados e métodos voltados para a implementação de tarefas de visualização. O software é orientado a objetos, sendo que suas rotinas foram implementadas em C++. O usuário pode acessar as rotinas existentes e programar novas rotinas (*scripts*) usando as linguagens Tcl/Tk ou C++. Uma vez no ambiente VTK, o usuário pode acessar todas as funções do próprio VTK, bem como as do Tcl e Tk.

Os métodos implementados no VTK abrangem um conjunto relativamente grande de técnicas de visualização, e não são voltados para nenhum domínio de aplicação específico, pois um dos objetivos dos desenvolvedores foi o de manter a generalidade do sistema. Dessa forma, o ambiente é extensível e relativamente fácil de usar por um usuário com conhecimentos de programação e algum domínio inicial de técnicas de visualização, oferecendo uma plataforma bastante adequada para a implementação de tarefas de visualização. Uma limitação, entretanto, é que o custo da generalidade do VTK é a perda de eficiência: é possível gerar boas visualizações a um custo relativamente alto em termos de tempo de processamento e ocupação de memória, pois nem algoritmos nem estruturas de dados estão otimizados para explorar aspectos específicos da aplicação. Ainda assim, o sistema oferece uma plataforma valiosa - e de baixo custo - para usuários de visualização experimentarem com as técnicas existentes.

O VTK permite a definição de vários tipos de malhas, ou seja, diferentes organizações para os conjuntos de dados: cartesianas (*vtkStructuredPoints*), regulares (*vtkStructuredGrid*), e genéricas (*vtkPolyData* e *vtkUnstructuredGrid*). Além das funções de visualização, o VTK inclui várias primitivas de modelagem, como primitivas geométricas, modelos implícitos, varredura rotacional e translacional e operações de combinação de primitivas, também úteis na geração de visualizações.



## Exemplo 1: Visualização de Fluidos com Superfícies Livres

As visualizações mostradas a seguir foram geradas no LCAD - Laboratório de Computação Científica de Alto Desempenho do ICMSC como parte dos projetos *PowerVis* e GENSMAc. O projeto GENSMAc envolve o desenvolvimento de um simulador do escoamento de fluidos com superfícies livres, o *FreeFlow*, por Tome, Castelo e outros [Tom 94; 96]. Já o projeto *PowerVis* propõe o desenvolvimento de um Sistema de Visualização Multi-modal, i.e., que empregue múltiplas modalidades de interação com o usuário, como imagens e som, por exemplo. A geração e análise de visualizações a partir de dados obtidos de diferentes aplicações, entre as quais escoamento de fluidos, é essencial para a evolução desse projeto. É nesse contexto que foram desenvolvidas as visualizações mostradas a seguir.

### 1.1 Formatos do VTK e Dados do Fluido

Os dados do fluido gerados pelo programa *FreeFlow* são de dois tipos distintos, ambos bidimensionais. O primeiro tipo de conjunto de dados corresponde à saída gerada por simulações 2D do fluido, sendo que os dados de saída estão posicionados em uma malha regular cartesiana de células. Cada célula contém dados relativos a uma partícula de fluido e, para cada célula, o simulador informa a sua posição, os componentes de velocidade (nas direções horizontal,  $x$ ; e vertical,  $y$ ), e o valor da pressão. Esse conjunto de dados (caso 1) foi representado através do objeto *vtkStructuredPoints*, que corresponde à implementação do conceito de malha cartesiana no VTK. Os arquivos contêm, para cada ponto da malha, o valor da pressão armazenado como um escalar, e os valores da velocidade armazenados em um vetor. Existe uma matriz de células (e portanto um arquivo) para cada instante de tempo da simulação. Para esse fluido, as visualizações geradas utilizaram técnicas para visualização de dados 2D escalares (pressão na superfície 2D do fluido) e vetoriais (velocidade na superfície 2D), variantes no tempo. Assim, o tempo corresponde à terceira dimensão (eixo  $z$ ), e as visualizações geradas são tridimensionais, sendo que as saídas 2D em planos de tempo consecutivos foram “empilhadas” para gerar uma visualização 3D (vide Figura A.8, no item 1.3), como é comum em aplicações médicas, por exemplo.

O segundo conjunto de dados (caso 2) foi gerado através de simulações bidimensionais de fluxos eixo-simétricos, i.e., fluxos que apresentam simetria rotacional em relação a um eixo central. Para esses dados, a simulação gera uma saída com informações sobre partículas na fronteira de uma fatia 2D do fluido tridimensional, na forma de uma poli-linha, uma para cada instante de tempo. Esses dados foram armazenados em um arquivo segundo o formato do VTK, e posteriormente representados usando o objeto que implementa o conceito de malha poligonal (*vtkPolyData*). A Figura A.1 ilustra o formato de um arquivo de dados genérico do VTK, no caso descrevendo um conjunto de dados do tipo malha poligonal. Programas de conversão foram escritos em C para reformatar os arquivos de dados gerados pelo simulador colocando-os em um formato compatível com o do VTK. Em ambos os casos (1 e 2), as descrições da geometria do molde e do ejetor do fluido também foram fornecidos pelo simulador, e convertidos no mesmo formato poligonal usado para o fluido.

Os programas *ctopoly.c*, *mtopoly.c*, *geramol.c*, *geraflu.c* e *geraeje.c* são responsáveis pela conversão das descrições do molde, ejetor e fluido produzidas pelo simulador para o formato *polydata* do VTK, que descreve uma malha poligonal. Os dados produzidos pelo simulador estão nos arquivos denominados *PLOTMOLDE* e *CELLGENS*. O arquivo *PLOTMOLDE* descreve o contorno de um molde, expresso em termos de dois tipos de elementos gráficos primitivos: segmentos de reta e semi-círculos.

```
# vtk DataFile Version 1.2
Panel method
ASCII
DATASET POLYDATA
POINTS 3028 FLOAT
    .0000000    .0000000    .0000000
    .0364560    .0000000    .0753350
    .1452910    .0000000    .1495720
    .3249190    .0000000    .2216280
    .5727200    .0000000    .2904520
    .8850810    .0000000    .3550400
    1.2574460    .0000000    .4144520
    1.6843870    .0000000    .4678190
...
...
...
POLYGONS 5608 22432
3 0 13 1626
3 13 14 1626
3 14 1 1626
3 1 0 1626
3 1 14 1627
3 14 15 1627
3 15 2 1627
3 2 1 1627
...
...
...
POINT_DATA 3028
SCALARS CP FLOAT
LOOKUP_TABLE default
    .7668081
    .6273912
    .2257359
    .0724062
    .0136782
    -.0135187
    -.0272291
    -.0387932
...
...
...

```

**Figura A.1** - Arquivo de dados VTK genérico (vide [Sch96], Apêndice A.5).

O arquivo descreve, na verdade, a METADE da seção transversal do molde num certo intervalo de tempo, e possui um conjunto de linhas, cada qual representando um elemento do molde. Essas linhas são precedidas de uma linha básica com informações sobre o molde naquele intervalo de tempo. O formato do arquivo é descrito na Figura A.2 (ver *RUN?PLOTMOLDE.DAT*). O arquivo *CELLGENS* plota coordenadas de listas de pontos (poli-linha) que representam o fluido consecutivamente em vários pontos no tempo. Para cada ponto no tempo existe uma linha base e um ou mais conjunto de pontos que representam a poli-linha. O formato do arquivo é mostrado na Figura A.3 (ver *RUN?CELLGENS.DAT*).

Foram gerados arquivos do VTK do tipo *polydata*, um arquivo para cada molde, fluido e ejetor a cada intervalo de tempo, sendo que os arquivos de molde são mantidos separados dos arquivos de fluido (idem para os ejetores). Assim, cada arquivo PLOTMOLDE gera muitos arquivos VTK, e o mesmo ocorre para o arquivo CELLGENS. A Figura A.4 mostra os algoritmos básicos implementados para a conversão do molde e do fluido.

t	dx	nciclos		nfig						
X0	Y0	X1	Y1	C1	C2	XC	YC	R	1/0	
X0	Y0	X1	Y1	C1	C2	XC	YC	R	1/0	
...										
...										
...										

onde:

- t - tempo
- dx - distância entre as coordenadas x (aspect ratio de x)
- nciclos - número de ciclos do processo numérico (deve ser ignorado)
- nfig - o número da figura apresentada nas linhas abaixo
- X0, Y0 - scoordenadas do ponto inicial do segmento de reta ou do semi-círculo
- X1, Y1 - segundo par de coordenadas do segmento de reta ou do semi-círculo
- C1, C2 - combinados determinam o tipo do elemento:
  - C1 = 0 -> o elemento é um segmento de reta
  - C1 = 1 -> o elemento é um círculo
  - C2 = concavidade (deve ser ignorado)
- XC, YC - centro do círculo
- R - raio do círculo
- 1/0 - 1 significa que o molde continua
- 0 significa fim do molde (para aquela figura nfig).

**Observação IMPORTANTE:** quando o raio do círculo é muito grande, o semi-círculo deve ser considerado um segmento de reta. No caso do formato VTK, não existem componentes curvos do polydata. Então, no futuro faremos uma discretização dos círculos. Por enquanto, trabalhamos com segmentos de reta apenas (convertendo os semi-círculos para segmentos de reta).

**Figura A. 2-** Formato do arquivo PLOTMOLDE, gerado pelo *FreeFlow*. Descreve um molde.

t	nlist	nfig	nelem
X	Y		
X	Y		
X	Y		
X	Y		
...			
...			
nelem			
X	Y		
X	Y		
X	Y		
...			
...			

onde:

- t - tempo
- nlist - número de listas para aquele intervalo de tempo (pode haver mais de uma)
- nfig - número da figura (corresponde ao mesmo numero no PLOTMOLDE)
- nelem - número de elementos da lista seguinte

**Observação:** quando existe mais de uma lista no mesmo tempo, entre as listas existe uma linha com o número de elementos (*nelem*) da próxima lista.

**Figura A. 3 -** Formato do arquivo CELLGENS, gerado pelo *FreeFlow*. Descreve um fluido.

```

Algoritmo para molde - E: arq. entrada, figura
abrir arquivo que descreve molde
Pepita
    ler prim. linha (tempo, dx, nciclos, nfig)
    le molde (S: npontos, matriz de coordenadas)
ate nfig = figura ou EOF

montar nome do arquivo de saida (nome+figura+".vtk")
abrir arquivo de saida
escrever cabecalho
escrever POINTS npontos "float"
escrever coord[i].x, coord[i].y, 0.0 para todo i= 0 a npontos-1

nlines= (npontos div 2)
escrever LINES nlines nlines*3
para i= 0 ate nlines -1
    escreve 2, 2*i, 2*i+1

Algoritmo para fluido - E: arq. entrada, figura
abrir arquivo que descreve fluido
ler prim. linha (tempo, nlist, nfig, nelem_in)
enquanto nfig <> figura e NOT EOF
    descarta dados desta figura
    ler linha(tempo, nlist, nfig, nelem_in)
fim
k= 0; nelem[k]= nelem_in
montar nome do arquivo de saida (nome+figura+".vtk")
abrir arquivo de saida
escrever cabecalho
marcar posicao ppontos no arquivo
escrever POINTS npontosxxx?? "float"

npontos= 0
l= 0
para l = 0 ate nlist - 1
    npontos= npontos + nelem[k]
    le fluido (S: matriz de coordenadas)
    escrever coord[i].x, coord[i].y, 0.0 para todo i= 0 a nelem-1
    k= k+1
    se l <> nlist - 1, ler linha( nelem[k])
fim

tot_elem= 0
para k= 0 ate nlist-1
    tot_elem= tot_elem + nelem[k]
fim

escrever LINES nlist nlist+ tot_elem
cont= 0;
para j = 0 ate nlist-1
    escreva nelem[j]
    para k= 0 ate nelem[j]-1
        escreve cont
        cont++
    fim
fim
ir para ppontos
escrever POINTS npontos "float"

```

**Figura A. 4 - Algoritmos básicos para conversão entre os formatos de dados do *FreeFlow* e do VTK.**

## 1.2. Técnicas de Visualização

### Visualização 3D de Fluidos 2D

Para representar os dados do caso 1, foi usada a estrutura *vtkStructuredPoints*. Nesse caso, as informações de interesse associadas aos dados podem ser visualizadas usando procedimentos convencionais para entidades escalares e vetoriais. Em particular, a pressão está sendo visualizada através da geração de iso-superfícies 3D para valores de interesse, e de planos de corte 2D. A velocidade foi visualizada usando *hedgehogs*, os quais foram “fatiados” para possibilitar a visualização da distribuição das velocidades no molde ao longo do tempo. Tanto o corte por planos como as fatias nos *hedgehogs* foram animadas para apoiar a interpretação do comportamento do fluido 2D ao longo do tempo, que define a terceira dimensão da visualização 3D. Os *pipelines* mostrados nas Figuras A.5 e A.6 descrevem a conexão entre os objetos de dados do VTK através dos filtros que operam sobre os dados, nos programas que geram as visualizações descritas acima e ilustradas na Figura A.8 (vide Item 1.3).

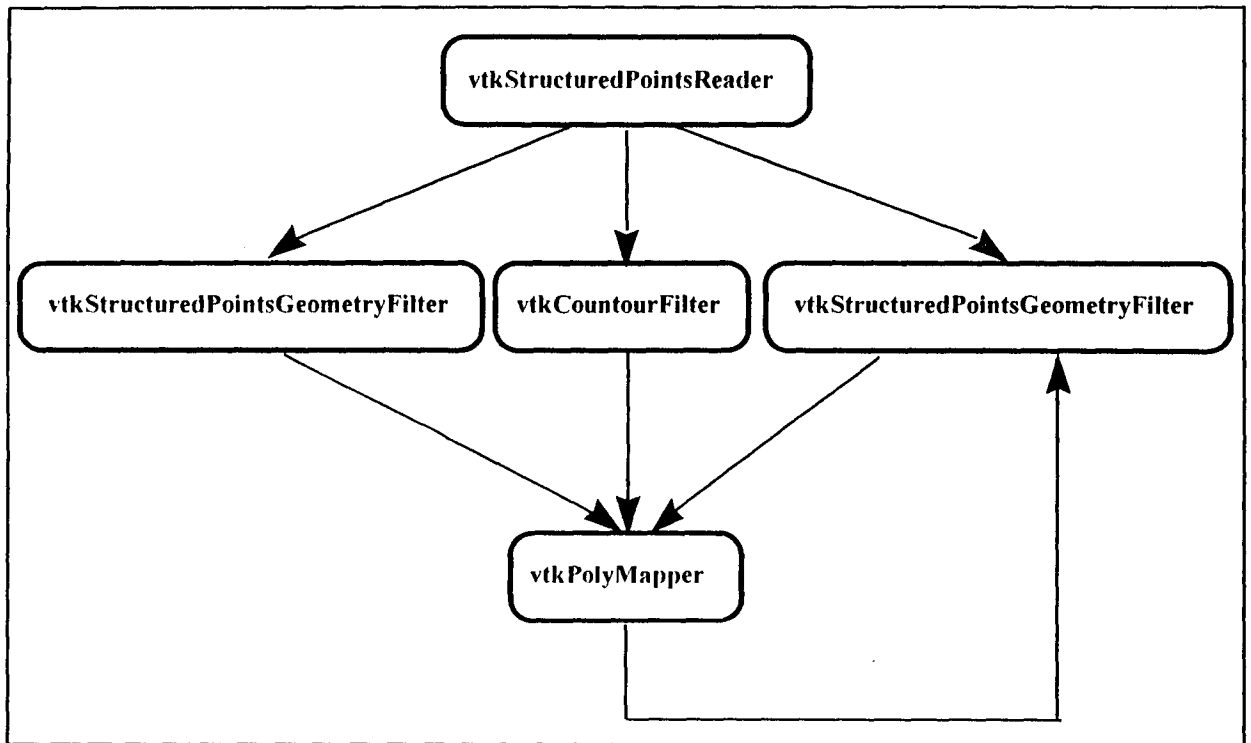


Figura A.5- Pipeline para a geração de iso-superfícies de pressão, planos de corte e animação dos planos de corte.

### Visualização 3D de Fluxos Eixo-Simétricos

Para o conjunto de dados do caso 2, foi usada a estrutura de representação *vtkPolyData*. Nesse caso, a representação resultante, que descreve uma seção transversal da fronteira do fluido 2D, pode ser visualizada em 3D através de uma extrusão rotacional. O molde e o ejetor também podem ser visualizados em 3D a partir de uma extrusão rotacional de suas seções transversais e o molde, em particular, foi

renderizado transparente. O *pipeline* de visualização utilizado é ilustrado na Figura A.7, e algumas das visualizações geradas são ilustradas na Figura A.9 (vide Item 1.3).

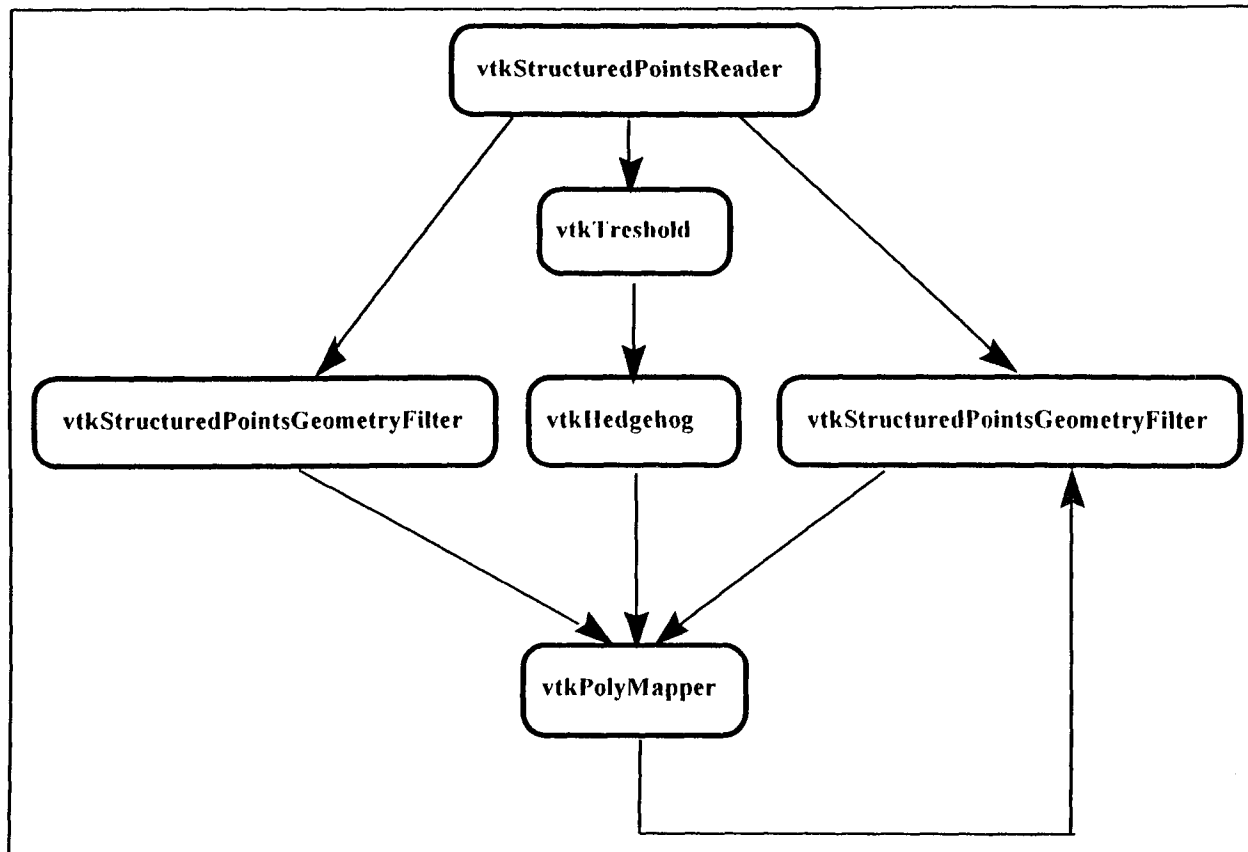


Figura A.6 - Pipeline para a geração de *hedgehogs*, planos de corte e animação.

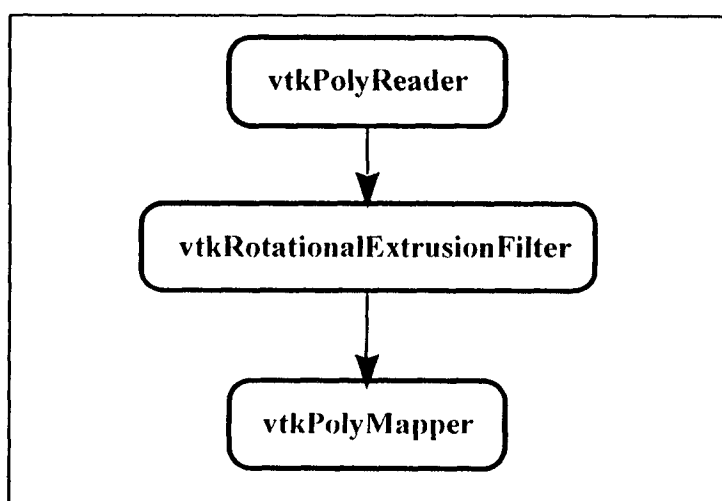


Figura A.7 - Pipeline para a visualização 3D do fluido eixo-simétrico.

A extrusão rotacional não foi a única operação realizada, entretanto. Várias transformações geométricas foram necessárias para posicionar os valores retornados pelo simulador em relação à origem definida no eixo de rotação, bem como para aumentar a efetividade das visualizações geradas, pois a interação direta é dificultada pelo grande volume de dados em questão. Além disso, as operações sobre os dados poligonais foram intermediadas por filtros de “limpeza” que fazem uma simplificação da geometria para simplificar o processo de *rendering*.

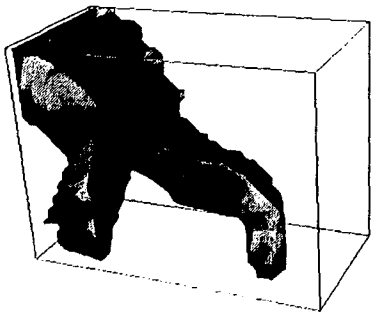
### 1.3 Resultados

Algumas das visualizações obtidas para ambos os tipos de dados de fluidos com superfícies livres são apresentadas a seguir. No primeiro caso (Figura A.8), o molde tem o formato de uma caixa e o ejetor está no topo direito da mesma. As iso-superfícies mostram o comportamento da pressão no fluido ao longo do tempo, durante a sua injeção no molde. Os cortes planares fazem os mesmo para instantes de tempo específicos. Os *hedgehogs* permitem ilustrar a velocidade do fluido durante a injeção e, analogamente, cortes planares permitem visualizar a situação no molde 2D em um instante de tempo específico.

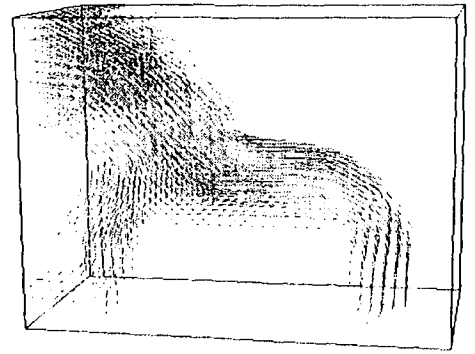
Dois exemplos distintos do caso eixo-simétrico são mostrados (Figura A.9). As Figuras A.9(a) e (b) ilustram a visualização de dois instantes de tempo distintos na simulação de um experimento denominado “preenchimento de cavidade”, que consiste na injeção de um fluido em um pote. As Figuras A.9 (c) a (f) ilustram instantes de tempo distintos na visualização da simulação de um experimento que mostra uma gota de fluido caindo em um pote que já contém fluido.

As visualizações geradas fornecem um auxílio valioso na interpretação do comportamento dos fluidos, tendo sido consideradas pelos especialistas compatíveis com o comportamento esperado dos mesmos. Detalhes das simulações numéricas, bem como outras visualizações, podem ser encontrados em [Tom 96]. As visualizações ilustradas na Figura A.9 demandam um tempo computacional bastante alto nas máquinas disponíveis. Uma animação intermediária que carrega vários quadros consecutivos, ilustrando melhor o fenômeno real, está sendo construída.

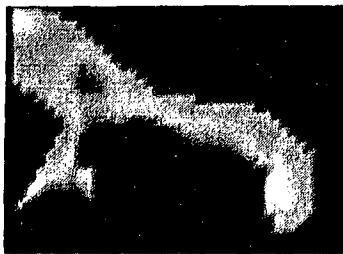
Inúmeros outros tipos de visualizações podem ser realizados com os dados disponíveis. Programas de conversão podem ser melhorados para permitir interpolações intermediárias gerando mapeamentos melhores para o caso I. Visualizações de pressão e velocidade para o caso eixo-simétrico também podem ser geradas, e constituem um exemplo particularmente interessante de visualização 3D de dados multi-dimensionais.



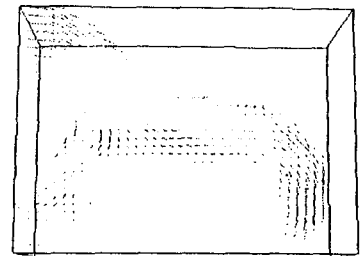
a)



c)



b)



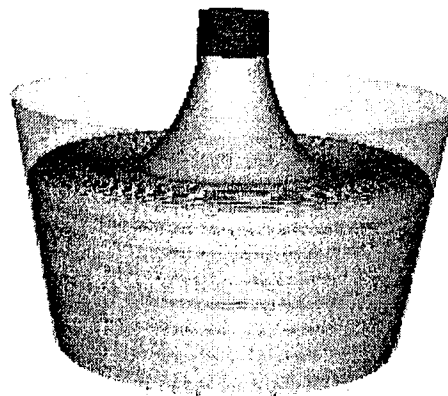
d)

**Figura A.8 - Visualização 3D de fluxo 2D (arquivo fonte: *fluido2.tcl*).**

- a) Iso-superfícies de pressão.
- b) Plano de corte ilustrando as iso-superfícies em um instante de tempo (animado no original).
- c) *Hedgehogs* ilustrando vetores de velocidade.
- d) Plano de corte ilustrando os *hedgehogs* em um instante de tempo (animado no original).

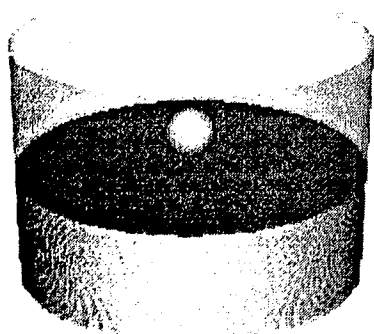


a)

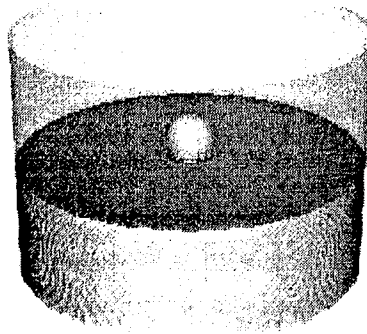


b)

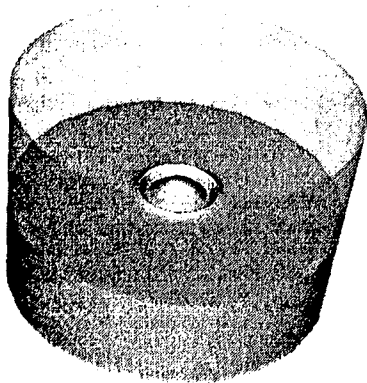




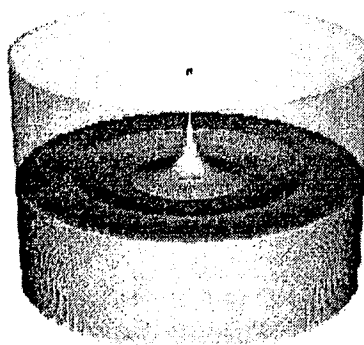
c)



d)



e)



f)

**Figura A.9** - Visualizações de fluxos eixo-simétricos. Arquivos fonte: *sweepn2.tcl* e *splash.tcl*.  
a), b) preenchimento de cavidade, ilustrando o processo de injeção de fluido em um molde.  
c) a f) gota caindo em um molde com fluido.

## Exemplo 2: Visualização de Fluidos em Aerodinâmica

Na área particular de Aero/Hidrodinâmica, o principal objetivo da Mecânica dos Fluidos aplicada ao projeto de veículos consiste, em última análise, na obtenção de pressões superficiais atuantes na superfície de um corpo devido à sua interação com fluido em movimento. A distribuição de pressões superficiais determina as resultantes de força e momento sofridas pelo sistema, definindo seu comportamento dinâmico e eficiência energética como veículo (consumo de combustível). Além disso, refletem fenômenos importantes do campo completo de escoamento que podem ser controlados pelas características geométricas do sistema.

Distribuições de pressão superficial são resultados típicos de ensaios experimentais em túneis de vento. Além disso, no início dos anos 70 tornaram-se disponíveis os primeiros métodos viáveis de simulação numérica aplicáveis a escoamentos aerodinâmicos ao redor de geometrias tridimensionais complexas, referidos de forma genérica como *métodos de painéis*, baseados em distribuições superficiais de singularidades potenciais [Hen90]. Estes métodos apresentam resultados adequados ao projeto aerodinâmico, principalmente de veículos aeroespaciais, aliados a um custo computacional muito menor que o da solução completa das equações de movimento no domínio tridimensional. Essas vantagens fazem desse tipo de método a principal forma de análise aerodinâmica na indústria aeroespacial até os dias de hoje, sendo capazes de gerar grandes quantidades de dados escalares e vetoriais distribuídos sobre superfícies complexas.

Tomando por base os fatores colocados acima, foi elaborada uma rotina básica para visualização de um campo escalar sobre a superfície de um corpo tridimensional. Esta rotina simples serviria de “raiz” na eventual elaboração de um sistema interativo para visualizar distribuições de pressão aerodinâmica sobre geometrias de veículos aeroespaciais. No nível atual deste trabalho, a rotina foi aplicada a apenas dois casos específicos.

### 2.1. Técnicas de Visualização

Para visualizar o campo escalar na superfície, foram adotadas duas técnicas consagradas:

- mapeamento por cor na superfície modelada por polígonos;
- linhas de contorno de pressão constante na superfície modelada por polígonos.

As duas técnicas descritas acima foram implementadas num *script* para o VTK 1.2, cujo código é listado na Figura A.11. A associação entre os objetos VTK empregados pode ser observada no *pipeline* apresentado na Figura A.10.

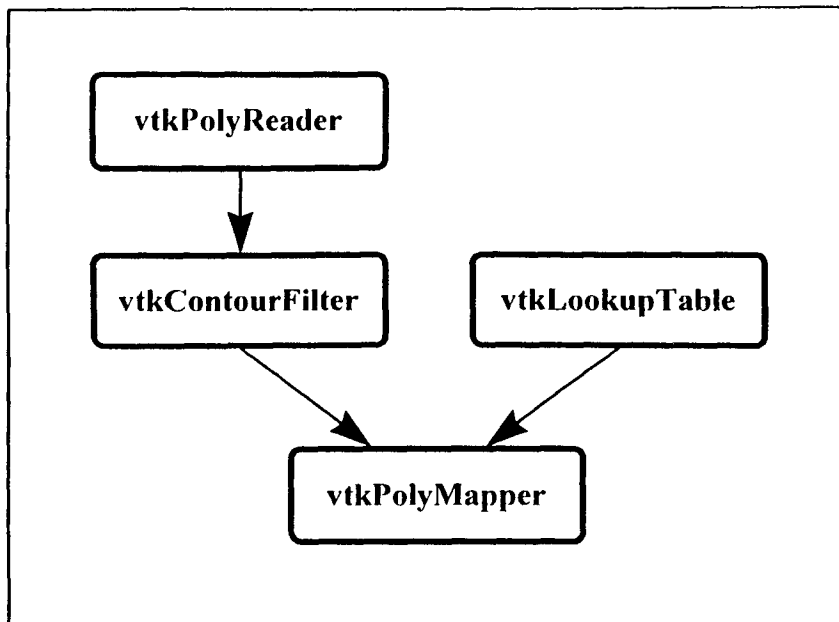


Figura A.10 - Pipeline de visualização (VTK).

Um objeto *vtkPolyReader* lê um arquivo texto ASCII em formato padrão VTK contendo o conjunto de dados com os pontos-amostra da superfície a ser visualizada, assim como a topologia da superfície poligonal que será formada entre esses pontos e o valor escalar associado a cada um. Em seguida, parâmetros são definidos para um filtro de linhas de contorno *vtkContourFilter*, que processa os escalares gerando os contornos para constantes pré-definidas. Os parâmetros são definidos para uma tabela de mapeamento de valores escalares para tons de cores, representada por um objeto *vtkLookupTable*. Finalmente, a superfície é renderizada com as cores atribuídas pela tabela e com as linhas de contorno geradas.

```

# Definicao de um Pender Master:
vtkPenderMaster rm;

# Definicao de uma janela de renderizacao:
set renWin [rm MakeRenderWindow];

# Definicao de um renderer:
set ren1 [$renWin MakePenderer];

# Definicao de um interactor:
set iren [$renWin MakePenderWindowInteractor];

# Objeto fonte de leitura de dados:
vtkPolyReader WingReader;
  WingReader SetFilename "wb2.vtk";

# Lookup Table para mapa de cores
# (do vermelho ao azul, de menores para maiores valores):
vtkLookupTable Plut;
  Plut SetHueRange 0 0.6667;

# Mapeador poligonal para o aerofolio:
vtkPolyMapper WingMap;
  WingMap SetInput [WingReader GetOutput];
  WingMap SetLookupTable Plut;
  WingMap SetScalarRange -0.2 0.5;
  
```

```

# Actor para o aerofolio:
vtkActor aWing;
    aWing SetMapper WingMap;

# Definicao de um filtro de contornos
# (15 contornos, na faixa de valores observada):
vtkContourFilter ContourFil;
    ContourFil SetInput [WingReader GetOutput];
    ContourFil GenerateValues 15 -0.2 0.1;

# Mapeador poligonal para os contornos:
vtkPolyMapper ContourMap;
    ContourMap SetInput [ContourFil GetOutput];
    ContourMap SetScalarRange -0.2 0.1;

# Fonte de luz extra:
vtkLight L2;
    L2 PositionalOff;
    L2 SetIntensity 1.0;

# Actor para os contornos:
vtkActor Contours;
    Contours SetMapper ContourMap;
    [Contours GetProperty] SetColor 1 1 1;

# Insercao dos actors:
$ren1 AddActors aWing;
$ren1 AddActors Contours;

# Fundo:
$ren1 SetBackground 0 0 0;

# Ordem de renderizacao:
$renWin Pender;

# Inicializar no do interactor:
wm withdraw .

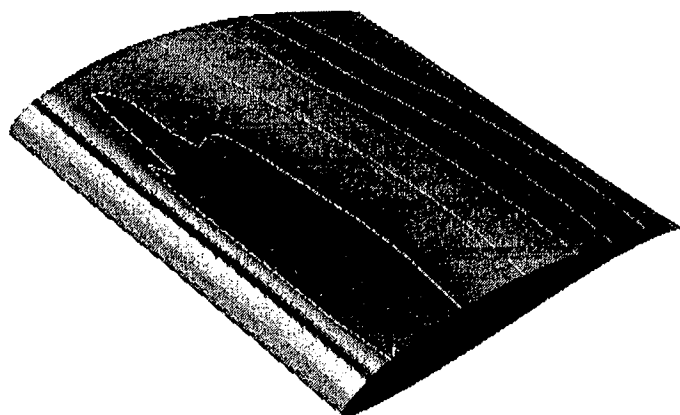
$iren Start;

```

**Figura A.11 - Script CP.TCL**

## 2.2. Resultados

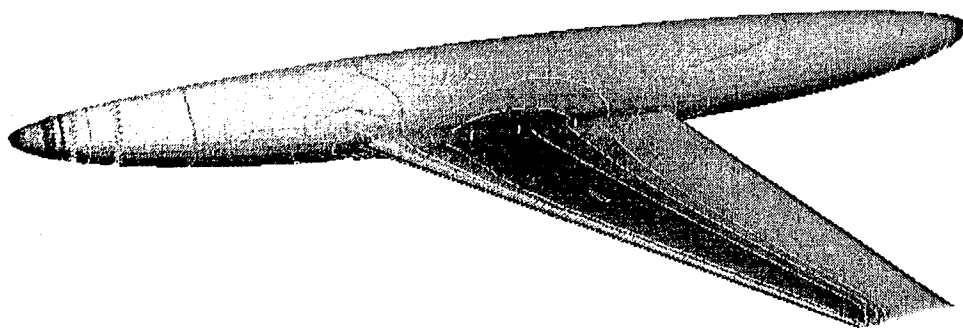
O algoritmo descrito foi aplicado a dois casos particulares de visualização de escoamentos aerodinâmicos. O primeiro caso foi extraído de resultados de ensaios em túnel de vento. Trata-se de uma seção retangular de uma asa genérica, submetida à interferência de uma hélice propulsora próxima. No trabalho em questão [Cat92], a visualização do campo de pressões seria essencial para deduzir se os efeitos desse arranjo asa/hélice seriam benéficos ou não para o desempenho de uma aeronave sob determinadas condições de operação utilizando esse sistema. A visualização resultante para uma condição particular do arranjo é apresentada na Figura A.12, na qual a asa é mostrada com a região do escoamento incidente visível para o leitor.



**Figura A.12** - Visualização do campo de pressões sobre a asa.

A gama de variação de cores no mapa apresentado foi estabelecida sobre o espectro, variando do vermelho para as pressões mais baixas para o azul das mais altas. Do ponto de vista da identificação de características importantes do campo de pressões, detecta-se uma fina faixa vermelha na região dianteira superior da superfície, decorrência do posicionamento de uma trilha de transição. Na região superior traseira observa-se a deformação das linhas de pressão constante ao longo da dimensão transversal da asa, que acompanham uma maior região em amarelo na extremidade direita da asa. Trata-se da região de maior influência da hélice, que diminui as pressões em direção à região traseira da superfície.

Um segundo exemplo consiste de resultados de análise numérica de uma configuração aeronáutica genérica de asa e fuselagem, resultantes de testes iniciais de um método de painéis recentemente implementado. Uma vista do resultado de visualização é apresentado na Figura A.13.



**Figura A.13** - Visualização do campo de pressões sobre uma configuração asa/fuselagem genérica.

Uma vez que o escoamento é simétrico em relação ao plano vertical central, apenas a metade esquerda da geometria é apresentada. Novamente, o mesmo arranjo espectral de cores foi utilizado. Muitas características importantes do campo são destacadas, entre elas a grande região vermelha de baixa pressão, esperada sobre a asa. Também é de interesse a influência da asa sobre o corpo da fuselagem na região da junção, representada pela “contaminação” laranja-avermelhada que se estende sobre o amarelo dominante. Observa-se também as linhas quase concêntricas em torno da região dianteira da junção, indicando um acentuado gradiente positivo, resultante da presença da asa como obstáculo.

## Referências

- [Cat 92] Catalano, F.M.; Stollery, J.L. - “The Effect of a High-Thrust Propeller on the Aerodynamic Characteristics of a Wing at Low Reynolds Number”, 19<sup>th</sup> Congress of the International Council for Aeronautical Sciences (ICAS 94). Guggenheim, USA, 1994, pp. 196-206.
- [Day 96] Day, A. M.; Minghim, R.; Arnold, D. B.; Turner, S. - “Visualisation and Sonification of Marine Survey Data”, British Computer Society Workshop on Visualization, December 1995, to appear in: Earnshaw, R et al. (eds.), **Visualization and Modelling**, Academic Press (London), 1996.
- [Hen 90] Henne, P. A. (Editor) - **Applied Computational Aerodynamics**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1990.
- [Rum 91] Rumbaugh, J.; Blaha, M. - **Object-Oriented Modeling and Design**, Prentice-Hall, 1991.
- [Sch 96] Schoroeder, W. J.; Martin, K.; Lorensen, W. - **The Visualization Toolkit - An Object-Oriented Approach to 3D Graphics**, Prentice-Hall, 1996.
- [Tom 94] Tome, M. F.; McKee, S. - “GENSMAC: A Computational Marker-and-Cell Method for Free Surface Flows in General Domains”, **Journal of Computational Physics**, vol. 110, pp. 171-186.
- [Tom 96] Tome, M. F.; Castelo Fo., A; Murakami, J.; Cuminato, J. A.; Minghim, R.; Oliveira, M. C. F. - “Numerical Simulation of Axysimmetric Free Surface Flows”, *Notas do ICMSC, Série Computação*, No. 30, ICMSC-USP, set. 1996.

# NOTAS DO ICMSC

## SÉRIE COMPUTAÇÃO

- 033/97 NUNES, M.G.V.; HASEGAWA, R.; VIEIRA, F.M.C.; SANTOS, G.H.R.; FORTES, R.P.M. - SASHE: Sistema de autoria e suporte hipermídia para ensino <sup>1</sup>.
- 032/97 DIOGO, T.; FRANCO, N.F. - High order product integration methods for Volterra integral equation with weakly singular Kernel.
- 031/96 ARENALES, M.N.; MORABITO, R. - A theory of the generation of cutting and packing patterns Part I: foundations.
- 030/96 TOMÉ, M.F.; CASTELO FILHO, A. ; MURAKAMI, J.; CUMINATO, J.A.; MINGHIM, R.; OLIVEIRA, M.C.F. - Numerical simulation of axisymmetric free surface flows.
- 029/96 TOMÉ, M. F.; CASTELO FILHO, A.; CUMINATO, J.A.; McKEE, S. - GENSMAC3D: Implementation of the Navier-Stokes equations and Boundary conditions for 3D free surface flows.
- 028/96 MARTINS, TERESA B.F.; GHIRALDELO, CLAUDETE M.; OLIVEIRA JR., O.N. - Readability formulas applied to textbooks in brazilian portuguese.
- 027/96 ALUISIO, SANDRA M.; OLIVEIRA, MARIA C..F. DE; NETO, ALVARO GARCIA; MASIERO, PAULO C.; OLIVEIRA JR., OSVALDO N. - Writing tools and a software architecture to assist writing in a foreign language.
- 026/96 ALUISIO, SANDRA M.; OLIVEIRA JR., OSVALDO N. - A detailed schematic structure of research paper introductions: an application in support-writing tools.
- 025/96 NUNES, M.G.V.; HASEGAWA,R.; KAWAMOTO,S.; OLIVEIRA, M.C.F. DE; TURINE, M.A.S.; GHIRALDELO, C. M.; OLIVEIRA JR., O.N.; RIOLFI, C.R.; SIKANSKI, N.S.; MARTINS, T.B. - Style and grammar checkers for brazilian portuguese.
- 024/96 FORTES, R.P.M. - Uma ferramenta orientada a links para avaliação de hiperdocumentos.