

Avaliação da precisão no processo de reconstrução 3D a partir de seções seriadas

HÉLIO PEDRINI¹
LEILA MACIEL DE ALMEIDA E SILVA²
CLÉSIO LUIS TOZZI³

UNICAMP-FEE
Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial
Grupo de Computação de Imagens
Caixa Postal 6101
13081 Campinas, São Paulo, Brasil

¹ pedrini@dca.fee.unicamp.br

² almeida@dca.fee.unicamp.br

³ clesio@dca.fee.unicamp.br

Abstract. This work is concerned with the reconstruction problem of 3D objects from planar cross sections. Its purpose is to study the variation of the number of points on each contour and its influence on volume estimation of the reconstructed object.

1 Introdução

Em muitos ramos da ciência aplicada, um sólido tridimensional necessita ser reconstruído a partir de suas seções transversais. Essas seções são obtidas através da interseção do objeto com uma coleção de planos, não necessariamente paralelos. Por exemplo, na medicina as imagens dessas seções transversais podem ser obtidas através da utilização de *scanners* médicos, tais como tomografia computadorizada, ressonância magnética, tomografia através da emissão de pósitrons e ultrassonografia. Assim, tarefas como planejamento de tratamentos através de radiação, estudo de características morfológicas de órgãos, planejamento cirúrgico e auxílio em diagnósticos têm recebido cada vez mais contribuições com a utilização das técnicas de reconstrução computadorizada.

O problema de reconstrução consiste basicamente em inferir a representação tridimensional do objeto, não somente para efeitos de visualização, mas também para obter e analisar parâmetros geométricos do mesmo.

Inúmeros algoritmos para tratar o problema de reconstrução foram propostos e podem basicamente ser englobados em duas classes, quais sejam, o método de *voxels* e o método de triangulação de contornos. Por **contorno** entendemos uma aproximação poligonal da borda da imagem de cada seção transversal.

No método de *voxels*, os dados consistem num conjunto de elementos de volume retangular, denominados *voxels* (análogo ao *pixel*, só que considerando agora o espaço tridimensional). O problema

reside, então, em extrair e seguir as faces dos *voxels* que compõem a fronteira do objeto. Esse método é empregado tipicamente para imagens de tomografia computadorizada e foi bastante estudado por Herman e seus colaboradores (veja, por exemplo, [Herman *et al.* (1981)] e [Herman (1988)]).

No método de triangulação, os dados consistem num conjunto de pontos que são os vértices dos contornos das imagens das seções transversais. O objetivo do método é encontrar uma superfície poliédrica aproximada entre pares de contornos consecutivos. Essa superfície é na realidade uma coleção de faces triangulares e a união destas coleções, para todo par de contornos consecutivos, resultará numa aproximação da superfície original do objeto. Cada coleção deve satisfazer a um critério que define a aceitabilidade da superfície reconstituída. Keppel [Keppel (1975)], primeiro a estudar o problema de reconstrução por triangulação, propôs o critério de maximização do volume entre dois contornos consecutivos. Fuchs e outros [Fuchs *et al.* (1982)] usaram o critério de minimização da área superficial entre dois contornos consecutivos. Outros critérios foram sugeridos por vários pesquisadores e, dentre os trabalhos nesta área, podemos citar os de Christiansen e Sederberg [Christiansen-Sederberg (1978)], Shantz [Shantz (1981)], Cook e Batnitsky [Cook-Batnitsky (1981)], Ganapathy e Dennehy [Ganapathy-Dennehy (1982)], Boissonat [Boissonat (1984), (1988)], entre outros. Em particular, no nosso trabalho seguimos a metodologia sugerida por Ekoule e outros [Ekoule *et*

al. (1991)] para realização da triangulação e a sugerida por Cook e outros [Cook *et al.* (1982)] para o cálculo do volume do objeto reconstruído.

O resultado obtido pelo método de triangulação de contornos, nas diversas abordagens anteriormente referenciadas, depende fortemente do espaçamento entre as seções transversais e do processo de aquisição dos contornos. Este último compreende os problemas do seccionamento dos objetos, da detecção e afinamento de bordas e da aquisição dos vértices dos contornos.

O objetivo do nosso trabalho é estudar a influência de uma sub-amostragem dos vértices dos contornos no volume final do objeto reconstruído. A relevância deste estudo está presente na possibilidade de obtenção de resultados mais rápidos embora com precisão relaxada. Esses resultados são por vezes suficientes para determinadas aplicações, desde que atendam a uma faixa de erro estipulada.

Para a realização do nosso trabalho, usamos inicialmente formas geométricas simples e compostas, ambas de comportamentos bem definidos analiticamente. Posteriormente tomamos imagens reais, obtidas do seccionamento de um pimentão. Escolhemos o pimentão por serem as imagens de suas seções transversais compostas de formas côncavas e convexas e também devido ao seu alto grau de deformação longitudinal (veja figura 3).

Este artigo compreende ainda cinco seções. Na seção 2 discutimos o problema da preparação dos contornos. Nas seções 3 e 4 apresentamos a metodologia usada no processo de triangulação e cálculo do volume, respectivamente. Na seção 5 apresentamos os resultados obtidos. Finalmente na seção 6, apresentamos as conclusões finais.

2 Preparação dos contornos

Nesta seção apresentamos como os contornos foram obtidos, como foi realizada a correspondência entre os mesmos e como novos contornos foram gerados a partir dos contornos originais.

2.1 Obtenção dos pontos dos contornos

No caso das formas geométricas definidas analiticamente, obtivemos os contornos pela simulação do seccionamento transversal das mesmas segundo planos paralelos entre si, a um dado espaçamento. Assim, cada seção fica definida por uma curva de equação analítica conhecida. Por exemplo, no caso de um cilindro temos que cada contorno é descrito pela equação da circunferência. Os vértices de cada contorno foram tomados usando-se a equação paramétrica (ρ, θ) da curva. Para isso adotamos uma variação

angular de dez graus, no sentido anti-horário.

No caso do pimentão, usamos um processo menos trivial. Inicialmente medimos o volume do pimentão. Marcamos, também, duas linhas mestras em sua superfície, visando o problema posterior de correspondência dos contornos. Em seguida, seccionamos o pimentão transversalmente segundo vinte planos paralelos a um espaçamento aproximado de 5 mm. Colocamos os cortes num *scanner* para aquisição da imagem discretizada e a espessura de cada corte foi medida para assegurar precisão na determinação da distância entre seções. Finalmente, a aquisição dos vértices dos contornos foi feita manualmente, no ambiente Khoros [Khoros (1991)]. Cuidados foram tomados para que o primeiro vértice de cada contorno fosse a marca referente a uma das linhas mestras já mencionadas. Além disso, o percurso nos contornos seguiu a mesma orientação para todos eles (exigência do algoritmo de triangulação utilizado). Um outro cuidado foi a anotação, em cada contorno, dos dois **pontos de referência** correspondentes às duas linhas mestras, fundamentais para a resolução do problema de correspondência.

2.2 Correspondência entre contornos

O método de aquisição dos vértices dos contornos descrito na seção anterior não garante um registro dos mesmos.

Assim, desenvolvemos um procedimento para a realização da correspondência dos contornos e seu registro. Para isso usamos fundamentalmente os dois pontos de referência anteriormente mencionados.

O método para se fazer a correspondência resumiu-se basicamente em traçar um segmento de reta ligando os pontos de referência, para cada contorno, e após translações e rotações, fazê-lo coincidir com o eixo horizontal x do referencial adotado. Obviamente observamos a coerência de localização dos primeiros vértices dos contornos. A correspondência como descrita acima deixa ainda em aberto um grau de liberdade no posicionamento dos contornos. Assim, fizemos o registro dos contornos segundo um eixo imaginário que passa pelo centro de massa dos mesmos. Queremos ressaltar aqui, que esse registro pode não refletir a real disposição dos contornos quando da sua forma original, mas fornece uma aproximação admissível.

2.3 Geração de novos contornos

De posse dos contornos registrados, passamos ao processo de sub-amostragem de vértices dos contornos, necessário para a realização da análise a que nos propomos. Este processo é realizado em duas fases:

cálculo da taxa de discretização e geração dos novos vértices dos contornos propriamente dita.

A taxa de discretização, correspondente ao espaçamento entre os novos vértices a serem obtidos, é dada pela seguinte fórmula:

$$taxa = P/N,$$

com

$$N = nv * perc/100,$$

onde P designa o perímetro do contorno original, N o número total de vértices depois da sub-amostragem, nv o número de vértices no contorno original e $perc$ a percentagem de vértices desejada sobre o número de vértices do contorno original. A escolha desta taxa proporciona uma variação do número de vértices percentualmente equivalente, em todos os contornos.

A obtenção dos novos vértices é feita através do percurso sobre o contorno original, partindo-se do primeiro vértice de cada contorno, sempre segundo um mesmo sentido. Notemos que esses vértices assim adquiridos comporão agora um novo contorno derivado do original. Assim, vértices do contorno original, que correspondem a pontos da imagem real, poderão ou não fazer parte do novo contorno, a depender da taxa de discretização adotada.

3 Método de triangulação

Nesta seção descrevemos a metodologia empregada na reconstrução das formas por nós analisadas, a partir dos contornos obtidos pelos procedimentos descritos anteriormente.

Como já mencionamos na seção 1, a técnica de reconstrução utilizada neste trabalho é a de triangulação, ou seja, a superfície entre contornos adjacentes é aproximada por uma coleção de faces triangulares. A união destas faces, considerando-se todos os pares de contornos consecutivos, resultará na superfície aproximada do objeto original.

Obviamente existem várias coleções de faces triangulares que podem ser obtidas a partir de um mesmo conjunto de pontos. Na realidade, este número de coleções é absurdamente grande e os algoritmos de triangulação existentes buscam encontrar a coleção que resulte numa melhor aproximação para a superfície.

Métodos ótimos procuram determinar a melhor dentre todas as coleções de faces triangulares, baseando-se em critérios globais como maximização do volume ou minimização da área superficial. Entretanto, são métodos computacionalmente custosos.

Em nosso trabalho, o critério de decisão de como os vértices de contornos consecutivos devem ser ligados foi local. Isto pode resultar numa solução não

ótima, porém permite o tratamento de contornos complexos com esforço computacional menor. Esta metodologia está baseada no trabalho de Ekoule e outros [Ekoule *et al.* (1991)].

Chamando de **segmento de contorno** uma aproximação linear da curva conectando dois pontos consecutivos, temos que uma **coleção aceitável** de faces triangulares ligando dois contornos consecutivos pode ser definida a partir de uma lista de arestas satisfazendo as seguintes propriedades:

- cada segmento de contorno aparecerá em apenas uma face triangular da coleção;
- se uma aresta aparecer como aresta esquerda (direita) de alguma face, ela aparecerá como aresta direita (esquerda) de exatamente uma outra face na coleção.

Uma coleção de faces satisfazendo estas propriedades é chamada de **superfície aceitável**.

Para ilustrar, consideremos dois contornos fechados adjacentes C_i , no nível z_i , $i = k - 1$ e $i = k$ (veja figura 1).

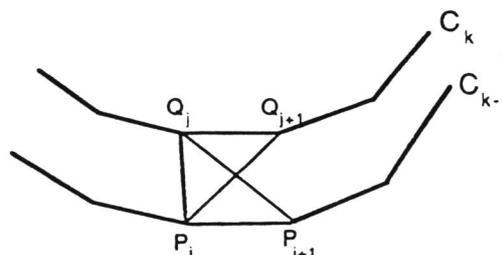


Figura 1: Visão parcial dos contornos C_{k-1} e C_k . Esta figura foi extraída de [Ekoule *et al.* (1991)].

Sejam P_i , $0 \leq i \leq m - 1$ e Q_j , $0 \leq j \leq n - 1$ os vértices dos contornos C_{k-1} e C_k , respectivamente. Definamos a distância Euclidiana como sendo o critério de escolha das arestas a comporem as faces triangulares. Assim, a face triangular (P_i, Q_j, Q_{j+1}) pertencerá à coleção aceitável de faces triangulares que ligam C_{k-1} e C_k , se a aresta (P_i, Q_{j+1}) possuir distância Euclidiana inferior à aresta (P_{i+1}, Q_j) . Caso contrário, será escolhida a face (P_i, P_{i+1}, Q_j) .

Ressaltamos aqui que o algoritmo de triangulação utilizado resolve satisfatoriamente os problemas de contornos com forma e orientação não similares, assim como o problema da existência de múltiplos contornos por seção transversal. Em muitos dos trabalhos referenciados na seção 1, estes problemas não são tratados.

4 Método do cálculo do volume

Após o processo de triangulação, podemos determinar de maneira precisa certas medidas do objeto reconstruído tais como área superficial, volume, centro de massa, entre outras. Na medicina, por exemplo, inúmeras são as aplicações envolvendo o cálculo de volume de órgãos.

Basicamente existem dois métodos gerais para se estimar o volume de objetos. O primeiro deles consiste em supormos uma forma geométrica (elipsóide, parabolóide, etc) para a área de interesse e, então, estimar os parâmetros necessários para a determinação do volume. O segundo método é baseado na reconstrução poliédrica do objeto, obtida pelo processo de triangulação [Cook *et al.* (1982)].

No nosso trabalho fizemos o cálculo estimado do volume com base no segundo método, que passamos a descrever.

Suponhamos que sejam dadas as seções transversais de um objeto e que os pontos amostrados em cada contorno estejam no sentido anti-horário. Suponhamos, também, que o contorno superior possui m pontos e o inferior n . Logo, existem exatamente $(m+n)$ faces triangulares que formam uma superfície aceitável entre os dois contornos.

Sejam P_i , Q_i e R_i os pontos que definem a i -ésima face triangular (P_i pertencente ao contorno superior, Q_i ao contorno inferior e R_i sendo o ponto consecutivo a P_i ou Q_i). Seja U um ponto qualquer do contorno superior. Então, os seguintes vetores podem ser formados, como mostra a figura 2, onde:

$$\bar{A}_i = \overline{UP}_i, \bar{B}_i = \overline{UQ}_i, \bar{C}_i = \overline{UR}_i.$$

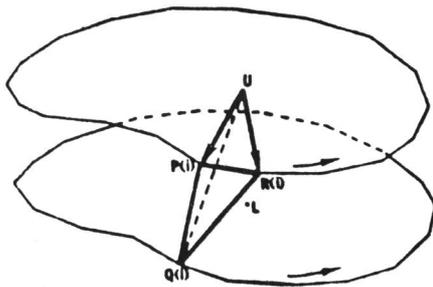


Figura 2: Vetores de um dos poliedros entre duas seções transversais. Figura extraída de [Cook *et al.* (1982)].

Redefinindo a notação dos vértices no contorno inferior para S_j , $j = 1, 2, \dots, n$ e considerando um ponto qualquer S_k neste mesmo contorno, os seguintes vetores podem ser formados:

$$\bar{D}_j = \overline{US}_j, \bar{E} = \overline{US}_k.$$

Chamando de *fatia* a região entre dois contornos consecutivos, temos que o volume de uma única fatia é dado pela expressão:

$$V = \frac{1}{6} \left| \sum_{i=1}^{n+m} \bar{A}_i \bullet \bar{B}_i \otimes \bar{C}_i + \sum_{j=1}^n \bar{D}_{j+1} \bullet \bar{D}_j \otimes \bar{E} \right|,$$

onde \bullet denota o produto escalar e \otimes o produto vetorial.

O volume de um objeto é calculado levando-se em conta a soma de todas as fatias que compõem o objeto.

A precisão do algoritmo de estimativa de volume depende de vários fatores, tais como, a taxa de amostragem dos contornos e o espaçamento entre eles.

5 Resultados

Como mencionamos anteriormente, a influência do número de vértices por contorno no processo de reconstrução foi avaliada utilizando-se dados simulados para formas geométricas de comportamento bem definido e dados reais, obtidos pelo seccionamento de um pimentão. O parâmetro utilizado nesta avaliação foi o volume resultante da reconstrução.

As formas simuladas utilizadas foram:

- cilindro de raio e altura de 10 cm;
- cone com base de raio 5 cm e altura de 10 cm;
- forma combinada construída tomando-se um tronco de cone de altura 10 cm e bases de raios de 5 e 3 cm, subtraindo deste um outro tronco de cone também de altura 10 cm e de bases de raios de 3 e 1 cm e, por fim, seccionando longitudinalmente ao meio a forma resultante da subtração. Observe que as bases dessa forma combinada têm o formato de um C.

Para o cilindro, usamos apenas duas seções para o processo de reconstrução, enquanto para as outras duas formas usamos onze seções espaçadas entre si de 1 cm.

A tabela 1 apresenta o volume obtido pela reconstrução dos contornos originais das formas, bem como os resultados obtidos através da diminuição dos vértices desses contornos de 15%, 40% e 70%.

A tabela 2 apresenta o volume obtido pela reconstrução do pimentão, com uma variação percentual sobre os vértices dos contornos originais de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60%.

Analisando as tabelas 1 e 2, podemos observar que tanto para as formas simuladas como para a forma real (pimentão), houve uma degradação do resultado obtido com a diminuição do número de vértices dos contornos, como era esperado. Entretanto, é interessante observar que tal degradação mantém um limite aceitável, mesmo para reduções de vértices de até 60%.

O erro observado entre o volume medido e o volume estimado, no caso do pimentão, considerando o número total de pontos amostrados, é da ordem de 4.5%. Este erro é fortemente influenciado pela distância entre cortes, pela imprecisão do processo de seccionamento e da anotação dos pontos dos contornos. Contudo, o resultado é aceitável para a maior parte das aplicações.

6 Conclusões finais

Com este trabalho concluímos que uma sub-amostragem dos vértices dos contornos não afeta substancialmente o resultado do volume final obtido, o que implica na possibilidade de uma reconstrução com menor esforço computacional.

Uma melhoria dos resultados obtidos poderia ser conseguida através de um procedimento automático que realizasse a correspondência entre os contornos baseado nas suas características morfológicas.

Este trabalho serviu também para validar o método de triangulação e do cálculo de volume utilizados.

7 Referências

- E. Artzy, G. Frieder e G. Herman. The theory, design, implementation and evaluation of a three-dimensional surface detection algorithm. *Comput. Graphics Image Process.*, 15, 1981, 1-24.
- J. D. Boissonat. Representing 2D and 3D shapes with the Delaunay triangulation. *Proceedings of IEEE ICASSP*, 1984, 745-748.
- J. D. Boissonat. Shape reconstruction from planar cross sections. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 44, 1988, 1-29.
- H. N. Christiansen e T. W. Sederberg. Conversion of complex contour line definition into polygonal element mosaics. *Comput. Graph.*, 12, 3, 1978, 187-192.
- P. N. Cook e S. Batnitsky. Three-dimensional reconstruction from serial-sections for medical applications. *Proceedings of the 14th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 1981, 358-389.
- L. T. Cook, P. N. Cook, K. R. Lee, S. Batnitsky, B. Y. S. Wong, S. L. Fritz, J. Ophir, S. J. Dwyer

- III, L. R. Bigongiari e A. W. Templeton, An Algorithm for Volume Estimation Based on Polyhedral Approximation, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2, 19, 1980, 493-500.
- A. B. Ekoule, F. C. Peyrin e C. L. Odet. A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple planar contours. *ACM Transactions in Graphics*, 10, 2, 1991, 182-199.
- H. Fuchs, Z. M. Kedem e S. P. Uselton. Optimal surface reconstruction from planar contours. *Commun. ACM*, 20, 1977, 693-702.
- S. Ganapathy e T. G. Dennehy. A new general triangulation method for planar contours. *ACM Comput. Graphics*, 16, 1982, 69-75.
- G. T. Herman. From 2D to 3D representation. *Mathematics and Computer Science in Medical Imaging*, 1988, 197-220.
- E. Keppel. Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines. *IBM J. Res. Dev.*, 19, 1975, 2-11.
- The Khoros Group. Department of Electrical and Computer Engineering, University of New Mexico, Albuquerque, 1991.
- M. Shantz. Surface definition for branching contour defined objects. *Comput. Graph.*, 15, 2, 1981, 242-270.

Formas Geométricas	Porcentagem dos vértices originais	Volume Real (cm^3)	Volume Estimado (cm^3)	Erro Percentual
Cilindro	100	3.141,59	3.124,70	0,54
	85	3.141,59	3.101,97	1,26
	60	3.141,59	3.070,05	2,28
	30	3.141,59	2.887,69	8,08
Cone	100	261,54	260,13	0,54
	85	261,54	258,20	1,28
	60	261,54	255,69	2,24
	30	261,54	240,30	8,12
Forma Combinada	100	188,50	186,26	1,19
	85	188,50	185,65	1,51
	60	188,50	182,77	3,04
	30	188,50	170,04	9,80

Tabela 1: Volumes das formas geométricas.

Porcentagem dos vértices originais	Volume Medido (cm^3)	Volume Estimado (cm^3)	Erro Percentual
100	131,50	125,59	4,49
90	131,50	124,73	5,15
80	131,50	124,45	5,36
70	131,50	124,25	5,51
60	131,50	123,81	5,85
50	131,50	123,25	6,27
40	131,50	121,44	7,65

Tabela 2: Volumes do pimentão

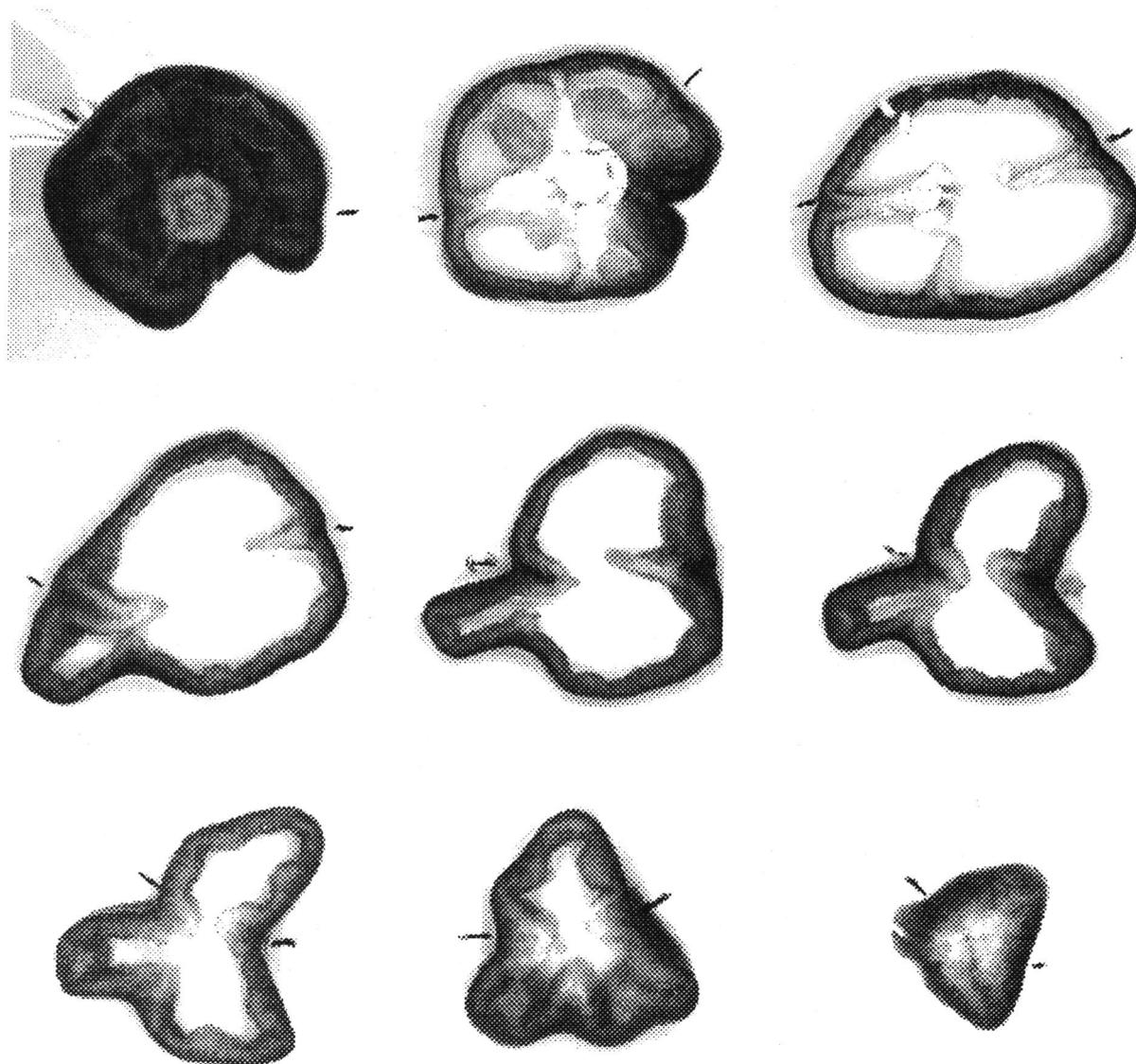


Figura 3: Algumas seções transversais do pimentão.