

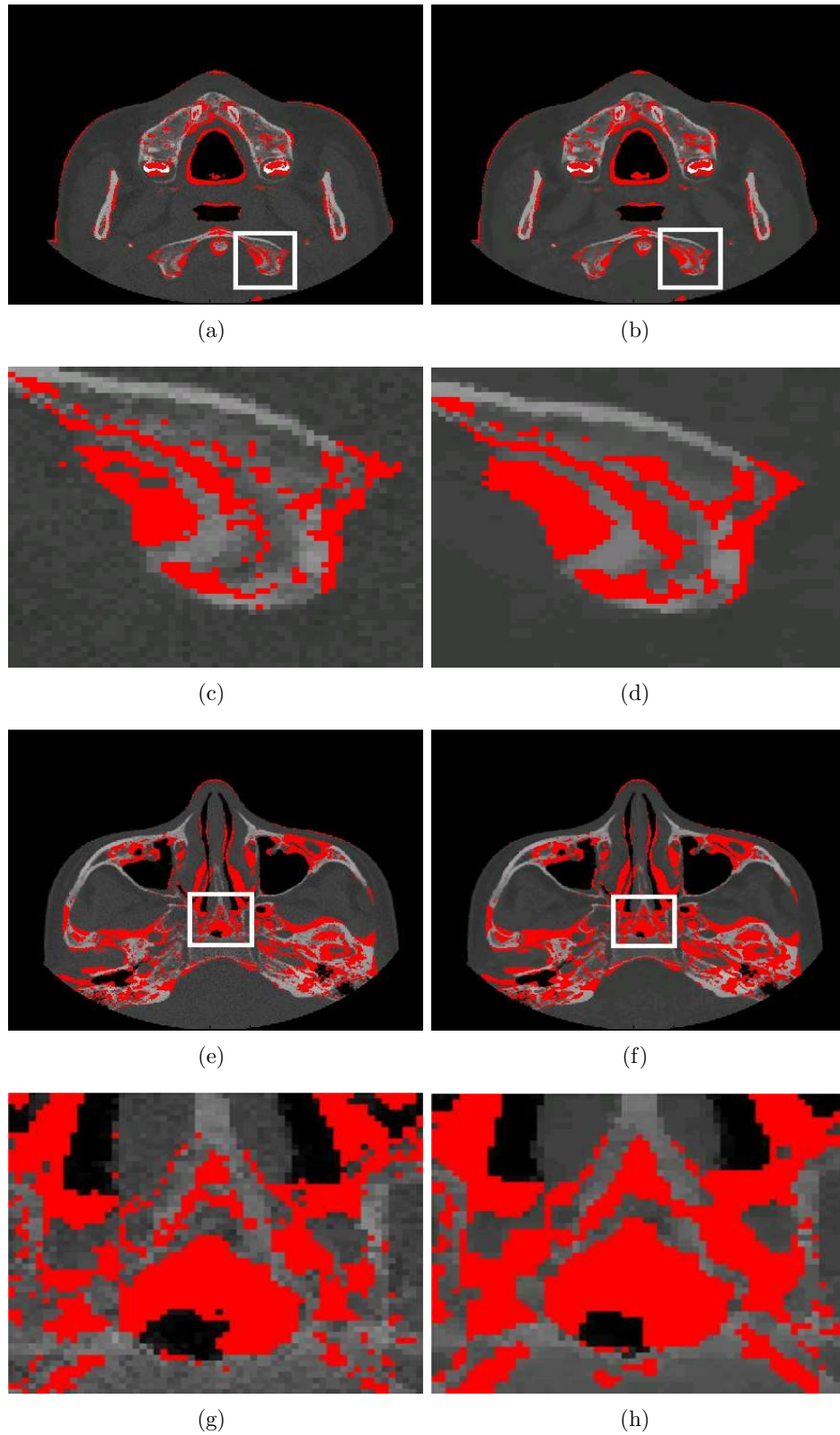


Figura 5.11: Detalhes da fatia virtual inicial obtida de fatias suavizadas e não suavizadas. (a) e (b) fatia virtual inicial 24 não suavizada e suavizada, respectivamente; (c) e (d) ampliação das áreas marcadas nas letras (a) e (b) dessa figura; (e) e (f) fatia virtual inicial 51 não suavizada e suavizada, respectivamente; (g) e (h) ampliação das áreas marcadas nas letras (e) e (f) dessa figura.

Análise parcial dos resultados obtidos

A suavização com conservação de bordas mostra, pela comparação das Tabelas 5.2 e 5.4, que o nível de similaridade *pixel a pixel* e da correlação estatística não aumentaram em relação às fatias não suavizadas. Isso ocorre devido ao fato de que o método de suavização utilizado neste trabalho atua de maneira isolada em cada fatia. Esse isolamento das fatias pode provocar para um mesmo tecido existente em fatias consecutivas, a estabilização dos níveis de cinza em valores diferentes em cada uma dessas fatias, justificando a redução do valor da similaridade *pixel a pixel* entre as fatias.

Para obter as fatias reais consecutivas mais semelhantes, pode-se aplicar o processo de suavização com conservação de bordas não de maneira isolada em cada fatia real, e sim de maneira que envolva todas as fatias ao mesmo tempo, isto é, estender o processo de suavização de bordas de 2D para 3D. Ao suavizar em 3D, a uniformidade de níveis de cinza não é obtida de maneira isolada em cada fatia e sim em toda a estrutura suavizada.

5.6 – Suavização de Fatias com Conservação de Bordas em 3D

Um processo para aplicar o passo de suavização simultaneamente nas fatias antes da geração das fatias virtuais, isto é, somente na imagem 3D formada pela justaposição das fatias reais, será prejudicado pela existência dos espaços vazios entre elas. Assim, propõe-se a geração de uma imagem em 3D composta somente pelas fatias reais do exame e nessa mesma imagem é aplicado o processo de suavização com conservação de bordas em 3D será aplicado.

Para a suavização em 3D com conservação de bordas, é necessário obter uma expressão que possa ser utilizada, na forma discreta, para a manipulação de uma imagem em 3D.

Conforme mostrado no Capítulo 4 deste trabalho, a Equação (5.4) é a equação geral de suavização de uma imagem.

$$T(u) = g(u)|\nabla u| \operatorname{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) \quad (5.4)$$

onde:

u - imagem tridimensional $u(x, y, z)$, contendo as várias fatias resultantes do exame de tomografia computadorizada, isto é, um conjunto de imagens em 2D.

$T(u)$ - variação total sofrida por u em uma iteração do método.

O cálculo de g é realizado utilizando-se a Equação (5.3) deste capítulo, estendendo apenas o domínio da função de 2D para 3D, isto é, das imagens 2D, I , para a imagem em 3D, u . Neste caso a Equação (5.5) é a equação de g .

$$g(u) = \frac{1}{1 + K_g |\nabla u|} \quad (5.5)$$

O desenvolvimento da segunda parte da Equação (5.4) para a obtenção de $T(u)$ é mostrado na Equação (5.6).

$$T(u) = |\nabla u| \operatorname{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) \quad (5.6)$$

$$T(u) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \left[\operatorname{div}\left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}}, \frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}}, \frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}}\right) \right] \quad (5.7)$$

$$T(u) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \left[\frac{d}{d_x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) + \frac{d}{d_y} \left(\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) + \frac{d}{d_z} \left(\frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) \right] \quad (5.8)$$

Calculando-se as derivadas parciais da Equação (5.8).

$$\frac{d}{d_x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{u_{xx}\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - u_x \overbrace{\frac{d}{d_x}(\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2})}^A}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (5.9)$$

O cálculo de A na Equação (5.9) é mostrado na Equação (5.10).

$$\begin{aligned} \frac{d}{d_x}(\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}) &= \frac{1}{2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{-\frac{1}{2}}(2u_x u_{xx} + 2u_y u_{yx} + 2u_z u_{zx}) \\ &= (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{-\frac{1}{2}}(u_x u_{xx} + u_y u_{yx} + u_z u_{zx}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Substituindo-se o valor de A na Equação (5.9) obtém-se a Equação (5.11).

$$\frac{d}{d_x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{\overbrace{u_{xx}\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - u_x(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{-\frac{1}{2}}(u_x u_{xx} + u_y u_{yx} + u_z u_{zx})}^B}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad (5.11)$$

A Equação (5.12) mostra o cálculo de B.

$$B = u_{xx}\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - \frac{u_x(u_x u_{xx} + u_y u_{yx} + u_z u_{zx})}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (5.12)$$

$$B = \frac{u_{xx}\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - (u_x^2 u_{xx} + u_x u_y u_{yx} + u_x u_z u_{zx})}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (5.13)$$

$$B = \frac{u_{xx}u_x^2 + u_{xx}u_y^2 + u_{xx}u_z^2 - u_x^2u_{xx} - u_xu_yu_{yx} - u_xu_zu_{xz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (5.14)$$

Substituindo-se B, encontrado na Equação (5.14), na Equação (5.11) obtém-se a Equação (5.16).

$$\frac{d}{d_x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{u_{xx}u_x^2 + u_{xx}u_y^2 + u_{xx}u_z^2 - u_x^2u_{xx} - u_xu_yu_{yx} - u_xu_zu_{xz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} \quad (5.15)$$

$$\frac{d}{d_x} \left(\frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{u_{xx}u_y^2 + u_{xx}u_z^2 - u_xu_yu_{yx} - u_xu_zu_{xz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} \quad (5.16)$$

De maneira análoga, na Equação (5.16), obtém-se as Equações (5.17 e (5.18).

$$\frac{d}{d_y} \left(\frac{u_y}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{u_{yy}u_x^2 + u_{yy}u_z^2 - u_yu_xu_{xy} - u_yu_zu_{zy}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} \quad (5.17)$$

e

$$\frac{d}{d_z} \left(\frac{u_z}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \right) = \frac{u_{zz}u_x^2 + u_{zz}u_y^2 - u_zu_xu_{xz} - u_zu_yu_{yz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} \quad (5.18)$$

Assim, $T(u)$ é encontrado utilizando-se a Equação (5.21).

$$T(u) = |\nabla u| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \left[\frac{u_{xx}u_y^2 + u_{xx}u_z^2 - u_xu_yu_{yx} - u_xu_zu_{xz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} + \right. \\ \left. \frac{u_{yy}u_x^2 + u_{yy}u_z^2 - u_yu_xu_{xy} - u_yu_zu_{zy}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)} + \right.$$

$$\frac{u_{zz}u_x^2 + u_{zz}u_y^2 - u_z u_x u_{xz} - u_z u_y u_{yz}}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)}] \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} T(u) = & \left(\frac{u_{xx}u_y^2 + u_{xx}u_z^2 - u_x u_y u_{yx} - u_x u_z u_{zx}}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} + \right. \\ & \frac{u_{yy}u_x^2 + u_{yy}u_z^2 - u_y u_x u_{xy} - u_y u_z u_{zy}}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} + \\ & \left. \frac{u_{zz}u_x^2 + u_{zz}u_y^2 - u_z u_x u_{xz} - u_z u_y u_{yz}}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \right) \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} T(u) = & \frac{u_{xx}(u_y^2 + u_z^2) + u_{xy}(u_x^2 + u_z^2) + u_{zz}(u_x^2 + u_y^2)}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - \\ & \frac{u_x u_y (u_{xy} + u_{yx}) - u_x u_z (u_{zx} + u_{xz}) - u_y u_z (u_{yz} + u_{zy})}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Como as derivadas parciais são simétricas em relação aos seus argumentos, isto é, $u_{ab} = u_{ba}$, tem-se:

$$\begin{aligned} T(u) = |\nabla u| \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) = & \frac{u_{xx}(u_y^2 + u_z^2) + u_{yx}(u_x^2 + u_z^2) + u_{zz}(u_x^2 + u_y^2)}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} - \\ & \frac{2u_x u_y u_{xy} + 2u_x u_z u_{zx} + 2u_y u_z u_{yz}}{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Assim, para realizar o processo de suavização com conservação de bordas em 3D, é necessário obter apenas as derivadas $u_{xx}, u_{yy}, u_{zz}, u_x, u_y, u_z, u_{xy}, u_{xz}, u_{yz}$. Após encontrar essas derivadas, realiza-se o processo iterativo da mesma forma como foi explicado neste capítulo para a suavização em 2D.

Foram realizados testes para verificar se os parâmetros utilizados para a suavização em 2D serviriam para a suavização em 3D. Utilizou-se nesses testes, os três melhores valores obtidos na suavização em 2D, além de usar o pior valor obtido com a finalidade de verificar se nesse caso a imagem suavizada seria degenerada por esse processo.

Tabela 5.5: Resultados da suavização de fatias com conservação de bordas em 3D para as fatias 4, 24 e 51 de um exame de tomografia.

Teste	Iterações	K_p	K_g	Pixel a Pixel 4	Correl. Estat. 4	Níveis de Cinza 4	Pixel a Pixel 24	Correl. Estat. 24	Níveis de Cinza 24	Pixel a Pixel 51	Correl. Estat. 51	Níveis de Cinza 51
1	050	0,1	0,50	57,7%	99,4%	65	46,6%	99,6%	71	44,3%	99,6%	107
2	050	0,1	1,00	58,6%	99,7%	66	47,3%	99,7%	69	46,4%	99,8%	108
3	100	0,1	1,00	57,4%	99,4%	64	45,6%	99,6%	71	43,7%	99,6%	106
4	200	0,5	0,25	29,1%	91,9%	82	19,3%	88,6%	94	21,1%	93,5%	105

A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos nos testes realizados. Pode-se observar nela que os resultados convergem para os resultados próximos dos obtidos da suavização em 2D. Pode-se verificar também nessa tabela que houve uma redução geral do valor da correlação estatística, pois nesse caso a suavização é realizada a partir das informações contidas no conjunto de fatias e não só na fatia a que o *pixel* suavizado pertence.

5.6.1 – Geração da fatia virtual inicial após a suavização em 3D

A geração das fatias após a suavização em 3D será realizada pelo mesmo processo realizado no sub-item 5.3.1 deste capítulo. Para o processo de suavização em 3D utilizou-se os mesmos parâmetros da suavização em 2D, isto é, 50 iterações, $K_p = 0,1$ e $K_g = 1,0$. Pode-se observar na Tabela 5.5 que esses parâmetros são realmente os melhores. As fatias virtuais iniciais geradas nesse teste serão comparadas com as mesmas fatias geradas com a suavização em 2D com a finalidade de demonstrar a efetividade desse novo processo. Os resultados obtidos nesse teste estão mostrados na Tabela 5.6, nos gráficos da Figura 5.12

e para análise visual, a Figura 5.13 ilustra as imagens das fatias virtuais iniciais obtidas.

Tabela 5.6: Resultados obtidos para obter a fatia virtual em 3D para diversos valores do coeficiente K .

K	Níveis de Cinza 4	Pixel a Pixel 4	Correl. Estat. 4	Níveis de Cinza 24	Pixel a Pixel 24	Correl. Estat. 24	Níveis de Cinza 51	Pixel a Pixel 51	Correl. Estat. 51
0,05	2	92,96%	62,45%	2	94,38%	81,35%	2	88,68%	74,56%
0,10	4	94,88%	63,57%	4	96,58%	82,92%	4	92,48%	76,20%
0,15	5	95,34%	64,08%	6	97,32%	84,28%	6	93,93%	77,53%
0,20	7	95,94%	65,16%	8	97,73%	86,30%	9	95,16%	79,31%
0,25	9	96,37%	66,41%	10	98,00%	86,99%	11	95,67%	80,15%
0,30	11	96,72%	67,81%	12	98,21%	87,59%	13	96,07%	80,92%
0,35	13	97,02%	69,41%	14	98,35%	88,21%	15	96,39%	81,58%
0,40	14	97,18%	70,34%	16	98,46%	88,84%	17	96,68%	82,22%
0,45	16	97,45%	72,32%	18	98,56%	89,51%	19	96,92%	82,90%
0,50	18	97,71%	74,40%	20	98,65%	90,13%	21	97,14%	83,55%
0,55	20	97,91%	76,19%	22	98,72%	91,06%	24	97,45%	84,46%
0,60	22	98,12%	78,33%	24	98,80%	91,63%	26	97,61%	84,98%
0,65	23	98,22%	79,41%	26	98,85%	92,10%	28	97,78%	85,59%
0,70	25	98,40%	81,56%	28	98,91%	92,57%	30	97,92%	86,08%
0,75	27	98,56%	83,62%	30	98,95%	93,08%	32	98,06%	86,52%
0,80	29	98,69%	85,25%	32	98,98%	93,30%	34	98,18%	86,90%
0,85	31	98,79%	86,53%	35	99,02%	93,89%	36	98,29%	87,35%
0,90	33	98,88%	87,86%	37	99,05%	94,41%	39	98,45%	88,04%
0,95	34	98,93%	88,57%	39	99,07%	94,88%	41	98,54%	88,45%
1,00	36	99,00%	89,69%	41	99,09%	95,28%	43	98,62%	88,79%

Pode-se observar na Tabela 5.6 e na Figura 5.12 que o valor ideal para o K continua sendo o mesmo do teste realizado em 2D, ou seja, igual a 0,15, porque os valores de K apresentaram uma curva de crescimento da similaridade *pixel a pixel* e da correlação estatística com os mesmos comportamentos observados nos testes anteriores e, portanto, pode-se considerar as mesmas análises, considerações e conclusões já obtidas em 2D. No entanto, pode-se verificar que nessa tabela e figura que os valores da similaridade *pixel a pixel* e da correlação estatística são nesse caso maiores do que no teste realizado em 2D, tanto com a suavização quanto sem a suavização.

A Figura 5.13 mostra os resultados das fatias virtuais iniciais 4, 24 e 51 para $K = 0,05$; 0,15; 0,25; 0,50 e 1,0 nas linhas 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. A análise da Tabela 5.6 e dos gráficos da Figura 5.12 mostram que as fatias virtuais iniciais das Figuras 5.13(d), (e) e (f) são as mais adequadas para o processo de interpolação.

As fatias virtuais iniciais das Figuras 5.13 (m), (n) e (o) apresentam a menor quanti-

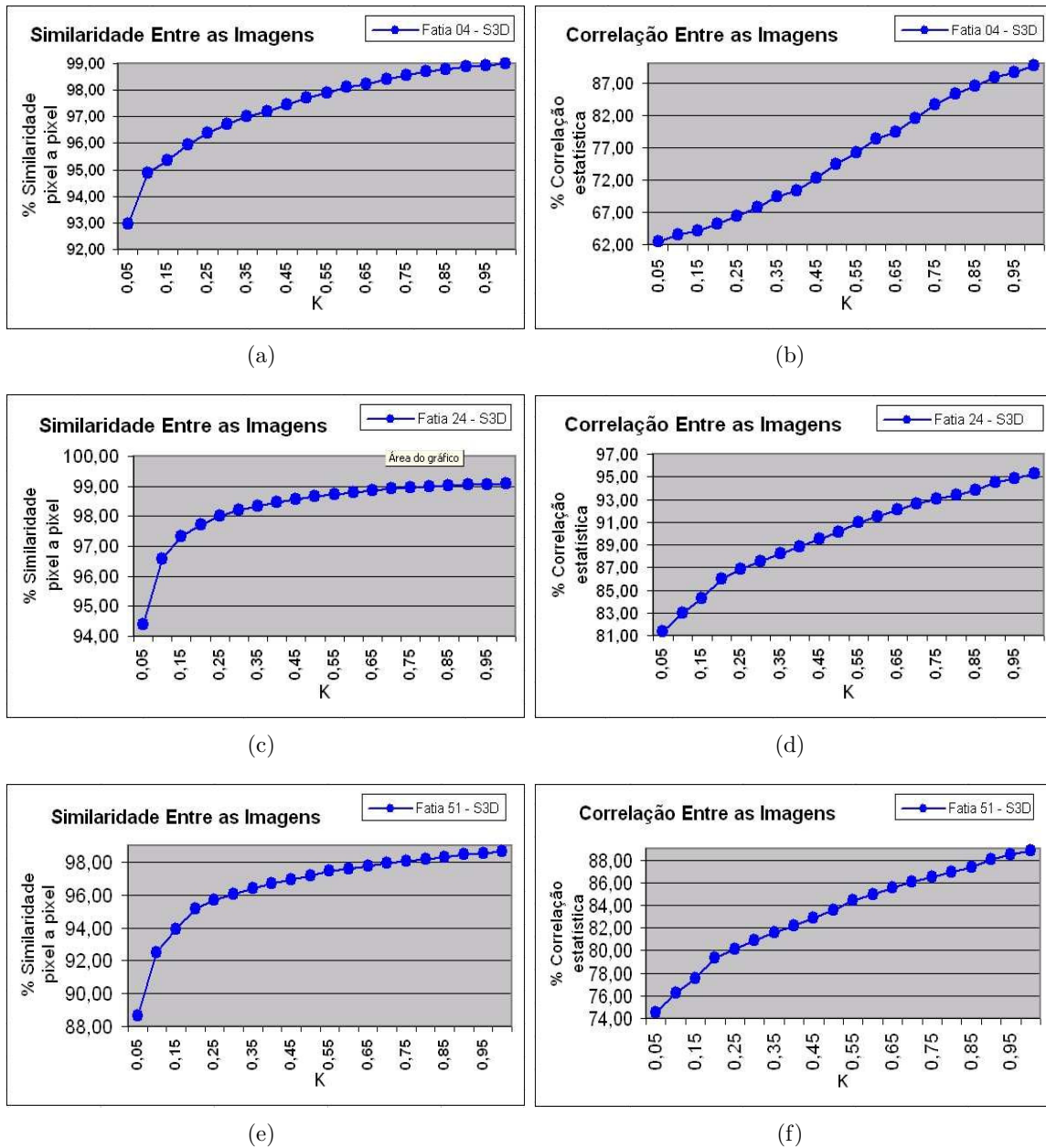


Figura 5.12: Medidas de similaridade *pixel a pixel* e da correlação estatística em função do valor de K para as fatias 4' e 4, 24'e 24 e 51'e 51.

dade de áreas vazias. Contudo, elas estão interpretando dois tecidos diferentes como um único tecido, pois existe a tolerância média que é de aproximadamente 40 níveis de cinza.

As Figuras 5.14 (a), (b) e (c) mostram três fatias virtuais iniciais, para a fatia real 24 de um exame de tomografia computadorizada, obtidas sem suavização e com suavização em 2D e em 3D, respectivamente. Para os dois processos de suavização foram utilizados

os mesmos parâmetros, isto é, 50 iterações, $K_p = 0,1$ e $K_g = 1,0$. Para a determinação das fatias virtuais iniciais, o parâmetro utilizado foi $K = 0,15$. Nas Figuras 5.14 (g), (h) e (j) é mostrada a mesma informação, para a fatia 51 desse exame. O quadro em branco de cada fatia está ampliado logo abaixo na mesma figura, ilustrando um detalhe ampliado das fatias virtuais iniciais.

Pode-se observar no detalhe ampliado das Figuras 5.14 (f) e (l), que o processo de suavização em 3D consegue obter regiões menores e mais bem delimitadas, do que nos processos de suavização em 2D ilustrados nas Figuras 5.14 (e) e (k) e sem suavização mostrados nas Figuras 5.11 (d) e (j).

Análise parcial dos resultados obtidos

Pode-se concluir dos testes realizados neste capítulo que o processo de suavização com conservação de bordas em 3D tem a capacidade de aumentar a similaridade entre as fatias reais, fazendo com que um tecido que faz parte de várias fatias consecutivas tenha a mesma intensidade de níveis de cinza em cada uma dessas fatias. Esse fato contribui para a obtenção de uma fatia virtual inicial com menos espaços vazios, facilitando o futuro processo de interpolação de imagens.

Quando as fatias estão muito espaçadas uma das outras, pode ocorrer a existência de mais do que uma fatia virtual inicial entre duas fatias reais. Nesse caso, essas fatias virtuais serão idênticas, pois as informações de origem para a geração dessas fatias são as mesmas, isto é, as fatias reais entre elas.

5.7 – Conclusões Sobre os Resultados Obtidos

Este capítulo apresentou um método para a obtenção de uma fatia virtual inicial e dois melhoramentos para esse método. As fatias virtuais iniciais obtidas pelo método desenvolvido neste trabalho é o ponto de partida para o segundo passo do método de interpolação de imagens e será mostrado no Capítulo 6 desta tese.

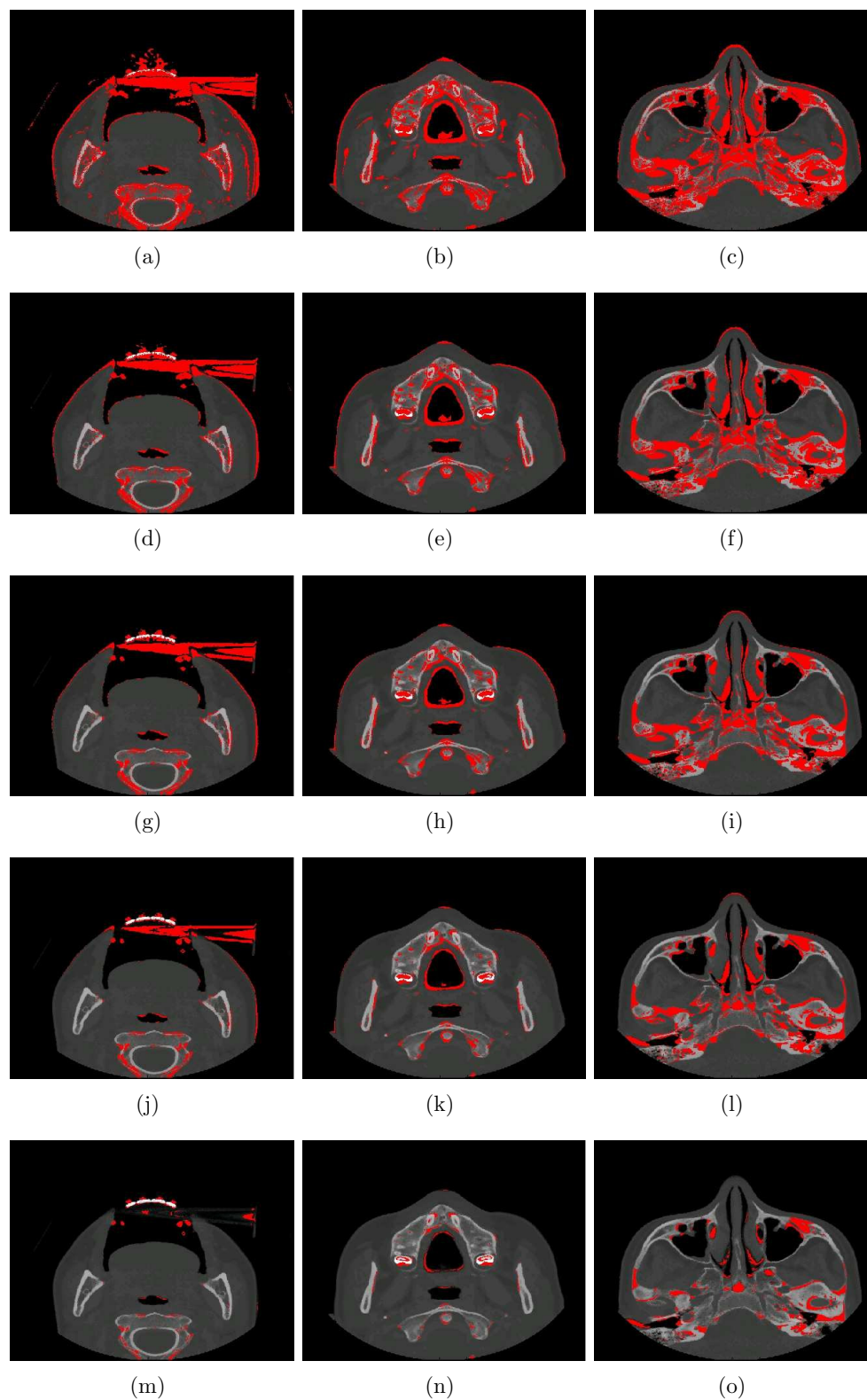


Figura 5.13: Resultados obtidos para os valores de tolerância K: 0,05; 0,15; 0,25; 0,50 e 1,0. (a), (d), (g), (j) e (m) resultados para a fatia 4; (b), (e), (h), (k) e (n) resultados obtidos para a fatia 24; (c), (f), (i), (l) e (o) resultados para a fatia 51.

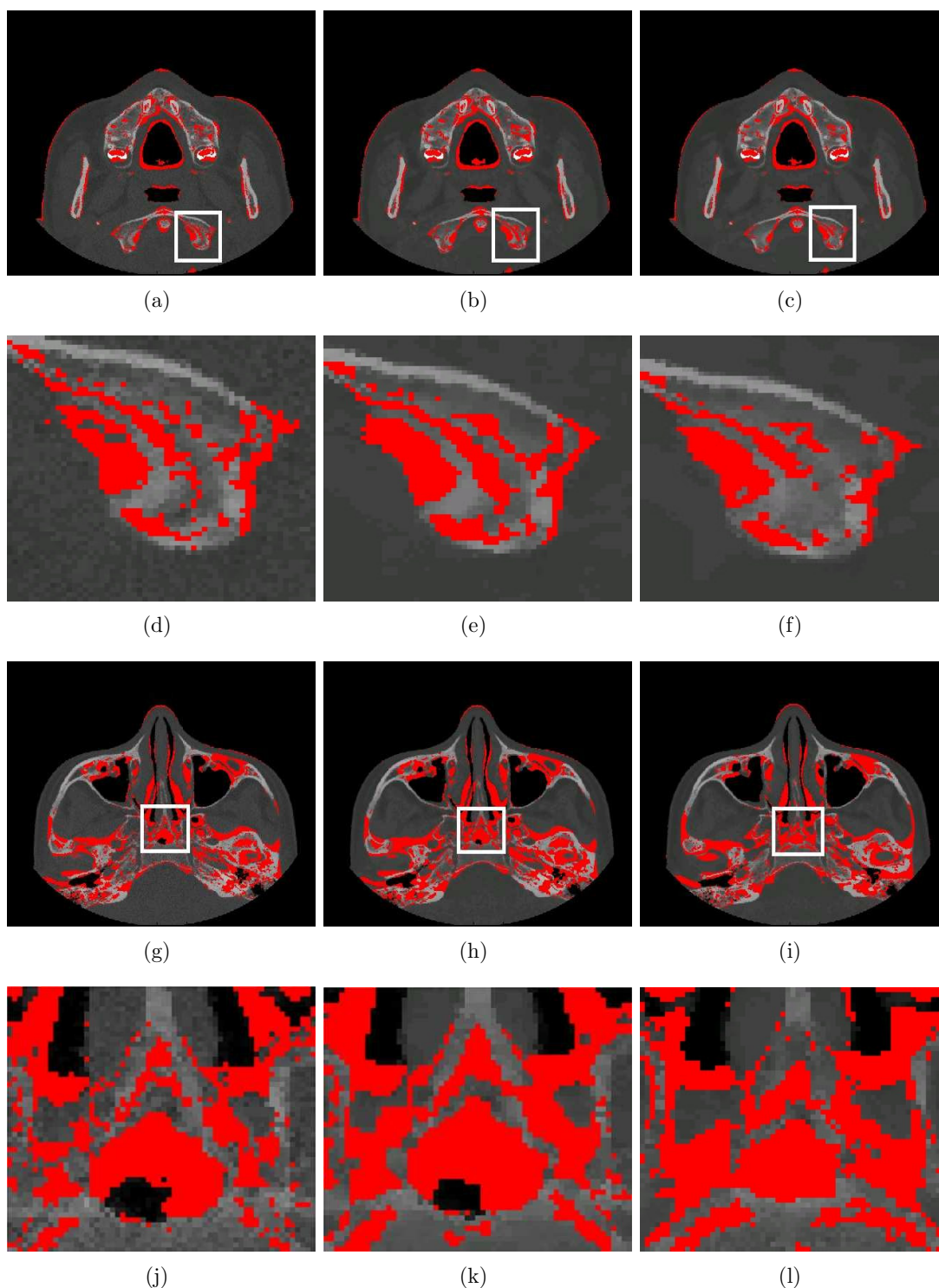


Figura 5.14: Detalhes da fatia virtual inicial obtidos das fatias suavizadas e não suavizadas. (a), (b) e (c) fatia virtual inicial 24 não suavizada, suavizada em 2D e suavizada em 3D, respectivamente; (d), (e) e (f) ampliação das áreas marcadas nas letras (a), (b) e (c), respectivamente; (g), (h) e (i) fatia virtual inicial 51 não suavizada, suavizada em 2D e suavizada em 3D, respectivamente; (j), (k) e (l) ampliação das áreas marcadas nas letras (g), (h) e (i), respectivamente.

O método desenvolvido neste capítulo consegue obter fatias virtuais iniciais que contém as porções semelhantes das fatias reais que as limitam. Ele utiliza a correlação estatística entre os *pixels* das fatias reais, demonstrando resultados melhores do que a comparação *pixel a pixel*. Essa conclusão foi obtida pelo seguinte:

1. A fatia virtual inicial apresentou níveis de similaridade em torno de 95% ao passo que a comparação *pixel a pixel* direta apresentou nível de similaridade em torno de 42%, e;
2. As medidas obtidas com o método desenvolvido neste capítulo aproximaram-se da correlação estatística entre as duas fatias contínuas, confirmando a grande semelhança visual entre elas.

Para obter melhores resultados no método desenvolvido neste capítulo foi realizada a suavização das fatias de um exame de tomografia com conservação de bordas em 2D. Os testes realizados mostraram que:

1. As regiões vazias das fatias virtuais iniciais não foram reduzidas com o processo de suavização com conservação de bordas;
2. A suavização com conservação de bordas não aumentou o nível de correlação estatística entre as fatias virtuais iniciais e as reais correspondentes, como pode-se observar na Tabela 5.4 deste capítulo. Isso ocorreu porque as fatias foram suavizadas de maneira isolada, convergindo o nível de cinza de um mesmo tecido para valores diferentes em cada fatia; e
3. Embora a correlação estatística não tenha aumentado e nem as áreas vazias diminuído com o processo de suavização com conservação de bordas, as regiões vazias da fatia virtual inicial tornaram-se mais bem delimitadas e concentradas, como pode-se observar na Figura 5.11 deste capítulo.

Finalmente, este capítulo mostrou o processo de suavização de imagens com conservação de bordas em 3D, aplicado a uma imagem em 3D formada por fatias de um

exame de tomografia computadorizada. Dos testes realizados pode-se concluir que:

1. A suavização com conservação de bordas em 3D resulta em uma maior uniformidade dos níveis de cinza nas diversas fatias quando comparada com a suavização em 2D, aumentando a correlação estatística entre as fatias virtuais iniciais e as fatias reais correspondentes, como pode-se observar na Tabela 5.6 deste capítulo.
2. As regiões vazias tornaram-se, da mesma forma que na suavização em 2D, mais bem delimitadas, mas com a vantagem de terem tornado-se regiões menores, facilitando e melhorando o resultado do processo de interpolação de imagens; e
3. Não observou-se um aumento do tempo de processamento em 3D, pois a suavização é realizada em toda imagem em 3D, enquanto que na suavização em 2D, o processo se repete de maneira isolada em cada fatia. Assim, em ambas as abordagens, o tempo de processamento foi o mesmo.

Finalmente, pode-se concluir que o processo de suavização com conservação de bordas em 3D oferece todas as vantagens em relação a suavização em 2D, além de não aumentar o tempo de processamento. Portanto, essa é a abordagem escolhida para ser utilizada nos demais experimentos deste trabalho.

O próximo capítulo deste trabalho apresenta a proposta de dois métodos de restauração de imagens considerando como ponto de partida a imagem tridimensional formada pelas fatias reais e virtuais iniciais. Esses métodos utilizam o processo de *inpainting*, o primeiro em 2D e o segundo em 3D. São mostrados os resultados obtidos nos testes utilizando-se esses dois métodos e são realizadas conclusões sobre esses resultados.

6 *Interpolação de Imagens 3D Utilizando Inpainting*

6.1 — Introdução

A geração de fatias virtuais iniciais pela suavização da imagem com conservação de bordas em 3D, levou à obtenção de fatias virtuais com poucas áreas vazias. Essas fatias obtidas permitem tratar o processo de interpolação de imagens utilizando o algoritmo de retoque de imagens, pois um método desse aplicado a essas porções vazias das fatias virtuais iniciais fará com que a imagem em 3D esteja completa para o processo de visualização.

Os processos de restauração de imagens utilizados nesta tese consiste inicialmente na aplicação da técnica apresentada por Barcelos e outros [74] e Martins [20]. Essa técnica visa a eliminação dos espaços vazios em uma imagem pelo prolongamento das linhas geodésicas existentes na vizinhança das áreas vazias das fatias virtuais iniciais. Uma outra técnica também utilizada neste trabalho foi a apresentada por Bertalmío e outros [19] e posteriormente aprimorada por Barcelos e Batista [22]. Essa segunda técnica utilizada consiste em efetuar o retoque da imagem em duas etapas, uma de transporte de informação e outra de difusão da região retocada. Ambos os processos de restauração de imagens são chamados de *inpainting* e foram explicados no Capítulo 4 deste trabalho.

Esses dois métodos de interpolação de imagens, consideram como ponto de partida a imagem tridimensional formada pelas fatias reais e fatias virtuais iniciais. Eles utilizam abordagens diferentes para o processo de *inpainting*, além de considerem um contexto maior do que apenas aquele definido pelas fatias reais consecutivas, satisfazendo o objetivo

proposto nesta tese. Um detalhamento básico desses dois métodos é o seguinte:

- O primeiro método aplicado utiliza como fundamento teórico os princípios de *in-painting* apresentados por Barcelos e outros [74] e Martins [20]. Nesse método é utilizado como entrada do processo, as seções transversais da imagem em 3D, pois essas apresentam menos regiões vazias e também com dimensões menores. A Figura 6.3 mostra a imagem de uma seção transversal.

O experimento utilizando os cortes transversais da imagem em 3D permite que o método de restauração considere um contexto maior do que o formado por duas fatias reais, pois na seção transversal, o conjunto: “fatia real - uma ou mais fatias virtuais - fatia real” é considerado integralmente pelo processo de restauração, pois essas fatias é que compõem a seção transversal.

- O segundo método estende o método de Barcelos e Batista [22] para retoque em imagem em 2D que é um aprimoramento do método proposto por Bertalmio [19]. Neste trabalho o método aprimorado é estendido para imagens em 3D. Desta forma, a imagem em 3D é tratada integralmente em um único momento fazendo com que o processo de preenchimento possa agir em volumes vazios dessa imagem.

Para os dois métodos citados acima são realizados testes de acordo com um experimento padrão com a finalidade de determinar a sua qualidade e comparar os resultados obtidos em cada um deles. O experimento padrão a ser aplicado para cada um dos métodos, mostra os resultados obtidos e além disso, mostra uma análise e conclusões parciais sobre esses resultados.

6.2 – Experimento Padrão

O experimento padrão a ser realizado neste trabalho visa estabelecer critérios padronizados com a finalidade de permitir a comparação dos métodos propostos. Ele será realizado com quatro métodos de interpolação: o linear, o de Goshtasby e outros [1], o de retoque pelo prolongamento de linhas e o de retoque por transporte e difusão.

6.2.1 – Exames utilizados no experimento padrão

Serão utilizados três conjuntos de fatias obtidas de três exames de tomografia computadorizada. A Figura 6.1 mostra três fatias, uma de cada um dos exames utilizados no experimento padrão. Todos os exames retratam alguma parte do crânio do paciente analisado.

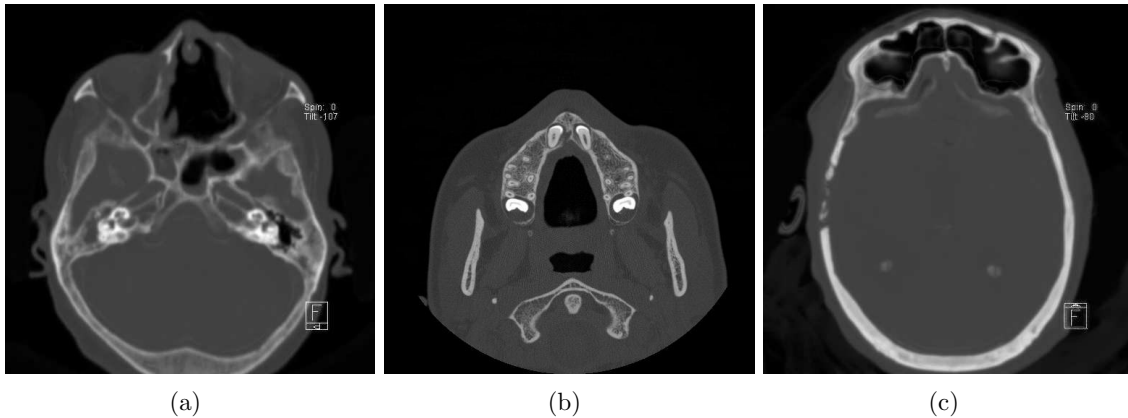


Figura 6.1: (a), (b) e (c) fatias 25, 23 e 25 obtidas de três exames de tomografia computadorizada, respectivamente, que serão utilizadas no experimento padrão.

6.2.2 – Medidas realizadas no experimento padrão

Para cada um dos métodos de interpolação testados e desenvolvidos neste trabalho, o experimento padrão prevê a aplicação dos seguintes testes:

1. Apresentação das imagens em 3D mostrando algumas visões distintas da estrutura gerada. As imagens serão apresentadas com duas diferentes funções de transferências, uma apresentando a estrutura óssea e a outra mostrando o rosto do paciente. Por essas imagens será possível a comparação visual da efetividade de cada método testado;
2. Da mesma forma que foi realizado nos testes do Capítulo 5 deste trabalho, o experimento padrão prevê um teste onde as fatias reais pares serão retiradas do conjunto, sendo gerado no lugar delas fatias virtuais. Serão realizadas as seguintes medidas de similaridade:

- Medida de correlação estatística entre a imagem gerada e a imagem real obtida no exame. A correlação estatística é obtida utilizando-se a Equação (5.1), mostrada no Capítulo 5 deste trabalho;
- Medida da relação sinal/ruído de pico (PSNR) entre a imagem gerada e a imagem real obtida no exame. A unidade da PSNR é decibéis (dB). Essa medida, no contexto deste trabalho, define a relação entre o sinal de pico das imagens e a média da diferença entre elas. A PSNR é obtida pela Equação (6.1).

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{b}{rms} \right) \quad (6.1)$$

onde:

b - maior valor possível do sinal. No caso de imagens com 256 níveis de cinza esse valor está entre 0 e 255;

rms - raiz quadrada da diferença média quadrática entre as duas imagens.

- Medida da distância de Hausdorff [2] entre os conjuntos de pontos resultantes do processo de triangulação de duas imagens em 3D obtidas pelo método de Marching Cubes [37]. Essa medida permite mensurar a distância entre os pontos da imagem interpolada com os pontos da imagem real. Assim, ela indicará qual imagem em 3D mais se aproxima da imagem original.

Os métodos de retoque pelo prolongamento de linhas e transporte e difusão propostos neste trabalho são inicialmente apresentados com as respectivas imagens resultantes da aplicação de cada um deles. Após essa apresentação, serão mostrados os resultados comparativos do experimento padrão.

6.3 – Retoque Pelo Método de Prolongamento de Linhas

As regiões vazias das fatias virtuais iniciais podem ser vistas como porções da imagem que foram danificadas ou mesmo porções oclusas por um objeto qualquer dessa imagem. Desta forma, pode ser aplicado um método de retoque da imagem representada na fatia virtual inicial, concluindo o processo de interpolação de imagens em duas etapas, conforme já mencionado anteriormente no Capítulo 5 deste trabalho.

A aplicação do método de restauração proposto por Barcelos e outros [21] e Martins [20], já mencionado neste capítulo, auxilia o segundo passo de interpolação proposto neste trabalho.

6.3.1 – Desenvolvimento do método

O processo de restauração proposto por Barcelos e outros [21] e por Martins [20] aplicado diretamente em uma única fatia virtual inicial, abrange apenas uma imagem em 2D de uma fatia e, portanto, não considera uma quantidade maior de fatias para obter os contornos. Essa situação não atende ao objetivo deste trabalho, pois é necessário mais de uma fatia para obter um contorno adequado para a imagem em 3D. Outro problema da aplicação direta à fatia virtual inicial é o tamanho das áreas vazias, conforme pode-se observar na Figura 6.2. As fatias virtuais iniciais possuem muitas áreas vazias, além de grandes extensões em cada uma dessas áreas.

O objetivo deste trabalho é realizar a interpolação em um contexto maior do que o definido por duas fatias reais consecutivas, isto é, realizar a interpolação da imagem utilizando as informações dos tecidos localizados em várias fatias consecutivas. Visando atender a isso, propõe-se que o processo de restauração proposto por Barcelos e outros [21] seja realizado não nas fatias virtuais iniciais e sim, nos cortes transversais da imagem em 3D formada pelas fatias reais e pelas fatias virtuais iniciais.

Assim, restaurando as fatias retiradas das seções transversais da imagem em 3D, é

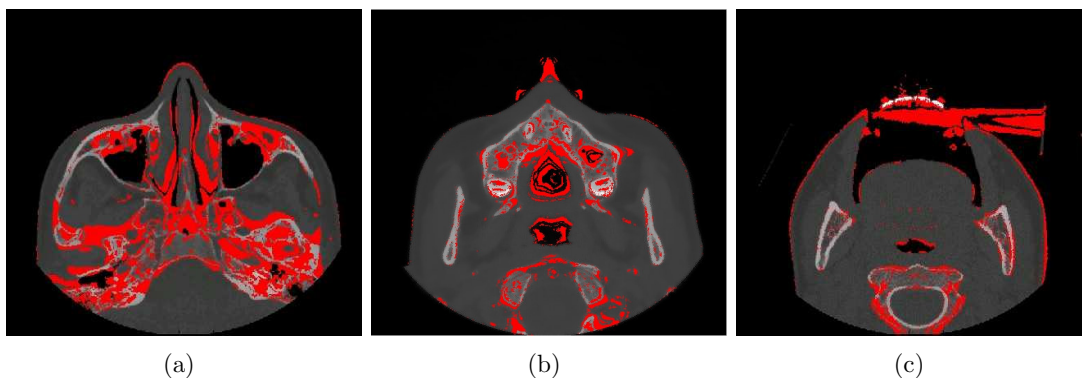


Figura 6.2: (a), (b) e (c) Exemplos de fatias virtuais iniciais obtidas, mostrando as extensas áreas não preenchidas.

possível considerar um contexto mais abrangente da estrutura a ser restaurada, pois a seção transversal possui porções de todas as fatias reais e virtuais da imagem em 3D. A Figura 6.3 mostra um conjunto de seções transversais.

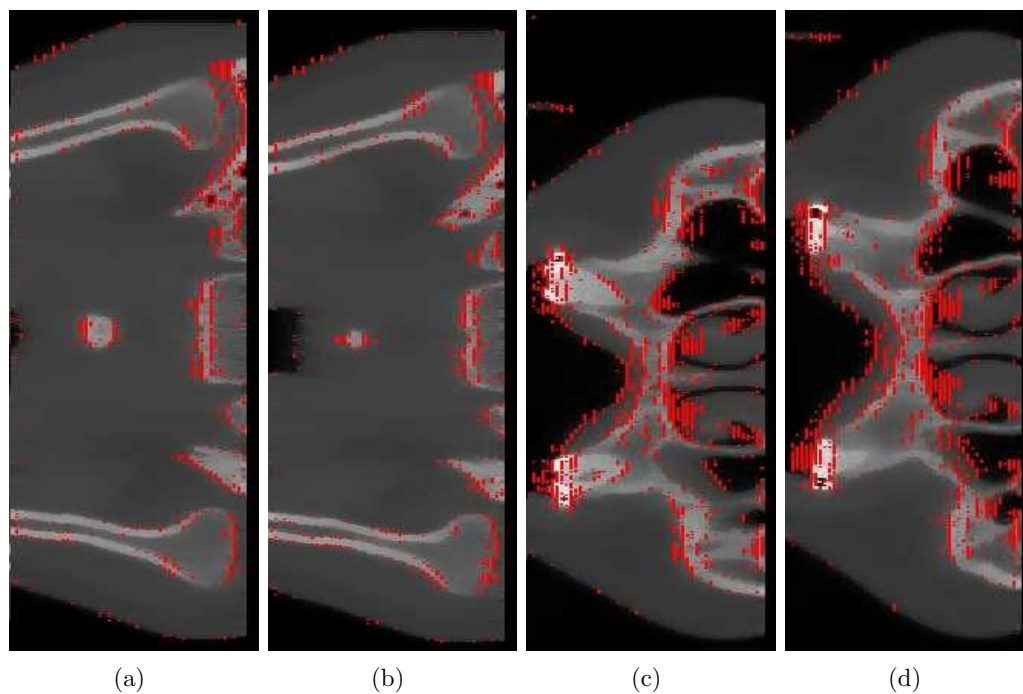


Figura 6.3: (a) e (b) Duas fatias próximas, a fatia 128 e 132; (c) e (d) duas outras fatias próximas, a fatia 300 e 304.

Sabe-se que a imagem em 3D composta pelas fatias reais e virtuais iniciais contém na melhor das hipóteses, 50% de fatias reais intercaladas por 50% de fatias virtuais. Essa proporção depende da distância entre as fatias reais e, normalmente, a imagem em 3D

será formada por mais fatias virtuais iniciais do que por fatias reais. Apesar de existir mais fatias virtuais iniciais do que fatias reais, observa-se também que as porções vazias das fatias virtuais compreendem uma pequena porção da área total da fatia.

A Figura 6.4 mostra um exemplo que foi utilizado em um exame composto por 52 fatias reais com espaçamento entre essas fatias que necessita de mais duas fatias virtuais iniciais. Desta forma foi obtida uma imagem em 3D composta por $154 \times 512 \times 512$ *pixels*. Nesse exemplo, as seções transversais dessa imagem em 3D será formada por 512 imagens em 2D, de 512×154 *pixels* cada uma. Pode-se observar na Figura 6.4 que as imagens são formadas por linhas das diversas fatias reais e virtuais iniciais que estão justapostas na imagem em 3D.

As Figuras 6.4 (a) e (b) mostram uma seção transversal com um quadro delimitando um detalhe da imagem que será ampliado e o quadro ampliado, onde pode-se observar que as áreas não definidas são vistas como linhas retas na cor vermelha, respectivamente.

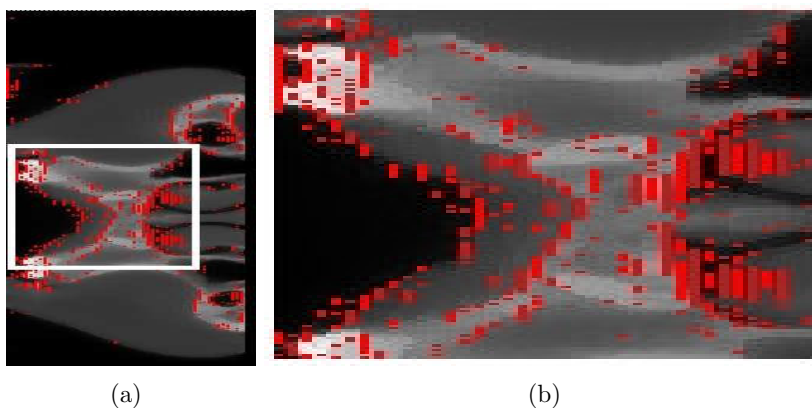


Figura 6.4: (a) Seção transversal 312 da imagem em 3D e uma região quadrada que será ampliada; (b) ampliação da imagem do quadro delimitado na letra (a) dessa figura.

Além de considerar a seção transversal em um contexto maior do que o formado por duas fatias reais vizinhas, uma outra vantagem para o processo de restauração é a natureza das imperfeições geradas nas fatias transversais. Como as fatias reais estão completamente preenchidas e as fatias virtuais iniciais estão parcialmente preenchidas, pode-se concluir que as regiões vazias terão regiões vazias menores, com a largura determinada pela quantidade de fatias virtuais iniciais existentes entre duas fatias reais consecutivas. No caso

da Figura 6.4, essa largura máxima é de dois *pixels*.

6.3.1.1 – O algoritmo de inpainting

O algoritmo de *inpainting* usado neste trabalho para restaurar as fatias transversais é o algoritmo proposto por Martins [20] e Barcelos e outros [21]. Esse algoritmo apresenta algumas variações para a determinação do tamanho do conjunto de contornos que serão analisados com o objetivo de escolher a melhor direção para a restauração. Nesta tese, será utilizada a variação que considera oito direções possíveis para o processo de propagação dos contornos. O algoritmo de *inpainting*, para imagens em 2D, aplica-se no seguinte contexto:

Seja $I : \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ uma imagem em 2D, onde Ω é o domínio dessa imagem. Considera-se $D \in \Omega$ o domínio de retoque. D é o conjunto dos pontos $(x, y) \in \Omega$ tal que $I(x, y)$ não é conhecida, ou assume valores incorretos. D pode ser a união finita de conjuntos disjuntos D_α , isto é, em uma mesma imagem podem existir diversas regiões a serem retocadas.

Martins [20] propuseram um algoritmo de restauração de D que seja realizado pelo transporte de informações de fora de D para a borda de D , isto é, para ∂D . Assim, a cada iteração, o tamanho do domínio D vai reduzindo-se. Pode-se descrever que $D^{n+1} = D^n - \partial D$, onde $D^0 = D$ e $D^{n+1} \in D^n$. Esse algoritmo propõe um processo iterativo que se repete até obter um D^k que seja um conjunto vazio.

As informações transportadas são obtidas a partir da determinação das linhas geodésicas que encontram com o domínio de retoque D em um ponto $I(x, y)$. Essas linhas podem ser determinadas a partir do cálculo da derivada em várias direções que estão chegando a $I(x, y)$, com isso localizando-se as linhas geodésicas; além do cálculo do potencial (diferença de intensidade) [20], também em várias direções, determina-se qual é a melhor linha geodésica que chega ao ponto $I(x, y)$ considerado.

Os passos para o funcionamento do algoritmo de retoque da imagem pelo prolongamento de linhas pode ser resumido em:

1. Determinação de D e de ∂D : seja p um *pixel* do domínio de retoque ∂D . A condição para p pertencer a esse domínio é que ele tenha *pixels* vizinhos pertencentes a D e também pertencentes às áreas fora de D ;
2. Considera-se as seguintes direções e sentidos segundo a representação da rosa dos ventos: oeste para leste (O-E); sudoeste para nordeste (SO-NE); sul para norte (S-N); sudeste para noroeste (SE-NO); leste para oeste (E-O); nordeste para sudoeste (NE-SO); norte para sul (N-S) e noroeste para sudeste (NO-SE). Essas oito direções definem as possíveis origens dos contornos a serem continuados em ∂D . O conjunto de prioridades considerado no caso de definir qual o contorno a ser alongado para ∂D é: N-S; S-N; O-E; E-O; NO-SE; SE-NO; SO-NE; NE-SO;
3. Para cada *pixel* p pertencente a ∂D são calculadas as seguintes derivadas w :

- (a) $w_{O-E} = (I(x, y-1) - I(x, y-2));$
- (b) $w_{SO-NE} = (I(x+1, y-1) - I(x+2, y-2))/\sqrt{2};$
- (c) $w_{S-N} = (I(x+1, y) - I(x+2, y));$
- (d) $w_{SE-NO} = (I(x+1, y+1) - I(x+2, y+2))/\sqrt{2};$
- (e) $w_{E-O} = (I(x, y+1) - I(x, y+2));$
- (f) $w_{NE-SO} = (I(x-1, y+1) - I(x-2, y+2))/\sqrt{2};$
- (g) $w_{N-S} = (I(x-1, y) - I(x, y-2)), e ;$
- (h) $w_{NO-SE} = (I(x, y) - I(x, y));$

4. Da mesma forma que no passo 3, para cada *pixel* p pertencente a ∂D é calculado o potencial das derivadas definido por:

- (a) $P_{x, w_{O-E}} = (I(x+1, y-2) - I(x-1, y-2));$
- (b) $P_{x, w_{SO-NE}} = (I(x+2, y-1) - I(x+1, y-2));$
- (c) $P_{x, w_{S-N}} = (I(x+2, y+1) - I(x+2, y-1));$
- (d) $P_{x, w_{SE-NO}} = (I(x+1, y+2) - I(x+2, y+1));$

- (e) $P_{x,w_{E-O}} = (I(x-1, y+2) - I(x+1, y+2));$
- (f) $P_{x,w_{NE-SO}} = (I(x-2, y+1) - I(x-1, y+2));$
- (g) $P_{x,w_{N-S}} = (I(x-2, y-1) - I(x-2, y+1)), e;$
- (h) $P_{x,w_{NO-SE}} = (I(x-1, y-2) - I(x-2, y-1)).$

5. Obtém-se o melhor “prolongamento” de uma linha de nível, escolhida do conjunto obtido anteriormente e realiza-se o transporte dele para dentro do domínio ∂D . A obtenção desse prolongamento será aplicada logo a seguir neste capítulo.

A escolha do melhor “prolongamento” gera um novo $I(x, y) \in \partial D$. Supondo que existe uma curva c chegando em $I(x, y)$ e que $ct_0, ct_1, \dots$ são pontos conhecidos de c . A Figura 6.5 [20] mostra essa situação.

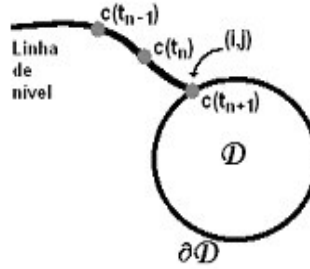


Figura 6.5: Uma curva c chegando ao domínio de restauração.

Fazendo $x = x_i(t_{n+1})$ e $y = y_i(t_{n+1})$, onde $I(x_i(t_n), y_i(t_n))$ é um ponto vizinho do ponto $I(x, y)$ a ser restaurado.

Considerando-se ainda que a curva c em questão satisfaz a Equação (6.2).

$$c(t_{n+1}) = c(t_n) + \Delta t c'(t_n) \quad (6.2)$$

Para todo $I(x, y)$, a condição da Equação (4.22), do Capítulo 4 deste trabalho deve ser satisfeita, indicando que o contorno escolhido satisfaz às restrições definidas para o algoritmo de retoque pelo método de prolongamento de linhas.

Para a escolha do melhor prolongamento, o método desenvolvido por Martins [20] propõe identificar o prolongamento $c(t_{n+1})$ a partir da determinação da menor derivada w , pois isso indica a existência de uma linha c , e do maior potencial, pois indica a linha c com maior energia, isto é, separa duas regiões com intensidades de níveis de cinza mais diferenciadas. Formaliza-se essas condições da seguinte forma:

- $w = \min |w_s|$, onde $s \in S$ representa o conjunto de derivadas calculadas nas várias direções;
- $P = \max |P_{u,s}|$, isto é, é o maior potencial no caso do conjunto de mínimas derivadas não ser unitário;

E assim, calcula-se o valor a ser “transportado” para o *pixel* $I(x, y)$ no tempo t_{n+1} pela Equação (6.2). O valor de Δt é uma constante de atenuação do passo por se tratar de um método iterativo em um domínio discreto, conforme já explicado no Capítulo 4 deste trabalho.

Repete-se esse mesmo procedimento para todos os *pixels* de ∂D , em um número finito de iterações. Após essas iterações o domínio ∂D é retirado do domínio D e o processo é repetido novamente, até obter-se D vazio em todos os possíveis D^k existentes na imagem em 2D.

O processo de análise de borda descrito por Martins [20] será utilizado no algoritmo implementado neste trabalho, pois poderá ocorrer o aparecimento de regiões longas e finas devido aos cortes transversais da imagem em 3D que serão utilizados nesta tese. Este formato alongado propicia o aparecimento dos problemas descritos por Martins [20] que são resolvidos pelo passo de análise de bordas.

O algoritmo para a realização do retoque da imagem com prolongamento de linhas é:

Algoritmo Retoque

Ler as Entradas (*Imagem*, M); $\{M$ iterações para o processo de análise de bordas}

Determinar domínio de retoque $\mathcal{D}$;

```

Enquanto  $\mathcal{D} \neq \emptyset$ 
    Determinar o limite do domínio de retoque  $\partial\mathcal{D}$ ;
    Repita  $M$  vezes
        Para cada elemento  $i$  de  $\partial\mathcal{D}$  faça
            Calculo das derivadas  $w_i$ 
            Calculo dos potenciais  $P_{wi}$ 
            Selecionar o melhor caminho, conforme condições especificadas anteriormente;
            Alongue a linha conforme Equação (6.2)
    Apresentar a imagem retocada;

Fim Algoritmo Retoque

```

6.3.1.2 – Resultados dos testes realizados

A aplicação do algoritmo de retoque foi implementada utilizando-se a aplicação protótipo proposta por Pires e Flôres [55, 56]. A Figura 6.6 mostra que esse algoritmo de retoque apresenta bons resultados para outras imagens que não seja os cortes transversais de tomografia computadorizada. Nas Figuras 6.6 (a) e (b) pode-se observar que apenas algumas regiões do gramado apresentam algumas imperfeições e ainda assim pouco perceptíveis. Nas Figuras 6.6 (c) e (d) pode-se verificar que o processo tornou a imagem completamente restaurada, tornando difícil a localização dos defeitos mostrados na imagem original a partir da análise visual na imagem restaurada.

Restauração das Fatias Transversais

A Figura 6.7 mostra duas seções transversais recuperadas pelo método de prolongamento de linhas. Pode-se observar que devido ao tamanho das regiões restauradas, não obteve-se um resultado visual expressivo como das imagens da Figura 6.6. As Figuras 6.7 (a) e (b) mostram 2 das 512 seções transversais do exame, na letra (a) a seção 128 e na letra (b) o resultado da sua restauração. O mesmo ocorreu com as Figuras 6.7 (c) e (d), só que utilizando a fatia transversal 300.

Na abordagem empregada, apresentada na Figura 6.7, o processo de prolongamento de linhas atua apenas nas seções transversais da imagem em 3D, isto é, considera apenas

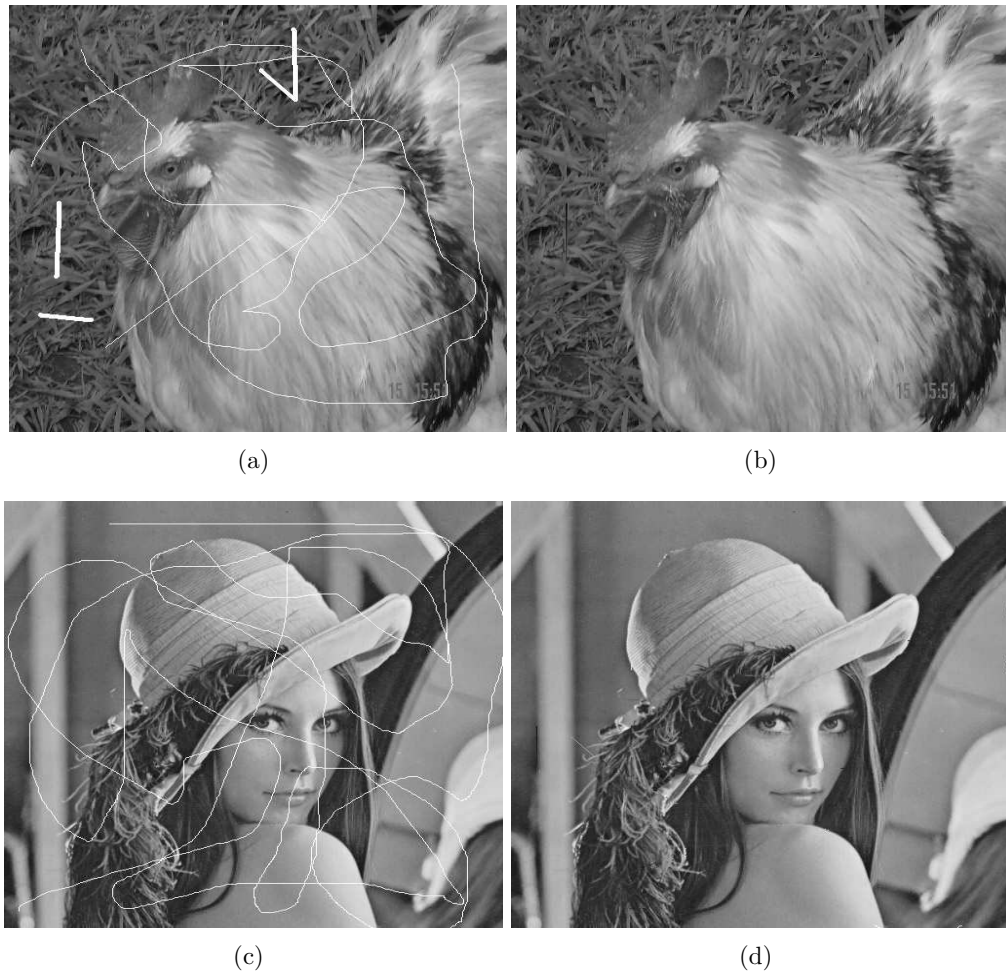


Figura 6.6: (a) e (b) Restauração da imagem de um galo; (c) e (d) restauração da imagem de um rosto humano.

uma dimensão para a realização do retoque. Como ocorreu na seção transversal algumas imperfeições no processo de retoque, o próximo item busca analisar a fatia virtual resultante da junção das seções transversais com o objetivo de verificar as conseqüências das imperfeições observadas na formação da imagem em 3D.

Restauração das Fatias Virtuais

A Figura 6.8 mostra três fatias virtuais restauradas após o processo de retoque nas fatias transversais pelo método de prolongamento de linhas. Pode-se observar diversas imperfeições na imagem, particularmente os prolongamentos de linhas na imagem que não deveriam ocorrer. As Figuras 6.8 (a), (b) e (c) mostram a segunda fatia virtual gerada, a

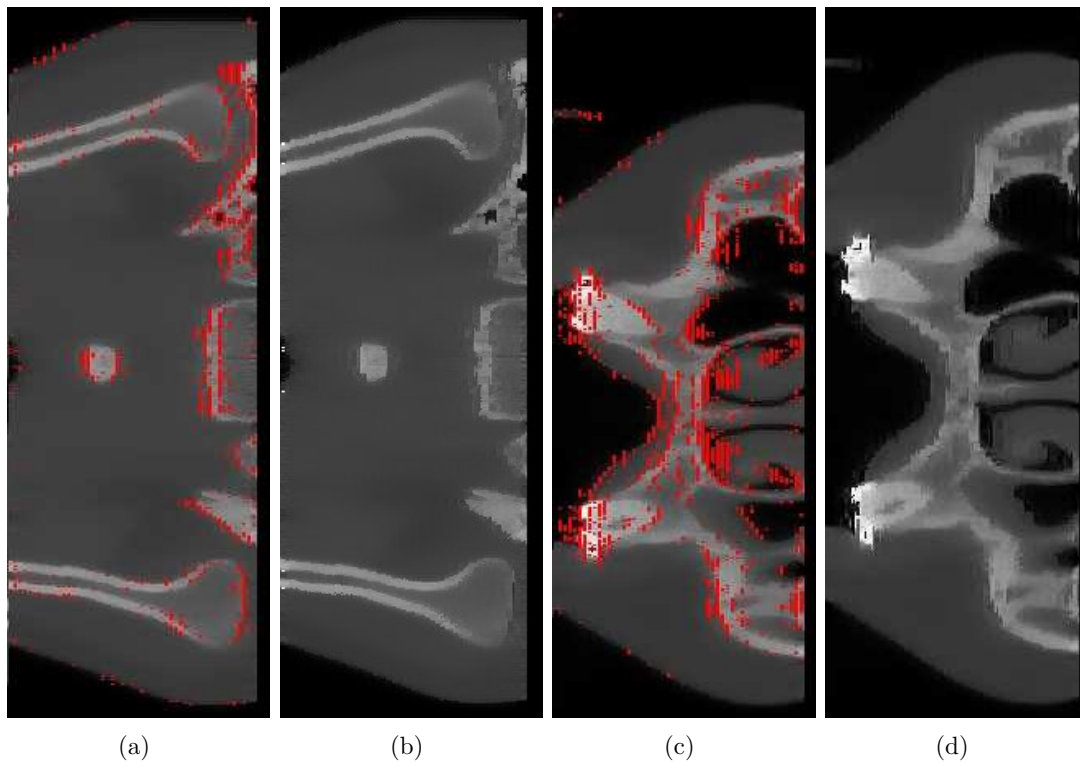


Figura 6.7: (a) e (b) Seção transversal 128 antes e após o processo de restauração, respectivamente; (c) e (d) seção transversal 300 antes e após o processo de restauração, respectivamente.

fatia 4.02, entre as fatias reais 4 e 5, a primeira fatia virtual gerada, a fatia 30.01, entre as fatias reais 30 e 31, e a segunda fatia virtual gerada, a fatia 50.02, entre as fatias reais 50 e 51. Em todos os casos, mais visivelmente nas fatias virtuais 50.02 e 30.01, é possível observar os prolongamentos de linhas produzidos de forma incorreta no processo de retoque das fatias transversais.

Assim, conclui-se, parcialmente, que o método de retoque para as seções transversais não apresenta resultados satisfatórios para a visualização em 3D. No próximo item deste capítulo, a visualização em 3D da estrutura resultante confirma essa conclusão parcial sobre o método de prolongamento de linhas nas fatias transversais.

Visão em 3D da Restauração pelo Método de Prolongamento de Linhas

A Figura 6.9 mostra quatro visões em 3D distintas da parte óssea da mandíbula hu-

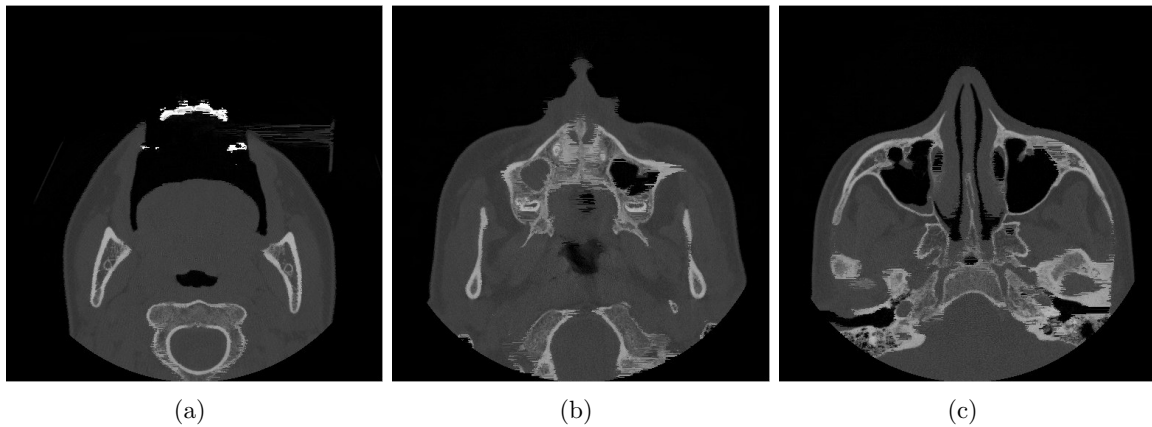


Figura 6.8: (a), (b) e (c) Fatias virtuais 004.02, 030.01 e 050.02, respectivamente, retocadas pelo método de prolongamento de linhas.

mana mapeada no exame de tomografia. A imagem em 3D é formada por 154 fatias, onde existem 52 fatias reais e 102 fatias virtuais. Embora a estrutura óssea esteja representada e passível de um fácil reconhecimento visual, pode-se observar diversas imperfeições nas imagens apresentadas. Os prolongamentos observados nas fatias virtuais e mostrados na Figura 6.8 deste capítulo, são provavelmente os responsáveis pelas imperfeições apresentadas nas imagens.

A Figura 6.9 (a) mostra a visão frontal inclinada da mandíbula humana representada nas 154 fatias, mostrando em primeiro plano a arcada dentária superior e ao fundo o início da coluna vertebral. A Figura 6.9 (b) ilustra a visão frontal da mandíbula, mostrando os dentes e o aparelho ortodôntico em primeiro plano. A Figura 6.9 (c) mostra a visão anterior e superior da porção do crânio onde está a mandíbula tendo em primeiro plano o início da coluna vertebral. Finalmente, a Figura 6.9 (d) ilustra a visão anterior e inferior da porção do crânio onde está a mandíbula tendo em primeiro plano o início da coluna vertebral.

Em todos os casos da Figura 6.9, pode-se observar imperfeições na imagem causadas pelo método de retoque pelo prolongamento de linhas nas seções transversais da imagem em 3D. O acúmulo de fatias com imperfeições torna-se um fator de destruição da imagem em 3D, pois existe um acúmulo de ruídos levando aos resultados apresentados na imagem.

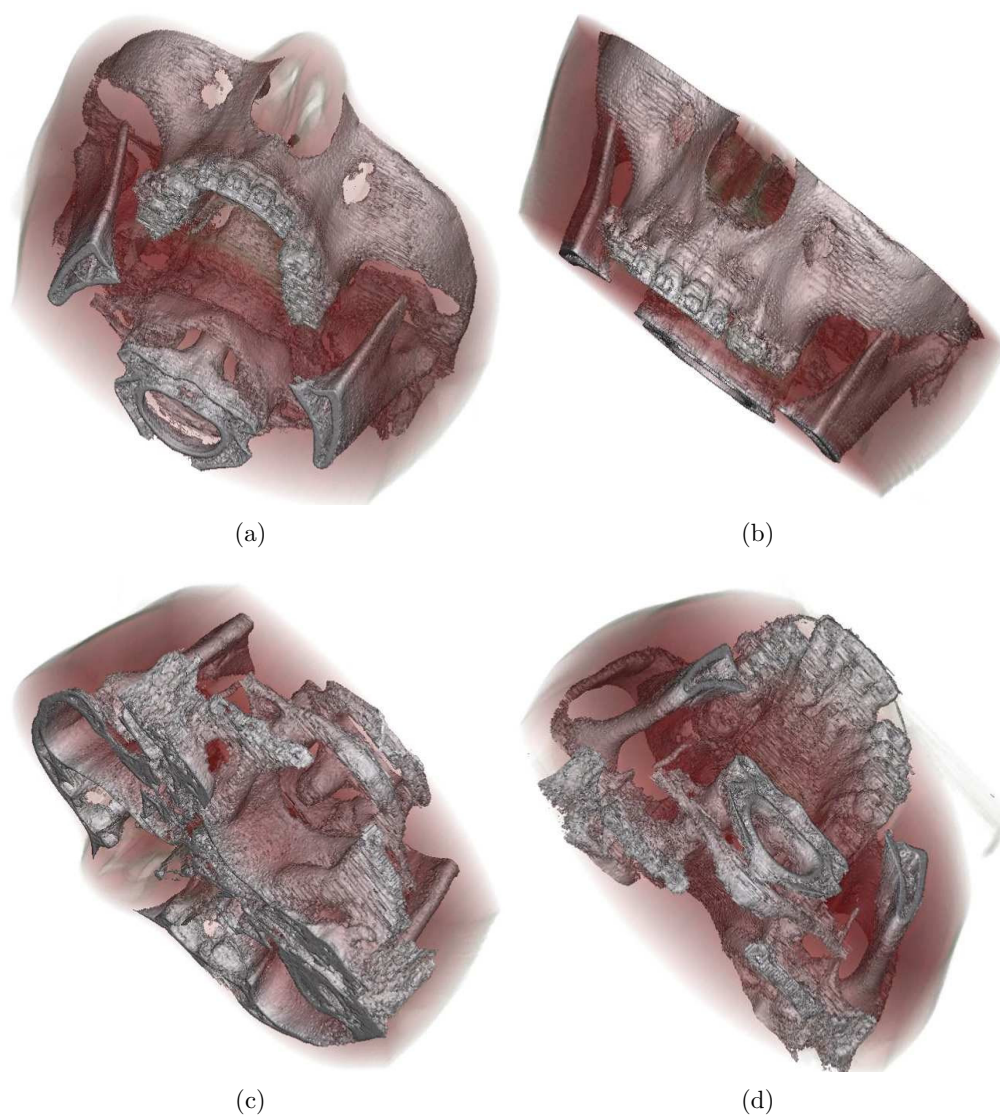


Figura 6.9: (a) e (b) Visão frontal da estrutura óssea mapeada no exame; (c) e (d) visão anterior da estrutura óssea mapeada no exame, utilizando o método de prolongamento de linhas.

A Figura 6.10 mostra três visões em 3D distintas da pele e alguns tecidos moles, apresentando a face do paciente na região da mandíbula mapeada no exame de tomografia. Os tecidos ósseos aparecem parcialmente na imagem, mas com um alto grau de transparência, apenas para ilustrar o posicionamento dos ossos na imagem. Pode-se observar nas três imagens diversas imperfeições, embora a imagem possa ser facilmente reconhecida visualmente. Também nesse caso, os prolongamentos observados nas fatias virtuais são provavelmente os responsáveis pelas imperfeições apresentadas nas imagens.

A Figura 6.10 (a) ilustra a visão frontal do rosto do paciente. Percebe-se claramente imperfeições nas narinas apresentadas na imagem. A Figura 6.10 (b) mostra o perfil do paciente. A Figura 6.10 (c) ilustra a visão superior do crânio, na região da mandíbula, apresentando alguns tecidos internos, principalmente as cavidades nasais.

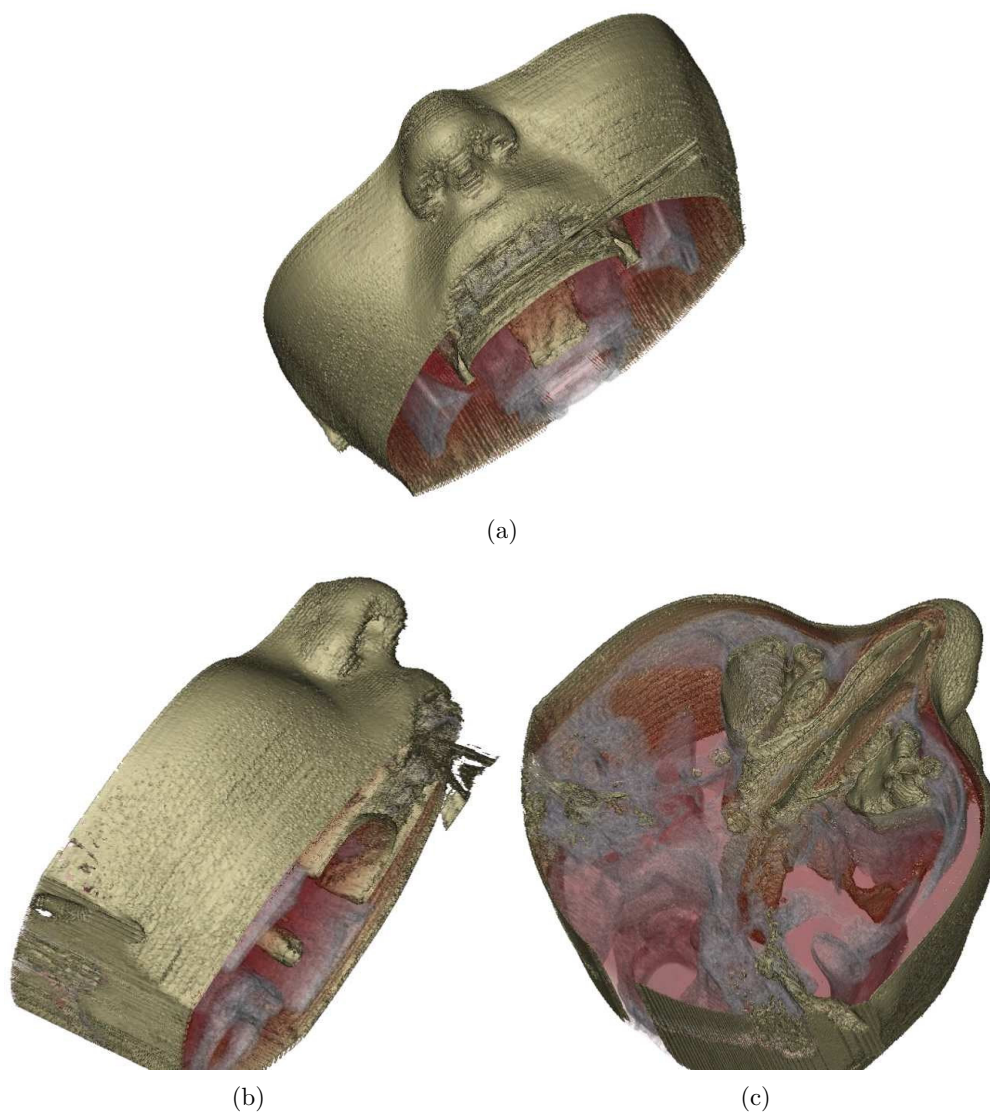


Figura 6.10: (a) Visão frontal da porção da face mapeada no exame; (b) perfil dessa face; (c) visão superior dos tecidos internos mapeados no exame.

Em todos os casos da Figura 6.10, da mesma forma que nas visões em 3D dos tecidos ósseos, pode-se observar imperfeições na imagem causadas pelos ruídos provenientes do processo de retoque.

Análise dos resultados do método de prolongamento de linhas

As imperfeições observadas nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 podem ser devido ao fato que o processo de retoque ocorre apenas no plano determinado pela fatia transversal, não permitindo o prolongamento dos contornos existentes entre as fatias transversais.

A extensão do algoritmo de prolongamento de linhas para o espaço tridimensional pode ser realizada pela utilização de vários planos, em várias direções, escolhendo dessa maneira a melhor continuação das linhas. Embora seja possível essa expansão e implementação do algoritmo, decidiu-se por utilizar neste trabalho, para a extensão para o espaço tridimensional, o método de transporte e difusão proposto por Bertalmio e outros [19] que posteriormente foi aprimorado por Barcelos e Batista [22].

A decisão pelo método de Bertalmio e outros [19] foi pelo fato que embora o processo matemático seja mais complexo, a implementação computacional não é. Além disso, o método de transporte e difusão contempla todas as direções possíveis para determinar a continuidade de uma estrutura, enquanto que pelo método de prolongamento de linhas as direções estariam presas a um número finito de planos implementados no algoritmo. A próxima seção apresenta os desenvolvimentos necessários para obter a expansão para 3D desse método.

6.4 – Interpolação de Imagens Utilizando Transporte e Difusão em 3D

A consideração de um corte transversal permite aumentar o contexto da área de retoque, pois uma seção é formada por diversas fatias. Entretanto, o corte transversal estabelece um único plano fixo para que os fluxos possam se deslocar. Essa ação de retoque em 2D pode não atender situações em que o fluxo do tecido, isto é, o contorno mais provável entre duas fatias vizinhas, se desloca para fora do plano definido pela seção transversal. Uma ampliação do processo de inpainting em 2D para 3D pode eliminar o problema provocado por contornos que se deslocam tridimensionalmente, saindo do plano de restauração descrito no Sub-item 6.3.1 deste capítulo. Essa abordagem pode gerar uma

estrutura com contornos mais exatos, além de manter um contexto maior do que duas fatias vizinhas, da mesma forma que o processo explicado neste sub-item.

6.4.1 – Retoque pelo transporte e difusão em 3D

O método de transporte e difusão [19, 22] foi implementado neste trabalho para realizar a tarefa de retoque em uma imagem em 3D [18]. O desenvolvimento das equações para o uso em 3D está apresentado abaixo. Esse método consiste em um algoritmo iterativo, onde duas ações distintas são realizadas. A primeira ação é o transporte de informações da vizinhança da área a ser retocada para o interior dessa área. A segunda consiste em um processo de suavização dos conteúdos transportados para a área de retoque. O método é definido formalmente a seguir.

O transporte de informações é realizado para dentro do domínio de retoque e é efetuado pelo produto escalar da normal $\vec{N}$ ao domínio de retoque pelo vetor $\vec{s}$ que indica a direção da linha isocrômica na vizinhança analisada. A Figura 6.11 mostra os dois vetores no domínio de retoque.

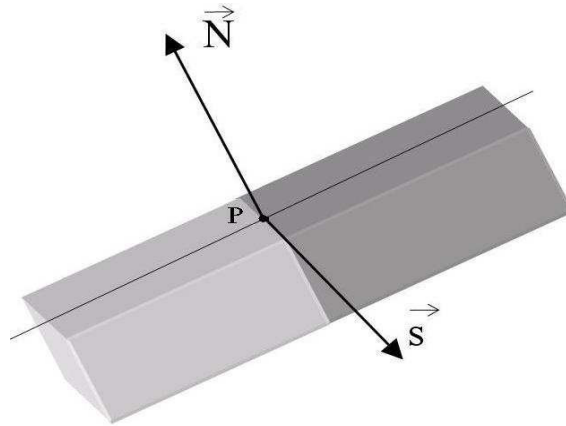


Figura 6.11: Posicionamento em uma estrutura dos vetores normal $\vec{N}$ e isocrômico $\vec{s}$.

A normal $\vec{N}$ é obtida calculando o gradiente do laplaciano no ponto (x, y, z) em questão. O vetor $\vec{s}$ por sua vez, é calculado pelo vetor perpendicular ao gradiente nesse ponto.

O cálculo de $\vec{N}$ e $\vec{s}$ em um ponto (x, y, z) pertencente à imagem que está sendo restau-

rada $u : R^3 \longrightarrow R$ é obtido da seguinte forma:

$$\vec{N} = \nabla \mathcal{L} (u(x, y, z)),$$

onde:

$$\mathcal{L} (u(x, y, z)) = \Delta u(x, y, z) = \nabla(\nabla u(x, y, z))$$

e

$$\vec{s} = \nabla^\perp u(x, y, z)$$

Assim, um passo de transporte de informação para um ponto (x, y, z) de u pode ser obtido:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \mathcal{L} (u) \cdot \nabla^\perp u$$

onde:

t - uma iteração específica no processo de transporte.

Como o transporte será realizado unicamente no domínio de retoque $\mathcal{D}$, então tem-se a forma da equação de transporte representada pela Equação (6.3).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \begin{cases} \nabla \mathcal{L}(u) \cdot \nabla^\perp u, \forall (x, y, z) \in \mathcal{D} \\ 0, \forall (x, y, z) \notin \mathcal{D} \end{cases} \quad (6.3)$$

Desenvolvendo a Equação (6.3), obtém-se:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \mathcal{L}(u) \cdot \nabla^\perp u = \nabla(\triangle u) \cdot \nabla^\perp u = \nabla(\nabla(\nabla u)) \cdot (\nabla u)^\perp \quad (6.4)$$

$$= \nabla(\nabla((\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z})).(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z})^\perp \quad (6.5)$$

$$= \nabla((\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}).(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z})).(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z})^\perp \quad (6.6)$$

$$= \nabla(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}).(-\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, -\frac{\partial u}{\partial y}) \quad (6.7)$$

$$= (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}).(-\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, -\frac{\partial u}{\partial y}) \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} &= (\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial x}, \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} + \\ &\quad \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial y}, \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3}). \\ &\quad (-\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, -\frac{\partial u}{\partial y}) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= (-\frac{\partial u}{\partial y})(\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial y}) + \\ &\quad (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})(\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial z} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3}) + \\ &\quad (-\frac{\partial u}{\partial y})(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial y^2 \partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial x}) \end{aligned} \quad (6.10)$$

A discretização da Equação (6.10) define o termo utilizado em uma iteração de transporte no processo. A cada passo t desse transporte a imagem torna-se cada vez mais retocada de forma correta. Portanto, tem-se que: $u_r = \lim_{t \rightarrow +\infty} (u_0 + \Delta t)$.

A cada conjunto de iterações de transporte, intercala-se um processo de difusão anisotrópica, pois desta forma, garante-se a correta evolução do campo direcional [91]. O processo de difusão anisotrópica utilizado no processo de retoque proposto nesta seção é obtido pela Equação (5.22), descrita no Capítulo 5 deste trabalho.

O algoritmo de retoque da imagem em 3D pode ser descrito da mesma forma que o proposto por Barcelos e Batista [22], porém neste trabalho o processo ocorre para uma imagem tridimensional. Os elementos desse algoritmo são:

1. A imagem em 3D a ser retocada, é denominada por u_0 ;
2. O domínio de retoque existente na imagem u_0 , é denominado por $\mathcal{D}$;
3. A quantidade total de iterações do par transporte/difusão, é representada por M ;
4. A quantidade de iterações a cada seqüência de transporte, é representada por m_t ;
5. A quantidade de iterações a cada seqüência de difusão, é representada por m_d ;

O algoritmo de retoque da imagem em 3D é:

Algoritmo Retoque

Ler as Entradas (u_0, M, m_t, m_d) ;

Determinar o domínio de retoque $\mathcal{D}$;

Para cada domínio de retoque faça

Repita M vezes

Repita m_t vezes o transporte, Equação (6.10);

Repita m_d vezes a difusão, Equação (5.22);

Apresentar a imagem retocada;

Fim Algoritmo Retoque

6.4.2 – Resultados Obtidos

Restauração das Fatias Virtuais

A Figura 6.12 mostra seis fatias virtuais, onde na primeira linha dessa figura as fatias virtuais foram obtidas pelo método de prolongamento de linhas e na segunda linha utilizando o método de transporte e difusão. As Figuras 6.12 (a) e (d) ilustram, para cada um dos métodos, a segunda fatia virtual gerada, a fatia 4.02, entre as fatias reais 4 e 5. As Figuras 6.12 (b) e (e) mostram, para cada método, a primeira fatia virtual gerada, a fatia 30.01, entre as fatias reais 30 e 31. As Figuras 6.12 (c) e (f) ilustram, da mesma forma, a segunda fatia virtual gerada, a fatia 50.02, entre as fatias reais 50 e 51.

A análise visual permite uma fácil diferenciação da qualidade dos resultados obtidos na Figura 6.12. Os ruídos alongados existentes nas fatias virtuais obtidas utilizando-se o método de prolongamento de linhas não ocorrem no método de transporte e difusão. Pode-se observar nessa figura a precisão dos contornos nas fatias virtuais obtidas pelo método de transporte e difusão, tornando-as semelhantes a uma fatia real. Esses resultados reafirmam o sucesso da extensão do método de retoque por transporte e difusão de 2D para 3D.

A Figura 6.13 mostra quatro fatias consecutivas. Nas extremidades dessa figura estão duas fatias reais e no meio dessas fatias, duas fatias virtuais. As Figuras 6.13 (a), (b), (c) e (d) ilustram as fatias 50.00, 50.01, 50.02 e 51.00, respectivamente. As numerações das fatias com casas decimais iguais a zero indicam que as fatias são reais.

Pode-se observar na Figura 6.13 a precisão dos contornos nas fatias virtuais, que possibilita uma correta junção dos tecidos entre as fatias. As porções diferenciadas nas duas fatias reais aparecem modificando-se gradualmente em cada uma das fatias virtuais, propiciando uma suave aproximação dessas diferenças. Os resultados obtidos nessa figura, reafirmam o sucesso da extensão do método de retoque pelo retoque e difusão de informações de 2D para 3D.

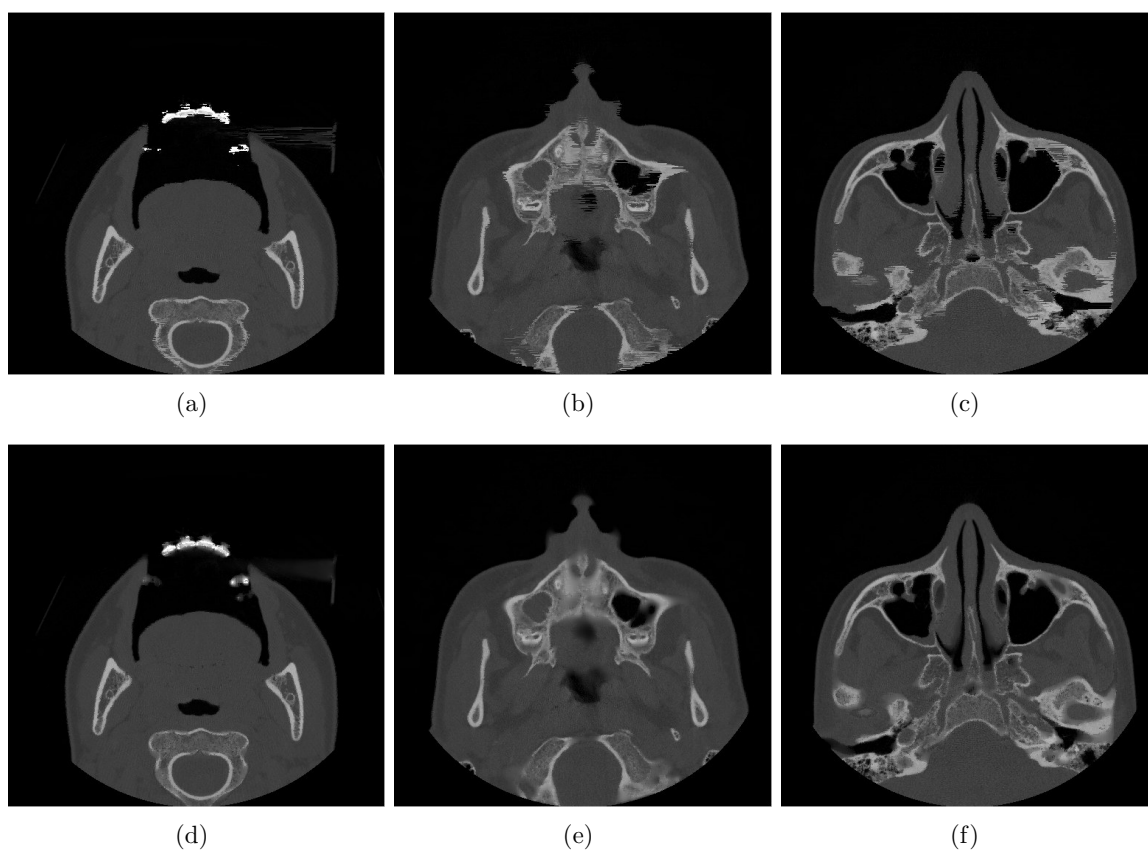


Figura 6.12: (a), (b) e (c) Fatias virtuais 004.02, 030.01 e 050.02, respectivamente, retocadas pelo método de prolongamento de linhas; (d), (e) e (f) fatias virtuais 004.02, 030.01 e 050.02, respectivamente, retocadas pelo método de transporte e difusão.

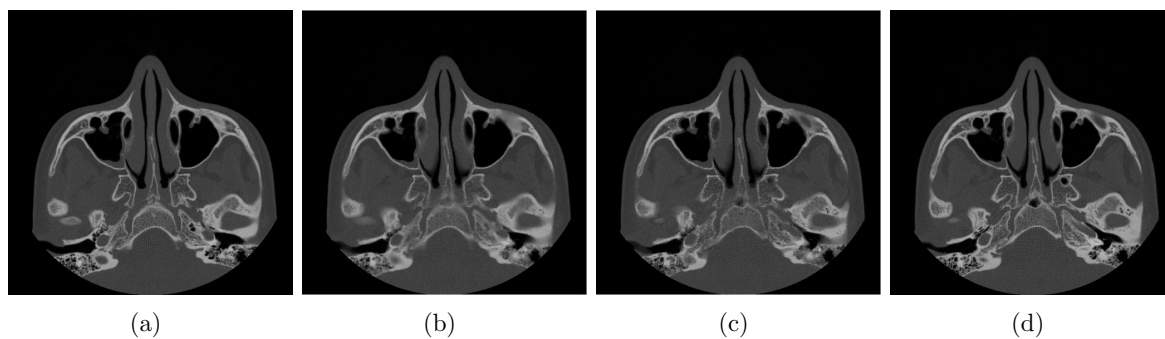


Figura 6.13: (a), (b), (c) e (d) Fatia real 50.00, fatias virtuais obtidas pelo método de transporte e difusão 50.01 e 50.02, e fatia real 51.00, respectivamente.

Visão em 3D da Restauração Utilizando-se o Método de Transporte e Difusão

Da mesma forma que no retoque nas fatias transversais, utilizando-se o método de prolongamento de linhas, a Figura 6.14 mostra quatro visões distintas em 3D da parte óssea da

mandíbula do paciente mapeada no exame de tomografia computadorizada, utilizando-se o método de transporte e difusão. O objetivo de mostrar essas visões em 3D é demonstrar visualmente a efetividade do método proposto. Na próxima seção deste capítulo será realizada a comparação numérica desses dois métodos, juntamente com outros dois métodos já existentes e implementados no Capítulo 3 deste trabalho.

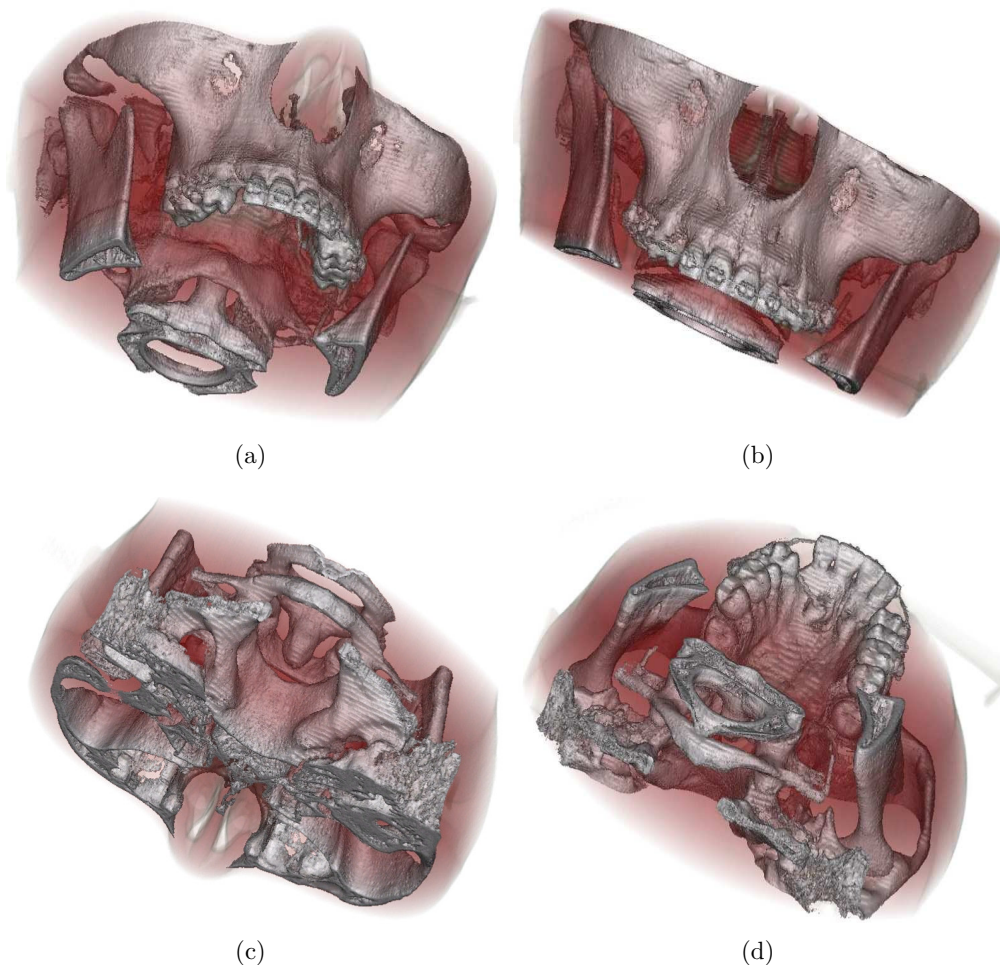


Figura 6.14: (a) e (b) Visão frontal da estrutura óssea mapeada no exame de TC utilizando-se o método de transporte e difusão; (c) e (d) visão anterior da estrutura óssea mapeada nesse exame utilizando-se esse método.

Pode-se observar na Figura 6.14 que a estrutura óssea possui poucas imperfeições e é fácil de ser reconhecida visualmente. Os seus contornos são suaves e precisos, os tecidos são precisos e as imagens mostradas nessa figura permitem a análise da estrutura óssea do paciente com confiabilidade.

A Figura 6.15 ilustra três visões em 3D distintas da pele e alguns tecidos moles, mostrando a face do paciente na região da mandíbula mapeada no exame de tomografia utilizando-se o método de transporte e difusão. Nessa figura os tecidos ósseos aparecem parcialmente na imagem, mas com um alto grau de transparência, apenas para ilustrar o posicionamento dos ossos na imagem. Observa-se que o método proposto consegue realizar a interpolação e gerar uma imagem em 3D de alta qualidade.

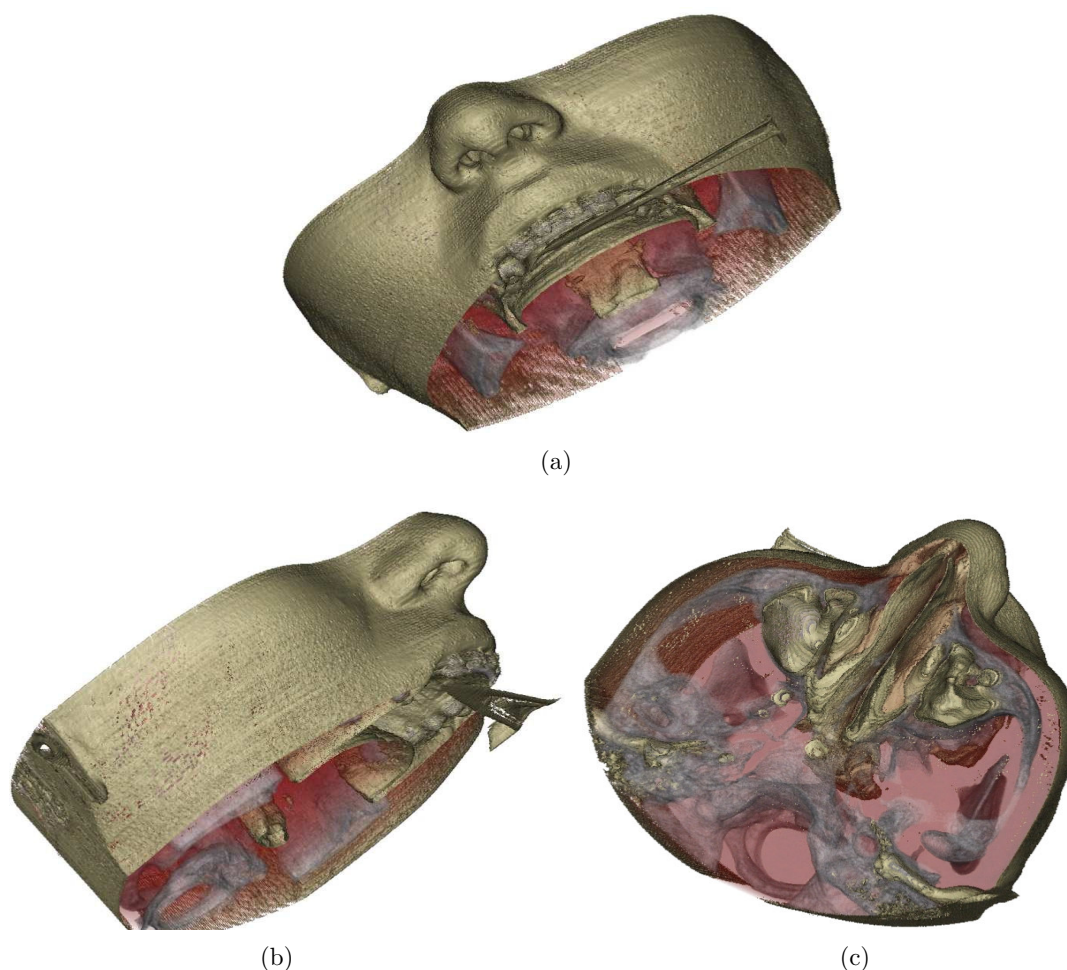


Figura 6.15: (a) Visão frontal da porção da face mapeada no exame de TC utilizando-se o método de transporte e difusão; (b) perfil dessa face; (c) visão superior dos tecidos internos mapeados nesse exame usando-se esse método.

Pode-se observar nas três imagens da Figura 6.15 que as imperfeições apresentadas quando se usa o método de prolongamento de linhas não se repetem com o método de transporte e difusão em 3D. As imagens dessa figura retratam precisamente a face, frontal

e perfil, e também os tecidos internos da cavidade nasal.

Análise dos resultados do método de Transporte e Difusão

As mesmas visões em 3D mostradas quando se utiliza o método de prolongamento de linhas são mostradas quando se usa o método de transporte e difusão para que se possa perceber visualmente a melhor qualidade desse segundo método. Nas Figuras 6.14 e 6.15 pode ser observado facilmente detalhes da estrutura a partir das imagens geradas. Desta forma, pode-se concluir parcialmente que o método de retoque e difusão satisfaz os objetivos propostos neste trabalho. Algumas imperfeições observadas podem ser resolvidas com a determinação de parâmetros mais adequados para os diversos passos desse método.

Na seção seguinte procurou-se parâmetros mais adequados para o processo de transporte e difusão para demonstrar a sua superioridade em relação aos outros métodos implementados. Em cada experimento, diferentes parâmetros foram utilizados para o transporte e difusão, e eles foram determinados por seguidas repetições do experimento até a obtenção de valores adequados.

6.5 – Análise Comparativa dos Métodos Utilizados

Nesta seção, os métodos propostos neste trabalho são comparados com os métodos implementados no Capítulo 3 deste trabalho que são as interpolações linear e pelo método de Goshtasby e outros [1]. Inicialmente é feita uma comparação visual dos resultados, apresentando alguns detalhes que realçam algumas vantagens dos métodos propostos neste trabalho. Após a análise visual, a segunda parte do experimento padrão é realizada com o objetivo de obter medidas de similaridades de cada um dos métodos com o objetivo de demonstrar numericamente as vantagens dos métodos propostos.

6.5.1 – Análise visual da reconstituição de todo conjunto

Para verificar a eficácia do método proposto, foram realizados três experimentos, utilizando-se exames de TC com 52, 50 e 47 fatias, respectivamente. As fatias utilizadas nos testes foram imagens de 512 x 512 pixels com resolução espacial no tomógrafo configurada para que cada pixel represente 0,34 mm da estrutura mapeada na imagem. Desta forma, a quantidade de fatias virtuais pode ser obtida pela Equação (6.11).

$$N_{Slices} = Trunc\left(\frac{d(F_a, F_b)}{0.34}\right) - 1 \quad (6.11)$$

onde:

$d(F_a, F_b)$ - distância entre as fatias F_a e F_b , e

$Trunc(x)$ - retorna o maior inteiro menor ou igual a x .

Para cada um desses três exames foram criados subconjuntos com 50% do tamanho original, mantendo sempre constante o afastamento entre as fatias em cada um desses subconjuntos. O objetivo dessa diferença de quantidade de informações entre os subconjuntos é medir a eficácia do método quando diminui-se a quantidade de fatias para representar uma mesma estrutura. Em todos os testes foram utilizadas duas funções de transferências para realçar a estrutura óssea e o rosto do paciente.

A Tabela 6.1 mostra os tempos e de quantidade de fatias virtuais geradas. A especificação da máquina utilizada para realização dos experimentos está descrita no Capítulo 1 desta tese. Nessa tabela pode-se observar que o processo de transporte e difusão é mais demorado que os demais métodos testados e a interpolação linear a mais rápida de todos.

Os parâmetros para as equações de transporte e difusão foram: $M = 25$; $M_t = 3$; $M_d = 10$; $K_t = 0,002$; $K_d = 0,05$ e $K_g = 0,6$, para os conjuntos cujas fatias são distanciadas de 1 mm (2 mm após a remoção de 50% das fatias reais) e $M = 40$; $M_t = 3$;

Tabela 6.1: Tempo de execução em segundos de cada um dos métodos implementados neste trabalho.

Teste	Suaviz. em 3D	Geração FVI	Fatias Reais	Fatias Virtuais	Goshtasby e Outros	Linear	Prolong. Linhas	Transporte e Difusão
1	00:55	00:16	47	92	00:16	00:09	01:56	06:04
2	00:58	00:20	52	194	00:23	00:13	07:59	08:00
3	01:08	00:19	52	102	00:19	00:09	01:19	05:46

$M_d = 10$; $K_t = 0,002$; $K_d = 0,05$ e $K_g = 0,6$ para o conjunto em que a distância entre as fatias é de 2 mm (4 mm após a remoção de 50% das fatias). O tempo apresentado na Tabela 6.1 refere-se ao parâmetro $M = 25$.

As Figuras 6.16 a 6.18 mostram os resultados da aplicação dos quatro métodos. As letras (a) a (d) das figuras mostram os tecidos ósseos e as letras (e) a (h) dessas figuras mostram os tecidos da face do paciente.

Pode-se observar significativas diferenças de qualidade dos métodos nas imagens geradas por eles. Nota-se claramente nas Figuras 6.16 a 6.18 que o método de transporte e difusão apresenta melhores resultados do que os demais métodos, apresentando uma imagem com contornos mais bem definidos e com a ausência de rugosidade na estrutura que existe em grande quantidade nos outros métodos.

Observando diversos detalhes dessas figuras é possível constatar que o método de transporte e difusão elimina com maior efetividade as imperfeições apresentadas nos outros métodos, propiciando uma imagem mais próxima dos contornos da estrutura real.

Assim, preliminarmente, o método de transporte e difusão apresenta-se como uma opção viável para a obtenção de estruturas passíveis de serem visualizadas em 3D. Os três exames analisados visualmente mostram que o método de transporte e difusão apresenta uma imagem em 3D de qualidade superior às demais. Esse resultado deve ser confirmado pelas comparações numéricas.

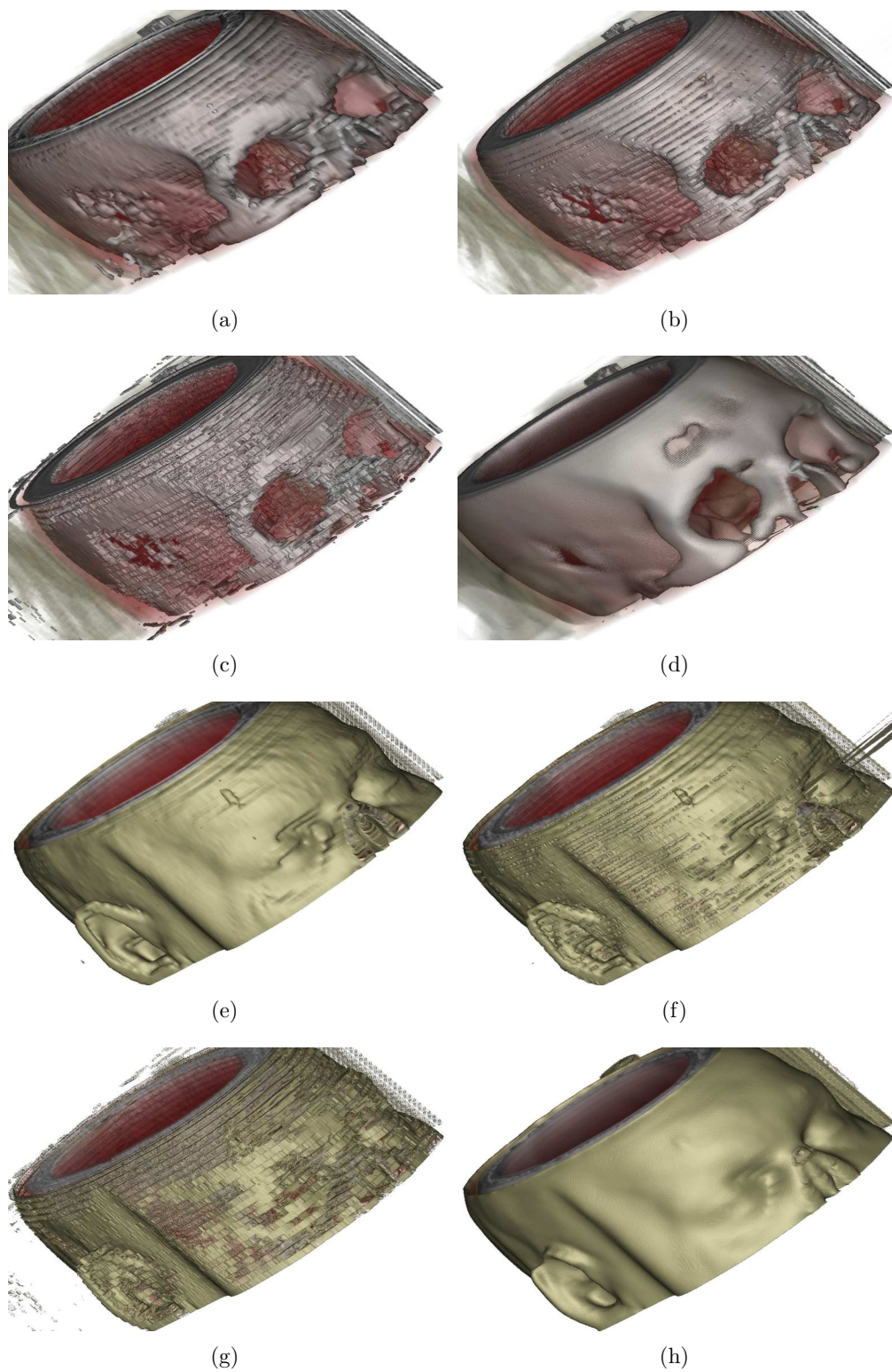


Figura 6.16: (a), (b), (c) e (d) Resultados obtidos para a estrutura óssea do primeiro paciente. (e), (f), (g) e (h) resultados para o tecido da face desse paciente. Os métodos apresentados são: linear, Goshtasby e outros [1], prolongamento de linhas e transporte e difusão, respectivamente.