

FERNANDO DE ALMEIDA CERQUEIRA

**RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE
MICROESTRUTURAS POR SECCIONAMENTO SERIAL**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

SÃO PAULO

2008

FERNANDO DE ALMEIDA CERQUEIRA

**RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE
MICROESTRUTURAS POR SECCIONAMENTO SERIAL**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica

Orientador: Prof. Dr. Cesar R. F. Azevedo

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Landgraf

SÃO PAULO

2008

AGRADECIMENTOS

A Mélia, que veio de longe e encheu minha vida de cores.

Ao César, professor e amigo cuja confiança foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao pessoal que trabalhou no mesmo período no Laboratório de Caracterização Hulbertus Colpaert, companhias dos horários prolongados.

Aos grandes e sinceros amigos Nelson, João e Maurício, com quem a vida acadêmica neste ano de 2008 foi bastante produtiva e divertida.

Ao Lívio, sempre solícito, pelo seu bom trabalho e espírito leve.

RESUMO

A caracterização de materiais é uma etapa importante nos os trabalhos de engenharia. A metalografia, uma técnica bastante utilizada, normalmente fornece apenas imagens em duas dimensões da microestrutura do material. Gerar imagens em três dimensões tornou-se algo mais acessível ultimamente devido aos avanços na capacidade de processamento e manipulação de dados dos microcomputadores. De fato, diversos trabalhos publicados recentemente apresentam resultados de microestruturas representadas em três dimensões construídas a partir de uma seqüência de ensaios metalográficos convencionais. As possibilidades de trabalho com estes objetos virtuais na forma das microestruturas "enterradas" no material são várias, como a realização de simulações por elementos finitos, por exemplo. Além disso, a visualização de características da microestrutura em três dimensões pode fornecer informações importantes sobre a nucleação, crescimento e interconectividade de fases no interior do metal. Este trabalho tem como objetivo principal a realização de estudos sobre a técnica de reconstrução tridimensional de microestruturas por seccionamento serial. Para isto foram realizadas reconstruções da grafita em um ferro fundido vermicular e de grãos de ferrita em um aço para aplicações elétricas, onde ensaios de microtextura EBSD também foram realizados para a definição da orientação cristalográfica de cada grão.

ABSTRACT

Materials characterization is an important step on engineering works. Metallography usually gives only two-dimensional images of the microstructure of the material. Generating three-dimensional images has become something much more accessible due to the new advances on processing and handling capacity of microcomputers. In fact, many recently published papers presents results of microstructures in three dimensions constructed from a sequence of conventional metallographic essays. The work possibilities with these virtual objects are many, as finite elements simulations, for example. Besides, the visualization of three dimensional microstructures may give important information on nucleation, growth and interconnectivity of phases inside the material. The main objective of this work is to study the technique of serial sectioning three-dimensional reconstruction of microstructures. For that, reconstructions of the compacted graphite in a cast iron and of grains in a steel for electric applications were made, in the last case EBSD microtexture essays were also made to define the cristalographic orientation of each grain.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Problema fundamental da estereologia..... | 1 |
| Figura 2 - Reconstruções computacionais de microestruturas. | 4 |
| Figura 3 – Elementos finitos em liga de Mg..... | 5 |
| Figura 4 – Reconstrução por seccionamento serial combinado com EBSD e simulação computacional de esforço uniaxial..... | 6 |
| Figura 5 - Simulações em modelo reconstruído de espuma de carbono..... | 7 |
| Figura 6 - Simulações em Liga de Sn – 3,5%Ag com presença de partículas de Ag ₃ Sn..... | 8 |
| Figura 7 – Imagens 2D e 3D de plaquetas de cementita pró-eutetóide..... | 9 |
| Figura 8 - Morfologia 3D da ferrita acicular em aço de baixo carbono..... | 10 |
| Figura 9 – Reconstruções de plaquetas de martensita grosseira mostrando a orientação cristalográfica..... | 11 |
| Figura 10 – Partículas de TiB em liga de titânio. | 11 |
| Figura 11 – Microestrutura do eutético ternário Nb – Al – Ni. | 12 |
| Figura 12 – Efeito da adição de estrôncio na modificação de ligas de Al – Si..... | 13 |
| Figura 13 – Gráficos comparativos da caracterização em 2D e 3D de ligas Al – 12%Si e Al – 12%Si – Sr. | 14 |
| Figura 14 – Microestrutura da amostra de ferro fundido vermicular. | 17 |
| Figura 15 – Resultado preliminar da reconstrução da grafita vermicular a partir de 37 seções espaçadas em aproximadamente 1µm. | 18 |
| Figura 16 – Microestrutura do FFV após 2h a 740°C e resfriada no interior do forno.. | 19 |
| Figura 17 - Esquema das etapas envolvidas na reconstrução 3D de microestruturas. | 23 |
| Figura 18 – Detalhes da geometria Vickers (adaptado da ref. 30) | 25 |
| Figura 19 – Otimização dos parâmetros do microscópio e software de captura.. | 27 |
| Figura 20 – Sobreposição de marcas de microdureza de duas seções consecutivas. | 28 |
| Figura 21 – Esquema de alinhamento das imagens..... | 29 |
| Figura 22 – Acerto dos passos da movimentação das imagens para o alinhamento. | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 23 – Valores dos tons em uma imagem em preto e branco | 31 |
| Figura 24 – Alterações de brilho e contraste em uma imagem..... | 31 |
| Figura 25 – Passos envolvidos no tratamento de uma imagem pra revelar o contorno de grão. | 32 |
| Figura 26 – Delineação dos contornos das microestruturas..... | 33 |
| Figura 27 – Tipos de reconstruções. | 34 |
| Figura 28 – Determinação da espessura das seções para a reconstrução..... | 34 |
| Figura 29 – Robo-Met.3D de Spowart. | 35 |
| Figura 30 – Comparativo dos métodos de medida pela área e pela diagonal das marcas vickers..... | 37 |
| Figura 31 – Reconstrução 1 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento..... | 41 |
| Figura 32 – Reconstrução 2 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento..... | 42 |
| Figura 33 – Reconstrução 3 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento..... | 43 |
| Figura 34 – Reconstrução 4 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento..... | 44 |
| Figura 35 – Reconstrução 5 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento, vistas laterais. | 45 |
| Figura 36 – Reconstrução 1 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento..... | 46 |
| Figura 37 – Reconstrução 2 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento..... | 47 |
| Figura 38 – Reconstrução 3 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento..... | 48 |
| Figura 39 – Reconstrução 4 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento..... | 49 |
| Figura 40 – Reconstrução 5 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento, vistas laterais | 50 |
| Figura 41 – Inclusões. | 51 |
| Figura 42 – Imagens de MEV da grafita vermiclar submetidas a ataque profundo. . | 52 |
| Figura 43 – Ambigüidades possíveis na morfologia da grafita. | 53 |
| Figura 44 – Detalhes da morfologia da grafita vermicular. | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 – Conectividade de estruturas relativamente distantes.. | 54 |
| Figura 46 – Distribuição da fração de grafita calculada nas 97 seções metalográficas da reconstrução com 100X de aumento. | 55 |
| Figura 47 – Reconstrução 1 do aço elétrico. | 57 |
| Figura 48 – Reconstrução 2 do aço elétrico. | 58 |
| Figura 49 – Reconstrução 3 do aço elétrico. | 59 |
| Figura 50 – Reconstrução 4 do aço elétrico. | 60 |
| Figura 51 – Grão que apresentou crescimento anormal separado do grãos vizinhos, vista inferior. | 61 |
| Figura 52 – Grão que apresentou crescimento anormal separado do grãos vizinhos, vista superior. | 62 |
| Figura 53 – Detalhe do grão com crescimento anormal. | 63 |
| Figura 54 – Detalhe dos grãos vizinhos ao grão de crescimento anormal. | 64 |
| Figura 55 - Detalhe do que parece ser um ancoramento do contorno de grão. | 65 |
| Figura 56 – Reconstrução da geometria da indentação Vickers. | 66 |
| Figura 57 – Perfil topográfico da indentação vickers. | 67 |
| Figura 58 – Comparação entre reconstruções obtidas por fotos de diferentes aumentos. | 68 |
| Figura 59 - Espessura removida acumulada nas operações de polimento | 69 |
| Figura 60 – Variação acumulada da espessura entre as duas regiões de medidas das diagonais das marcadas de indentação. | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composição química, histórico de laminação e recozimento. | 20 |
| Tabela 2 - Ajustes do software de captura de imagens..... | 21 |
| Tabela 3 - Fração volumétrica de grafita compacta calculada para diferentes fontes de dados..... | 55 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 3 |
| 2.1 | Histórico da reconstrução 3D de microestruturas..... | 3 |
| 2.2 | Aplicações da metalografia tridimensional | 5 |
| 2.2.1 | Análises por elementos finitos..... | 5 |
| 2.2.2 | Análises morfológicas | 9 |
| 2.3 | Objetivos do trabalho | 15 |
| 3 | Procedimento Experimental | 16 |
| 3.1 | Materiais investigados..... | 16 |
| 3.1.1 | Ferro Fundido Vermicular (FFV) | 16 |
| 3.1.2 | Aço elétrico (AE) | 20 |
| 3.2 | Equipamentos, Softwares e consumíveis..... | 20 |
| 3.3 | Descrição da técnica | 23 |
| 3.3.1 | Determinação do espaçamento entre seções | 24 |
| 3.3.2 | Determinação das rotinas de polimento | 26 |
| 3.3.3 | Aquisição das imagens | 27 |
| 3.3.4 | Alinhamento das imagens..... | 28 |
| 3.3.5 | Tratamento das imagens..... | 30 |
| 3.3.6 | Reconstrução | 33 |
| 3.4 | Automação dos procedimentos | 35 |
| 4 | Resultados e Discussões | 40 |
| 4.1 | Reconstrução da grafita vermicular | 40 |
| 4.1.1 | Visualização 3D | 40 |
| 4.1.2 | Detalhes da morfologia | 52 |
| 4.1.3 | Dados Quantitativos..... | 55 |
| 4.2 | Reconstrução dos contornos de grão do aço elétrico | 56 |
| 4.2.1 | Visualização 3D | 56 |
| 4.2.2 | Detalhes da morfologia | 65 |
| 4.3 | Avaliação da técnica | 66 |
| 4.3.1 | Marcas de dureza vickers | 66 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3.2 | Efeito do aumento das imagens na reconstrução | 68 |
| 4.3.3 | calibração da rotina de polimento | 69 |
| 5 | Conclusões..... | 71 |
| 6 | Sugestões pra trabalhos futuros..... | 72 |
| 7 | Referências Bibliográficas | 73 |
| 8 | Anexos | 77 |
| 8.1 | Scripts Auto Hot Key | 77 |
| 8.1.1 | Captura das imagens no software micrometrics SE..... | 77 |
| 8.1.2 | Alinhamento das imagens no Reconstruct..... | 82 |
| 8.1.3 | Auxílio às medidas das diagonais no ImageJ | 85 |

1 INTRODUÇÃO

Desde o surgimento da metalografia em 1863, creditada a Henry Sorby, as informações obtidas com a visualização de imagens de planos do interior de metais serviram de início para no mínimo aguçar a curiosidade sobre a natureza e com isso levar ao surgimento e desenvolvimento da ciência dos materiais (1, 2). Hoje, com as inúmeras técnicas e equipamentos de caracterização microestrutural disponíveis, diversas informações podem ser extraídas com finalidades bastante específicas e abrangentes. Mesmo assim, a busca por métodos e técnicas mais eficientes, acuradas e inovadoras não cessaram.

O comportamento dos materiais é controlado por sua microestrutura (3). O que se observa em um ensaio metalográfico convencional consiste da interseção de estruturas tridimensionais com o plano da seção. Observações em duas dimensões (2D) associadas a métodos de análise compõem a chamada estereologia, que supre cientistas com informações precisas e valiosas, capazes de relacionar microestrutura, processos de fabricação e propriedades físicas dos materiais com um sucesso impressionante, mas claramente não são capazes de representar a verdadeira microestrutura “enterrada” em materiais opacos como os metais (2, 4, 5, 6, 12, 13).

Ao inferir dados de uma micrografia pode-se ter idéia das formas das estruturas tridimensionais (3D) em estudo mas não é possível resolver todas as ambiguidades (2, 5). A figura 1 exemplifica o problema fundamental da estereologia.

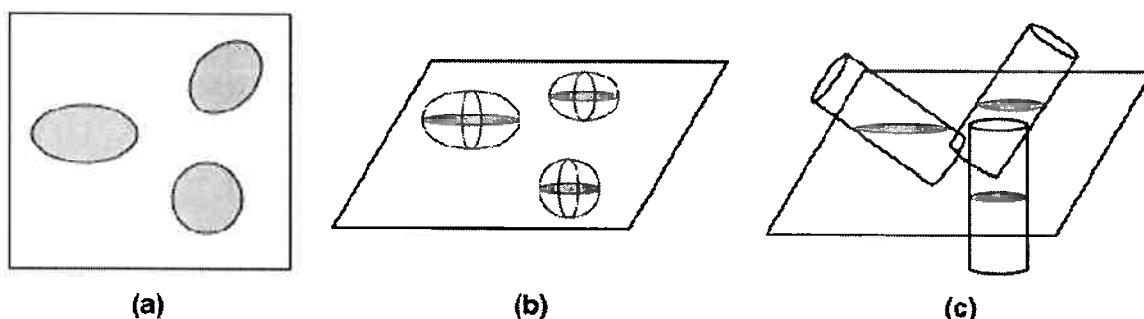


Figura 1 - Problema fundamental da estereologia. A microestrutura em (a) pode ser gerada tanto por elipses alinhadas (b) como por cilindros desalinhados (c). Embora seções adicionais excluam possibilidades pode-se não eliminar todas as ambiguidades (adaptado da ref. 2).

Em 1983 DeHoff apontou a necessidade de se conduzir seccionamentos seriais para a análise de microestruturas metálicas (7). A razão é que existem algumas características que só podem ser determinadas a partir de representações tridimensionais, como o numero de estruturas por unidade de volume, conectividade, distribuição de tamanhos, distribuição espacial e a forma detalhada de um elemento microestrutural. O método mais prático de se obter essas informações é o seccionamento serial embora tenha a característica de ser um trabalho extenuante (1, 2, 4 - 7).

Foi com o surgimento e a facilitação do acesso a ferramentas computacionais que o interesse em visualizar microestruturas em 3D ganhou novo fôlego, inicialmente sendo desenvolvidas para o uso em biologia e medicina (7, 8, 9). Hoje existem softwares de reconstrução de uso livre, computadores pessoais de desempenho muito maior do que a alguns anos atrás e a possibilidade de se obter e manipular micrografias digitais de alta resolução. Assim a renderização de superfícies a partir de imagens bidimensionais tornou-se algo bem mais viável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA RECONSTRUÇÃO 3D DE MICROESTRUTURAS

A necessidade de se pensar as microestruturas além do plano é recorrente, embora nem sempre viável ou acessível. Tentativas de inserir uma terceira dimensão a mais à imagem que se vê no microscópio datam de pelo menos 1918 quando Forsman's repetidamente poliu uma amostra de aço para entender a estrutura 3D da perlita. Projetando as imagens em camadas de papelão de espessuras apropriadas ele foi capaz de obter modelos sólidos de lamelas de cementita(4). Em 1962 Hillert e Lange obtiveram um pequeno filme de seções seriais que mostravam a estrutura 3D de uma colônia inteira de perlita, reconstruídas em 1999 por Kral et al com auxílio de computadores (4).

O uso de computadores na reconstrução microestrutural associado ao seccionamento serial começou em 1991 quando Hull et al (10) geraram objetos em polígonos de grãos primários de titânio beta, figura 2-a. Em 1996 Mangan et al (11) obtiveram imagens tridimensionais de plaquetas de widmanstätten em uma liga Fe-12,3%Mn-0.8%C a partir de 30 imagens de microscopia eletrônica de varredura, figura 2-b.

Um marco na metalografia 3D foram os primeiros trabalhos conjuntos de Kral, Spanos, Rosenberg e outros (4, 14 - 16), figura 2-c. Eles foram capazes de realizar reconstruções de altíssima qualidade no final dos anos 90 fazendo uso de plataformas computacionais Silicon Graphics, as mesmas usadas por Hollywood para efeitos especiais na época.

Uma série de outros trabalhos foi feita usando imagens obtidas sequencialmente entre lixamentos/polimentos (2, 4 - 6, 9 -11, 13 - 29). No Brasil o único resultado publicado foi realizado na Unicamp, por Contieri, Rios, Zanotello e Caram em 2007 (30) por ocasião do estudo da morfologia do eutético ternário Nb-Al-Ni obtido em solidificação direcional.

Um método moderno e mais atrativo, porém de acesso mais restrito, é o seccionamento do material por meio de um feixe de íons focados ("focused ion beam" ou "ion sputtering") diretamente dentro do microscópio eletrônico de varredura, figuras 2-d, 2-e. As imagens são obtidas sem problemas de alinhamento

físico das amostras, como no caso do processo por microscopia ótica e polimento. Adicionalmente, a espessura de material retirado é controlada com precisão bem maior que o método convencional, mas não permite o ataque metalográfico, uma vez que a amostra não sai de dentro do MEV (31 - 34). Torna-se necessário o uso de imagens como mapeamento de microtextura via EBSD ou contraste de elétrons retoespalhados por exemplo para revelar algumas características do material.

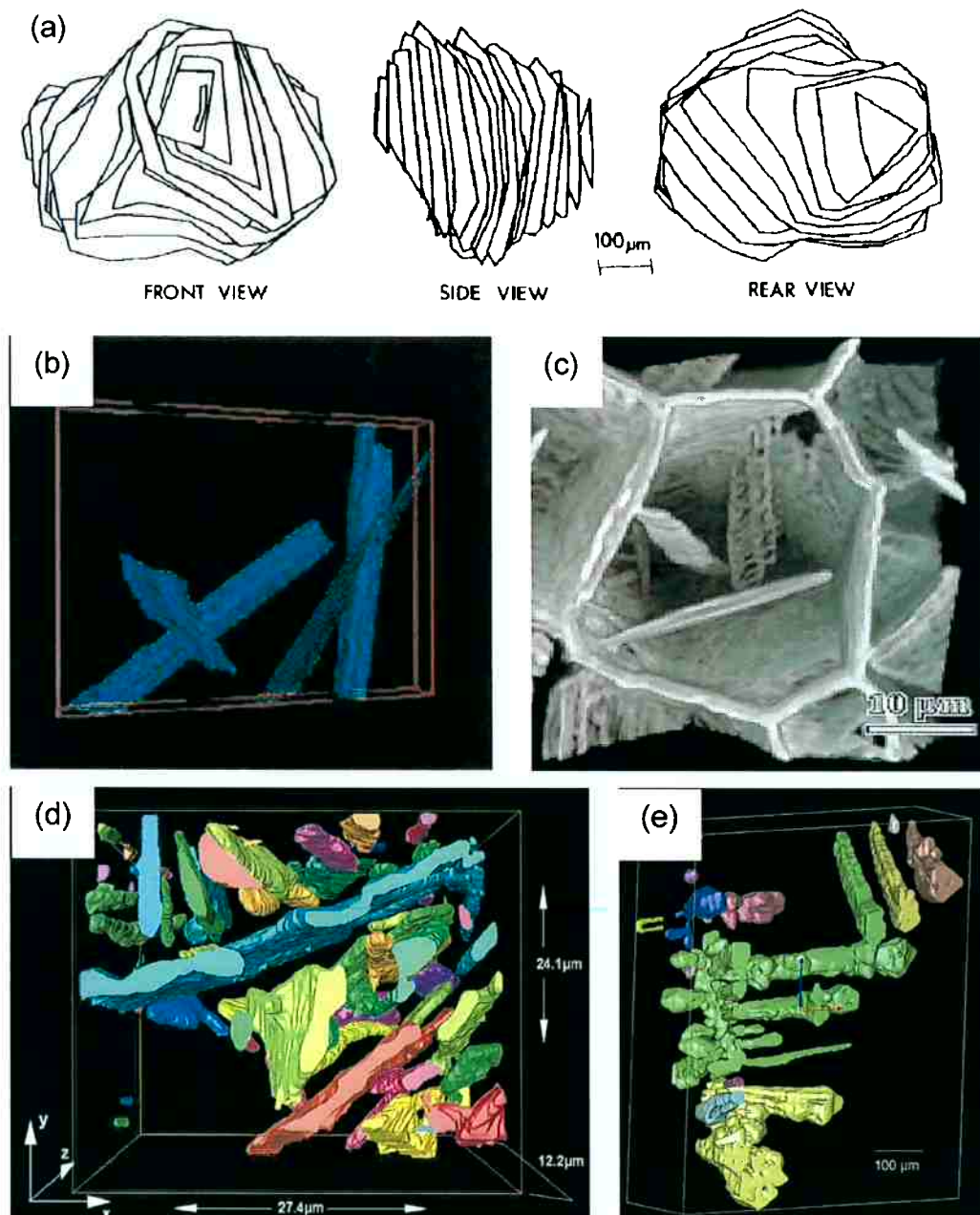


Figura 2 - Reconstruções computacionais de microestruturas. (a) Grão de titânio beta em liga IMI 829, 1991 (10); (b) Trabalho de 1996 de lamelas de cementita em Fe-12,3%Mn-0,8%C (11); (c) Cementita em contorno de grão em Fe-13%Mn-1,3%C, 1999 (4) ; (d) Reconstrução de silício eutético em liga de Al, 2006 (31); (e) Intermetálico LaSn_3 em Sn-3,9%Ag-0,7%Cu-0,5%La, 2007(24).

2.2 APLICAÇÕES DA METALOGRAFIA TRIDIMENSIONAL

A metalografia tridimensional, além de resolver ambigüidades da estereologia, pode dar informações valiosas tanto qualitativas como quantitativas. A verdadeira morfologia das microestruturas também dá indícios importantes da nucleação e do crescimento de cristais durante as transformações de fase, o que é particularmente interessante no controle e na otimização microestrutural.

2.2.1 ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

Os objetos reconstruídos em 3D podem ser exportados e traduzidos para diversos formatos de arquivos de CAD* como stl e vrml. Uma vez no formato conveniente uma malha de elementos finitos (EF) tetraédricos, cúbicos ou prismáticos pode ser gerada para fins de uma simulação computacional de esforços mecânicos e condução térmica entre outras possibilidades. Gokhale et al (20) a partir da reconstrução de alta resolução da porosidade em uma liga de magnésio AM50, mostraram a interconectividade dos poros e demonstraram como a simulação por EF pode servir para calcular os fatores de concentração de tensões na matriz adjacente, variando-se o campo de tensões. (vide figura 3)

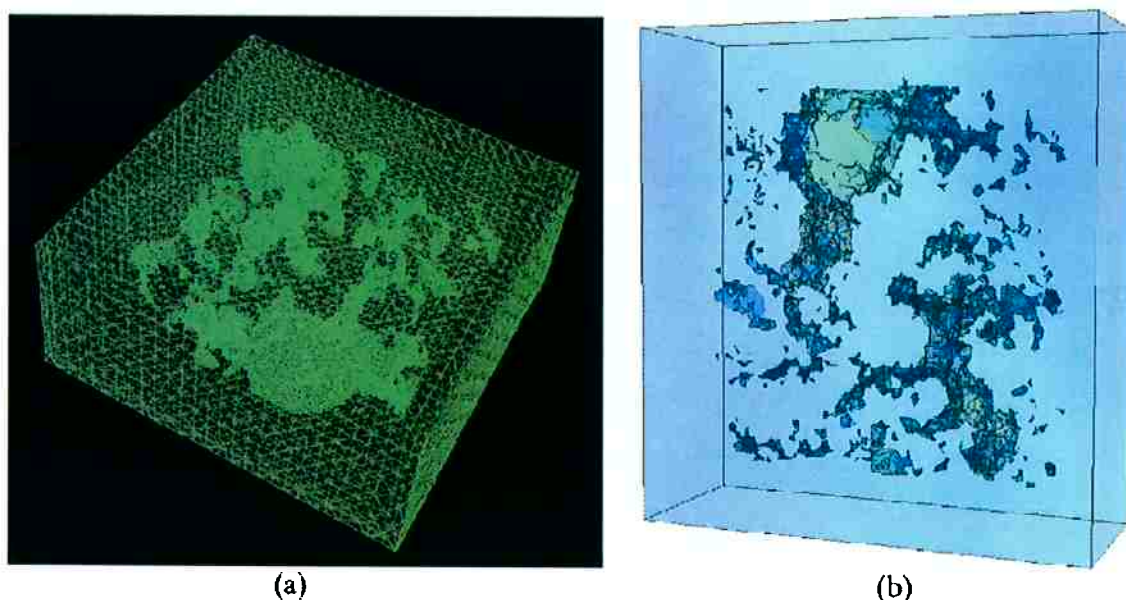


Figura 3 – Elementos finitos em liga de Mg. (a) Malha tridimensional; (b) Análise mostrando a distribuição de tensões ao redor dos poros (20).

** CAD : sigla de "Computer Aided Desing", desenhos realizados com auxilio de computadores*

Lewis et al (17, 35) chegaram a um volume reconstruído de aproximadamente $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ ao caracterizarem uma liga super-austenítica de um aço inoxidável. Durante o seccionamento serial foram obtidas análises EBSD (Electron Backscatter Diffraction) o que possibilitou identificar em cada grão e sub-grão a orientação cristalográfica. Na maior parte dos casos as análises EBSD não fornecem a inclinação do contorno de grão. Apenas quatro dos cinco parâmetros necessários para definir o contorno de grão são conhecidos. Com a reconstrução em 3D foi possível definir completamente o plano do contorno de grão. Com essas informações os autores realizaram uma simulação por EF no volume reconstruído submetido a esforços uniaxiais. Foi possível considerar a anisotropia do material em relação à tensão simulada levando-se em conta a orientação específica de cada grão. (vide figura 4)

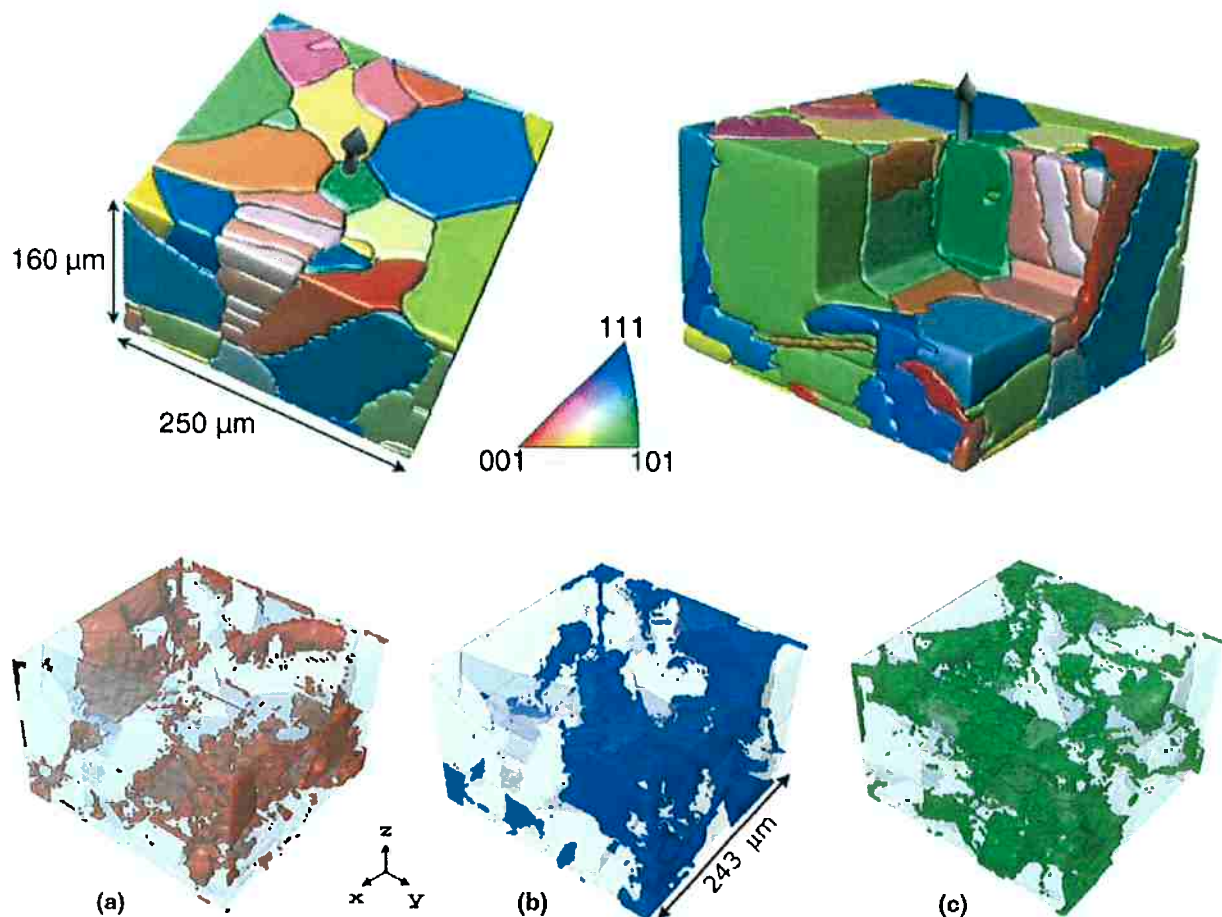


Figura 4 – Reconstrução por seccionamento serial combinado com EBSD e simulação computacional de esforço uniaxial (17, 35). As cores chaves são relativas às orientações cristalográficas da seta. (a), (b) e (c), em cores, os pontos onde a tensão supera 250MPa com 0,2% de deformação aplicado em x, y e z respectivamente

Relacionar a microestrutura com propriedades é particularmente difícil em materiais celulares devido a complexidade das estruturas em três dimensões. Maruyama et al (21) capturaram a estrutura de uma espuma de carbono gráfico usando o Robo-Met.3D desenvolvido por Spowart (6). Os resultados serviram de base para a malha de EF submetida a simulações de esforços mecânicos e térmicos. (vide figura 5)

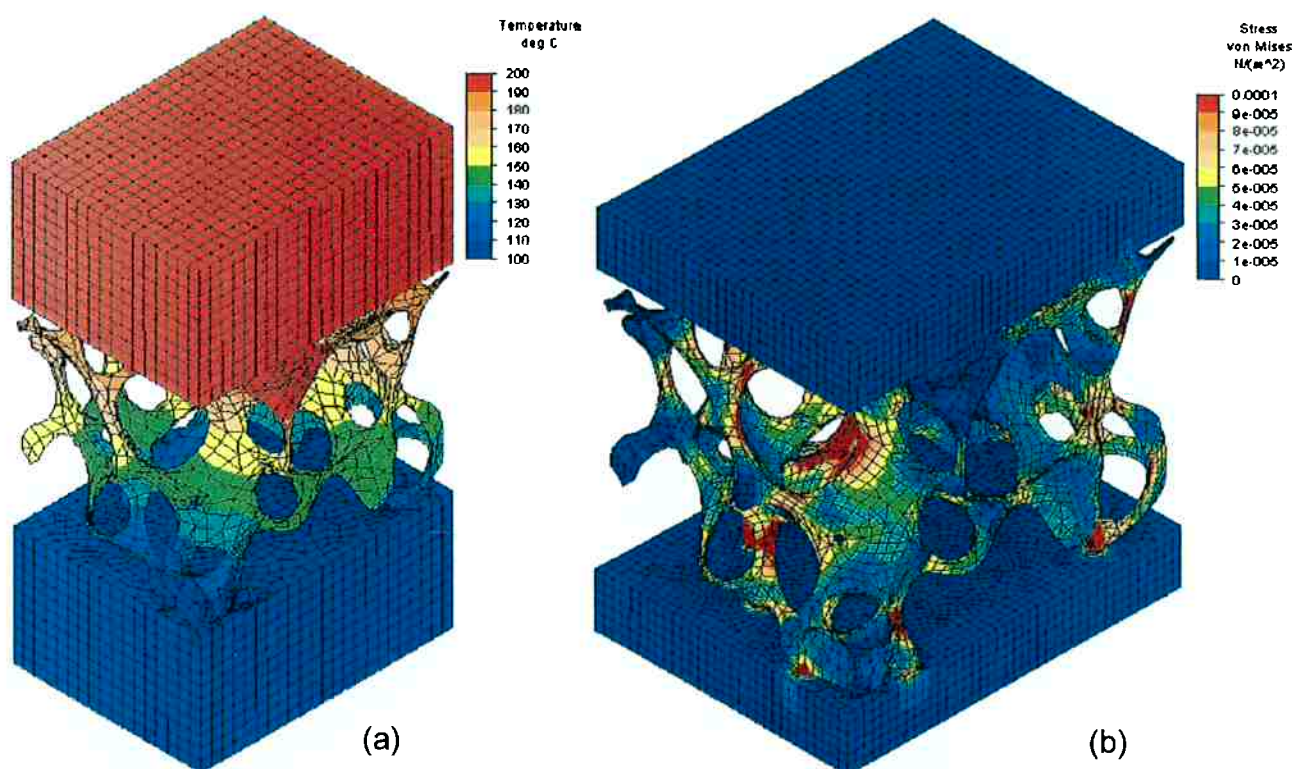


Figura 5 - Simulações em modelo reconstruído de espuma de carbono. (a) Transferência de calor com fluxo constante; (b) Distribuição de tensões em sob carga axial mostrando concentrações nas ligações. As dimensões do volume reconstruído são de 606 μ m x 776 μ m x 579 μ m (21).

Gosh et al (19) partiram da reconstrução de partículas em uma liga sinterizada de Al – Si – Mg, para obter a distribuição espacial e o espaçamento das partículas. De posse destes dados, desenvolveram um modelo multi-escala para o comportamento de uma peça metálica macroestrutural.

Sidhu e Chawla (27) realizaram estudos em uma liga de soldagem de Sn – 3,5%Ag. Esta liga apresenta uma fase intermetálica Ag_3Sn capaz de endurecer a matriz de estanho. Inicialmente percebeu-se que o volume das partículas de Ag_3Sn reconstruídas diferia substancialmente do estimado estereologicamente a partir de imagens 2D. A porcentagem de Ag_3Sn calculada foi de 4,3% do volume total nas três regiões reconstruídas e 5,2%, 3,3% e 3,9% nas seções 2D das mesmas regiões. O módulo de elasticidade da liga calculado a partir das simulações foi de

51,5 GPa enquanto o calculado a partir de um modelo de esferas baseado nas imagens 2D foi de 48,6 GPa. O valor experimental de 51,3GPa mostra claramente a maior precisão da caracterização 3D para o controle de propriedades dos materiais. (vode figura 6)

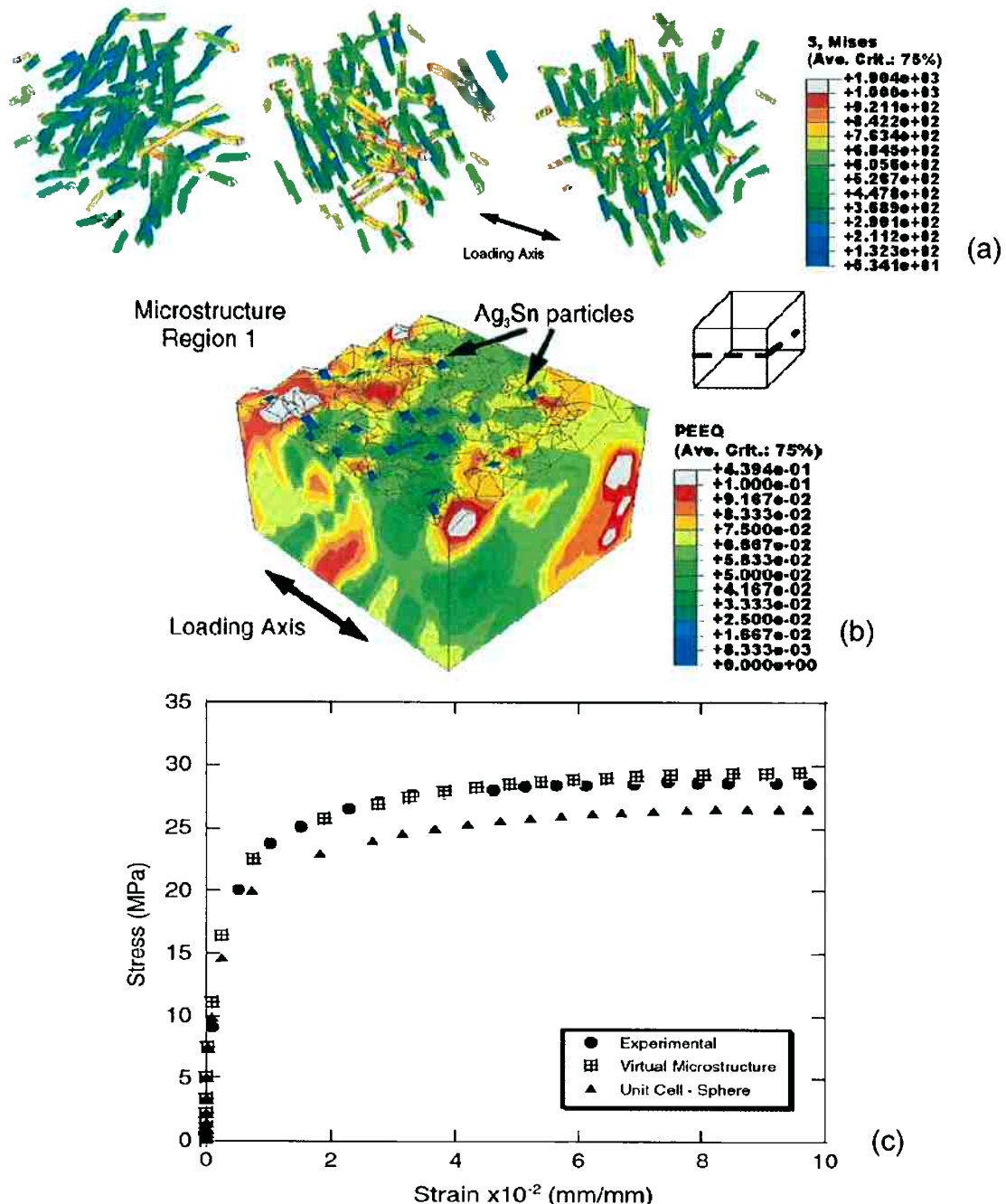


Figura 6 - Simulações em Liga de Sn – 3,5%Ag com presença de partículas de Ag₃Sn. (a) Distribuição de tensões nas partículas de Ag₃Sn em 3 volumes reconstruídos. (b) Evolução da deformação plástica equivalente na matriz da solda. (c) Comparações entre modelos de previsão de comportamento da curva tensão deformação (27).

2.2.2 ANÁLISES MORFOLÓGICAS

Como mencionado anteriormente, a visualização em 2D pode levar a interpretações incorretas da microestrutura do material. Hung, Spanos, Kral, Rosenberg e outros (4, 15) mostraram com suas reconstruções indícios de que precipitados de cementita pró eutetóide não nucleiam no interior dos grãos e que contornos de subgrão agem mais como barreiras ao crescimento de precipitados do que como sítios potenciais de nucleação. (vide figura 7).

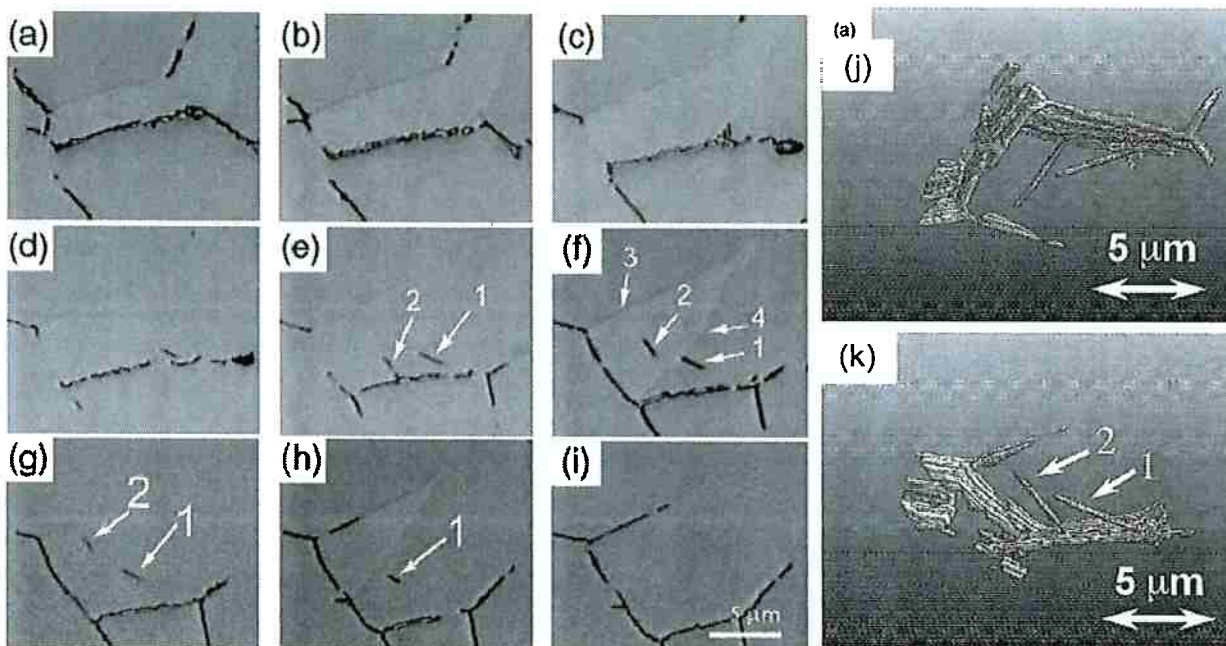


Figura 7 – Imagens 2D e 3D de plaquetas de cementita pró-eutetóide. (a – i) Seções espaçadas de aproximadamente 1,5μm. Os precipitados apontados em f e g parecem curtos e sem conexão com os contornos. (j, k) Reconstruções da mesma região. Percebe-se a conectividade dos precipitados 1 e 2 (15).

Wu (18), ao estudar a morfologia da ferrita acicular em aço de baixo carbono contendo titânio, percebeu que ao invés de agulhas de ferrita a morfologia do precipitado é mais parecida com ripas e plaquetas. Além disso, foi possível perceber que ocorre nucleação múltipla da ferrita em uma única inclusão, fato difícil de ser observado em 2D.

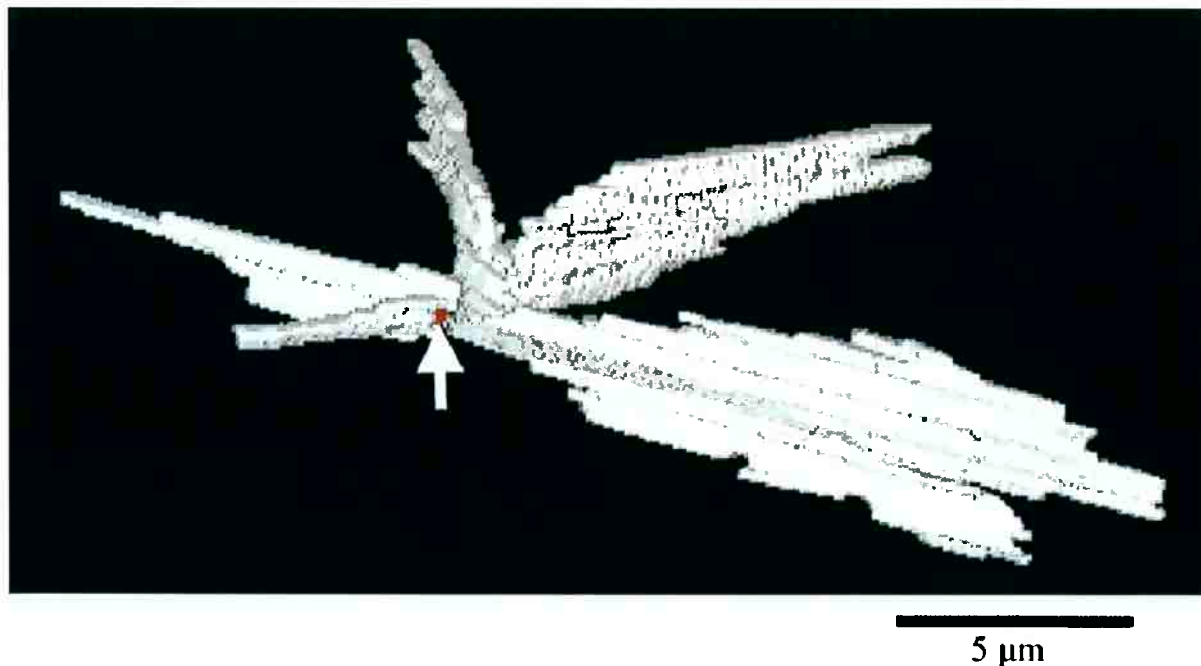


Figura 8 - Morfologia 3D da ferrita acicular em aço de baixo carbono. A seta indica uma inclusão, supostamente um sítio de nucleação múltipla.

Rowenhost et al (22) combinaram EBSD e seccionamento serial para analisar a morfologia e a cristalografia da martensita grosseira em aço de baixa liga e alta resistência HSLA – 100. Eles fizeram uso da observação de 100 seções espaçadas aproximadamente em $0,45\mu\text{m}$ e obtiveram 2 mapas de EBSD apenas nas 40ª e 50ª seções (assumindo que a orientação cristalográfica não varia mais do que 2% no interior do cristal de martensita e ignorando essas variações na reconstrução). Morfologicamente a martensita grosseira havia sido descrita anteriormente como placas de espessura fina, com as outras duas dimensões de tamanhos semelhantes. As reconstruções mostraram que ela possui uma dimensão de tamanho bem maior que as outras duas. A figura 9 - a mostra os cristais com as cores chaves de acordo com a direção cristalográfica normal aos planos de corte (plano xy). Fazendo-se uma malha extremamente fina, pôde-se calcular a direção cristalográfica da normal da interface dos cristais com a matriz, obtendo-se assim uma análise cristalográfica muito mais robusta da microestrutura em 3D. A figura 9 - b mostra as cores chaves destas direções onde é possível perceber que para as duas famílias de cristais da figura 9 - a a orientação é a mesma.

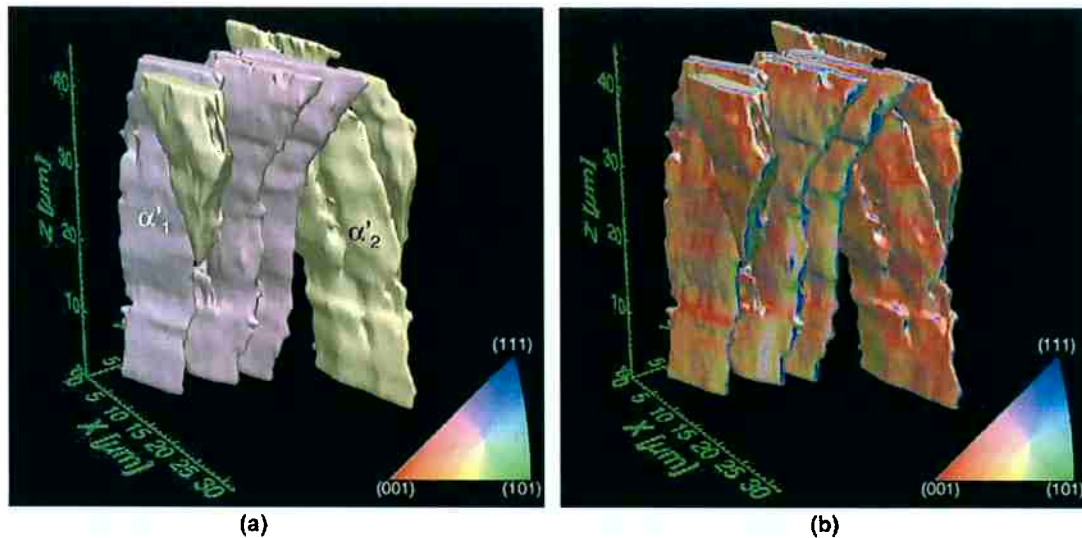


Figura 9 – Reconstruções de plaquetas de martensita grosseira mostrando a orientação cristalográfica. Em (a) as cores chaves são dadas em relação aos planos de cortes, normais a z. Em (b) o esquema de cores é dado em relação a normal da interface martensita – matriz (22). (α'_1 e α'_2 simplesmente indicam duas famílias de plaquetas com orientações cristalográficas distintas)

Lieberman, Gokhale e Tamirisakandala (23) realizaram a reconstrução de microestruturas de TiB em uma liga de titânio Ti-6Al-4V-1.7B sinterizada e extrudada. Neste estudo perceberam a orientação randômica do sinterizado e o alinhamento dos “palitos” de TiB da liga extrudada. (vide figura 10)

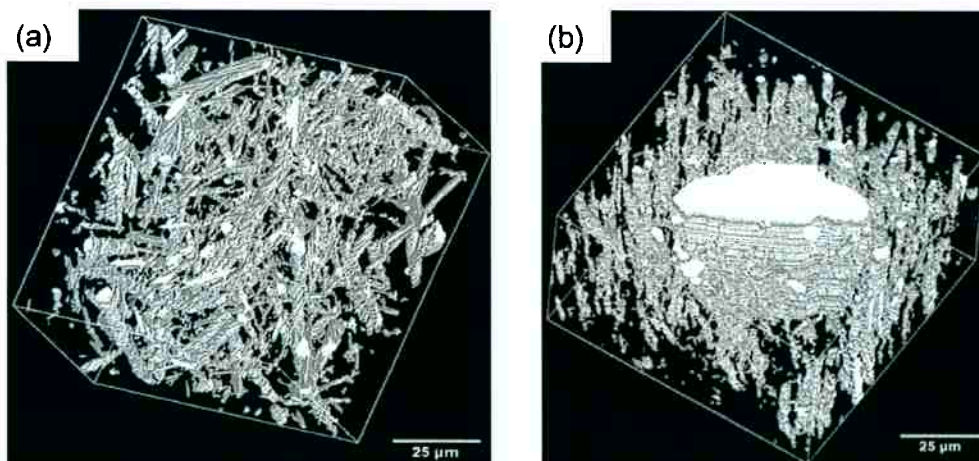


Figura 10 – Partículas de TiB em liga de titânio. Em (a) orientação randômica das partículas de TiB em amostra sinterizada e em (b) alinhadas em amostra extrudada.

Contieri et al (30) mostraram que o eutético ternário $Al_3Nb - Nb_2Al - AlNbNi$ obtido por solidificação direcional apresenta um crescimento regular embora as entropias de fusão de intermetálicos sejam altas. Em 2D, as fases parecem semi-contínuas. A reconstrução tridimensional deixou claro que as fases são contínuas e

apenas apresentam uma sinuosidade ao longo do eixo de crescimento. (vide figura 11)

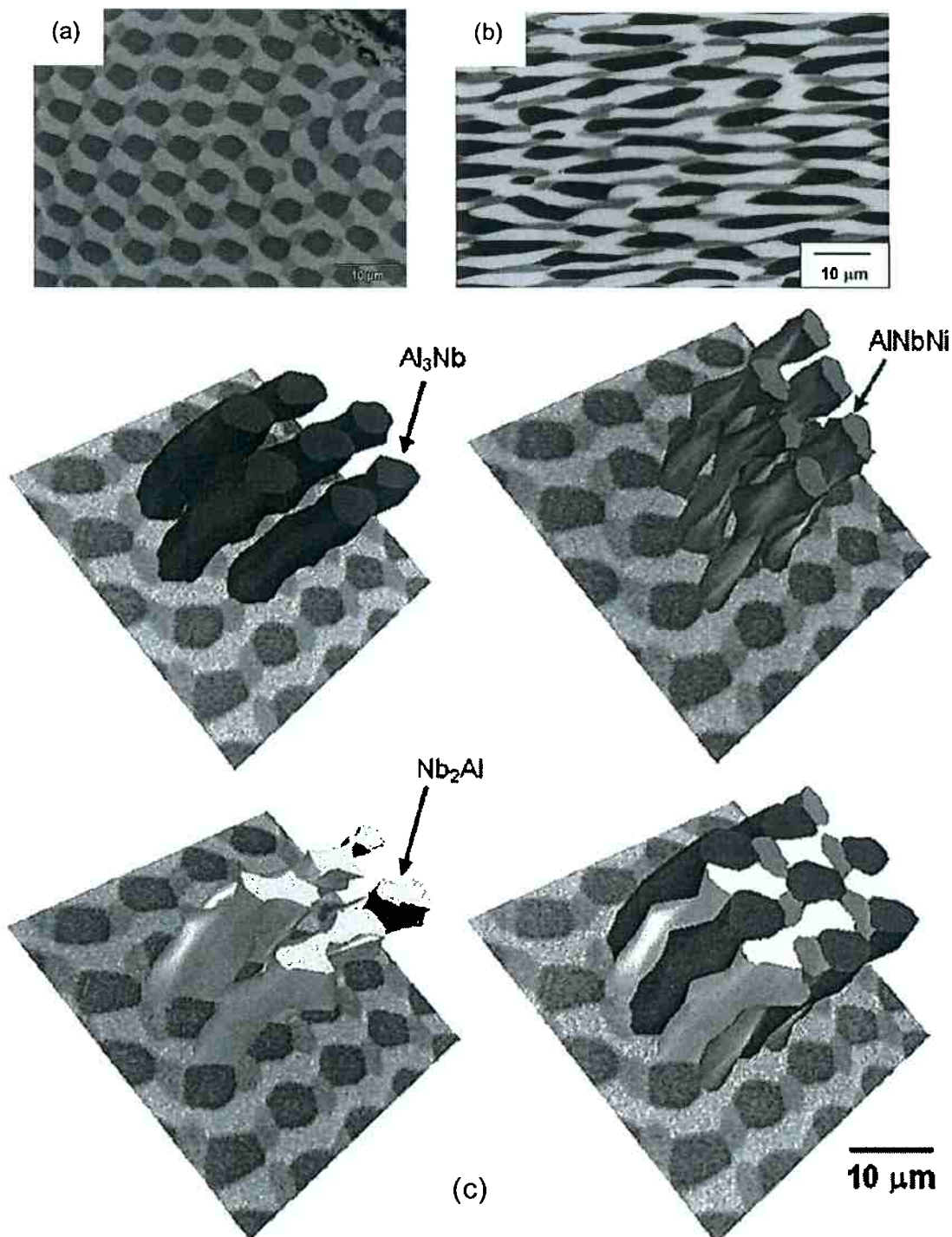


Figura 11 - Microestrutura do eutético ternário Nb – Al – Ni. (a) Microfotografia da seção transversal; (b) Seção longitudinal; (c) reconstruções 3D. A partir de (a) e (b) pode-se erroneamente ter a impressão de que as fases são semi – contínuas (30).

Lasagni et al (31) verificaram o efeito da modificação por estrôncio em ligas eutéticas de Al – Si. Utilizando a técnica de seccionamento por feixe de íons focado, eles conseguiram uma reconstrução de alta resolução das colônias de Si, com o

espaçamento das seções de aproximadamente $0,3\mu\text{m}$ nas ligas modificada e não modificada. (vide figura 12)

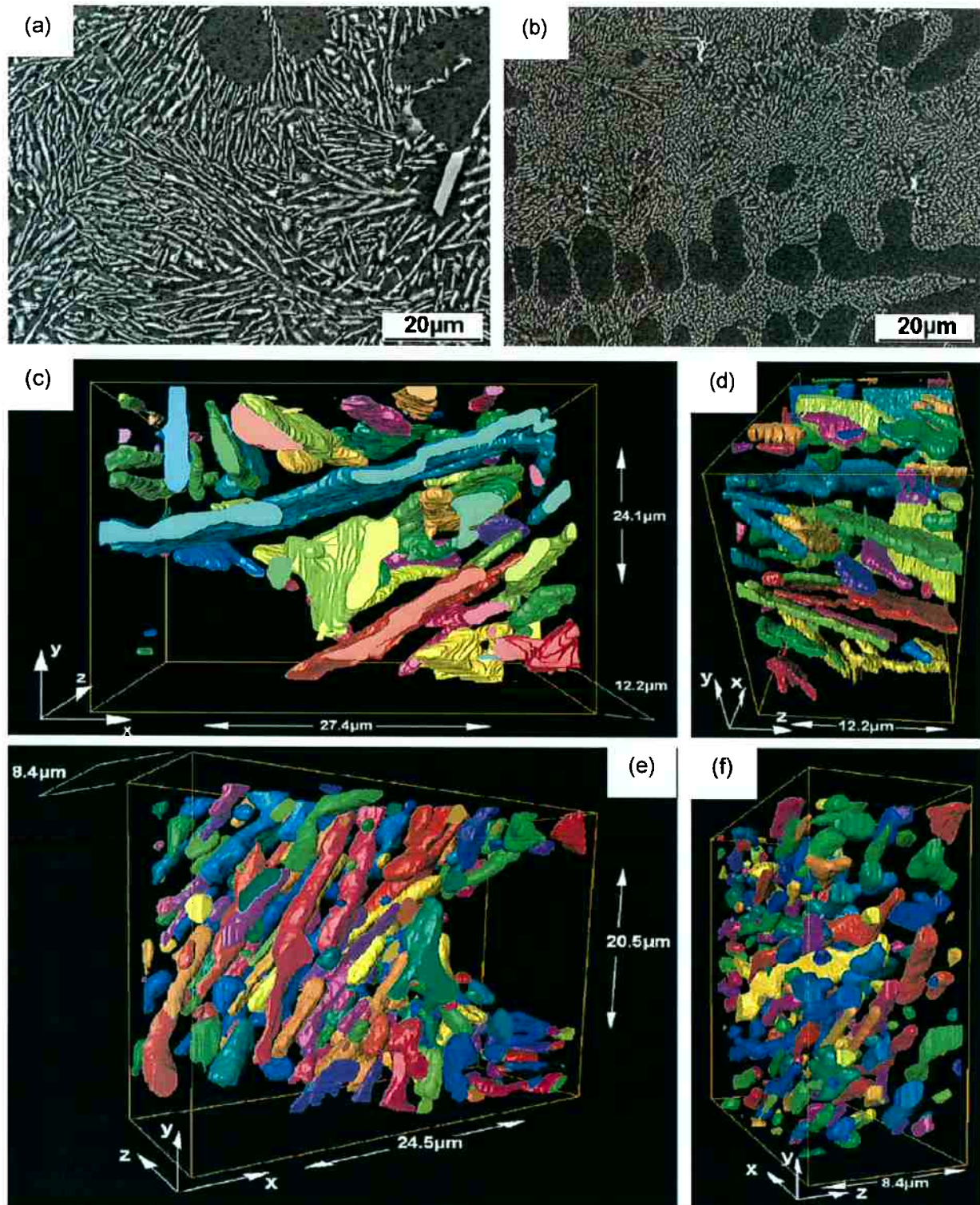


Figura 12 - Efeito da adição de estrôncio na modificação de ligas de Al – Si. (a) Micrografia eletrônica da liga não modificada e (b) modificada. A fase clara são inclusões de Si. (c e d) Reconstrução das partículas não modificadas e (e e f) modificadas. Cada grupo que se interconecta está marcado com uma cor individual (31).

A caracterização das inclusões de Si pode ser feita a partir de um fator de forma F_p ou com números como a circularidade, em 2D, ou esfericidade, em 3D (C_p). Dados pelas equações 1 e 2, onde P e A são o perímetro e a área das partículas em 2D e S e V a área superficial e o volume em 3D (31).

$$F_p = \frac{P^2}{4\pi A} \quad \text{em 2D} \quad \text{e} \quad \frac{S^{3/2}}{6\pi^{1/2}V} \quad \text{em 3D} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$C_p = \frac{1}{F_p} \quad \text{Eq. (2)}$$

O estudo mostrou que os resultados diferem substancialmente quando se caracteriza o material em 3D e em 2D. O aumento da esfericidade/circularidade da liga modificada foi de 15% na caracterização 2D (média de cortes em xy e yz) e de 25% na 3D. Além disso, os resultados como a densidade de partículas por mm^3 obtidos são muito mais robustos do que os por mm^2 . A figura 13 mostra um comparativo das informações quantitativas.

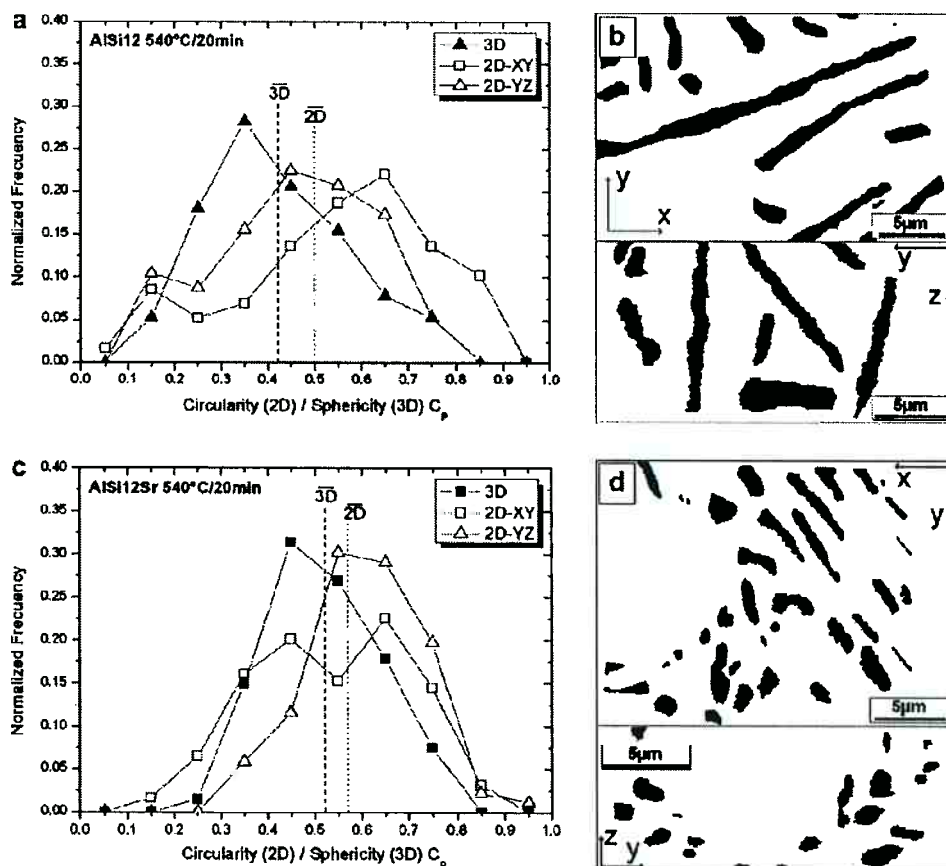


Figura 13 - Gráficos comparativos da caracterização em 2D e 3D de ligas Al – 12%Si e Al – 12%Si – Sr. Frequência normalizada da esfericidade/circularidade na liga não modificada (a) e modificada (c). (b) e (d) mostram as micrografias das seções transversais e longitudinais (31).

2.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

No presente estudo reconstruções da microestrutura da grafita vermicular e das interfaces entre grãos de um aço elétrico ao silício foram realizadas com o intuito de se analisar a técnica envolvida na realidade de laboratório. As micrografias foram obtidas por microscopia ótica e, no caso do aço elétrico, mapas EBSD foram feitos para se obter um mapa EBSD em 3D.

Os ensaios foram realizados no laboratório de caracterização microestrutural Hulbertus Colpaert com os materiais e equipamentos disponíveis e a manipulação das imagens e as reconstruções foram realizadas essencialmente em softwares de uso livre.

Sabendo-se da quantidade de trabalho envolvida no seccionamento serial, foi feito um esforço na intenção de automatizar, ou ao menos otimizar, as etapas do processo, onde o uso de softwares livres é particularmente interessante, pois possibilitam um maior entendimento e manipulação do que é realizado nos programas.

Como este é um trabalho pioneiro no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, não foi visada a obtenção de resultados diretos de caracterização dos materiais envolvidos, mas sim a realização de alguns estudos preliminares para o domínio da técnica.

Entendeu-se também a importância da identificação e registro de problemas e soluções que estão inerentes nas diversas etapas da preparação metalográfica e tratamento de imagens.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS INVESTIGADOS

Os materiais investigados neste trabalho foram um ferro fundido vermicular, amostra gentilmente cedida pela fundição Tupy, sem composição química definida e amostras de aço elétrico, estudadas pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Fernando Landgraf.

3.1.1 FERRO FUNDIDO VERMICULAR (FFV)

O ferro fundido vermicular, ou ferro fundido com grafita compacta, apresenta incrementos de 75% no limite de resistência, 35% a 40% no módulo de elasticidade e o dobro do limite de resistência à fadiga quando comparado com os tradicionais ferros fundidos cinzentos (38). Para se produzir os motores a diesel com as restrições ambientais de hoje são necessárias maiores pressões e temperaturas de trabalho e a substituição do ferro fundido cinzento pelo vermicular foi a escolha natural pois tem-se mais resistência mecânica sem perdas muito significativas na condutividade térmica.

Nas primeiras tentativas de realizar o seccionamento serial deste material percebeu-se uma grande dificuldade em preservar a grafita na matriz, o que é importante para se obter uma reconstrução fiel em 3D. Os equipamentos e consumíveis utilizados também não foram os mesmos dos ensaios finais.

Pensou-se primeiro em endurecer a matriz. Para isto um tratamento térmico foi realizado neste intuito. Determinou-se a temperatura crítica do ferro fundido vermicular a partir da análise química de uma amostra do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e de dados da literatura (37).

A temperatura calculada foi de aproximadamente 770°C. O material então foi submetido a um tratamento de 1h a 790°C e temperado em água. Os resultados obtidos no polimento não foram satisfatórios. Os contornos da grafita acabaram por ser mais danificados ainda. Houve a formação de ferrita acicular ao redor da grafita (figura 14 - b) tornando o contorno irregular com o polimento. Suspeitou-se a princípio que a ferrita se deformava na interface com a grafita, mas em vista do

resultado com o primeiro tratamento térmico preferiu-se trabalhar com o material como recebido (figura 14 - a).

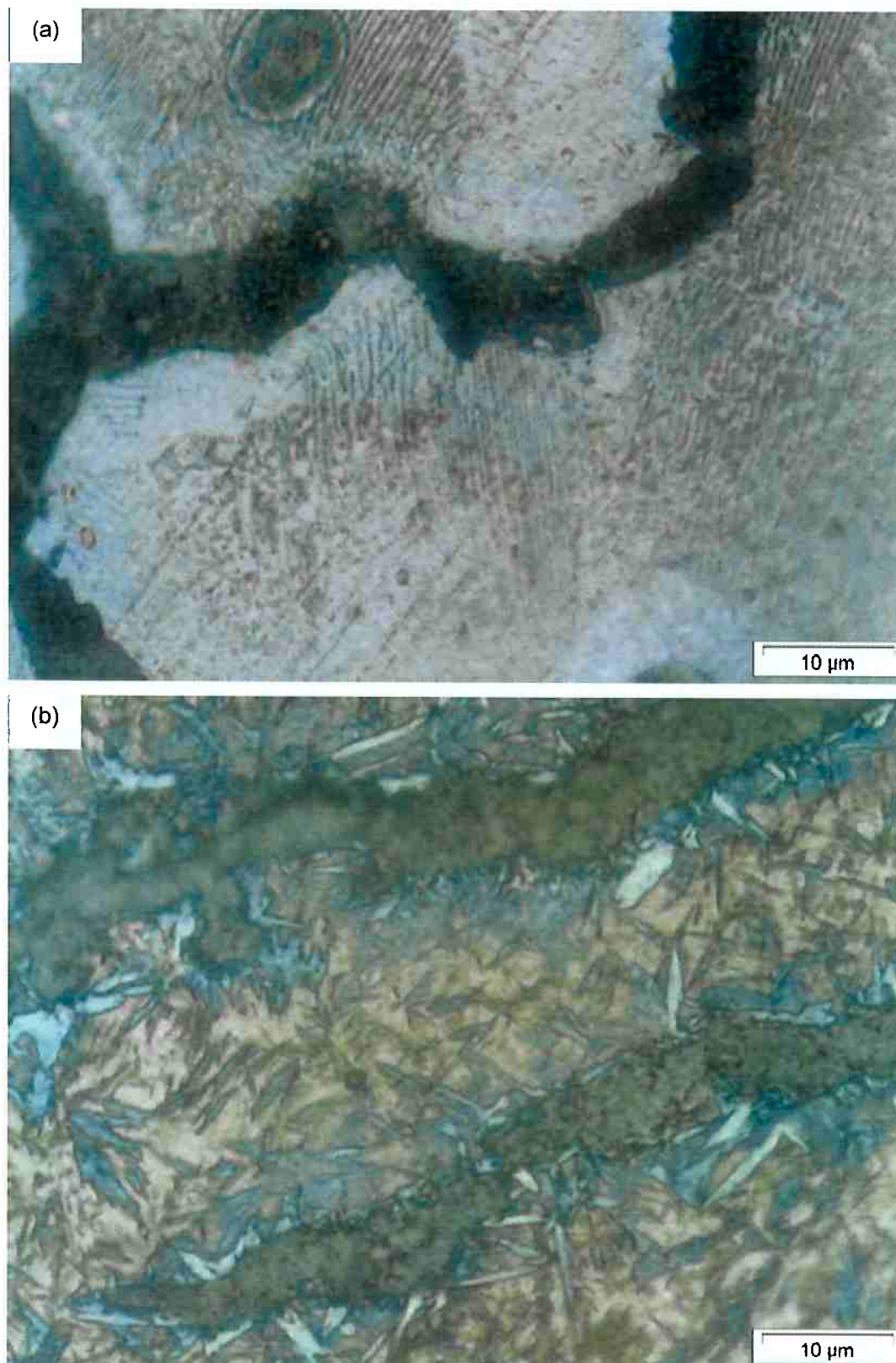


Figura 14 - Microestrutura da amostra de ferro fundido vermicular. (a) Como recebida e (b) após 1h a 790°C, temperada em água. Aumento 1000x.

Um resultado preliminar em 3D foi obtido a partir de 37 seções espaçadas em aproximadamente $1\mu\text{m}$ (vide figura 15). Como os resultados preliminares não foram satisfatórios uma mudança nas práticas metalográficas fez-se necessária. O uso de outros equipamentos e consumíveis resolveu o problema



Figura 15 – Resultado preliminar da reconstrução da grafita vermicular a partir de 37 seções espaçadas em aproximadamente $1\mu\text{m}$.

Outro tratamento foi realizado, desta vez no intuito de reduzir a dureza da matriz para aumentar a taxa de remoção de material. A intenção foi provocar a migração de carbono na forma de cémentita da perlita para a grafita e esferoidizar eventuais parcelas não transformadas. A amostra então foi submetida a um tratamento de 2h a 740°C e resfriada no interior do forno. A microestrutura obtida foi como prevista, embora tenha modificado levemente a forma da grafita (Vide figura 16).

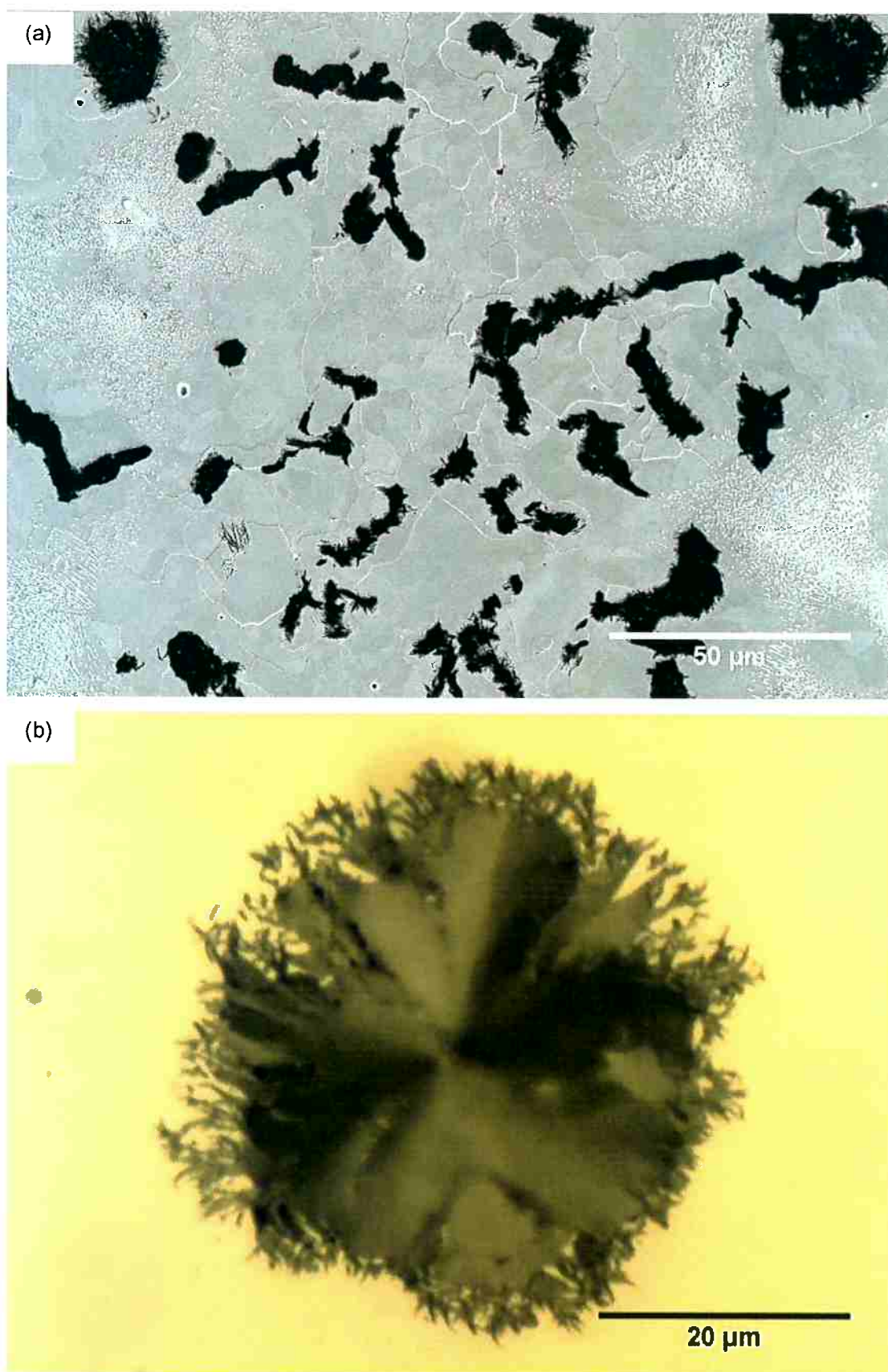


Figura 16 – Microestrutura do FFV após 2h a 740°C e resfriada no interior do forno. (a) Microscopia eletrônica de varredura, 350x; (b) Detalhe de ramificações na grafita, microscopia ótica, 1000x.

3.1.2 AÇO ELÉTRICO (AE)

A amostra trabalhada foi de um aço para aplicações magnéticas com a composição e histórico de laminação dados pela tabela a seguir.

Tabela 1 – Composição química, histórico de laminação e recozimento.

| Composição Química | C (ppm) | Mn (%) | P (%) | S (%) | Si (%) | Cu (%) | Al (%) |
|-----------------------|---------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 24 | 0,50 | 0,016 | 0,0086 | 0,69 | 0,066 | 0,312 |
| | B (ppm) | Nb (%) | V (%) | Ti (%) | Mo (%) | Ni (%) | Cr (%) |
| | 1 | 0,0024 | 0,013 | 0,001 | 0,056 | 0,0108 | 0,025 |

| | |
|--------------------|-------------|
| Laminação a quente | Até 2,3mm |
| Laminação a frio | Até 0,54mm |
| Recozimento | 24h a 640°C |

A amostra sofreu mais um ciclo de recozimento de 850°C por duas horas em ambiente de vácuo, realizado no Instituto de Física da USP. A intenção da caracterização foi investigar a morfologia dos contornos de grão curvos da amostra submetida a tratamento de recozimento visualizando-se a microestrutura em 3D.

3.2 EQUIPAMENTOS, SOFTWARES E CONSUMÍVEIS

A seguir temos a listagem dos equipamentos, softwares e consumíveis utilizados durante a confecção deste trabalho.

- **Corte das amostras.** As amostras foram cortadas em pedaços pequenos com uma serra de precisão Buehler Isomet. Como deve-se encontrar a região estudada no microdurômetro (aumento de 400X) é importante que a área polida da amostra seja pequena. Além disso, um pedaço pequeno facilita a remoção das camadas e desgasta menos os consumíveis
- **Embutimento.** O embutimento das amostras foi feito em baquelite com a pressão de embutimento menor (10 Bar) para que o polímero ficasse menos duro e a remoção de material fosse mais fácil durante o polimento.
- **Preparação inicial.** As amostras foram preparadas convencionalmente com o lixamento em lixas de carbeto de silício 180, 220, 400, 600 e 1200 e o

polimento com abrasivo de diamante de 3 μ m e 1 μ m. Um polimento de acabamento foi realizado com sílica coloidal 0,06 μ m por aproximadamente 20 minutos em uma politriz automática Buehler Minimet.

- **Polimento serial.** Os polimentos seriais foram realizados em uma politriz automática Buehler Minimet em tecido de polimento de cerdas curtas, Buehler Texmet 1000 e sílica coloidal 0,06 μ m. No caso do ferro fundido vermicular uma pequena quantidade de alumina gel 0,3 μ m foi adicionada à solução abrasiva. Percebeu-se que apenas a sílica não removia a quantidade de material necessário e apenas a alumina gerava muitos riscos.
- **Microdureza.** As marcas de microdureza Vickers foram feitas em um microdurômetro Zwick & Co para a obtenção das cotas de cada seção metalográfica e o alinhamento posterior das seções no microcomputador (estes ponto serão discutidos mais adiante neste trabalho).
- **Aquisição das imagens.** As imagens foram adquiridas em um microscópio ótico Olympus BX60M com uma câmera Micrometrics 318CU, de 3,2 megapixels, acoplada. A iluminação foi definida em 50% (botão preset) e o filtro polarizador ajustado de modo que a intensidade fosse máxima.
- **Software de captura.** O software de captura das imagens foi o Micrometrics SE Premium Versão 2.8. As imagens foram adquiridas em 2048 x 1536 pixels, resolução horizontal e vertical de 96dpi e intensidade de bits 24. A tabela a seguir mostra as configurações chaves do programa ajustadas para o FFV e para o AE, de modo a facilitar a etapa de tratamento das imagens.

Tabela 2 - Ajustes do software de captura de imagens.

| Ajuste | FoFo Vermicular | Aço Elétrico |
|---------------|-----------------|--------------|
| Exposure (ms) | 57,8046 | 33,3252 |
| Gain | 1 | 1 |
| Gamma | 100 | 1 |
| Saturation | 0 | 0 |
| Contrast | 1 | 0 |
| Red gain | 1 | 1 |
| Green gain | 1 | 1 |
| Blue gain | 2,125 | 1 |

- **Software de análise de imagens.** Para realização de medidas e o tratamento das imagens, o software utilizado foi o ImageJ versão 1.40, software de uso livre em plataforma Java desenvolvido pelo National Institutes of Health, órgão do departamento de saúde e serviços humanos do governo dos Estados Unidos. O software se encontra disponível no site <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- **Software de reconstrução.** As reconstruções em 3D foram feitas com o software Reconstruct 1.1.0.0 (9). Também se trata de um software de uso livre e de código aberto desenvolvido no Neural Systems Laboratory da Universidade de Boston por J. C. Fiala e está disponível no site <http://www.bu.edu/neural/Reconstruct.html>.
- **Software de programação de scripts.** Alguns scripts foram programados visando reduzir tarefas repetitivas no computador. O programa Auto Hot Key versão 1.0.47.06 foi escolhido para essas tarefas. É outro software de uso livre com linguagem própria, baseada na linguagem visual basic e é capaz de simular cliques de mouse e pressionamento de teclas. O software possui um manual extenso, porém simples, com vários exemplos e também há um fórum público na internet que se mostrou bem útil. Pode-se obter o programa em www.autohotkey.com
- **Microcomputador, análise de imagens e reconstrução.** O computador utilizado para as operações com as imagens e as reconstruções foi um CPU Intel Core 2 Duo E6550, 2,33GHz com 2GB de memória RAM.

Investigações no formato das identações Vickers também foram feitas para garantir a hipótese de que a marca possui o mesmo formato da geometria do identador. Imagens rotacionadas entre si a partir de um eixo eucentrico na superfície do ferro fundido foram geradas por microscopia eletrônica de varredura. Essas imagens foram em seguida entradas em um programa de reconstrução tridimensional de topografias, Alicona MeX versão 5.0, para que os ângulos entre as faces da pirâmide pudessem ser medidos. Os detalhes de como estas reconstruções são realizadas podem ser vistos no trabalho de formatura intitulado "Reconstrução tridimensional de superfícies metálicas utilizando o software MeX" do colega Edgar R. Marques deste mesmo ano (39). Os resultados serão apresentados mais a frente neste trabalho.

3.3 DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

O procedimento de obtenção das imagens não difere muito entre o que foi descrito nos diversos estudos apresentados. Basicamente deve-se retirar a camada de material desejado por uma etapa de polimento, ou uma sequência de etapas, com abrasivos de granulometrias decrescentes (1, 2, 4, 5).

O diagrama da figura 17 mostra um esquema das etapas envolvidas na reconstrução tridimensional de microestruturas.

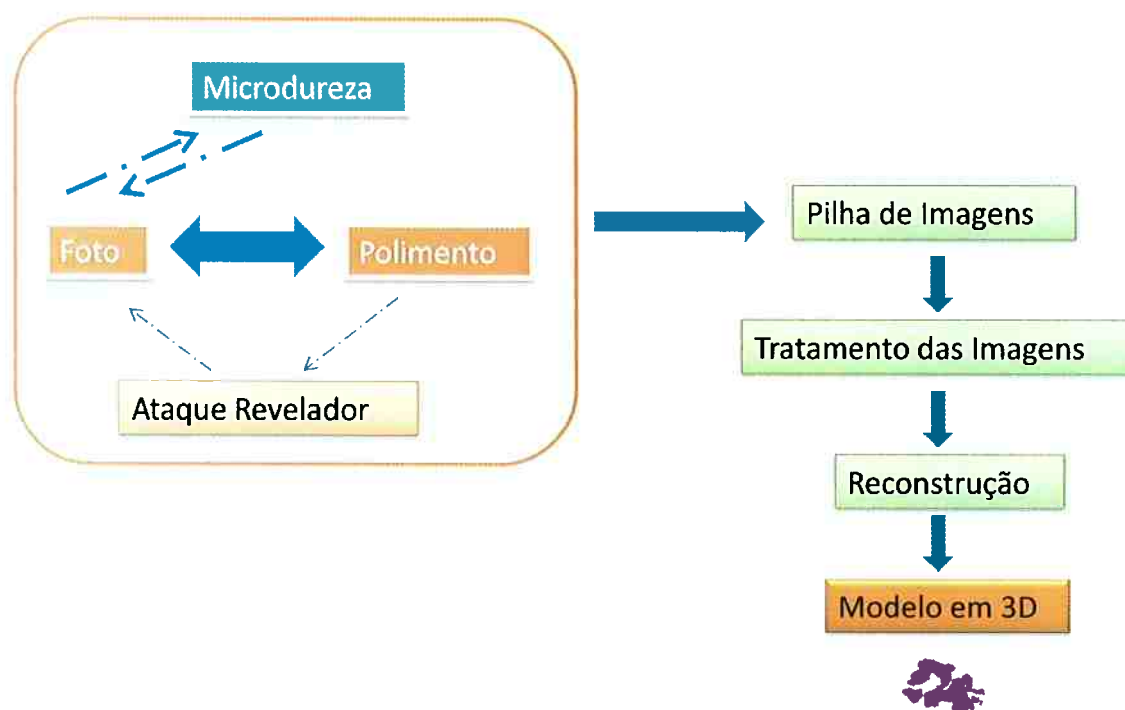


Figura 17 - Esquema das etapas envolvidas na reconstrução 3D de microestruturas.

Inicialmente deve-se estimar o volume a ser reconstruído e determinar alguns parâmetros básicos da reconstrução.

- **Aumento das imagens a ser usado no microscópio para a captura das imagens**

O aumento das imagens deve ser coerente com as estruturas ou características que se deseja investigar.

- **Espessura da camada a ser removida (passo)**

A espessura da camada depende da resolução que se deseja no objeto virtual. DeHoff, primeiro a apontar a necessidade do seccionamento serial na avaliação de microestruturas e citado em várias das referências deste trabalho (1, 2,

4, 5, 6), sugere entre 50 e 100 seções. Na prática se percebe que esses números arbitrários não precisam ser seguidos. Bons resultados foram obtidos com menos de 20 seções (30) e realizando algo excepcional, Kral et al (4) obtiveram mais de 200 seções na reconstrução de precipitados de cementita em contornos de grão austeníticos.

- **Necessidade ou não de ataque metalográfico e a determinação do mesmo**

Alguns materiais apresentam a vantagem de não necessitarem de ataques reveladores. Ao atacar o material, pequenas distorções no tempo de aplicação do ataque, diferenças na concentração dos reagentes e até mesmo variação de temperatura entre um dia quente e frio podem interferir nas imagens capturadas, mesmo controlando estritamente os fatores como iluminação do microscópio e os parâmetros do software de captura digital. Estas diferenças dificultam o tratamento em lote da pilha (em inglês “stack”) de imagens.

- **Práticas metalográficas; tecidos, abrasivos, materiais de consumo e padronização das práticas.**

A qualidade do ensaio metalográfico deve ser a maior possível pela mesma razão comentada a cima. Deve-se fazer uso de tecidos de polimento e abrasivos adequados. Um ponto importante é que aqui não se deseja uma preparação rápida e eficiente a partir da amostra bruta, por isso indicações da literatura e de fabricantes de consumíveis metalográficos devem ser encaradas com ressalvas. O entendimento dos mecanismos de microabrasão no polimento é recomendável. O uso de politrizes automáticas ou semi-automáticas é fundamental para garantir o mínimo de repetibilidade no polimento.

3.3.1 DETERMINAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SEÇÕES

A espessura da camada de material removido pode ser facilmente calculada pela variação do tamanho de marcas de microdureza Vickers. Para uma primeira aproximação que se mostrou bastante coerente, como será discutido adiante, a geometria da indentação pode ser considerada igual a um “negativo” da geometria piramidal do indentador. A figura 18 mostra os detalhes de impressão da dureza Vickers.

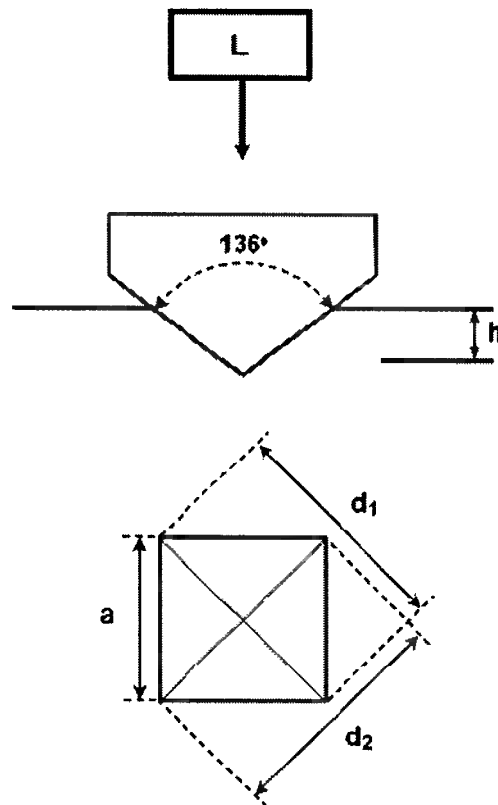


Figura 18 - Detalhes da geometria Vickers (adaptado da ref. 30)

Partindo-se do fato que o ângulo entre as facetas da pirâmide do indentador é de 136° , e que $d_1=d_2=d$, o valor da profundidade h da indentação é dado pela relação $h=0,143d$. Na prática não é necessário conhecer a verdadeira dureza do material, mas sim a variação da profundidade da indentação que pode ser inferida da relação anterior, assim temos $\Delta h=0,143\Delta d$, onde Δd é a diferença entre o valor da diagonal da indentação em seções consecutivas. É importante ressaltar que alguns artigos estudados durante a confecção deste trabalho apresentaram confusões quanto a verdadeira geometria vickers como a ref. (26) por exemplo, o que pode se refletir em um alongamento ou achatamento da morfologia estudada em relação à real. Problema facilmente resolvível com uma consulta a norma de ensaios de microdureza (36).

Como no caso não se está interessado no valor da medida de microdureza é recomendável garantir que a superfície da amostra esteja a mais horizontal possível na ocasião da aplicação das marcas. Para isto pode-se fixar a amostra pela base com massa de modelar a um porta amostra e usar os planificadores comuns em laboratórios de metalografia. Obteve-se resultados bem melhores desta maneira.

É mais conveniente realizar as medidas das diagonais em um software de análise de imagens, pois pode-se realizar todas as medidas de uma só vez e métodos de automação podem ser implementados para agilizar ao processo. O erro das medidas pode ser estimado, dependendo do cuidado com que as mesmas são realizadas e as possibilidades do software de análise.

3.3.2 DETERMINAÇÃO DAS ROTINAS DE POLIMENTO

A princípio é conveniente preparar normalmente a amostra, como um ensaio metalográfico convencional, visando sempre a qualidade. Marcas de microdureza devem ser aplicadas. Medidas das diagonais das identações devem ser realizadas entre cada passo para determinar a espessura removida de fato durante a calibração do passo. Quando a identação é aplicada, ela pode deformar ou trincar a região ao redor da marca. Dependendo do material isto pode ser um problema.

A importância da qualidade das imagens capturadas é ressaltada em diversos trabalhos de reconstrução (1, 4, 5, 6). É sempre bom fazer o uso de polimentos de acabamento com suspensões de sílica coloidal ou diamante de $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ por exemplo. Entretanto esse tipo de polimento pode não retirar a camada de material desejada em tempo hábil.

Partindo-se do menor tamanho de abrasivo disponível, a velocidade e a carga aplicada sobre a amostra devem ser variadas, objetivando-se a remoção de material determinada previamente. Um limite lógico de tempo deve ser imposto. Caso a variação da carga e da velocidade não remova a quantidade de material desejada ou produzam efeitos indesejáveis, deve-se considerar a introdução de uma etapa a mais de polimento com abrasivo de maior granulometria.

Observou-se no decorrer da produção deste trabalho que a rotina de polimento determinada pode apresentar distorções com o desgaste dos tecidos ou outros fatores. Portanto, medidas das diagonais das identações devem ser feitas regularmente durante o procedimento para se garantir que o processo anda como desejado.

3.3.3 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Na etapa de manipulação das imagens é preciso delinear os contornos, portanto a captura das imagens deve objetivar revelar os contornos das fases que estão em sendo estudadas. Pode-se alterar o brilho, contraste e iluminação no microscópio e no software de captura com este objetivo. (vide figura 19)

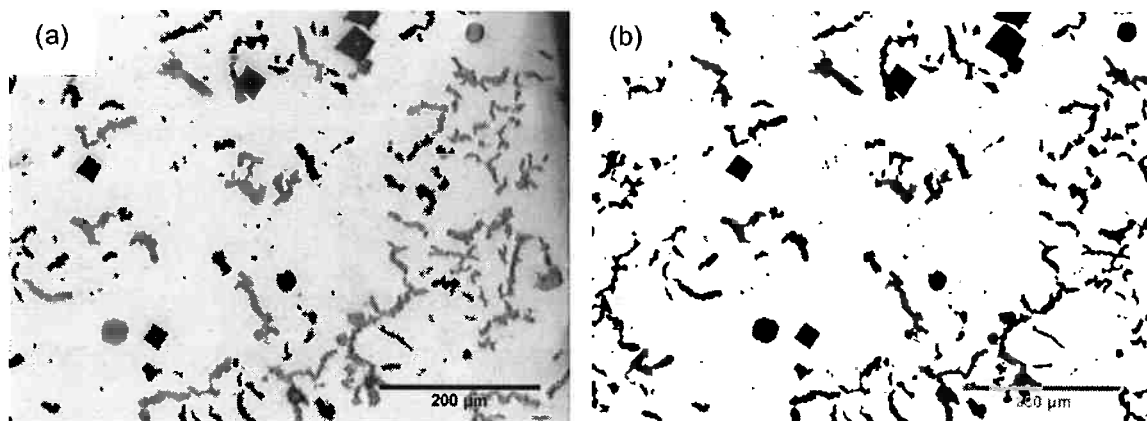


Figura 19 - Otimização dos parâmetros do microscópio e software de captura. Em (a) temos a imagem em preto e branco capturada normalmente e em (b) com os parâmetros modificados para facilitar os trabalhos posteriores.

Para facilitar o alinhamento das imagens posteriormente no computador é conveniente fazer uma marca na amostra ou determinar alguma posição da mesma para que esta sempre fique na mesma direção no microscópio.

Manipular imagens em preto e branco é consideravelmente menos complexo e trabalhoso do que imagens em cores. Se isto não comprometer a análise do objeto em estudo, o que geralmente é o caso, deve-se obter as imagens neste formato.

Ha alguns anos, manipular imagens de tamanho grande era um problema sério. Os disquetes, hoje peças de museu, armazenavam apenas 1,4 Mbytes. Uma imagem de 2048 x 1536 pixels como as utilizadas neste trabalho ocupam aproximadamente 1 Mbyte e são manipuladas em lotes de até 200 fotografias. Uma operação que necessite armazenar na memória RAM do computador uma cópia deste lote já compromete 400 Mbytes somente para abrir o lote e ao menos o dobro deste valor para realizar operações como aplicação de filtros. Nos padrões dos computadores pessoais de hoje isto não chega a ser um problema, porém, para aproveitar todas as potencialidades das análises de imagens como transformadas de Fourier e operações entre pilhas de imagens um computador de alto desempenho é conveniente.

3.3.4 ALINHAMENTO DAS IMAGENS

Para realizar as reconstruções a distância entre as seções é medida e assume-se que os planos das seções são sempre paralelos entre si, portanto os graus de liberdades restantes são a rotação do plano em relação ao eixo normal e a translação da imagem no plano da seção. Estes dois devem ser corrigidos no computador, salvo em procedimentos completamente automatizados. As marcas de microdureza servem para este fim, além de indicar a espessura de material removido. A questão da rotação e translação pode ser resolvida com apenas uma marca de microdureza, como mostra a figura 20, entretanto é recomendável fazer uso de mais de uma para ter melhores resultados, principalmente quando as marcas são pequenas em relação às figuras.

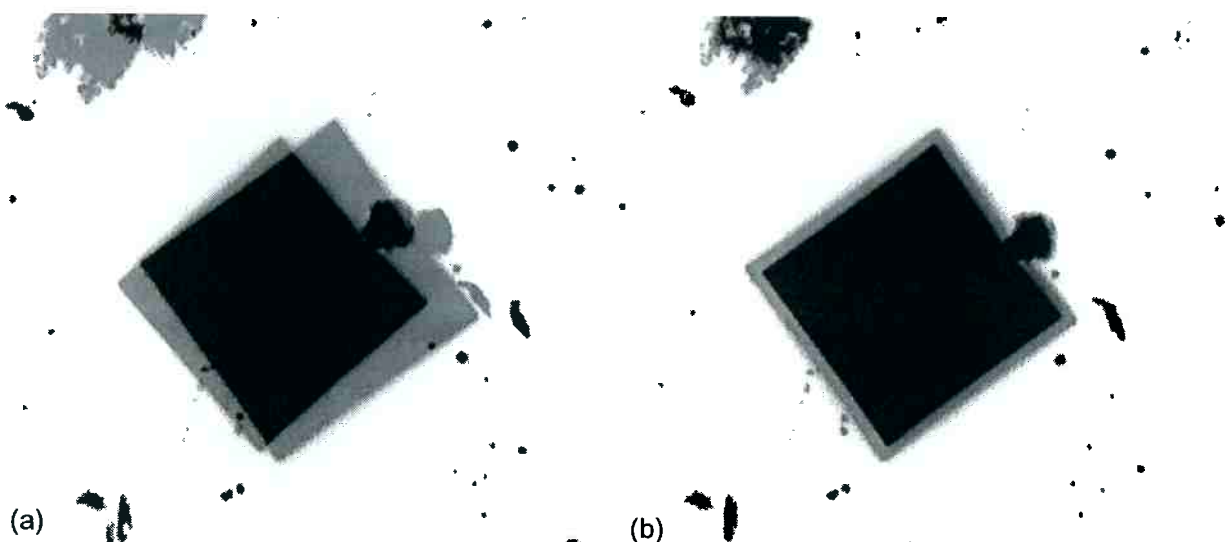


Figura 20 - Sobreposição de marcas de microdureza de duas seções consecutivas. Em (a) as seções estão desalinhadas e em (b) alinhadas.

Para este trabalho o procedimento adotado foi o de sobrepor imagens consecutivas, alinhá-las grosseiramente e acertar a translação em uma identificação com o zoom da tela fechado na mesma, em seguida fecha-se o zoom em outra identificação mais distante, refina-se a rotação, volta-se para a identificação anterior e verifica se é necessária alguma correção. (vide figura 21)

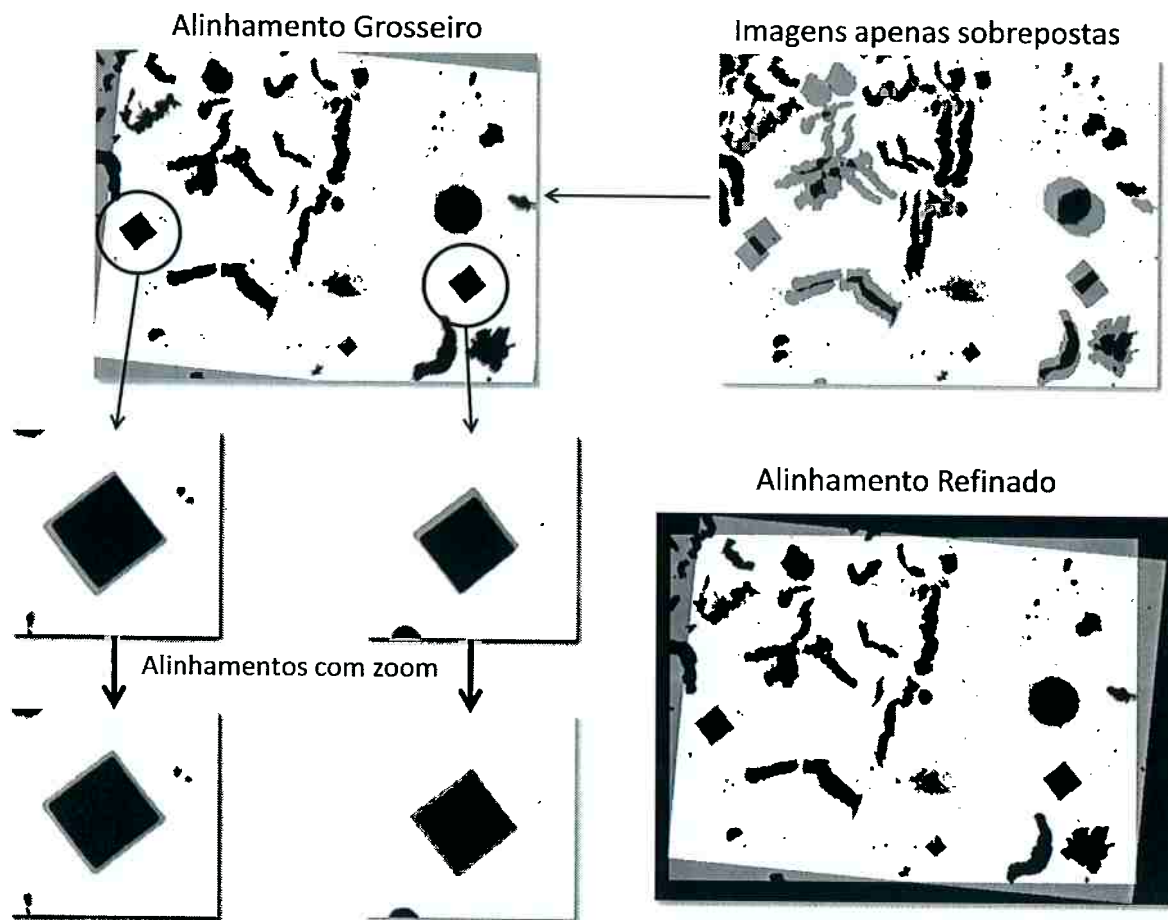


Figura 21 – Esquema de alinhamento das imagens.

O software RECONSTRUCT (9) foi utilizado na etapa de alinhamento. O alinhamento manual é realizado a partir das teclas do teclado, com as setas direcionais responsáveis pelo movimento de translação e as teclas F3 e F4 pelo movimento de rotação. Pode-se definir o passo de cada toque e utilizar em conjunto com as teclas CONTROL e SHIFT para passos mais grossos ou finos. A figura 22 mostra a caixa de diálogo do programa onde os parâmetros são definidos. É possível também deformar as imagens para o alinhamento, porém se os aumentos forem sempre os mesmos isto não é preciso.

Set the parameters of motions produced by keyboard input.
The scaling increments are multiplicative, all others are additive. See Keyboard Help for keystroke definitions.

☐ Use F5-F8 keys for deformations instead of slants.

| | Keystroke | + Shift | + Control | |
|-------------|-----------|---------|-----------|-----------|
| Rotate | 0.2 | 1.5 | 0.051 | degrees |
| Translate X | 0.01 | 0.1 | 0.001 | microns |
| Translate Y | 0.01 | 0.1 | 0.001 | microns |
| Scale X | 1.01 | 1.05 | 1.002 | |
| Scale Y | 1.01 | 1.05 | 1.002 | |
| Slant X | 0.02 | 0.1 | 0.004 | |
| Slant Y | 0.02 | 0.1 | 0.004 | |
| Deform X | 0.001 | 0.005 | 0.0002 | 1/microns |
| Deform Y | 0.001 | 0.005 | 0.0002 | 1/microns |

Figura 22 – Acerto dos passos da movimentação das imagens para o alinhamento.

Pode-se aplicar a mesma transformada para imagens de diferentes aumentos feitos na mesma região do material, trocando-se apenas a objetiva e sem movimentar a amostra. Estas informações se encontram nos arquivos na pasta onde a reconstrução está sendo feita e podem ser recuperadas. Embora entre diferentes aumentos possa haver alguma diferença, entre as seções no mesmo aumento a relação é válida. Movimentando-se apenas a mesa do microscópio, sem rotacioná-la, a transformada da rotação pode ser utilizada também, mas a translação deve ser corrigida. Um ajuste fino da rotação pode ser obtido com este procedimento, obtendo-se uma imagem com aumento maior de uma região com várias marcas de microdureza.

3.3.5 TRATAMENTO DAS IMAGENS

Para a reconstrução, as informações que devem ser extraídas de cada imagem são os contornos das microestruturas, como mencionado anteriormente no item que trata da captura. Uma imagem digital pode ser encarada como uma matriz, onde cada elemento trás a informação da posição e da intensidade de tons de cores de cada pixel. Quando as imagens são adquiridas o valor da intensidade de cada

pixel varia entre 0 (preto) e 255 (branco) no caso do formato em escala de cinza. (vide figura 23)



Figura 23 – Valores dos tons em uma imagem em preto e branco

A matriz clara não é constituída apenas de pixels de valor 255 e nem a microestrutura escura de pixels de valor 0, mas sim de valores que variam em uma faixa próxima. Desta forma é interessante transformar todos os pixels de cada uma das partes para um mesmo valor, gerando uma imagem binária.

Alterando apenas o brilho e o contraste a diferença entre a matriz e a microestrutura pode ser realçada. A figura 24 mostra as alterações em uma imagem e os histogramas dos tons de cinza com a finalidade de revelar os contornos de grão.

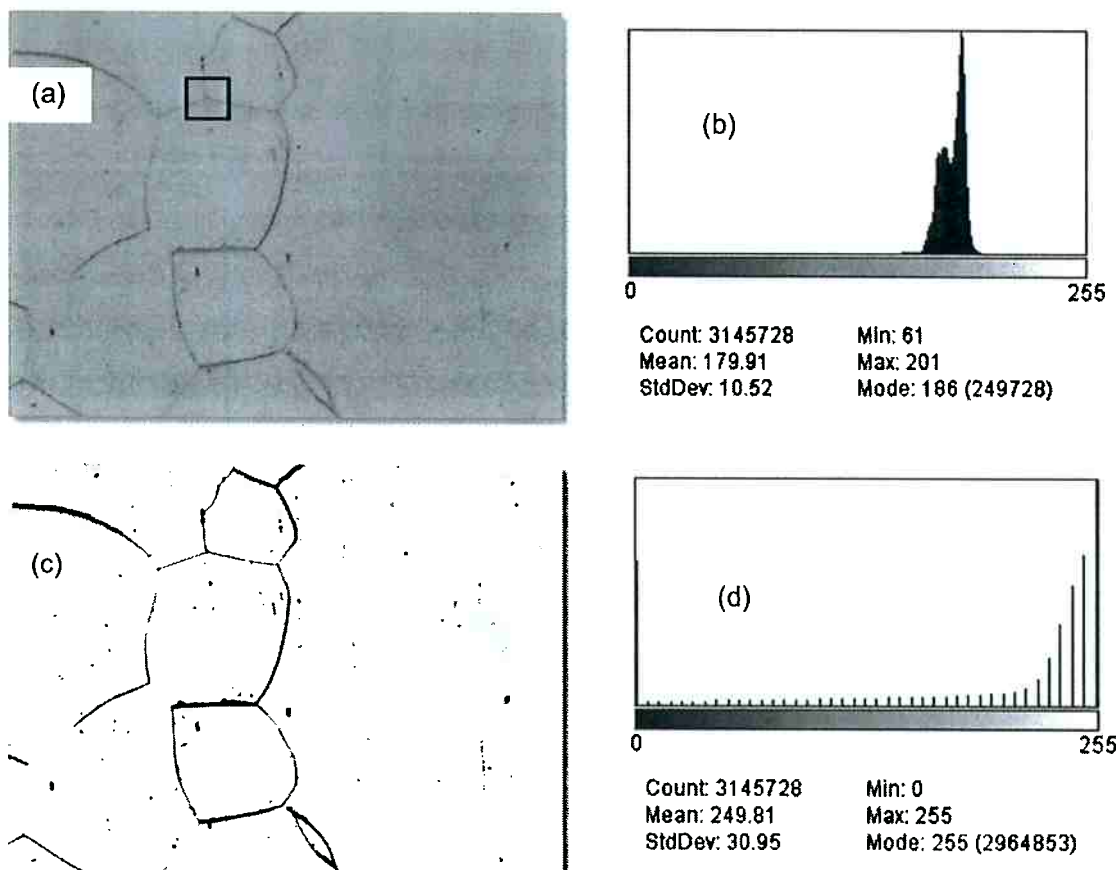


Figura 24 – Alterações de brilho e contraste em uma imagem. (a) e (b) Imagem e histograma de distribuição de tons na imagem como capturada; (c) e (d) Imagem e histograma após ajuste de brilho e contraste.

Para se ter uma melhor idéia do que acontece com cada pixel a região destacada na figura 24 (a) está melhor detalhada na figura 25 que mostra a sequência de passos.

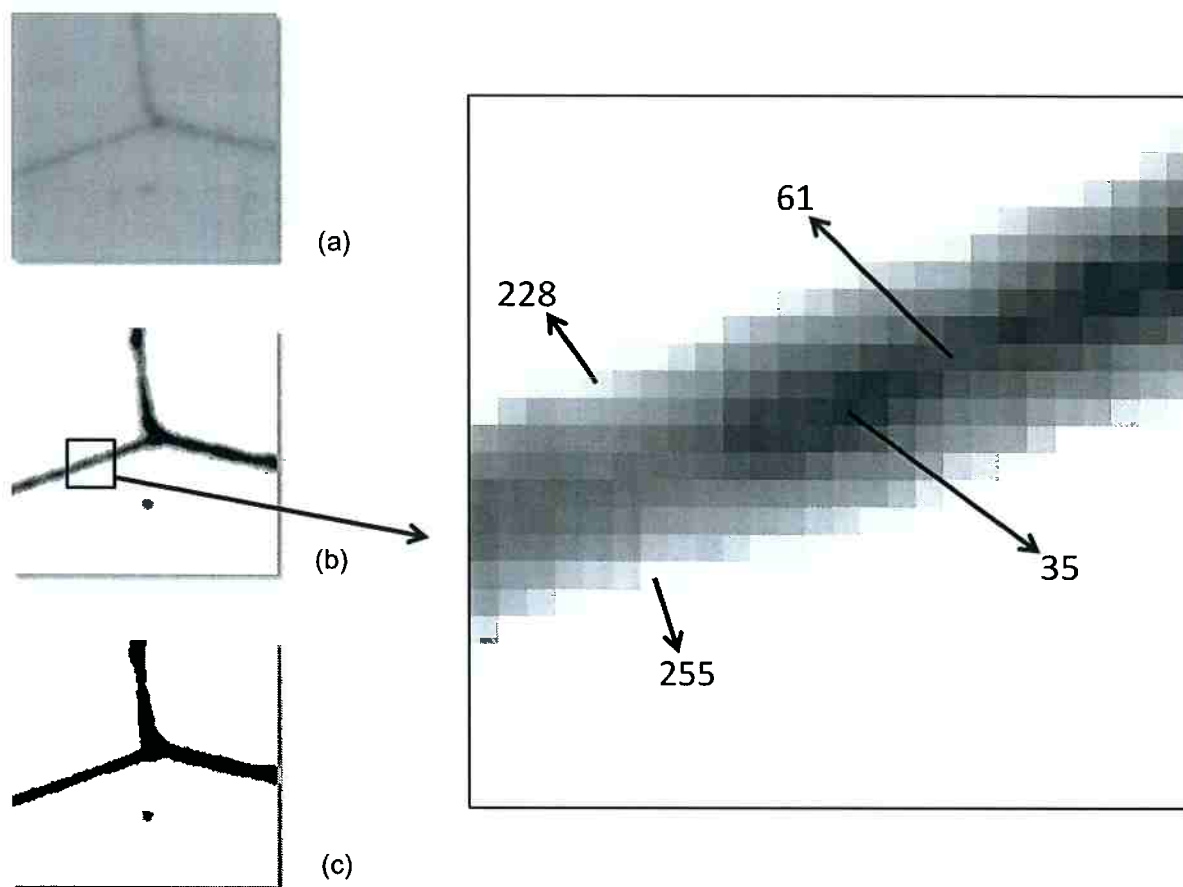


Figura 25 – Passos envolvidos no tratamento de uma imagem pra revelar o contorno de grão. No detalhe valores dos tons de alguns pixels.

Na figura 25, em (a) temos o detalhe destacado na figura 24 como capturado, em (b) após o ajuste de brilho e contraste e em (c) a imagem transformada em binária, com os contornos de grão com os valores dos pixels em 0 e a matriz com os pixels em 255.

Como visto na figura 24 (a) e (c), os filtros impostos nas imagens podem fazer com que alguns contornos de grão desapareçam. A solução é tentar refinar o processo ou reforçar a priori os contornos manualmente.

Com a imagem no formato binário é possível agora determinar um domínio fechado onde todos os pixels possuem o mesmo valor e a partir do contorno ter a região referente a cada grão ou fase do material.

3.3.6 RECONSTRUÇÃO

Os contornos gerados são vetorizados e simplificados, pois caso seguisse o contorno em pixels das imagens o software de reconstrução deverá lidar com muito mais informações na hora de gerar a superfície em 3D, tornando o processo mais demorado e com resultados de difícil renderização, dificultando a visualização. A figura 23 ilustra a solução do problema. Contornos vetorizados se tratam de uma sequência de pontos definidos no espaço e que se interconectam para formar uma curva fechada.

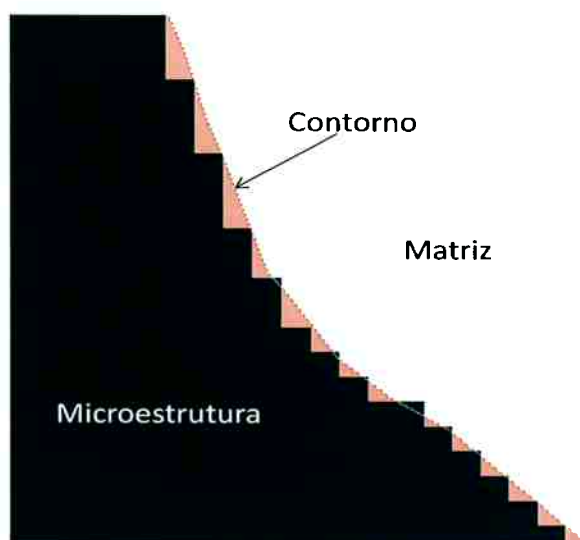


Figura 26 – Delineação dos contornos das microestruturas.

Uma vez com os contornos delineados existem diferentes formas de se obter a representação em 3D. No software utilizado neste trabalho essas formas principais são:

- **Linhas**; cada contorno é posicionado na sua cota de altura, figura 27 - a.
- **Placas**; são atribuídas as espessuras para cada seção e os contornos são representados com placas com essas espessuras, posicionados nas respectivas cotas, figura 27 - b.
- **Superfícies de Boissonnat**; os pontos dos contornos são interconectados aos pontos mais próximos das seções adjacentes formando triângulos que compartilham as arestas e definem uma superfície em 3D, figura 27 - c.

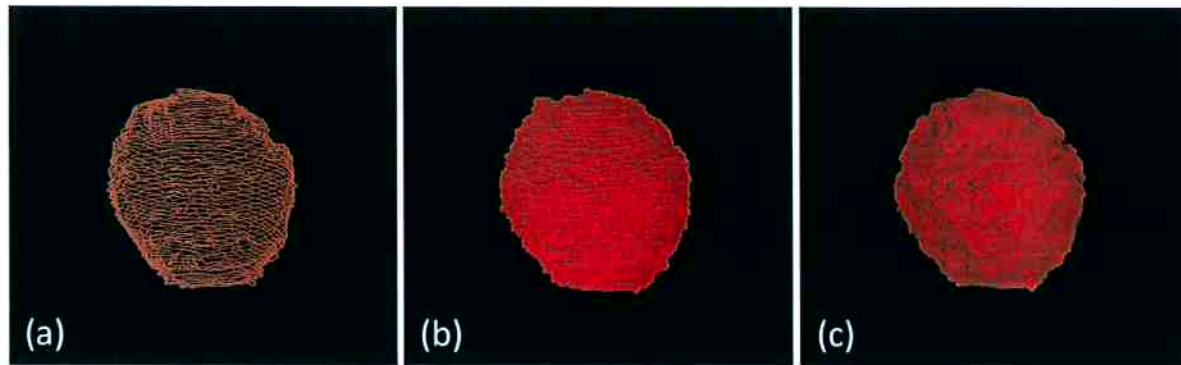


Figura 27 – Tipos de reconstruções. (a) Linhas; (b) Placas; (c) Superfície de Boissonnat.

Detalhes sobre as superfícies de Boissonnat podem ser encontrados na referência (40).

Para o programa realizar a reconstrução, é necessário entrar com a espessura de cada uma das seções. O valor é medido através das marcas de microdureza são os espaçamentos entre as seções. Uma aproximação teve que ser feita neste caso. A espessura de cada seção foi definida como a metade da soma dos espaçamentos adjacentes. A Figura 28 detalha a solução em um corte perpendicular aos planos metalográficos. A primeira e a última seção de cada série foram descartas.

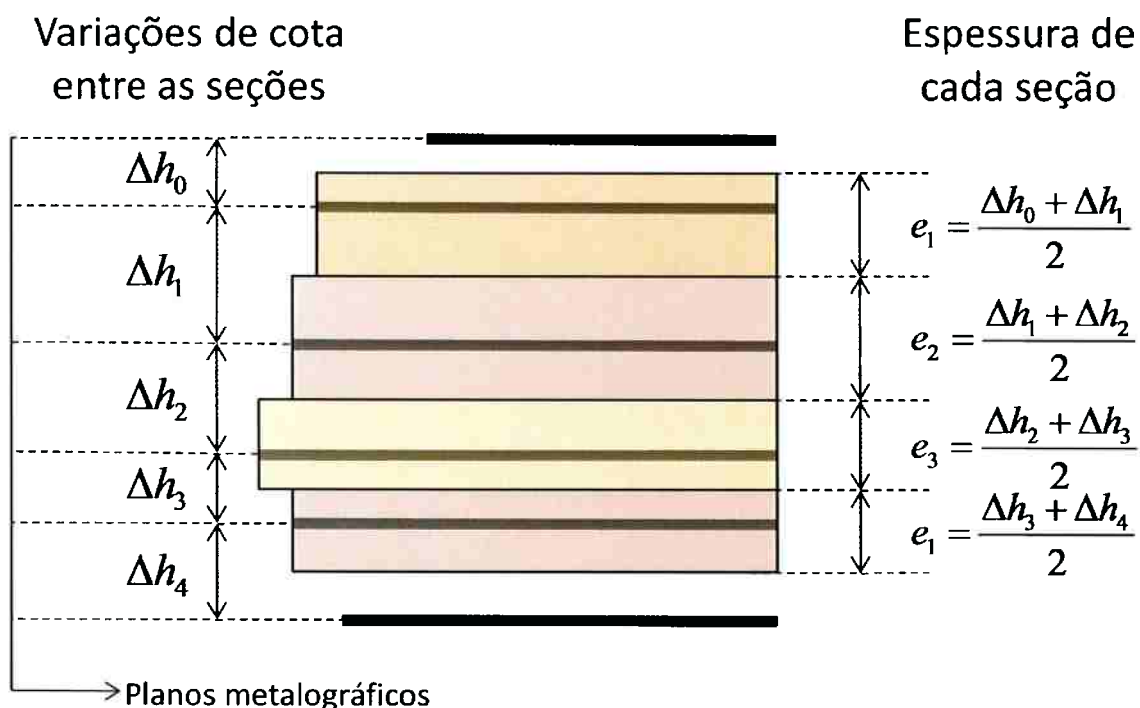


Figura 28 – Determinação da espessura das seções para a reconstrução.

3.4 AUTOMAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

O processo de preparação das amostras, coleta de imagens e tratamento dos dados é bastante demorado e repetitivo. Tarefas repetitivas, que não dependem de decisões humanas a todo o momento podem ser consideravelmente mais ágeis com a implementação de recursos de automação.

Automatizar a parte física de colocar a amostra na politriz, realizar marcas de microdureza, atacar quimicamente a amostra, secá-la, posicioná-la no microscópio, focar a região estudada, etc. Trata-se de uma tarefa complexa e requer investimentos consideráveis como braços mecânicos e equipamentos dedicados. A figura 29 mostra o Robo-Met.3D descrito na referência (6), que chega a realizar 100 fotografias por hora.

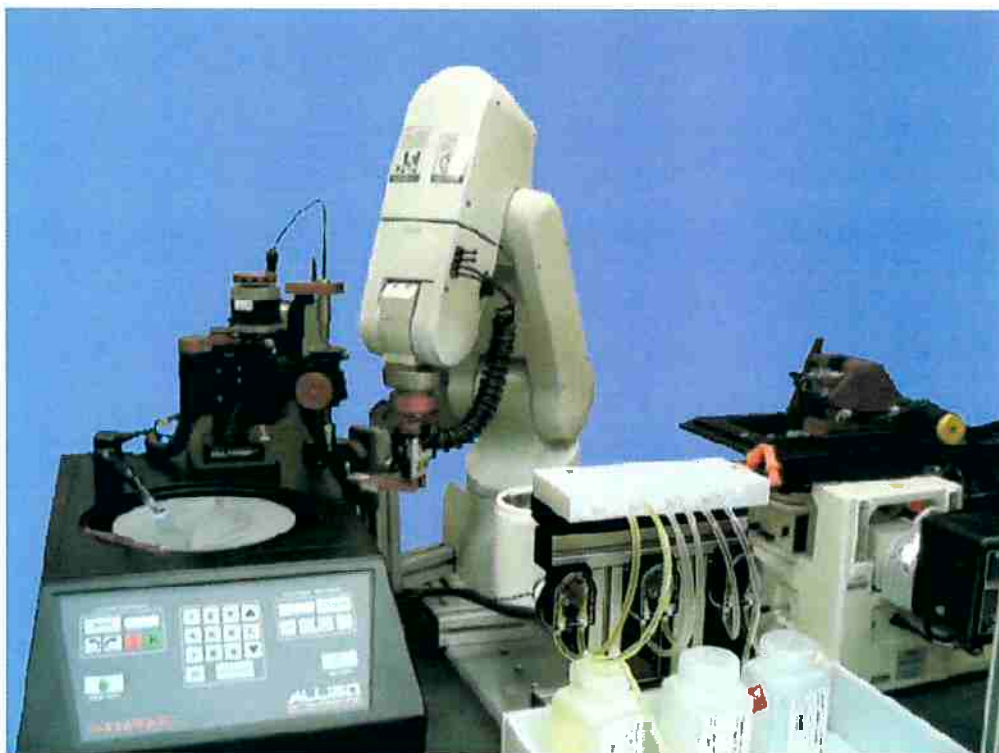


Figura 29 – Robo-Met.3D de Spowart (6).

No contexto deste trabalho esta não era uma opção, entretanto o volume de tarefas a ser realizado no computador posteriormente à aquisição das imagens também é grande. Cliques de mouse e teclas pressionadas, localizar e abrir arquivos, salvar informações e transpor dados de um programa para outro são tarefas que se seguirem certo padrão podem ser prontamente automatizadas com a implementação de simples scripts de programação. Quando considerada a

quantidade de dados que são manipulados no problema abordado neste trabalho essa é uma alternativa bastante interessante.

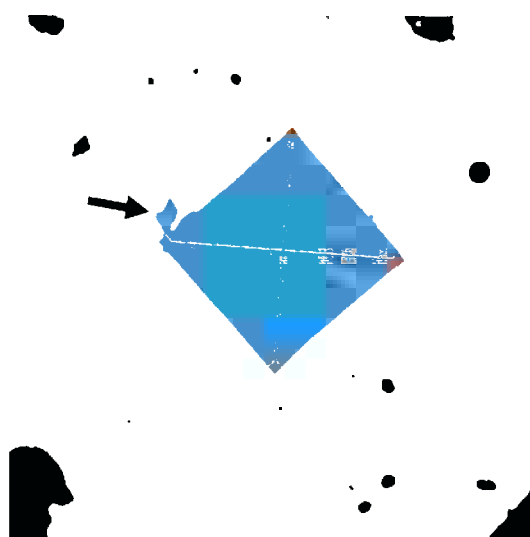
O primeiro script implementado foi para facilitar a captura das imagens. Com a amostra de AE a cada seção eram capturadas 7 fotografias. Da região estudada foram fotos com 100x, 200x e 500x de aumento, além de fotos com 500x de aumento de cada uma das identações vickers que delimitavam a região. Inserir manualmente o nome e local de cada arquivo a ser salvo e selecionar os parâmetros do software de captura (que são diferentes em cada aumento) para cada uma das fotos de cada uma das 60 seções é um trabalho extremamente entediante e justifica o receio que vários pesquisadores possuem quando consideram a utilização do seccionamento serial.

Com o script a tarefa ficou limitada a focar com os ajustes do microscópio a imagem em cada aumento e posição, segundo uma sequência pré-determinada, e apenas apertar uma tecla no computador que este automaticamente ajustava o software e salvava a imagem no local específico. Salvar os arquivos digitais nomeando-os segundo uma fórmula lógica é preponderante para os processos de automação.

O mesmo script foi modificado e aplicado no caso do FFV, onde uma sequência de ao menos 4 fotografias foi capturada para cada uma das 175 seções.

Outra tarefa repetitiva que foi prontamente automatizada trata-se da coleta dos valores das medidas das diagonais das marcas de microdureza. Inicialmente tentou-se realizar as medidas com apenas um clique na identificação, que possui na imagem em binário uma cor diferente da matriz metálica. A medida que se obtém é a área da identificação e a diagonal pode ser calculada como a raiz quadrada de duas vezes o valor da área.

Embora mais fácil, esse procedimento gerava alguns desvios que não eram aceitáveis para o trabalho. O interesse está na variação da medida e, em alguns casos, manchas exógenas ou endógenas se confundiam com a marcação e as distorções não podiam ser desprezadas. Algumas vezes chegavam a fazer com que o valor calculado da espessura removida fosse negativo. A figura 30 demonstra o problema.



| Tipo de medida | Medida | Diagonal |
|----------------|---------------------------|--------------------|
| Área | $A = 1660,6\mu\text{m}^2$ | 57,7 μm |
| Diagonais | $D_1 = 56,7\mu\text{m}$ | 56,8 μm |
| | $D_2 = 56,9\mu\text{m}$ | |

Figura 30 – Comparativo dos métodos de medida pela área e pela diagonal das marcas vickers. No detalhe uma partícula ou porosidade que se mesclou com a indentação na imagem em binário.

Este tipo de abordagem entretanto parece que pode ser aplicado para medidas convencionais em ensaios de microdureza para alguns materiais, inclusive retornando o valor mediante a inserção da carga utilizada. Em marcas sem defeitos agregados os valores pelos dois métodos apresentaram discrepâncias desprezíveis.

A solução encontrada foi traçar manualmente a diagonal. A automação se restringiu a dar o zoom necessário na indentação, numerá-la, coletar os valores e transferi-los do ImageJ para a planilha eletrônica onde a quantidade de material removido era calculada.

Transferir os dados de Δh calculados para o programa de reconstrução foi tarefa para um simples script. O programa necessita que os dados de cada seção sejam modificados individualmente, fazer isto um por um para 100 seções demandaria muito mais tempo.

O software Reconstruct guarda as informações de cada seção em arquivos separados em texto. Estes arquivos são editáveis pelo bloco de notas do Windows por exemplo. As transformadas do alinhamento puderam ser transportadas de uma série com um aumento para outra com aumento diferente por um script programado com auxílio do Auto Hot Key. O script automaticamente abre o arquivo referente a seção da série já alinhada, lê e armazena os valores de rotação e/ou translação que foram ajustados, fecha o arquivo, abre o da série em aumento diferente ainda não

alinhada e insere a transformada. O alinhamento é um dos passos mais trabalhosos de todo o processo e a qualidade dele se reflete diretamente nos resultados.

Confeccionar os scripts pode parecer uma tarefa difícil, mas o Auto Hot Key possui ferramentas que registra movimentos e cliques do mouse, janelas que são acionadas e o que é digitado no teclado. Isto facilita muito a programação e os scripts podem ser feitos em apenas alguns minutos.

É importante ressaltar que para serem usados em diferentes computadores os scripts devem ser revisados e corrigidos eventualmente. Alguns parâmetros como nomes de arquivos e os diretórios onde buscar os mesmos são específicos para o problema na máquina em que se está trabalhando.

A seguir temos como exemplo as linhas de código do programa utilizado para transportar os valores de Δh de uma tabela para cada uma das 97 seções da reconstrução da grafita vermicular no Reconstruct. Outros scripts estão anexados no final do trabalho.

```
#NoEnv
SendMode Input
SetWorkingDir %A_ScriptDir%

SESSION = 1

#9::

loop, 97
{
    winWait, VALORES.txt - Bloco de notas,
    IfWinNotActive, VALORES.txt - Bloco de notas, , WinActivate,
    VALORES.txt - Bloco de notas,
    WinWaitActive, VALORES.txt - Bloco de notas,

    Send, {SHIFTDOWN}{END}{SHIFTUP}
    sleep, 100
    send, {CTRLDOWN}c{CTRLUP}
    sleep, 100
    send, {RIGHT}
    sleep, 100

    ;CURSOR NA POSIÇÃO PARA A PROXIMA

    winWait, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,
    IfWinNotActive, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas, , WinActivate,
    alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,
    WinWaitActive, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,

    sleep, 100

    Send, {CTRLDOWN}h{CTRLUP}
    winWait, Substituir,
    IfWinNotActive, Substituir, , WinActivate, Substituir,
    WinWaitActive, Substituir,

    sleep, 100

    Send, 0.123457{TAB}
    sleep, 50
    Send, {CTRLDOWN}v{CTRLUP}
    sleep, 50
}
```

```
Send, {ALTDOWN}t{ALTUP}
sleep, 50
Send, {ALTDOWN}{F4}{ALTUP}
sleep, 50

winwait, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,
IfWinNotActive, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas, , WinActivate,
alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,
winwaitActive, alinhamento.%SESSION% - Bloco de notas,
Send, {CTRLDOWN}o{CTRLUP}

sleep, 100

send, {ENTER}
sleep, 200

SESSION++

Send, E:\TF\FFV\alinhamento.%SESSION%

sleep, 100

winwait, Abrir,
IfWinNotActive, Abrir, , WinActivate, Abrir,
winwaitActive, Abrir,

Send, {ENTER}
}

return
```

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma parte importante dos resultados são objetos virtuais em 3D. Não é possível apresentá-los apenas em representações bidimensionais no papel. Por este motivo está anexado neste trabalho um CD-ROM com vídeos, arquivos e programas para a melhor visualização dos resultados. (vide encarte)

4.1 RECONSTRUÇÃO DA GRAFITA VERMICULAR

4.1.1 VISUALIZAÇÃO 3D

Nesta reconstrução pelo menos 700 microfotografias foram realizadas. 350 serviram para a medição das diagonais das marcas Vickers em duas regiões distintas ao redor da região de estudo. Das outras 350, 175 são em 100x de aumento e 175 em 200x.

Para reconstrução tridimensional 98 seções foram utilizadas. O espaçamento médio entre as seções foi de 0,8 μ m e as dimensões do volume reconstruído a partir das imagens em 200X de aumento são 80 μ m x 320 μ m x 240 μ m, e das imagens em 100X são de 80 μ m x 580 μ m x 410 μ m.

As figuras 31 - 35 mostram os objetos tridimensionais reconstruídos com superfícies de Boissonnat a partir das imagens em 200X de aumento em diversas vistas e, as figuras 36 – 40, os objetos criados a partir das imagens em 100x de aumento. As cores diferentes são para indicar cada objeto interconectado. É importante ressaltar que a interconectividade foi considerada apenas no volume reconstruído e é possível que na área não observada os objetos marcados se conectem.

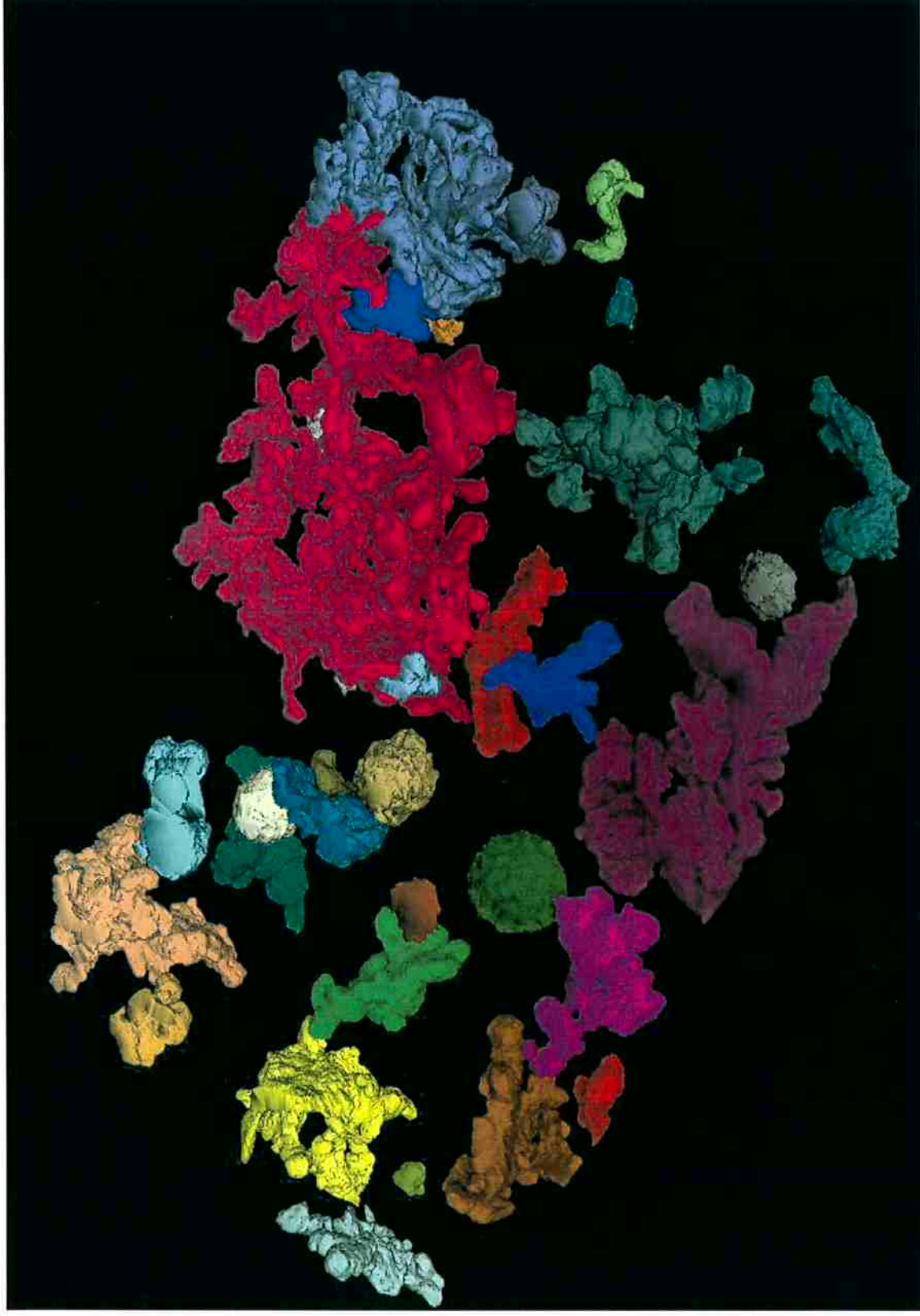


Figura 31 – Reconstrução 1 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento

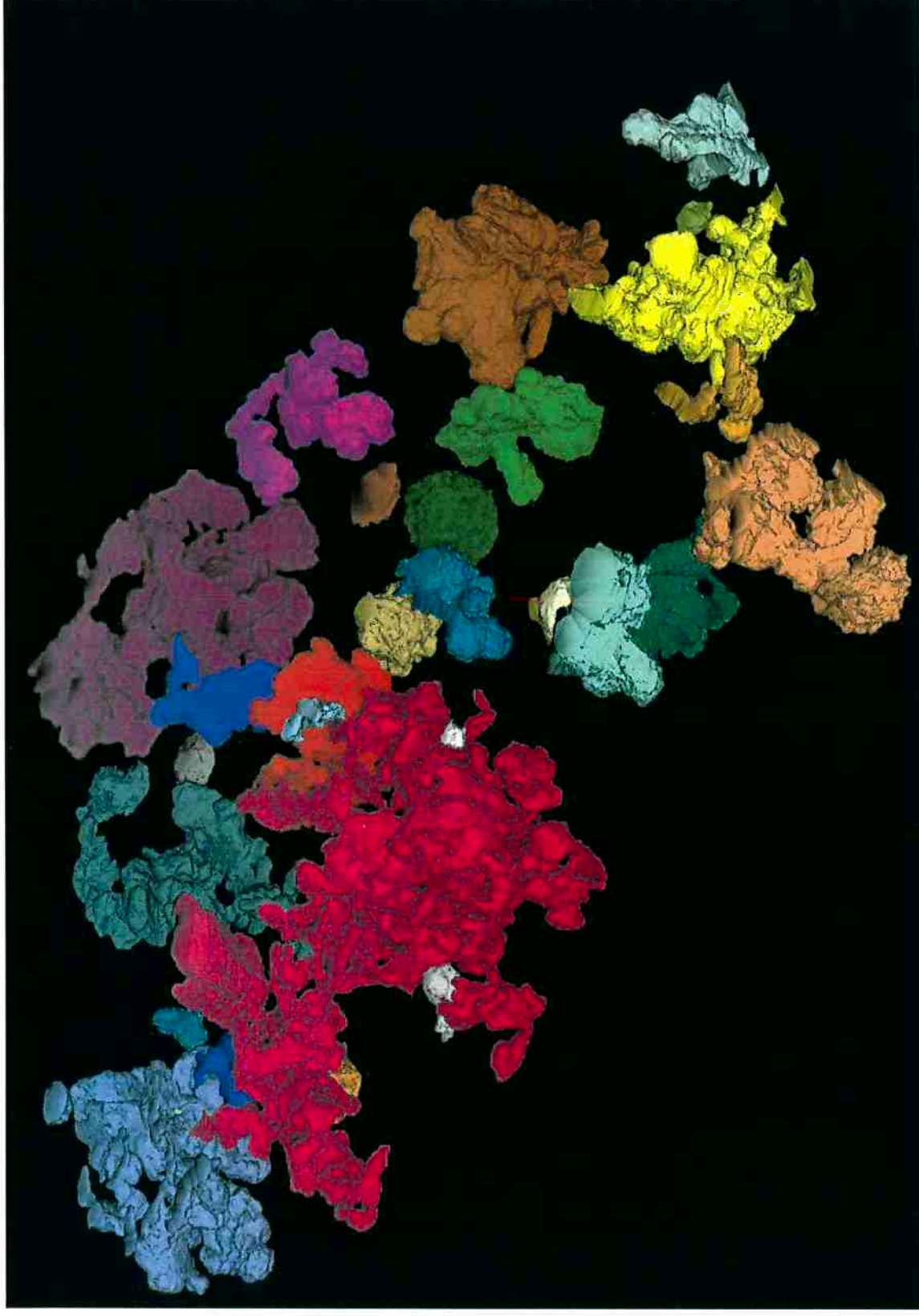


Figura 32 – Reconstrução 2 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento

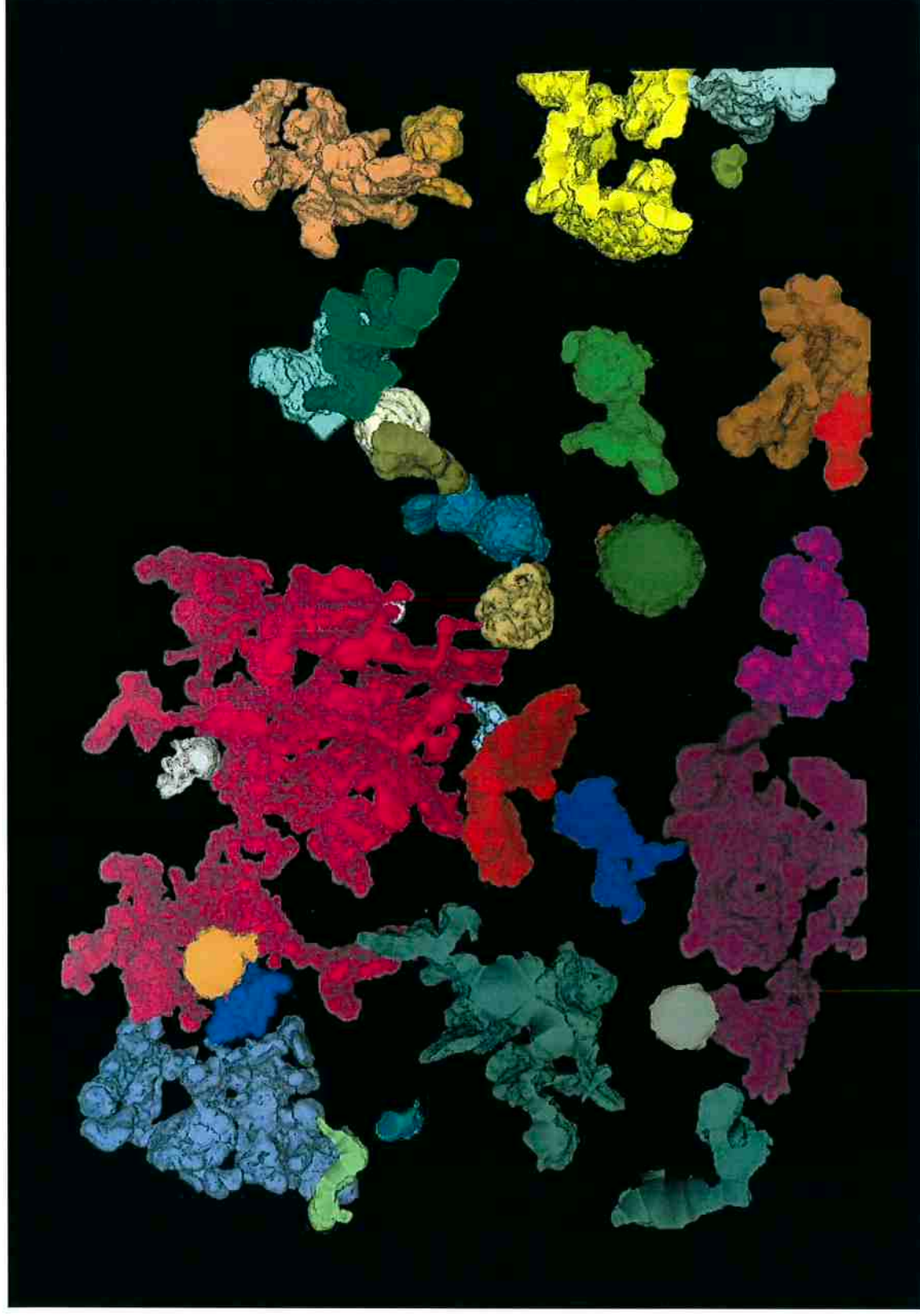


Figura 33 – Reconstrução 3 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento

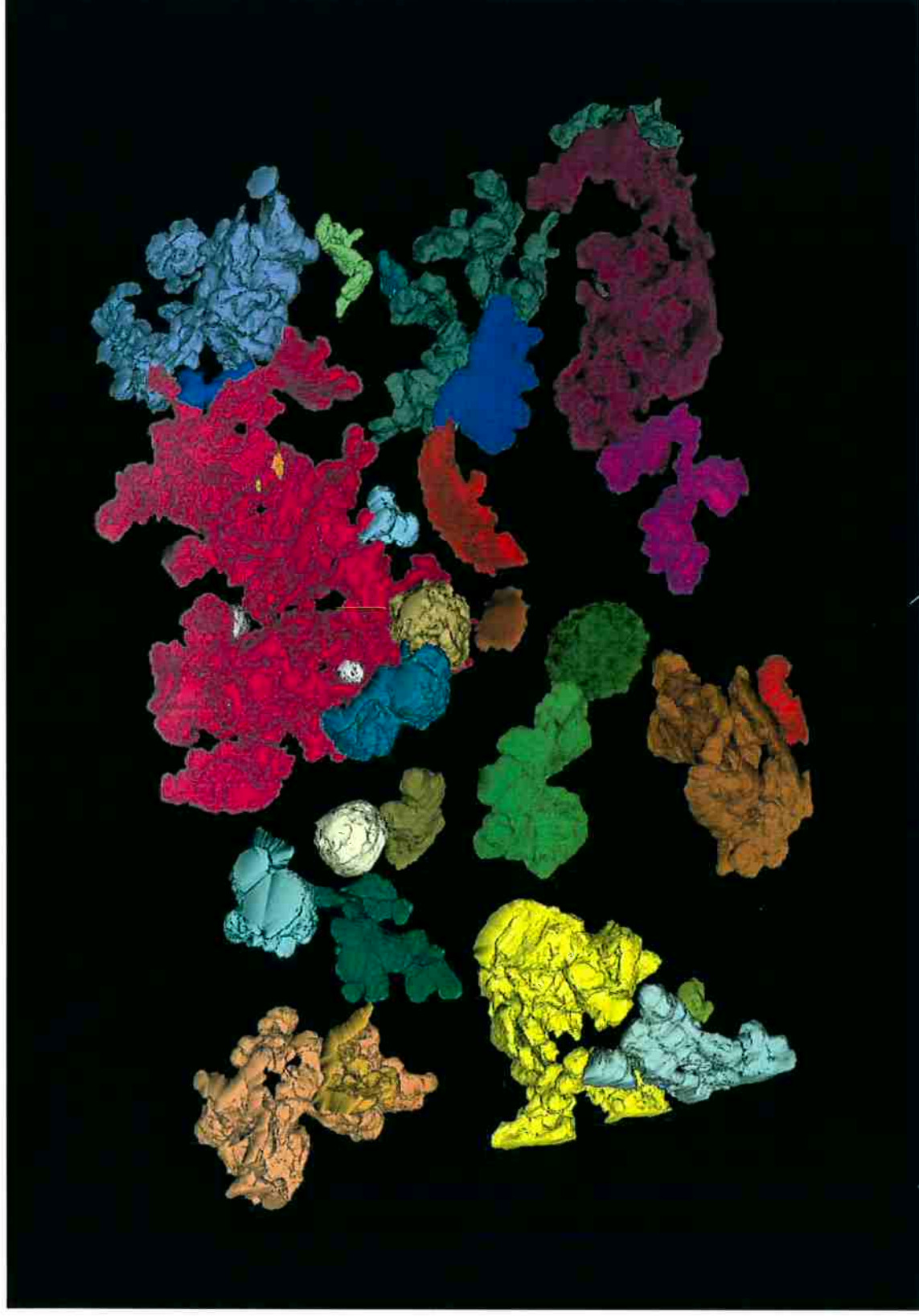


Figura 34 – Reconstrução 4 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento

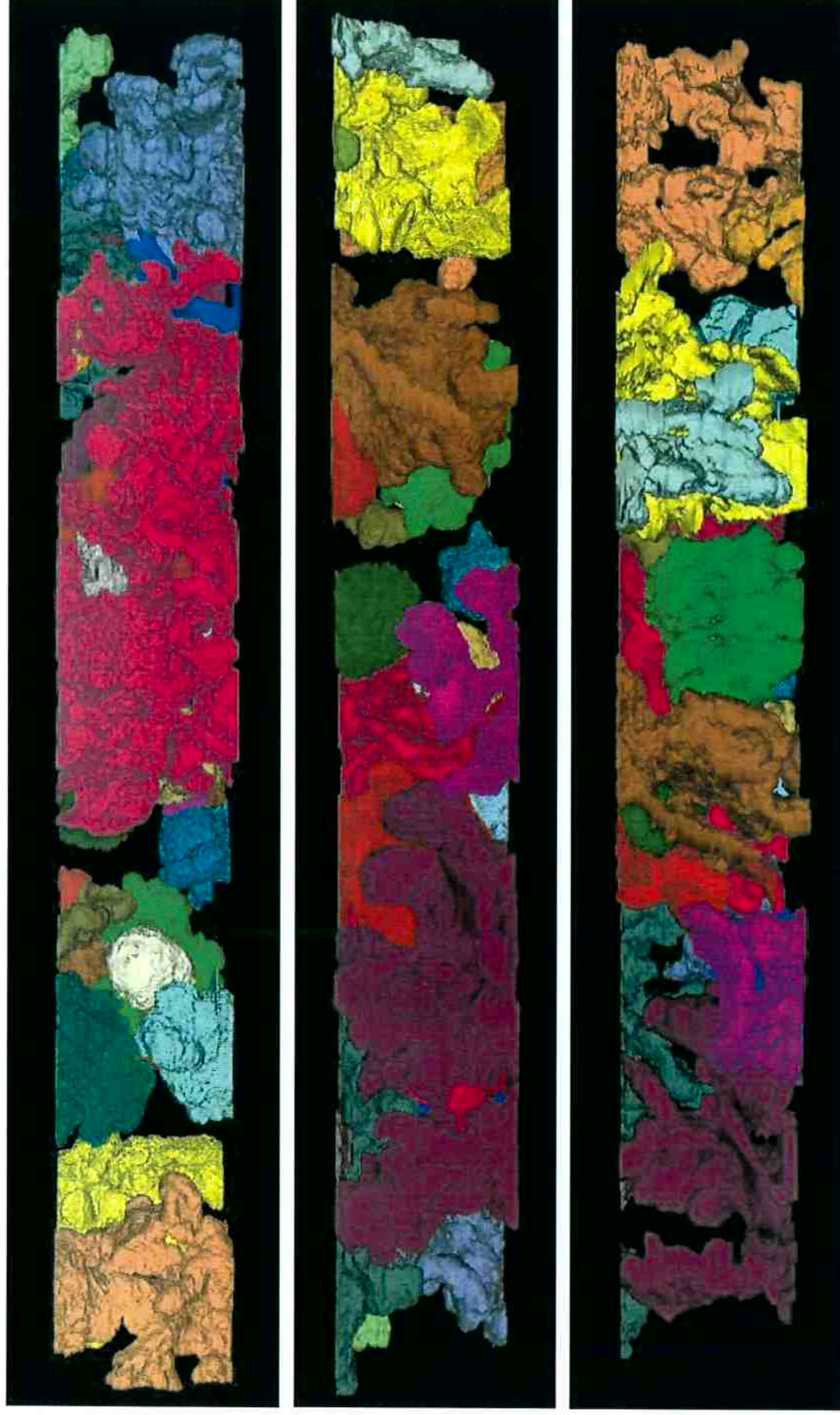


Figura 35 – Reconstrução 5 da grafita compacta a partir de imagens em 100X de aumento, vistas laterais.

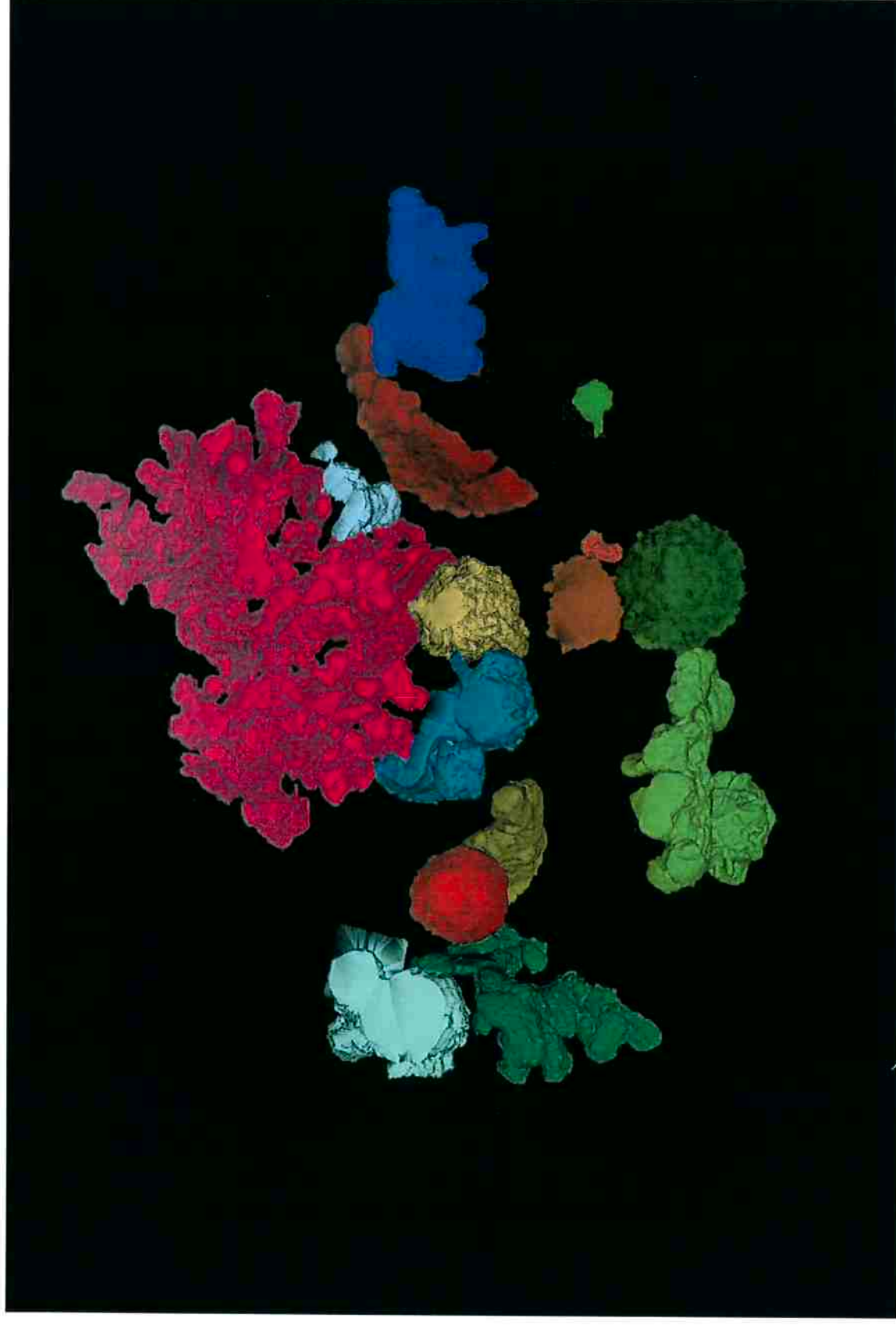


Figura 36 – Reconstrução 1 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento

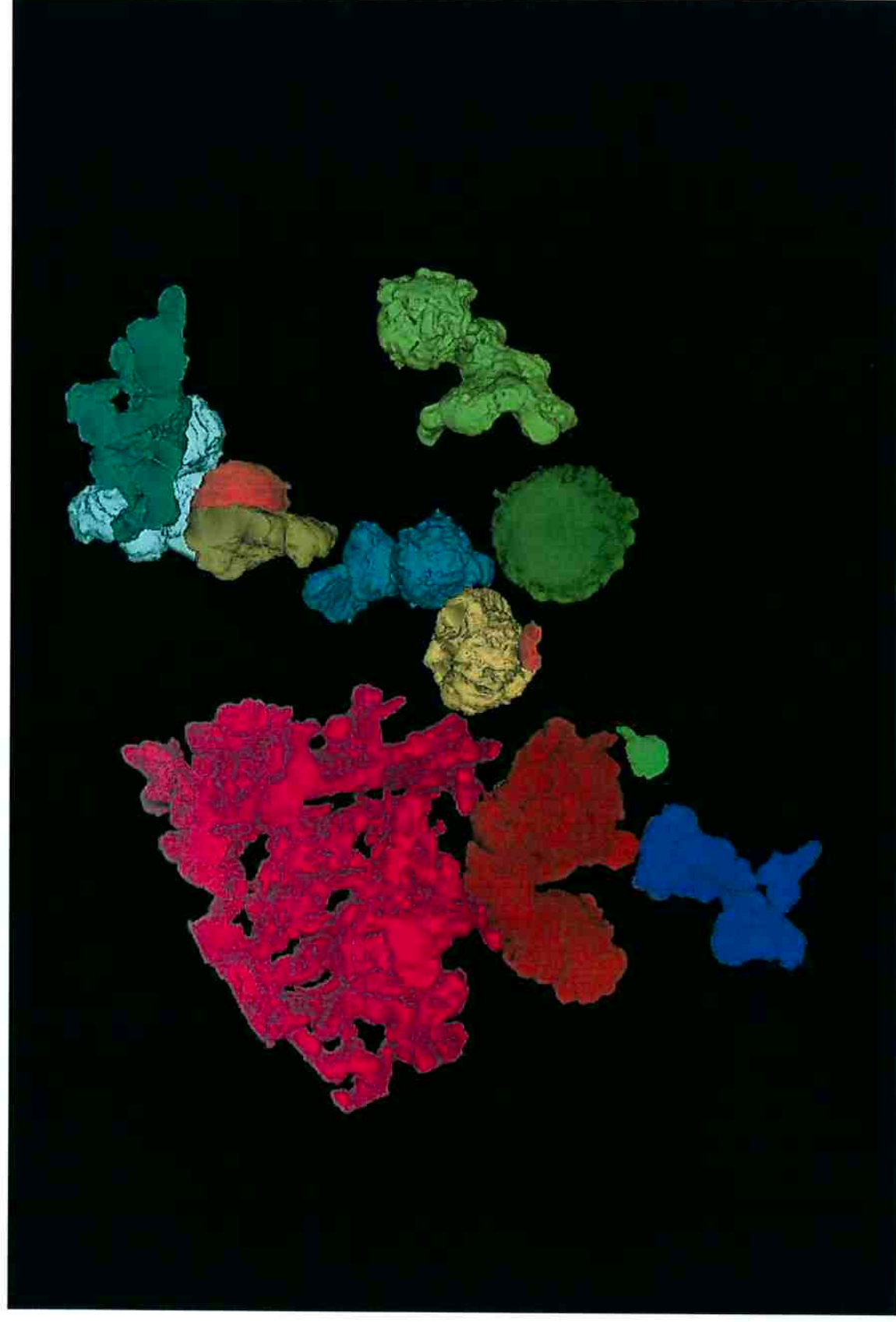


Figura 37 – Reconstrução 2 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento

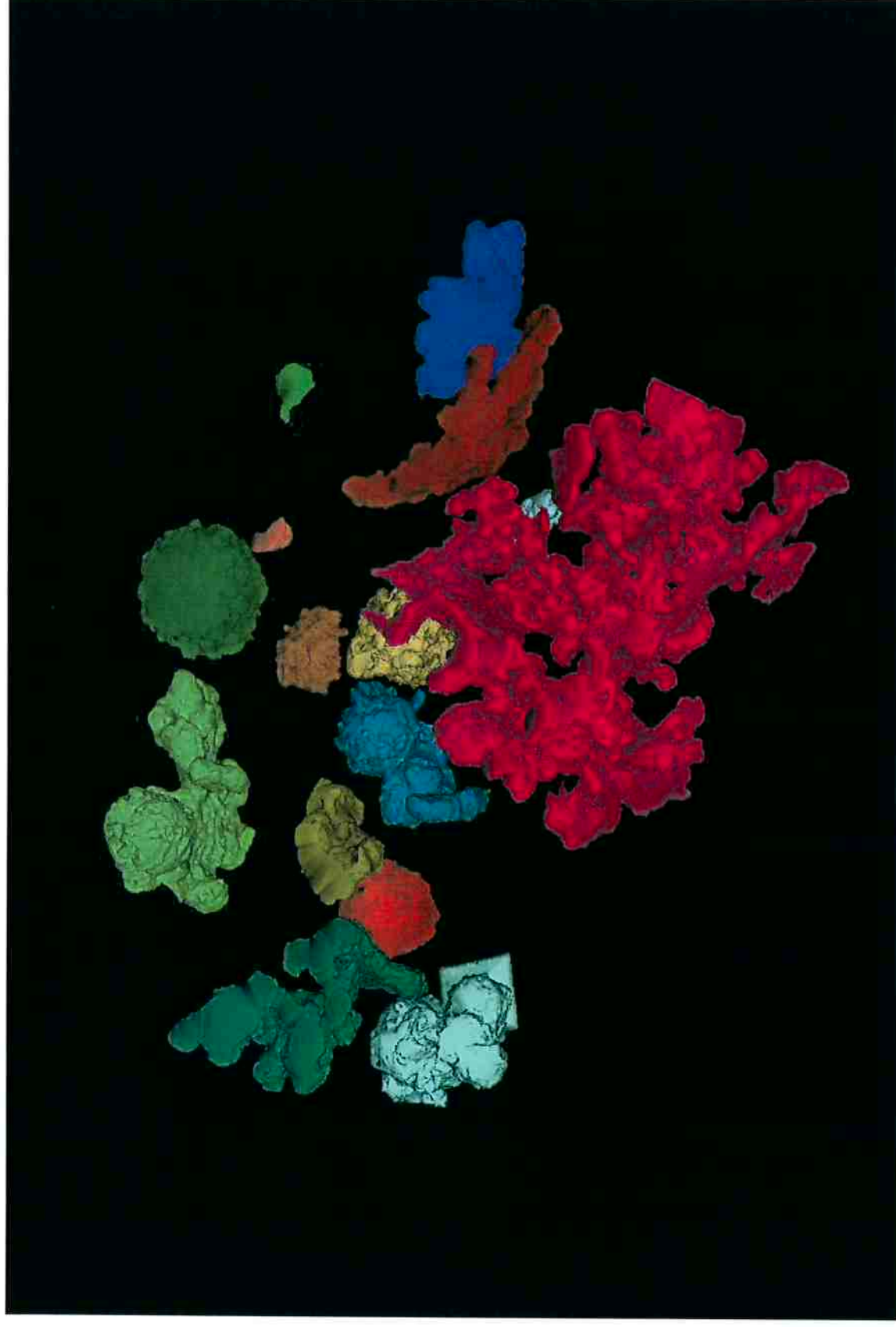


Figura 38 – Reconstrução 3 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento

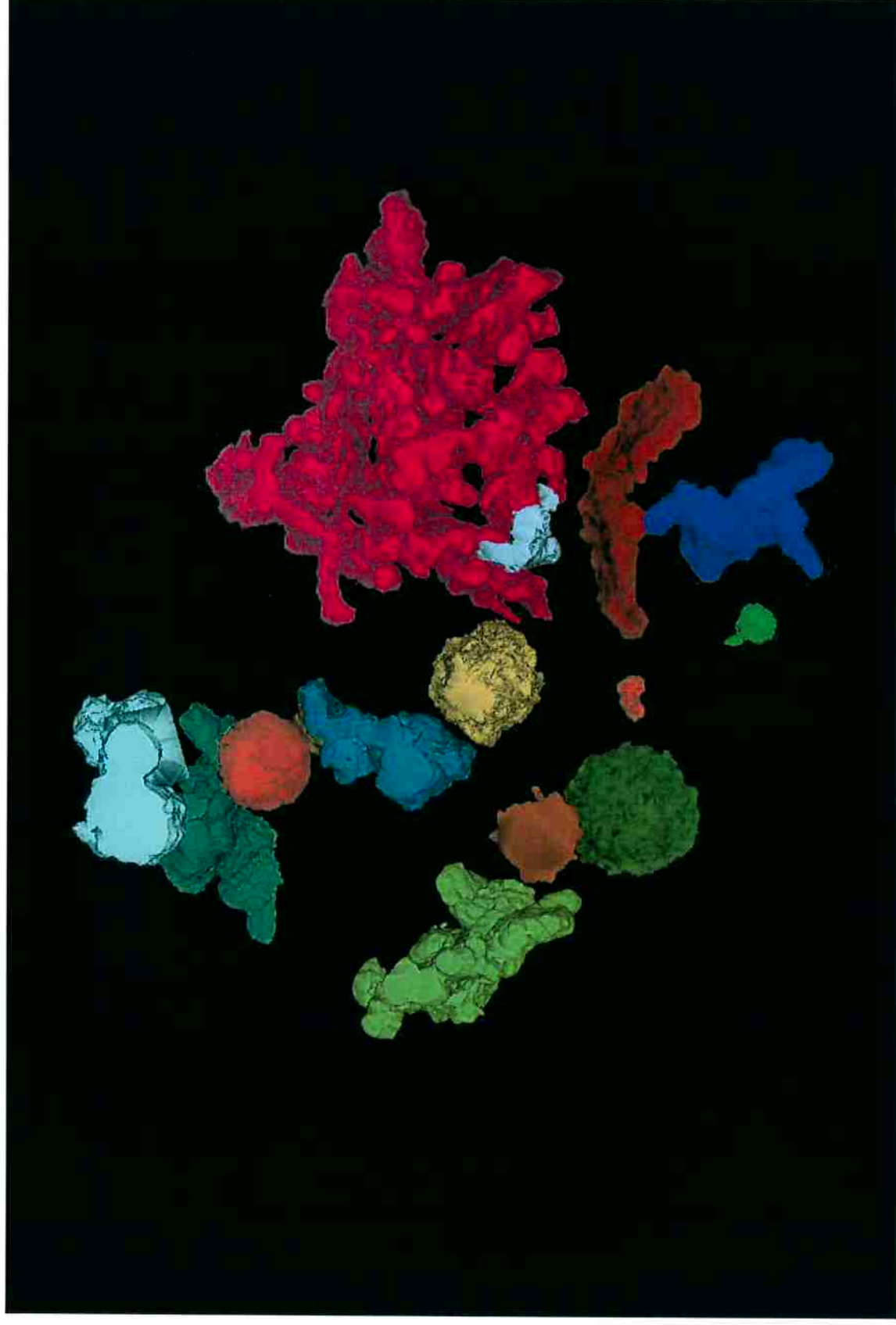


Figura 39 – Reconstrução 4 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento



Figura 40 - Reconstrução 5 da grafita compacta a partir de imagens em 200X de aumento, vistas laterais

Foi possível também nas reconstruções, a partir das fotos em 200X, observar algumas inclusões (identificar todas não foi possível). O critério para que pequenos pontos fossem considerados inclusões foi que esses pontos aparecessem em no mínimo 3 seções consecutivas (vide figura 41). Vale ressaltar que estas estruturas podem ser grafita secundária proveniente do tratamento térmico realizado.

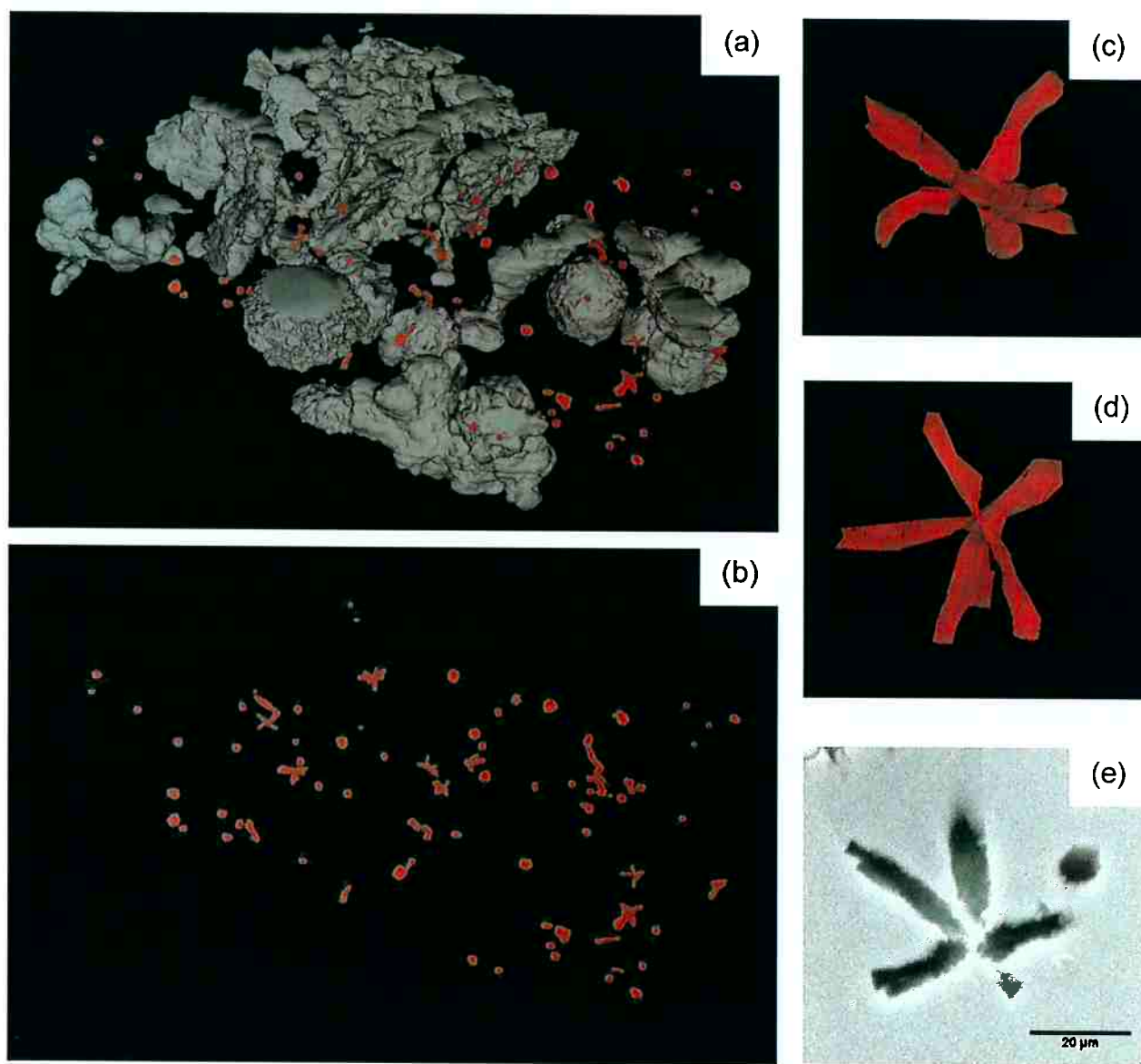


Figura 41 – Inclusões. (a) Distribuição das inclusões ao redor da grafita compacta. (b) Apenas as inclusões. (c) e (e) Detalhe de inclusão na forma de estrela. Microfotografia em MEV de uma inclusão na forma de estrela

É interessante notar as inclusões em forma de estrela e como a identificação delas é prejudicada em imagens bidimensionais. Se o plano de corte metalográfico não seccionar a inclusão como na figura 41 - e, apenas um ou mais pontos esféricos podem aparecer.

Algumas inclusões presentes possuíam ângulos mais pronunciados, entretanto a resolução da reconstrução não foi capaz de definir este detalhe.

4.1.2 DETALHES DA MORFOLOGIA

Usualmente faz-se uso de ataque profundo aliado a microscopia eletrônica de varredura, que possui uma profundidade de foco maior, para a visualização de microestruturas em 3D. No caso da grafita compacta o uso desta técnica até fez com que o nome “grafita vermicular” perdesse espaço para “grafita compacta” (1). Nas imagens bidimensionais usuais, a grafita se assemelha realmente com vermicúlos, entretanto percebeu-se que a estrutura é bem mais interconectada do que parece.

A figura 42 mostra imagens de microscopia eletrônica de varredura e FFVs submetidos a ataques profundos. É possível perceber vários dos detalhes observados nas figuras 31 a 40.

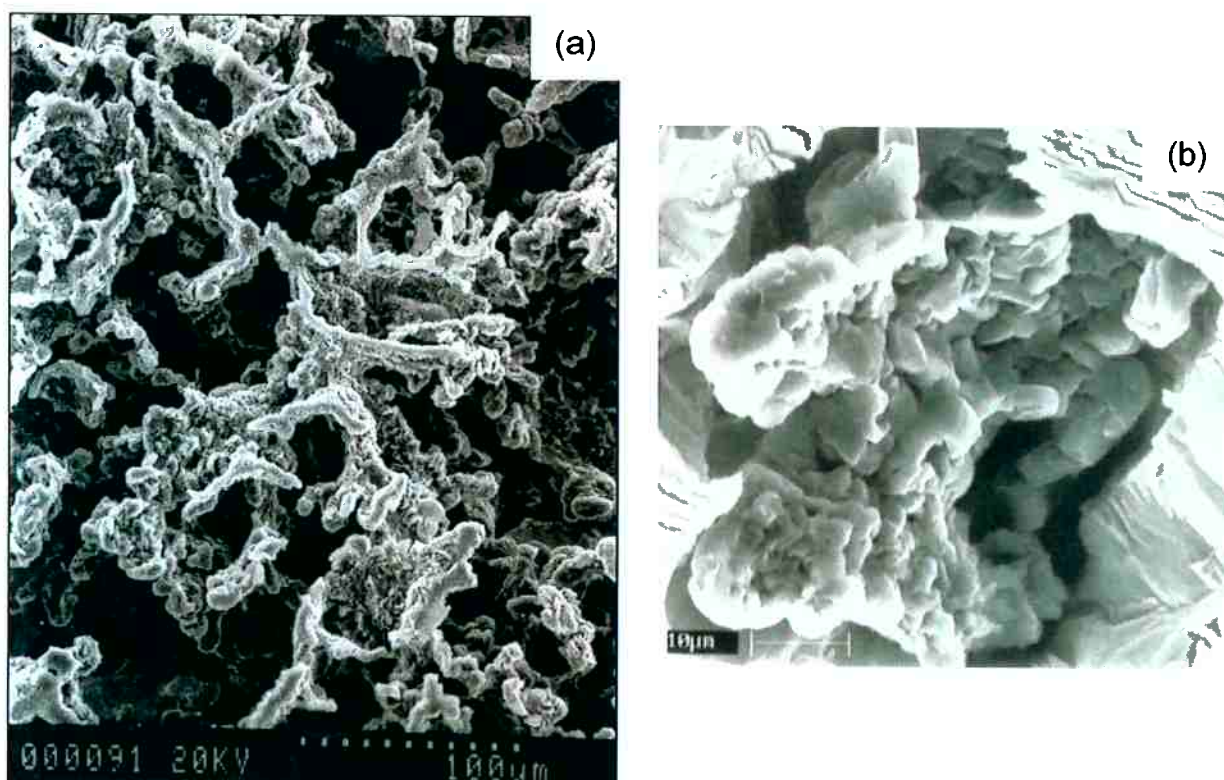


Figura 42 - Imagens de MEV da grafita vermiclar submetidas a ataque profundo. (a) ref. (41), (b) ref. (1)

Assim como todas as técnicas, o ataque profundo também tem suas limitações. Uma certa parcela de material pode se desprender da matriz, além disso,

o ângulo de observação é limitado o que impede a visualização de detalhes da interconectividade da grafita vermicular, por exemplo.

Devido ao tratamento térmico não usual imposto ao material estudado e as pequenas variações que ocorreram no formato dos precipitados fica difícil fazer considerações sobre a morfologia da grafita em FFVs utilizados pela indústria. Este também não é o foco do trabalho, entretanto pode-se apontar aqui algumas ambigüidades que as técnicas convencionais não são capazes de eliminar. (Vide figura 43)

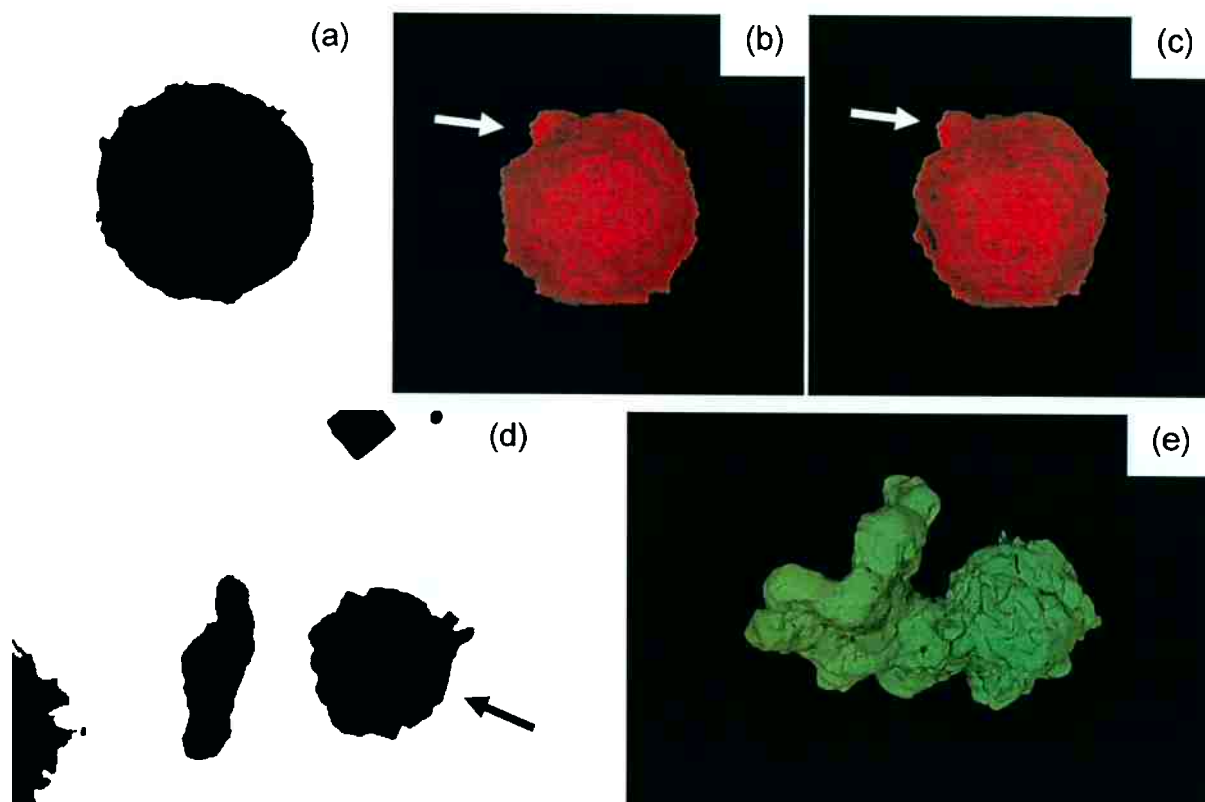


Figura 43 – Ambigüidades possíveis na morfologia da grafita. (a) e (d) Seções metalográficas, (b) e (c) reconstrução 3D em dois ângulos ligeiramente diferentes, no detalhe protuberância no nódulo, (e) reconstrução 3D mostrando a conexão do nódulo apresentado em (d)

Os ferros fundidos com grafita compacta possuem sempre uma parcela de nódulos de grafita como os do ferro fundido maleável, o que inclusive serve para caracterizar o material com um índice chamado de “grau de nodularização”. A figura 43 - a trata-se de uma das seções que foram utilizadas na reconstrução do objeto na figura 41 - b e c. Pode-se presumir pela primeira imagem que o que se observa é um

nódulo perfeito. A reconstrução mostra que o nódulo possui uma protuberância característica, o que não é encontrada nos ferros fundidos maleáveis.

Pode-se encontrar também estruturas que se assemelham a nódulos em algumas seções, e que na reconstrução estão intimamente ligados a outras formas de grafita.

Observou-se também que duas lamelas distintas de grafita podem se conectar em mais de um ponto inclusive gerando “buracos” na estrutura (figura 44).

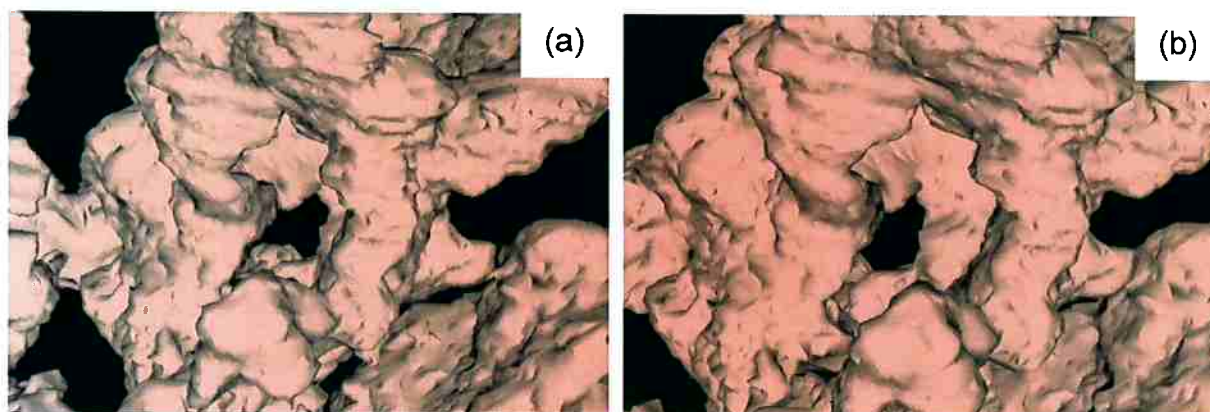


Figura 44 – Detalhes da morfologia da grafita vermicular. (a) e (b) Imagens ligeiramente anguladas entre si.

Estruturas distantes entre si em uma seção metalográfica podem estar interconectadas. A seção da figura 45 - a mostra em vermelho estruturas relativamente distantes que a reconstrução mostrou que estão interconectadas.

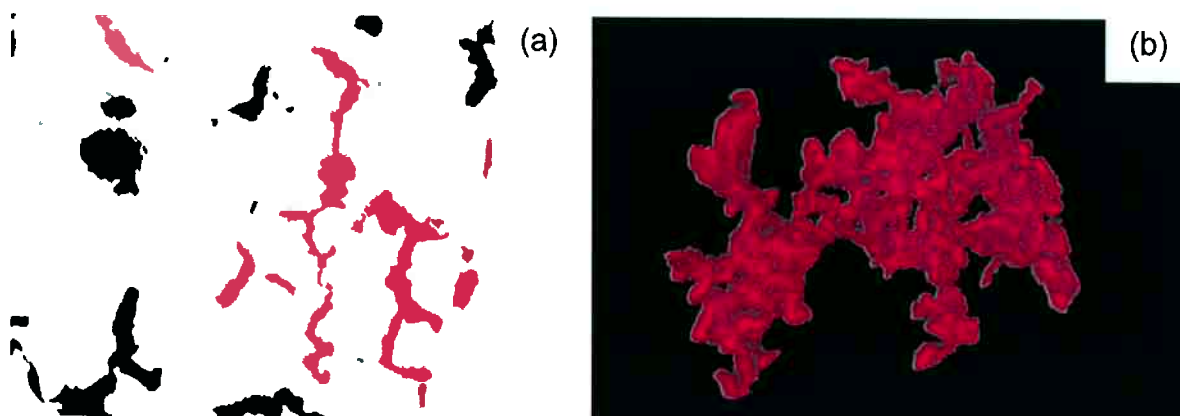


Figura 45 – Conectividade de estruturas relativamente distantes. (a) Plano metalográfico. (b) Reconstrução 3d da estrutura destacada.

Estruturas relativamente mais próximas não se mostraram conectadas, porém é importante lembrar que esta observação foi feita apenas no volume reconstruído e é provável que o grau de interconectividade das estruturas seja bem maior.

Maiores detalhes podem ser visualizados no CD-ROM em anexo.

4.1.3 DADOS QUANTITATIVOS

Uma série de dados podem ser obtidos a partir dos objetos virtuais reconstruídos. A Figura 46 exemplifica como existem discordâncias entre valores obtidos por imagens bidimensionais e tridimensionais.

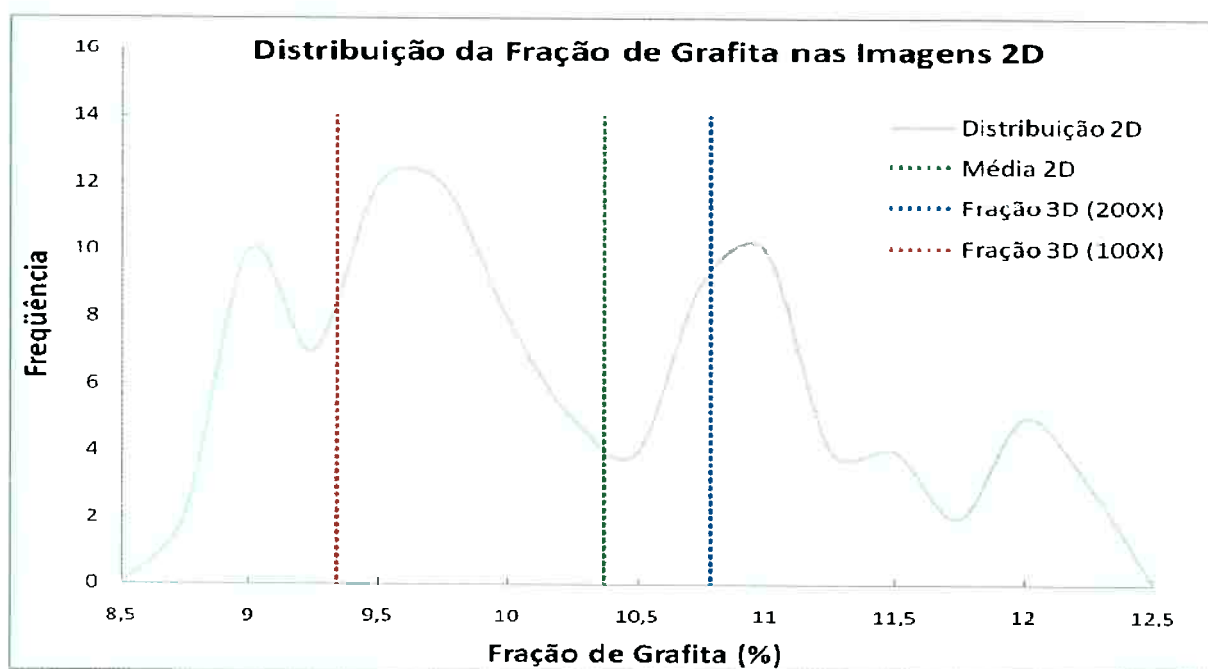


Figura 46 - Distribuição da fração de grafita calculada nas 97 seções metalográficas da reconstrução com 100X de aumento. As linhas verticais indicam a fração de grafita calculada a partir dos objetos reconstruídos e a média das frações nas seções que deram origem ao gráfico.

A fração de grafita medida a partir da reconstrução baseada nas imagens com 200X de aumento é ligeiramente maior que a fração média obtida a partir das imagens bidimensionais (tabela 3).

Tabela 3 - Fração volumétrica de grafita compacta calculada para diferentes fontes de dados

| Fração 2D * | Fração 3D 200X | Fração 3D 100X |
|-------------|----------------|----------------|
| 10.38 % | 10.78 % | 9.34 % |

* média de 97 fotos (100X de aumento)

O software fornece o volume de cada um dos objetos reconstruídos, e a fração volumétrica pode ser calculada dividindo-se o valor do volume de todos os objetos pelo volume total estudado.

No caso das imagens bidimensionais o cálculo é feito a partir do número de pixels com valor 0 (preto), nas imagens binárias, dividido pelo número total de pixels da imagem. Foi feito uso de um filtro para eliminar das fotografias partículas de dimensões menores que 7 microns e esfericidade entre 0,5 e 1.

Como em 100X de aumento tem-se uma menor resolução, o efeito foi de uma leve redução da área escura quando comparadas às imagens em 200X. Este efeito na reconstrução será discutido a diante.

A como dado meramente ilustrativo, pois não foram reconstruídas todas as inclusões, o volume dos objetos apresentados na figura 41 é de $4682\mu\text{m}^3$ que em um volume total de $6.144.000\mu\text{m}^3$ representa 0,08%.

4.2 RECONSTRUÇÃO DOS CONTORNOS DE GRÃO DO AÇO ELÉTRICO

4.2.1 VISUALIZAÇÃO 3D

Uma série de 56 imagens em aumento de 500X foi a base para a reconstrução dos grãos deste material. O volume reconstruído possui $14\mu\text{m} \times 97,5\mu\text{m} \times 92,8\mu\text{m}$.

Imagens EBSD serviram como guia para a determinação das cores de cada grão, mostrando assim a orientação cristalográfica em relação à direção de laminação.

As figuras 47 a 54 apresentam as reconstruções. A direção de laminação é perpendicular à face maior do retângulo.

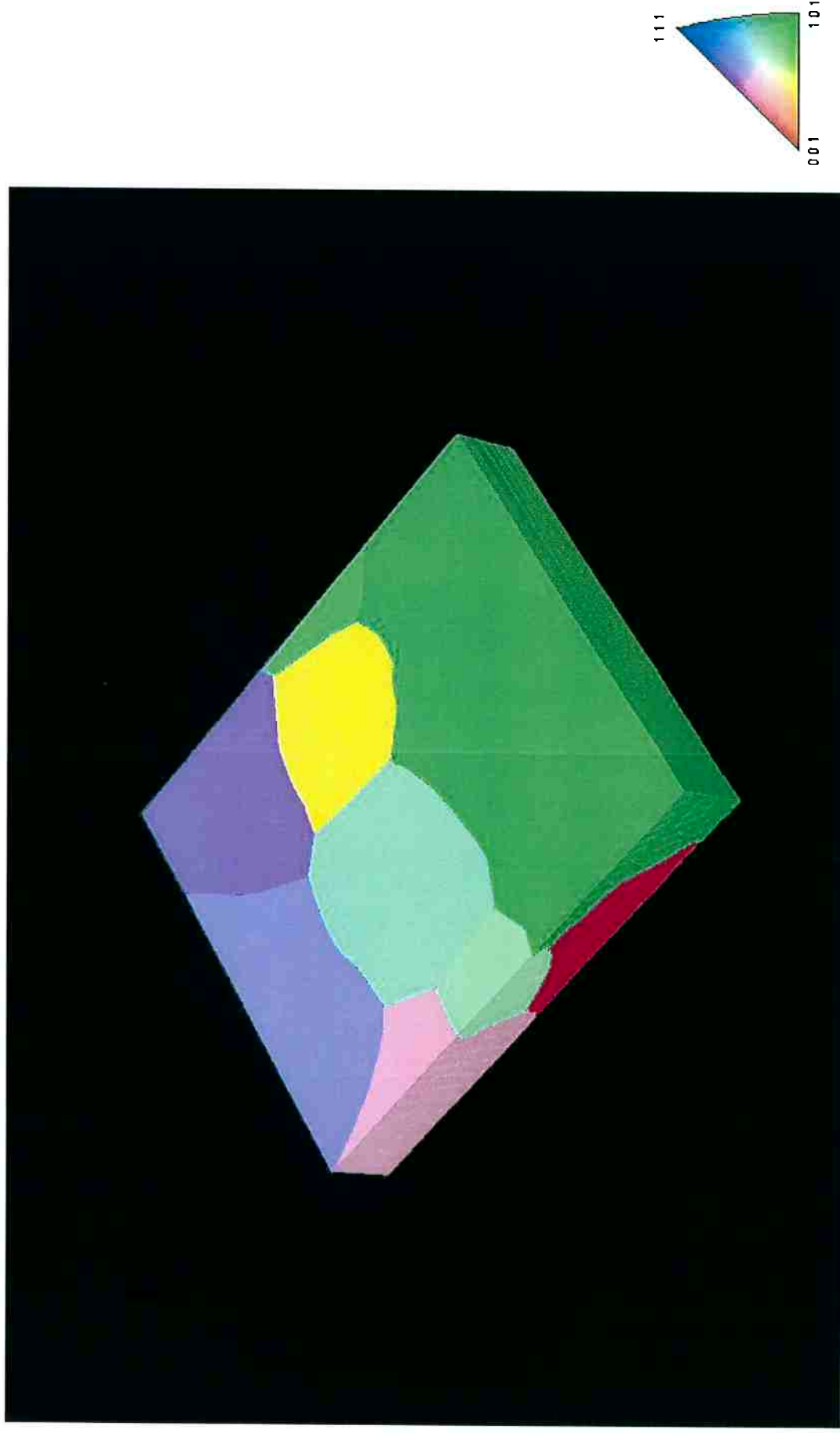


Figura 47 – Reconstrução 1 do aço elétrico.

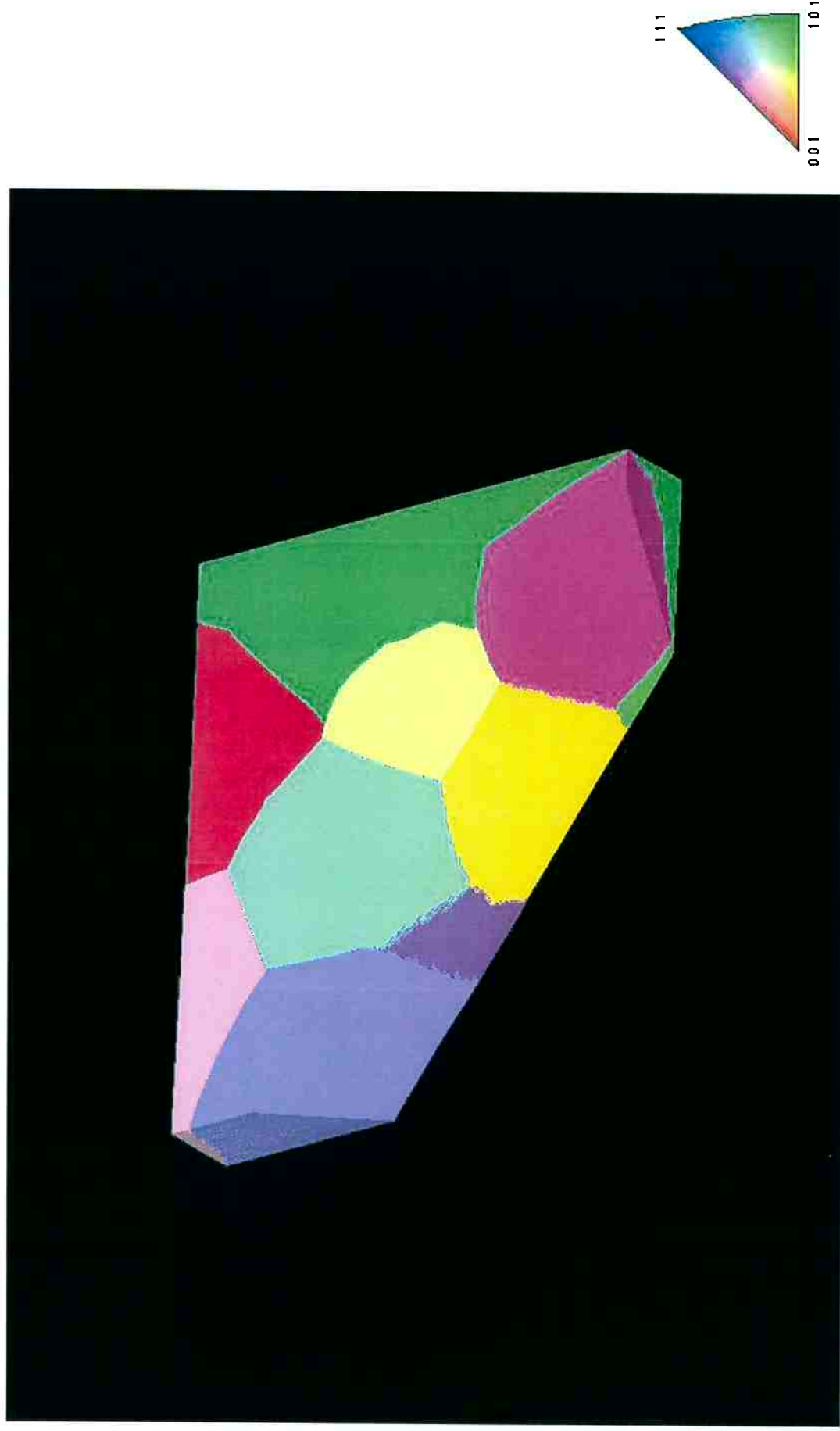


Figura 48 – Reconstrução 2 do aço elétrico.

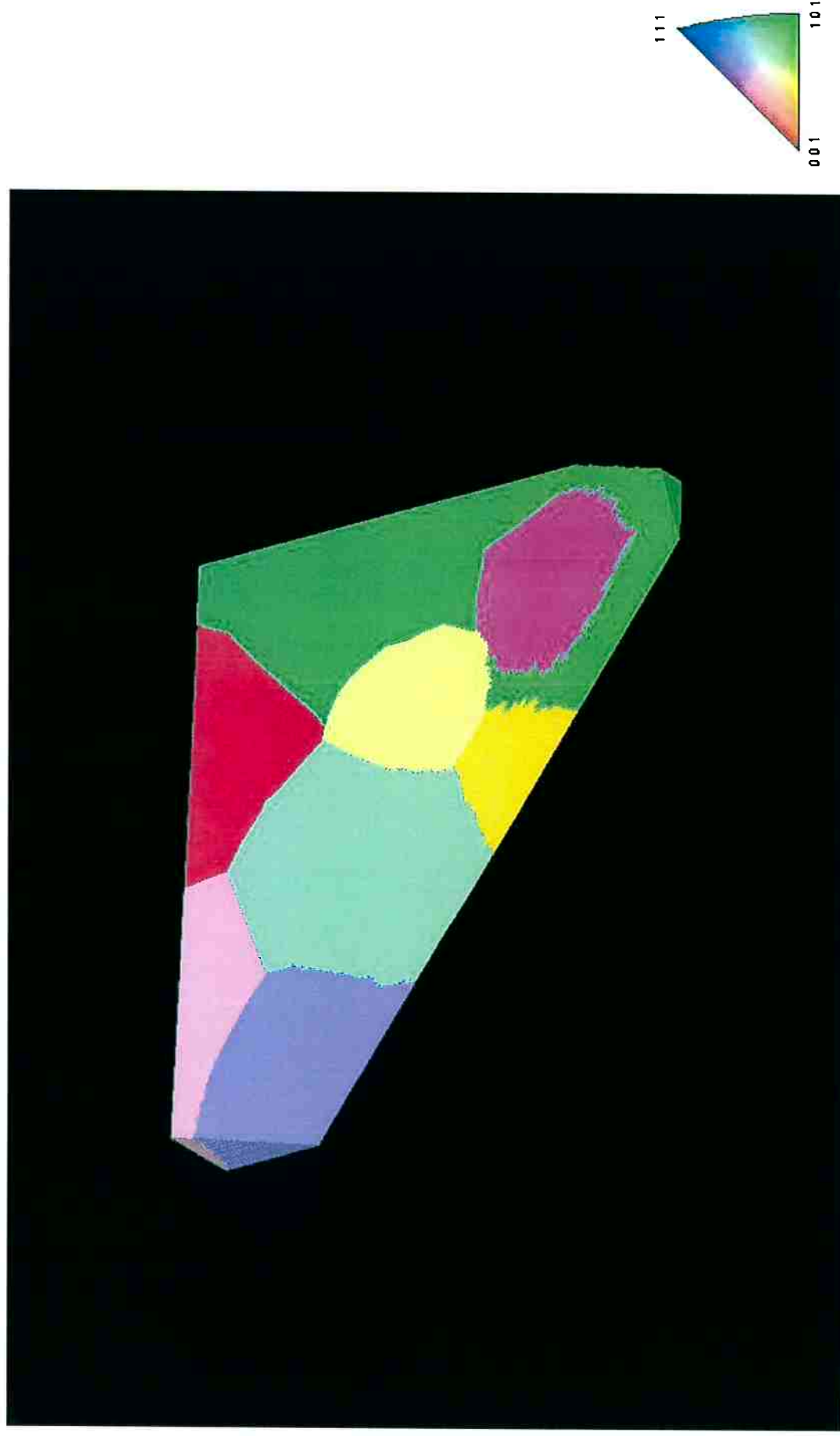


Figura 49 – Reconstrução 3 do aço elétrico.

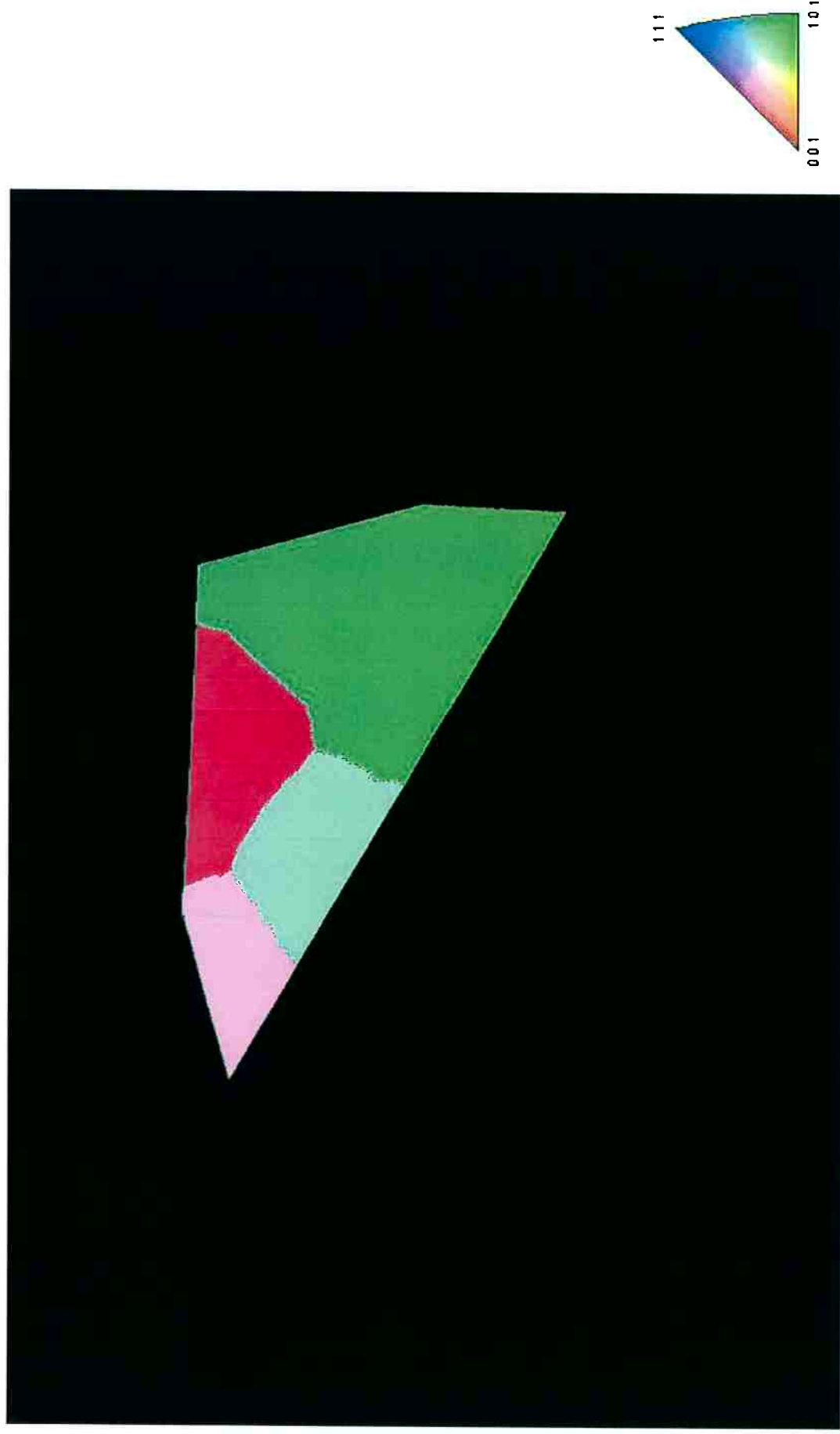


Figura 50 – Reconstrução 4 do aço elétrico.

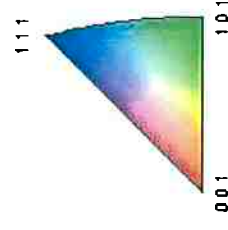
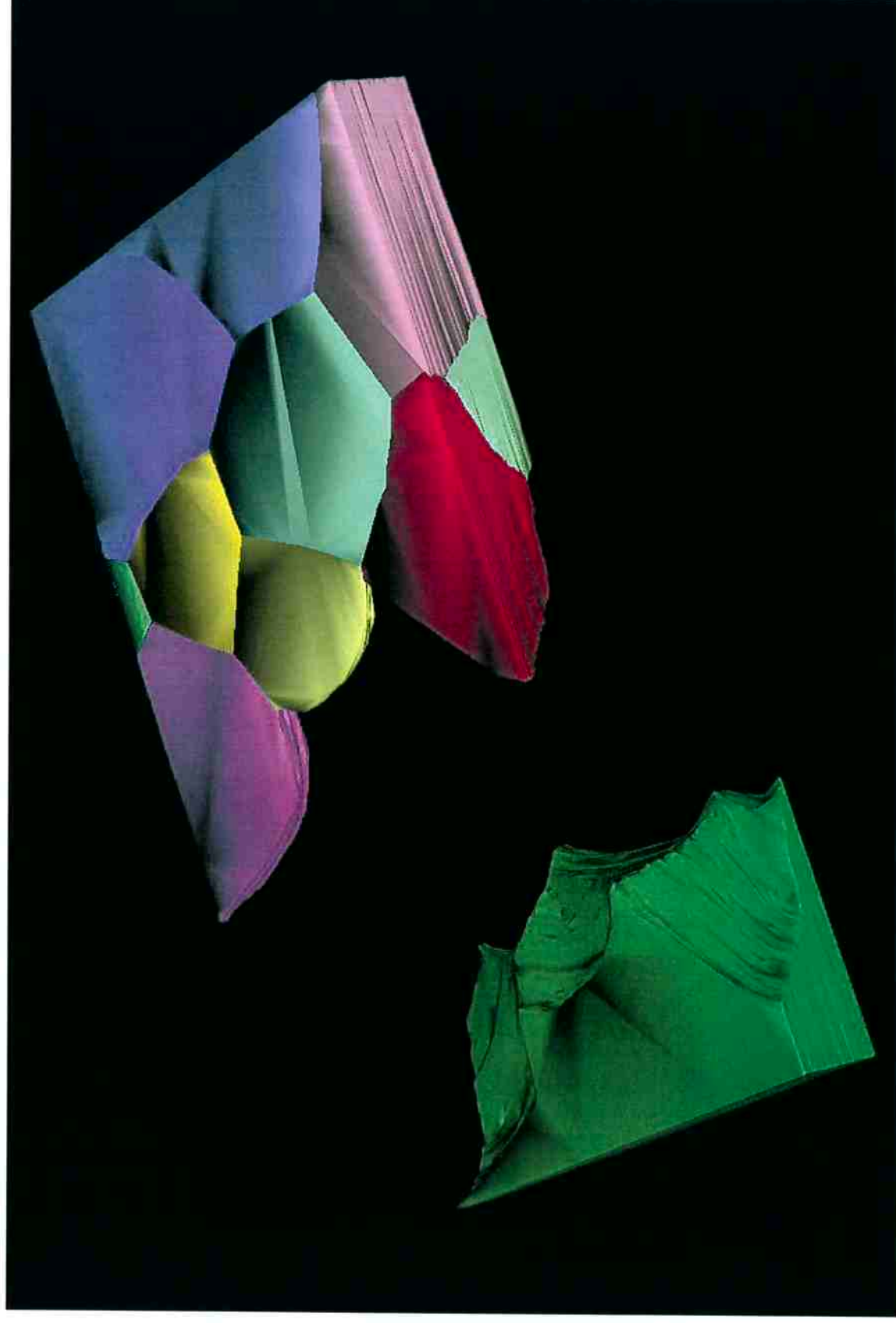


Figura 51 – Grão que apresentou crescimento anormal separado do grãos vizinhos, vista inferior.

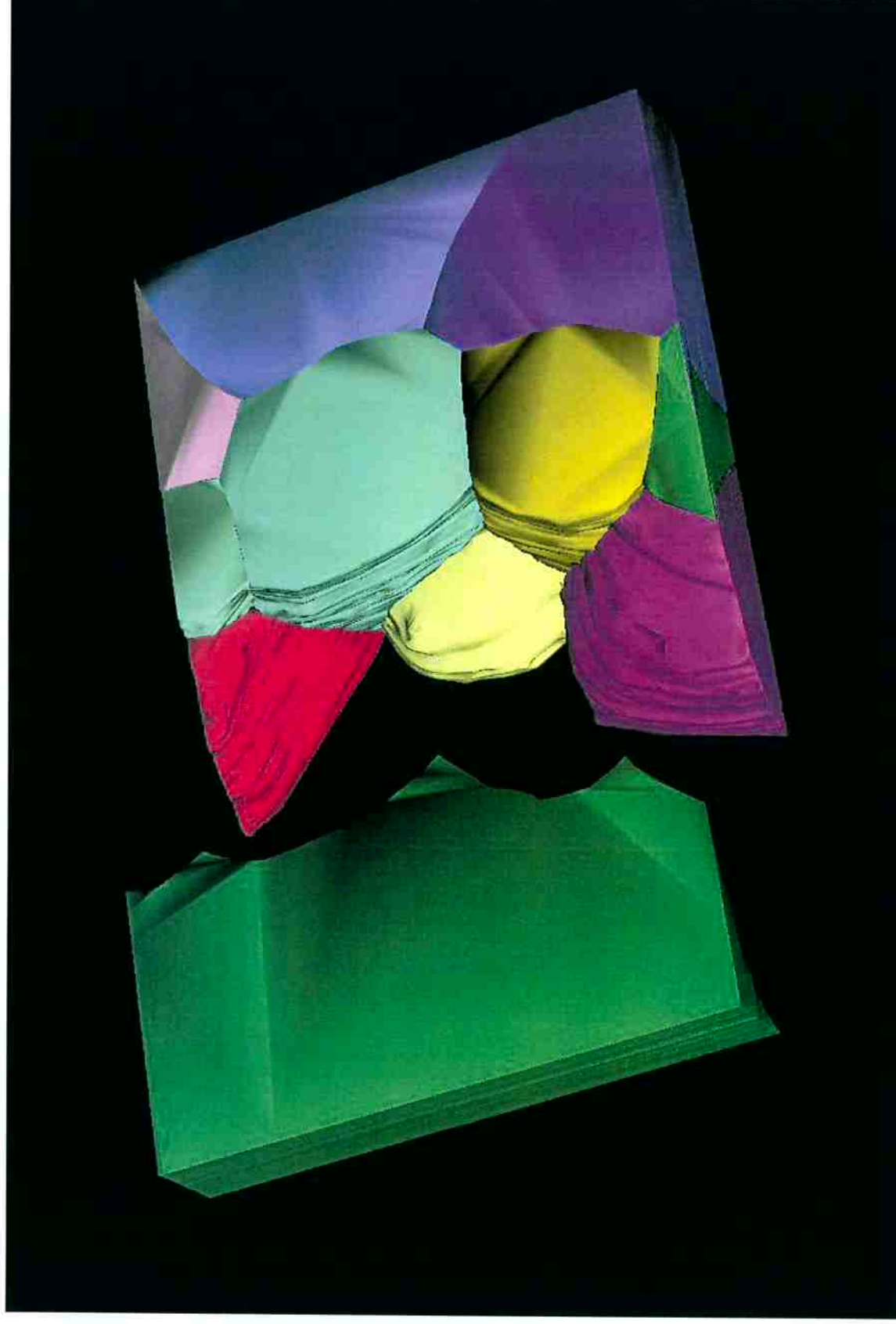


Figura 52 – Grão que apresentou crescimento anormal separado do grãos vizinhos, vista superior.



Figura 53 – Detalhe do grão com crescimento anormal.

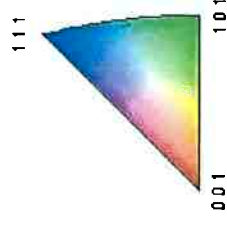
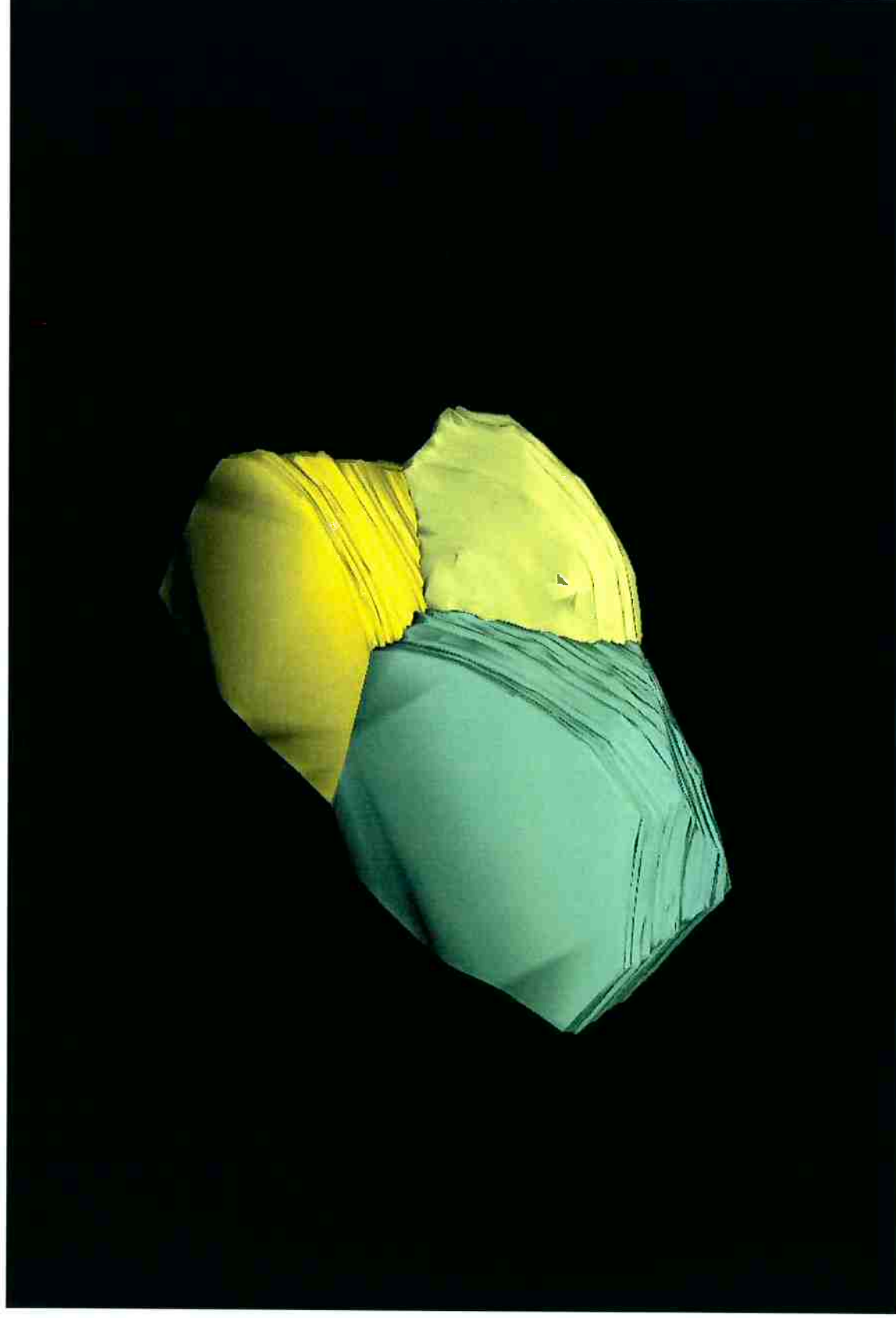


Figura 54 – Detalhe dos grãos vizinhos ao grão de crescimento anormal.

4.2.2 DETALHES DA MORFOLOGIA

A figura 55 mostra o que parece ser um ancoramento do contorno do grão que está sendo consumido pelo grão vizinho.

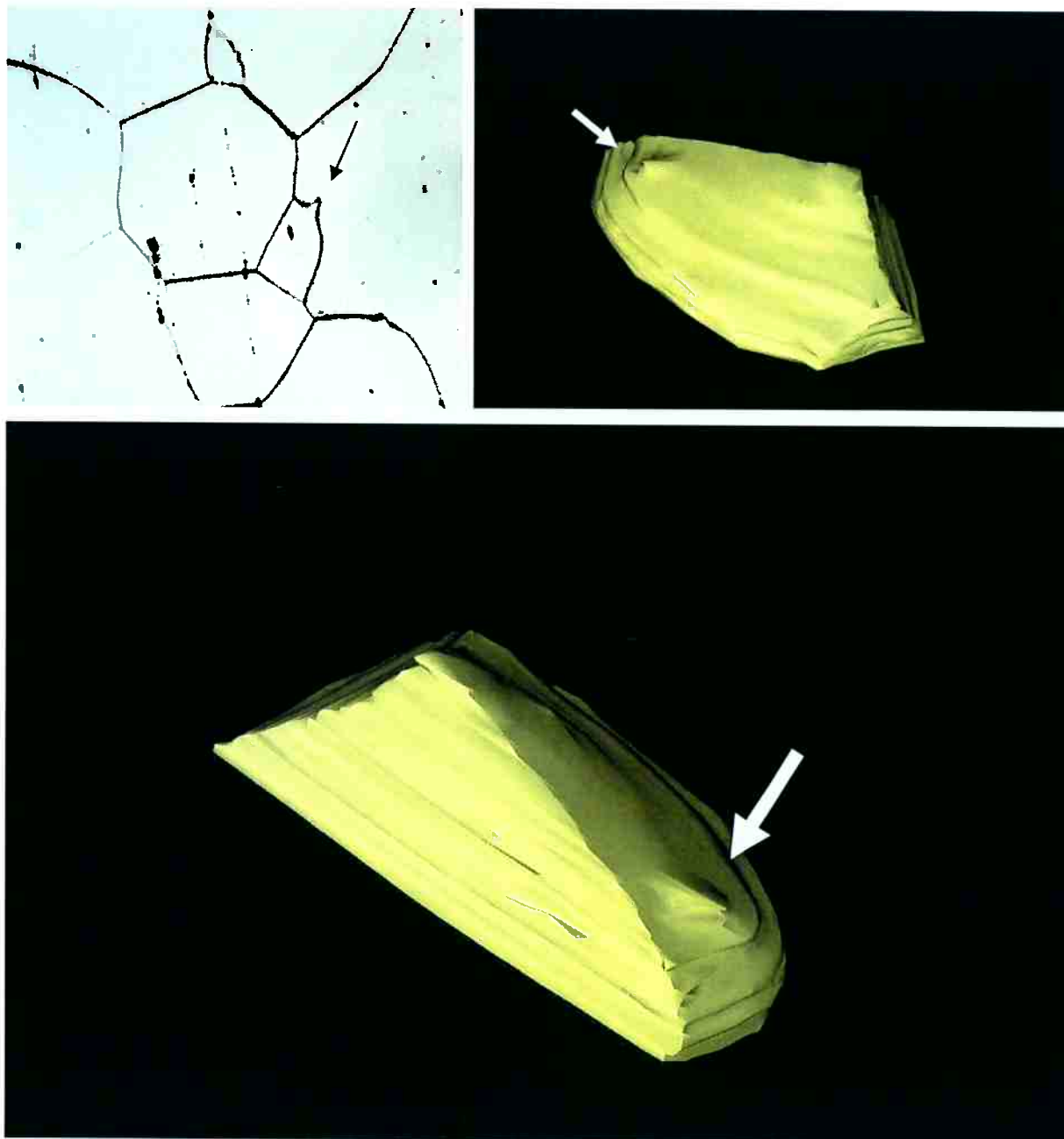


Figura 55 - Detalhe do que parece ser um ancoramento do contorno de grão.

4.3 AVALIAÇÃO DA TÉCNICA

4.3.1 MARCAS DE DUREZA VICKERS

Foi considerado no início deste trabalho a hipótese de que a geometria das identações utilizadas para o cálculo do espaçamento entre as seções metalográficas é um negativo perfeito do indentador. Calcular a resposta elástica envolvida na deformação plástica induzida pelo ensaio de microdureza é uma tarefa bastante complexa. O software MeX é capaz de gerar um perfil topográfico da região reconstruída onde se pode realizar medidas de comprimento e ângulos. A figura 56 mostra a reconstrução de uma indentação na matriz ferrítica do ferro fundido com grafita compacta com diagonal de 32 μm .

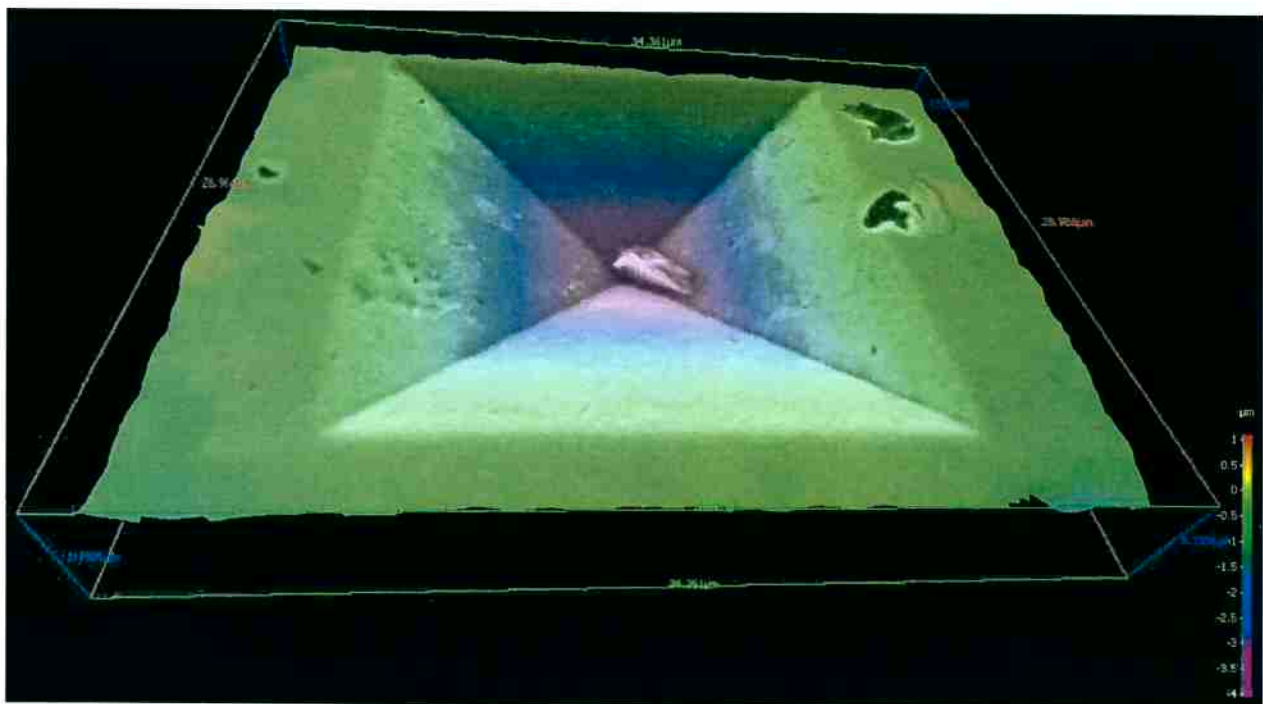


Figura 56 – Reconstrução da geometria da indentação Vickers.

A figura 57 - b mostra o perfil ao longo da linha em 57 - a. O ângulo calculado entre as duas faces é de 138°, bastante próximo do ângulo de 136° da geometria Vickers conforme a norma ASTM E384 que especifica o instrumental e as condições dos ensaios de microdureza.

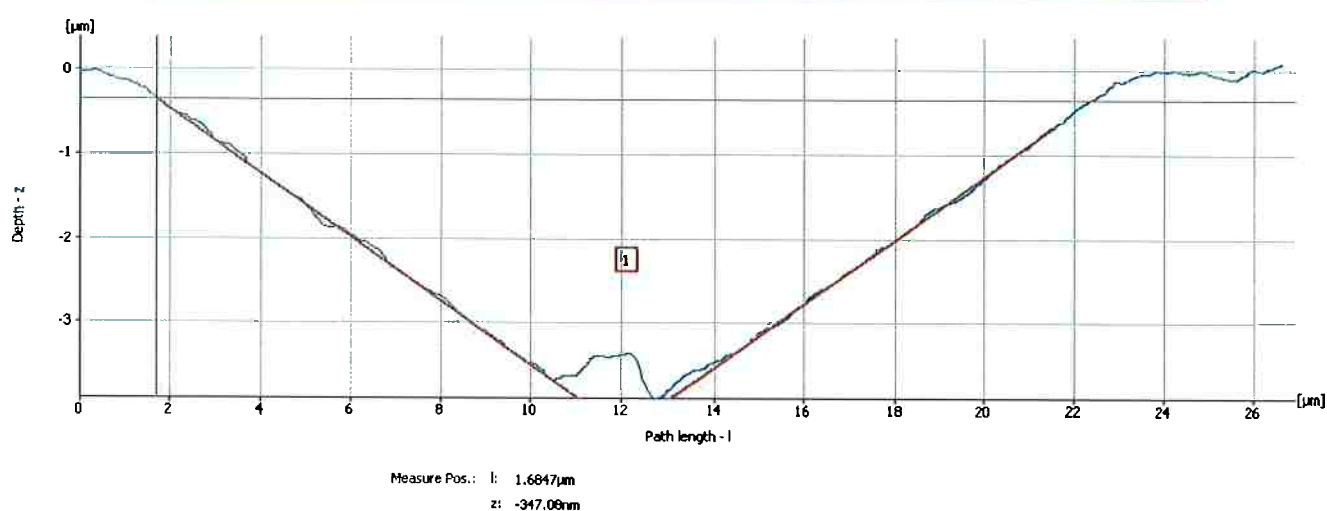
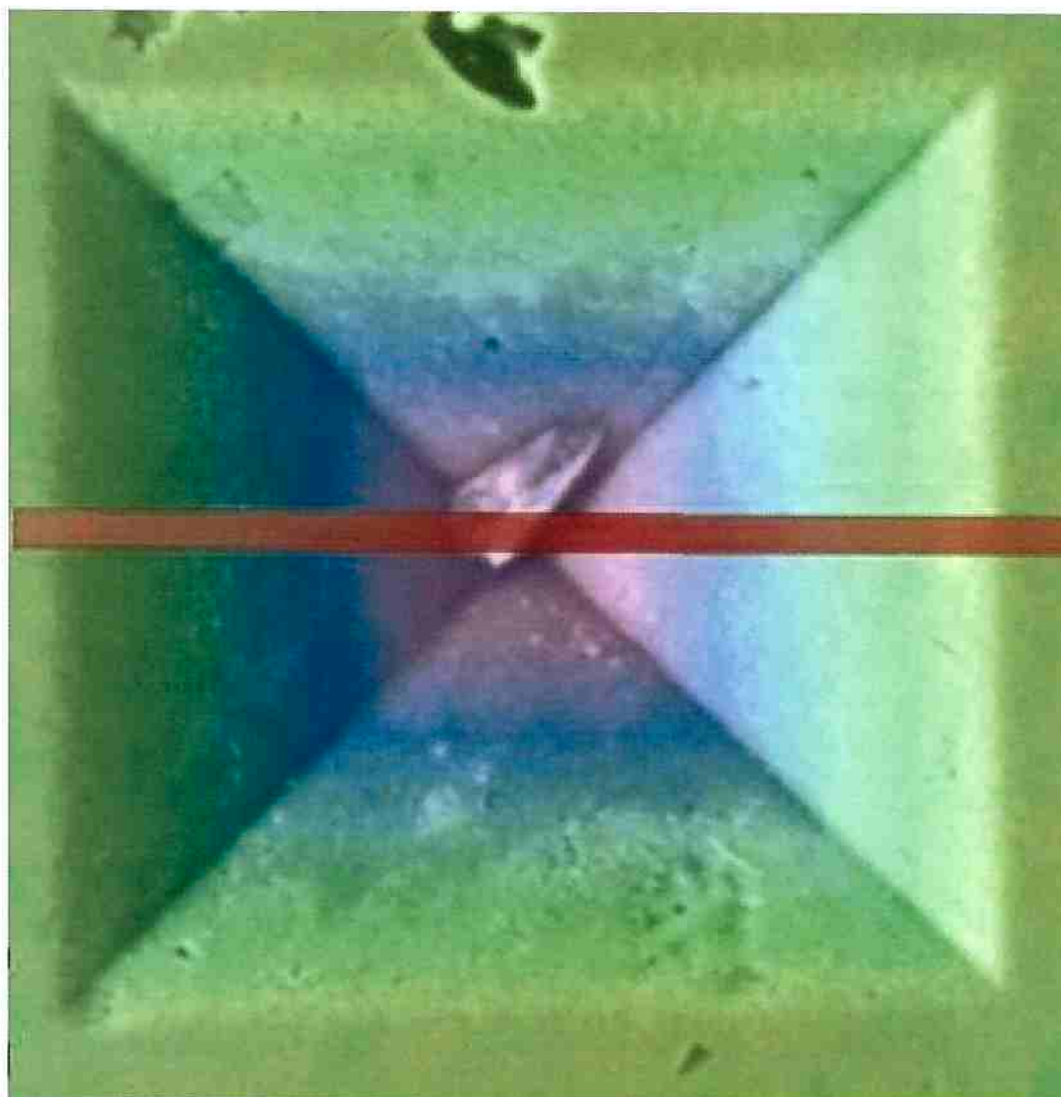


Figura 57 – Perfil topográfico da indentação vickers.

A pequena variação do ângulo torna inconclusiva a investigação. A variação apresentada pode ser devido a uma resposta elástica do material, uma pequena distorção na geometria do identador ou erro do software de reconstrução.

4.3.2 EFEITO DO AUMENTO DAS IMAGENS NA RECONSTRUÇÃO

A figura 58 mostra um quadro comparativo onde está apresentado a mesma estrutura reconstruída a partir de fotos com aumentos distintos.

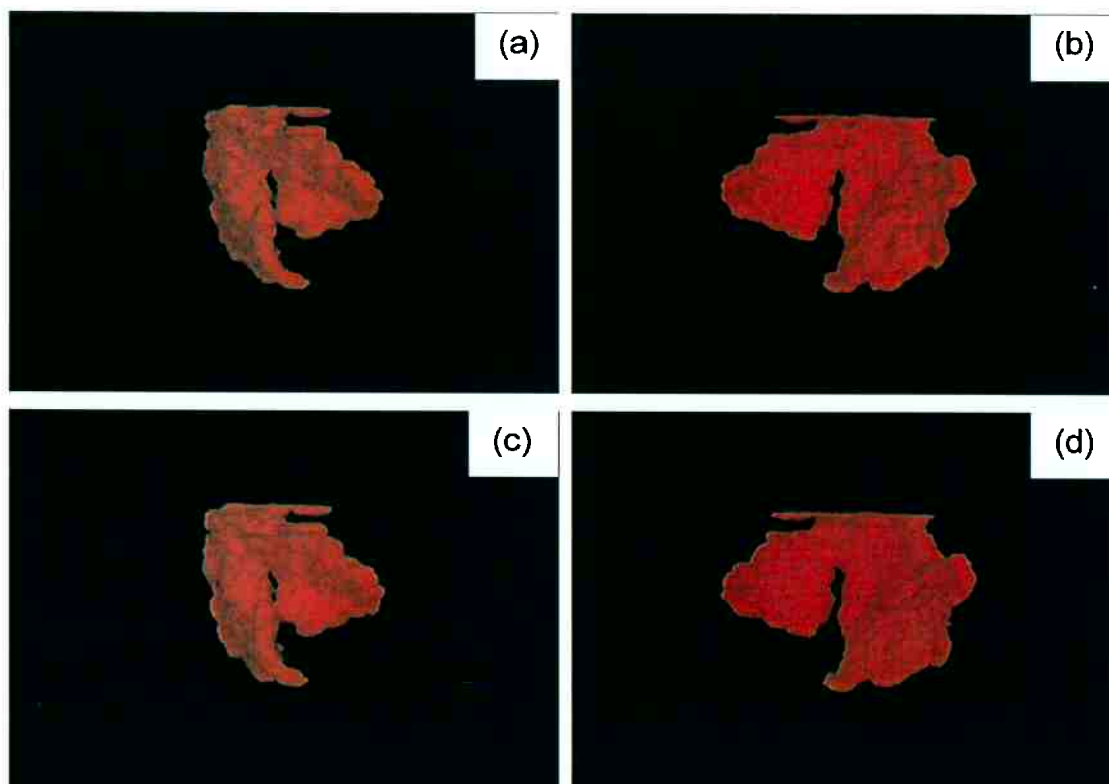


Figura 58 – Comparação entre reconstruções obtidas por fotos de diferentes aumentos. (a) e (b) aumento de 200X, (c) e (d) aumento de 100X

Entre as figuras 58 – a e c é possível notar uma leve diferença. Apenas ao manipular as imagens percebe-se mais diferenças. De uma forma geral, notou-se que as distorções do alinhamento das imagens são mais perceptíveis na sequência de fotos em 200X, e não houve uma melhoria significativa na resolução das imagens, salvo o caso das inclusões, normalmente menores que 7 microns.

O volume do objeto nas figuras 56 - a e b é de $56712\mu\text{m}^3$ e em c e d é de $52328\mu\text{m}^3$, uma diferença de 7,7%. Isto pode explicar o porque da fração volumétrica calculada para a reconstrução em 100X foi menor que em 200X.

Estas diferenças podem estar associadas aos parâmetros de iluminação do microscópio e/ou a configuração do software de captura das imagens.

4.3.3 CALIBRAÇÃO DA ROTINA DE POLIMENTO

Devido a um erro cometido no início do trabalho com a grafita compacta, os resultados das espessuras das seções estavam distorcidas para valores maiores que o real. Isto implicou em um passo menor que o esperado e em um volume reconstruído menor. Além disso, houve um momento em que a taxa de remoção do material caiu drasticamente. Suspeita-se do desgaste do tecido de polimento e também dos abrasivos.

O problema não foi identificado logo de imediato e mais de 30 seções foram realizadas e fotografadas. A figura 59 mostra a espessura removida acumulada nas operações de polimento do ferro fundido com grafita compacta para as duas regiões. As medidas das diagonais foram coletadas em duas regiões distantes entre si em aproximadamente 800 μm .

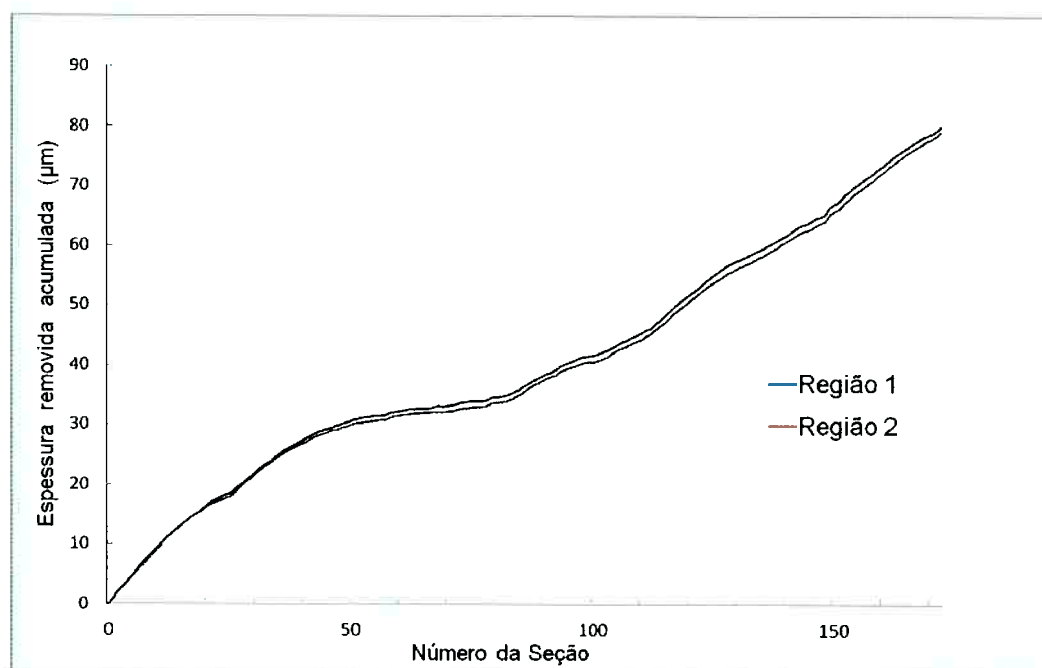


Figura 59 - Espessura removida acumulada nas operações de polimento

Nota-se no gráfico a queda da taxa de remoção entre as seções 50 e 80. De fato, a espessura removida nestes passes foi de aproximadamente 5,5 μm . É possível observar o pequeno descompasso entre as duas regiões no gráfico da figura 59. A figura 60 mostra como variou este descompasso ao longo das 175 seções.

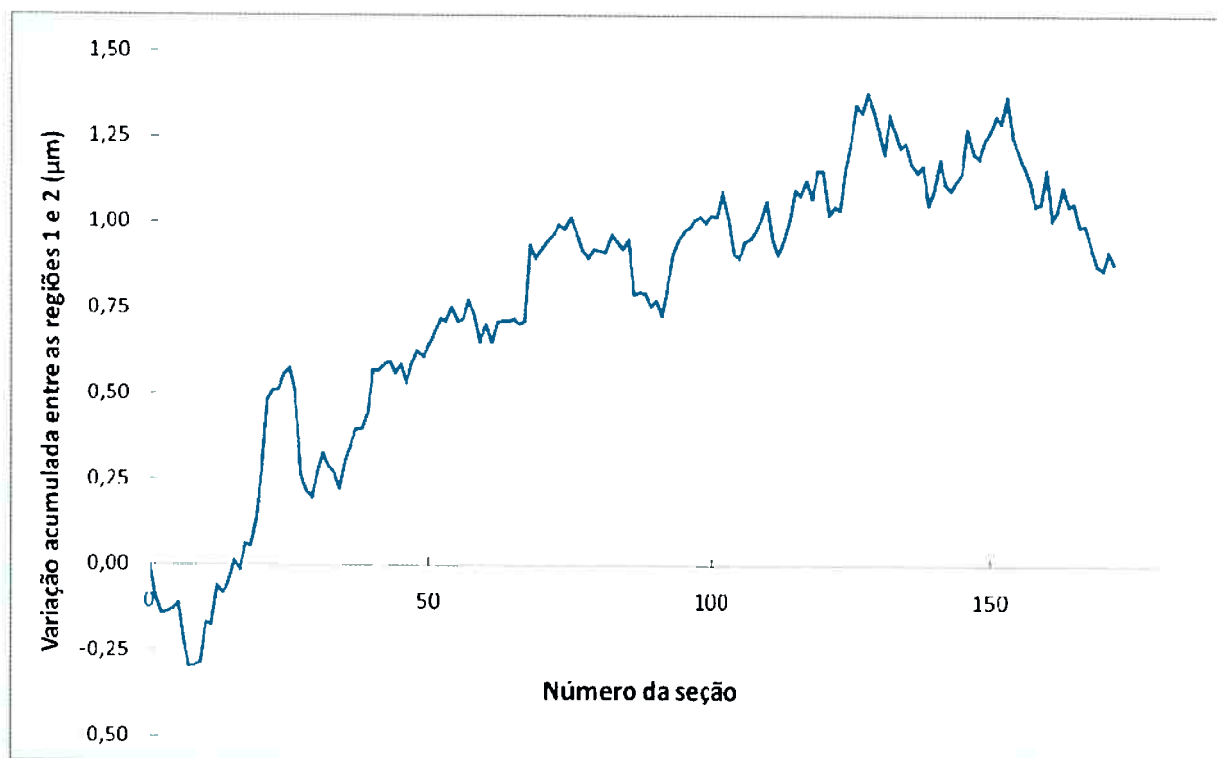


Figura 60 – Variação acumulada da espessura entre as duas regiões de medidas das diagonais das marcas de identificação.

Este efeito indica uma pequena inclinação ou abaulamento da superfície de polimento.

5 CONCLUSÕES

O surgimento de ferramentas computacionais mais avançadas, tanto em hardware como em software fazem com que a tarefa de reconstrução de microestruturas fique cada vez mais acessível. Isto chamou a atenção de diversos pesquisadores e a técnica de seccionamento serial aliada a ferramentas de CAD ganha espaço a cada dia nas publicações voltadas a cientistas de materiais.

O processo de seccionamento serial é complexo e bastante trabalhoso. Soluções que reduzam ou automatizem o trabalho repetitivo, como os scripts implementado neste estudo, são bem vindas.

Este trabalho mostrou que é possível gerar reconstruções em 3D de microestruturas a um custo baixo, inclusive com uso de softwares livres.

Obter imagens com alta qualidade, isto é, com o polimento, ataque e secagem muito bem feitos e padronizados, além de garantir a qualidade do trabalho facilita as etapas posteriores de tratamento das imagens e obtenção do contornos.

6 SUGESTÕES PRA TRABALHOS FUTUROS

As reconstruções obtidas neste trabalho e disponíveis em formato VRML no CD em anexo podem servir para simulações de elementos finitos. Um ponto particularmente interessante é a simulação de transferência de calor no ferro fundido vermicular e a obtenção da condutividade térmica específica do material.

Imagens das reconstruções dos contornos de grãos recozidos combinados com análises EBSD podem ser tratadas e a exemplo de Rowenhost (22), obter-se a figura com as cores chave das orientações cristalográficas em relação à direção normal do contorno de grão. Este tipo de análise poderia mostrar pares de direções nas interfaces em que o crescimento do grão durante o recozimento têm preferência.

A produtividade do processo de polimento serial é limitada pela etapa de manipulação da amostra. A automatização mecânica pode contribuir enormemente para melhorar o rendimento. Máquinas voltadas para o polimento serial ainda não fazem parte do mercado de suprimentos metalográficos. Parecem ser várias as complexidades de um projeto funcional de um equipamento como este.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM Metals Handbook, Vol9. 2002.
2. HOLM, E.; DUXBURY, P. Three-dimensional Materials Science. Scripta Materialia 54, p 1035-1040, 2006.
3. CALLISTER, W.D. Material Science and Engineering; an Introduction, 2ª edição, John Wiley& Sons Inc, 1991.
4. KRAL, M.; MANGAN, M; SPANOS, G.; ROSEMBERG, R. Three-dimensional Analysis of Microstructures. Materials Characterization 45, p 17-23, 2000.
5. SINGH, H.; GOKHALE, A. Visualization of Three-Dimensional Microstructures. Materials Characterization 54, p 21– 29, 2005
6. SPOWART, J. Automated Serial Sectioning for 3-D analysis of Microstructures, Scripta Materialia 55, 5-10, 2006.
7. ALKEMPER, J.; VOOHEES, P. Quantitative Serial Sectioning Analysis, Journal of Microscopy 201, p 388-394, 2001.
8. KREMER, J.; MASTRONARDE, D.; MCINTOSH. J. Computer Visualization of Three-Dimensional Image Data Using IMOD. Journal of Structural Biology 116, p71-76, 1996.
9. FIALA, J. C. Reconstruct: a Free Editor for Serial Section Microscopy. Journal of Microscopy 218, p 52-61. 2005.
10. HULL, D.; MCCAMMOND, D.; HOEPPNER, D.; HELLIER, W. Titanium Prior-Beta Grain Volume Distribution by Quantitative Serial Sectioning Techniques, Materials Characterization 26, p 63-71, 1991.
11. MANGAN, M.; LAUREN, P.; SHIFLET, G. Three-Dimensional Reconstruction of Widmanstätten Plates in Fe-12.3Mn-0.8C. Journal of Microscopy 188, p 36-41, 1997.
12. DENIS, E.; CÉCILE BARAT, C.; JEULIN, D.; DUCOTTET, C. 3D Complex Shape Characterization by Statistical Analysis: Application to Aluminium Alloys, Materials Characterization 59, p 338-343, 2008.
13. TEWARI, A.; GOKHALE, A. Estimation of Three-Dimensional Grain Size Distribution From Microstructural Serial Sections, Materials Characterization 46, p 329-335, 2001.

14. KRAL, M.; SPANOS, G. *Acta Materialia* 47, p 7-11, 1999.
15. HUNG, C.; SPANOS, G.; ROSEMBERG, R.; KRAL, M. Three-Dimensional Observations of Proeutectoid Cementite Precipitates as Short Isothermal Transformation Times. *Acta Materialia* 50, p3781-3788, 2002.
16. YOKOMIZO, T.; ENOMOTO, M.; UMEZAWA, O.; SPANOS, G.; ROSEMBERG, R.; Three-Dimensional distribution, Morphology, and Nucleation Site of Intragranular Ferrite Formed in Association with Inclusions. *Materials Science and Engineering A344*, p 261-267, 2003.
17. LEWIS, A.; BINGERT, J.; ROWENHORST, D.; Two and Three-Dimensional Microstructural Characterization of a Super-Austenitic Stainless Steel. *Materials Science and Engineering A418*, p 11-18, 2006.
18. WU, K. Three-Dimensional Analysis of Acicular Ferrite in a Low-Carbon Steel Containing Titanium, *Scripta Materialia* 54, p 569-574, 2006.
19. GHOSH, S.; LI, M.; MOORTHY, S.; LEE, K. Microstructural Characterization, Meso-Scale Modeling and Multiple-Scale Analysis of Discretely Reinforced Materials. *Materials Science and Engineering A249*, p 62-70, 1998.
20. LEE, S.; GOKHALE, A.; SREERANGANTHAN, A. Reconstruction and Visualization of Complex 3D Pore Morphologies in a High-Pressure Die-Cast Magnesium Alloy. *Materials Science and Engineering A427*, p 92-98, 2006.
21. MARUYAMA, B.; et al. A New Technique for Obtaining Three-Dimensional Structures in Pitch-Based Carbon Foams, *Scripta Materialia* 54, p 1709-1713, 2006.
22. ROWENHORST, D.; GUPTA, A. 3D Crystallographic and Morphological Analysis of Coarse Martensite: Combining EBSD and Serial Sectioning. *Scripta Materialia* 55, p 11-16, 2006
23. LIEBERMAN, S. GOKHALE, A. Reconstruction of Three-Dimensional Microstructures of TiB Phase in a Powder Metallurgy Titanium Alloy Using Montage Serial Sectioning. *Scripta Materialia* 55, p 63-68, 2006
24. DUDEK, M.; CHAWLA, N. Three-Dimensional (3D) Microstructure Visualization of LaSn₃ Intermetallics in a Novel Sn-Rich Rare-Earth-Containing Solder. *Materials Characterization* 59, p 1364-1368, 2008

25. KUIJPERS, N.; TIREL, J.; Quantification of the Evolution of the 3D Intermetallic Structure in a 6005A Aluminium Alloy During a Homogenisation Treatment, *Materials Characterization* 48, p 379-392, 2002.
26. WUNSCH, B.; CHAWLA, N. Serial Sectioning for 3D Visualization and Modeling of SiC Particle Reinforced Aluminium Composites. TMS Outstanding Student Paper, 2003.
27. SIDHU, R.; CHAWLA, N. Three-Dimensional (3D) Visualization and Microstructure-Based Modeling of Deformation in a Sn-Rich Solder, *Scripta Materialia* 54, p 1627-1631, 2006.
28. DINNIS, C.; DAHLE, A. Three-Dimensional Analysis of Eutectic grains in Hypoeutectic Al–Si Alloys, *Materials Science and Engineering A392*, p 440-448, 2005.
29. KO, K.; PARK, J. Morphological Evidence that Goss Abnormally Growing Grains Grow by Triple Junction Wetting During Secondary Recrystallization of Fe–3% Si Steel, *Scripta Materialia* 59, p 764-767. 2008.
30. CONTIERI, R.; RIOS, C. Growth and Three-Dimensional Analysis of a Nb–Al–Ni ternary Eutectic, *Materials Characterization* 59, p 693-699, 2008.
31. LASAGNI, F.; LASAGNI, A. Three-Dimensional Characterization of ‘As-Cast’ and Solution-Treated Si12(Sr) Alloys by High-Resolution FIB Tomography. *Acta materialia* 55, p 3875-3882, 2007.
32. KEEHAN, E.; KARLSSON, L. Three-Dimensional Analysis of Coalesced Bainite Using Focused Ion Beam Tomography. *Materials Characterization* 59, p 877-882, 2008.
33. PETROV, R.; GARCIA, O. Three Dimensional Microstructure–Microtexture Characterization of Pipeline Steel. *Materials Science Forum* 550, p 625-630, 2007.
34. GROEBER, M.; HALEY, B. 3D Reconstruction and Characterization of Polycrystalline Microstructures Using a FIB–SEM System. *Materials Characterization* 57, p 259-273, 2006.
35. LEWIS, A.; GELMACHER, A. Image-Based Modeling of the Response of Experimental 3D Microstructures to Mechanical Loading. *Scripta Materialia* 55, p 81-85, 2006.

36. ASTM Standard E384, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, 2008.
37. ASM Metals Handbook, Vol 4. 2002.
38. GUESSER, L. Ferro Fundido com Grafita Compacta, Metalurgia & Materiais, p 403-405, 2002
39. MARQUES, E. Reconstrução Tridimensional de Superfícies Metálicas Utilizando O Software Mex, Trabalho de Formatura, PMT-EPUSP, 2008. Trabalho não Publicado.
40. BOISSONNAT, J. Shape Reconstruction from Planar Cross Sections. Computer Vision, Graphics, and Image Processing 4, p 41-29, 1988.
41. www.daros.se/technical/images (aceso em 11/11/2008)

8 ANEXOS

8.1 *SCRIPTS AUTO HOT KEY*

8.1.1 CAPTURA DAS IMAGENS NO SOFTWARE MICROMETRICS SE

```
;
; AutoHotkey Version: 1.x
; Language:    English
; Platform:    Win9x/NT
;
```

#NoEnv ; Recommended for performance and compatibility with future AutoHotkey releases.

SendMode Input ; Recommended for new scripts due to its superior speed and reliability.

SetWorkingDir %A_ScriptDir% ; Ensures a consistent starting directory.

```
passo = 1
```

```
i1 = 1.2
```

```
i2 = 2
```

```
i3 = 3
```

```
i4 = 4.2
```

```
#n::
```

```
inputbox, passo, Passo, Digite o passo atual,,,,,,222,%passo%
```

```
MsgBox, 4, , Capturar 100x? o passo atual é %passo%
```

```
winactivate, Micrometrics SE Premium
```

```
MouseClick, left, 189, 206
```


Sleep, 600

MouseClick, left, 129, 366

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, .

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
elétrico\100x\%passo%{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar 200x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 101, 379

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
étrico\200x\%passo%\{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar 500x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 103, 393

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
étrico\500x\%passo%\{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar identificação 1 500x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 103, 393

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
elétrico\identações\%passo% - %i1%{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar identificação 2 500x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 103, 393

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
elétrico\identações\%passo% - %i2%{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar identificação 3 500x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 103, 393

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics
SE Premium - Captured-,

WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,

Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}

sleep, 200

Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço
elétrico\identações\%passo% - %i3%{ENTER}

sleep, 1000

MsgBox, 4, , Capturar identificação 4 500x? o passo atual é %passo%

winactivate, Micrometrics SE Premium

MouseClick, left, 189, 206

Sleep, 600

MouseClick, left, 103, 393

Sleep, 600

MouseClick, left, 170, 356

sleep, 2000

WinWait, Micrometrics SE Premium - Captured-,

```
IfWinNotActive, Micrometrics SE Premium - Captured-, , WinActivate, Micrometrics  
SE Premium - Captured-,  
WinWaitActive, Micrometrics SE Premium - Captured-,  
Send, {CTRLDOWN}{F4}{CTRLUP}{ENTER}
```

```
sleep, 200
```

```
Send, C:\Documents and Settings\Usuario.HOME\Meus documentos\FACERQ\laço  
elétrico\identações\%passo% - %i4%{ENTER}
```

```
sleep, 1000
```

```
return
```

8.1.2 ALINHAMENTO DAS IMAGENS NO RECONSTRUCT

```
;  
; AutoHotkey Version: 1.x  
; Language:    English  
; Platform:    Win9x/NT  
; Author:      A.N.Other <myemail@nowhere.com>  
;  
; Script Function:  
;   Template script (you can customize this template by editing  
"ShellNew\Template.ahk" in your Windows folder)  
;  
#NoEnv ; Recommended for performance and compatibility with future AutoHotkey  
releases.  
  
SendMode Input ; Recommended for new scripts due to its superior speed and  
reliability.  
  
SetWorkingDir %A_ScriptDir% ; Ensures a consistent starting directory.  
  
;  
;set up inicial  
;
```

```
;pontos = 1
;inputbox, passo, Passo, Digite o numero de pontos,,,,,,,,222,%pontos%
;
; posicionar um traço com zoom (win+a)
;
#a::
; ATIVAR RECNSTRUCT
```

```
WinWait, ahk_class ReconstructWinClass,
IfWinNotActive, ahk_class ReconstructWinClass, , WinActivate, ahk_class
ReconstructWinClass,
WinWaitActive, ahk_class ReconstructWinClass,
```

```
;SELECIONAR AREA DE INSERÇÃO DO TRACE DE ALINHAMENTO
```

```
:: SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE ZOOM
```

```
WinWait, ahk_class ReconstructToolsClass,
IfWinNotActive, ahk_class ReconstructToolsClass, , WinActivate, ahk_class
ReconstructToolsClass,
WinWaitActive, ahk_class ReconstructToolsClass,
MouseDown, left, 87, 40
Sleep, 100
```

```
KeyWait, LButton, D ; Wait for the left mouse button to be pressed down.
sleep, 100
KeyWait, LButton, u ; Wait for the left mouse button to be released.
```

```
:: SELEÇÃO DA FERRAMENTA DE POSICIONAMENTO DE TRAÇO
```

```
WinWait, ahk_class ReconstructToolsClass,
IfWinNotActive, ahk_class ReconstructToolsClass, , WinActivate, ahk_class
ReconstructToolsClass,
WinWaitActive, ahk_class ReconstructToolsClass,
```


MouseClicked, left, 151, 38

Sleep, 100

KeyWait, LButton, D ; Wait for the left mouse button to be pressed down.

sleep, 100

send, {HOME}

sleep, 100

return

;

;ALINHAMENTO RÍGIDO (WIN+A)

;

#q::

; ATIVAR RECONSTRUCT

WinWait, ahk_class ReconstructWinClass,

IfWinNotActive, ahk_class ReconstructWinClass, , WinActivate, ahk_class

ReconstructWinClass,

WinWaitActive, ahk_class ReconstructWinClass,

Send, {ALTDOWN}{ALTUP}

sleep, 250

send, t

sleep, 150

send, n

sleep, 150

send, r

return

8.1.3 AUXÍLIO ÀS MEDIDAS DAS DIAGONAIS NO IMAGEJ

; ALGUNS ACERTOS DE VARIÁVEIS PRO COMEÇO

```
#InstallMouseHook
```

```
#InstallKeybdHook
```

```
secao = 003
```

```
ident = 1
```

```
exlin = 0
```

; FUNÇÃO PARA ACERTAR A ESCALA

```
setaument(A){
```

```
WinWait, ImageJ,
```

```
IfWinNotActive, ImageJ, , WinActivate, ImageJ,
```

```
WinWaitActive, ImageJ,
```

```
Sleep, 100
```

```
Send, {ALTDOWN}{ALTUP}
```

```
SLEEP, 100
```

```
send,
```

```
{RIGHT}{RIGHT}{RIGHT}{RIGHT}{DOWN}{DOWN}{DOWN}{DOWN}{DOWN}{DOWN}  
{DOWN}{DOWN}{ENTER}
```

```
WinWait, Set Scale,
```

```
IfWinNotActive, Set Scale, , WinActivate, Set Scale,
```

```
WinWaitActive, Set Scale,
```

```
Sleep, 100
```

```
Send, %A%{TAB}1{TAB}{TAB}micron{TAB}{SPACE}{ENTER}
```

```
sleep, 2000
```

```
Return
```

```
}
```

;FUNÇÃO PARA ABRIR ARQUIVO

```
abrident(secao, ident){
```

```
WinWait, ImageJ,
```

```
IfWinNotActive, ImageJ, , WinActivate, ImageJ,
```

```
WinWaitActive, ImageJ,
```

```
Sleep, 100
```

```
Send, {CTRLDOWN}o{CTRLUP}
```

```
WinWait, Open,
```

```
IfWinNotActive, Open, , WinActivate, Open,
```

```
WinWaitActive, Open,
```

```
sleep, 300
```

```
Send, E:\FACERQ\Fof\NOVO\idents 200\%secao% - %ident%.jpg{ENTER}
```

```
sleep, 200
```

```
return
```

```
}
```

```
; FUNÇÃO PARA MEDIR A DIAGONAL
```

```
medir(){
```

```
KeyWait Control, D
```

```
KeyWait, LButton, D
```

```
KeyWait, LButton, U
```

```
KeyWait Control, U
```

```
sleep, 100
```

```
send, {CTRLDOWN}m{CTRLUP}
```

```
return
```

```
}
```

```
; FUNÇÃO PARA PEGAR E COLOCAR OS VALORES NO EXEL
```

```
pegident(){
```

global

;MEDIR A DIAGONAL DA IDENTAÇÃO

;USE + E - PARA DAR ZOOM NA IMAGEM

inputbox, NI, NUMERO DE IDENTAÇÕES, Quantas indentações vão ser medidas
nesta foto?,,,,,,222,%NI%

Loop, %NI%

{

inputbox, nomei, INDEX DAS IDENTS, Qual é o index desta
identação?,,,,,,222,%nomei%

Sleep, 100

medir()

medir()

;PEGAR RESULTADOS

sleep, 500

WinWait, Results,

IfWinNotActive, Results, , WinActivate, Results,

WinWaitActive, Results,

MouseClick, left, 113, 16

Sleep, 100

Send,

{ALTDOWN}{ALTUP}{RIGHT}{DOWN}{DOWN}{DOWN}{DOWN}{ENTER}{ALTDOW
N}{ALTUP}{RIGHT}{DOWN}{DOWN}{ENTER}{ALTDOWN}{ALTUP}{RIGHT}{DOWN}
{DOWN}{DOWN}{ENTER}

sleep, 500

;PASSAR PRO EXEL

WinWait, Microsoft Excel - identaxion measures.xlsx,

```
IfWinNotActive, Microsoft Excel - identaxion meaxures.xlsx, , WinActivate, Microsoft
Excel - identaxion meaxures.xlsx,
WinWaitActive, Microsoft Excel - identaxion meaxures.xlsx,
MouseDown, left, 173, 9
Sleep, 100
Send, {F5}
sleep, 100
send, c
send, %exlin%
sleep, 100
send, {ENTER}
sleep, 100
send, %secao% - %ident%
send, {RIGHT}
send, %nomei%
send, {RIGHT}
sleep, 50
send, {CTRLDOWN}v{CTRLUP}
sleep, 100
exlin += 2
```

```
WinWait, %secao% - %ident%.jpg,
IfWinNotActive, %secao% - %ident%.jpg, , WinActivate, %secao% - %ident%.jpg,
WinWaitActive, %secao% - %ident%.jpg,
Sleep, 100
}
}
```

```
; GUI dos aumentos
```

```
;
```

; IMPORTANTE!!! SERVE APENAS PARA AS CALIBRAÇÕES DA CAMERA
MICROMETRICS DO LCMHC

; CASO FOR USAR EM OUTROS AUMENTOS OU QQUER OUTRA COISA EDITE
OS COMANDOS ABAIXO.

;

; WIN + 0 PARA ABRIR

#0::

Gui, Font, S9 CDefault Bold, Verdana

Gui, Add, Button, x66 y71 w100 h30 , 50X

Gui, Add, Button, x66 y101 w100 h30 , 100X

Gui, Add, Button, x66 y131 w100 h30 , 200X

Gui, Add, Button, x66 y161 w100 h30 , 500X

Gui, Add, Button, x66 y191 w100 h30 , 1000X

Gui, Add, Text, x26 y21 w180 h30 +Center, ESCOLHA O AUMENTO QUE
TRABALHAREMOS

; Generated using SmartGUI Creator 4.0

Gui, Show, x0 y0 h257 w239, AUMENTO

Return

Button50X:

A=1.495

setaumento(A)

return

Button100X:

A=2.937

setaumento(A)

return

Button200X:

A=5.822

setaumento(A)

return

Button500X:

A=14.619

setaumento(A)

return

Button1000X:

A=29.108

setaumento(A)

RETURN

NI = 2

#p::

NX = 0

inputbox, NI, NUMERO DE VEZES PARA MEDIDAS, Quantas
vezes?,,,,,,222,%NX%

Loop, %NX%

{

medir()

sleep, 100

medir()

sleep, 100

}

return

#ç::

; QUAL A SEÇÃO E ETC..

inputbox, secao, secao, Qual a seção? (com os zeros!),,,,,,222,%secao%

if ErrorLevel

 MsgBox, CANCEL was pressed.

exlin = %secao%

exlin *= 10

;ABRIR ARQUIVO

sleep, 100

abrident(secao, ident)

sleep, 100

pegident()

send, {ALTDOWN}{F4}{ALTUP}

sleep, 300

exlin = %secao%

exlin *= 10

exlin += %NI%

exlin += %NI%

ident = 2

;ABRIR ARQUIVO

sleep, 100

abrident(secao, ident)

sleep, 100

;MEDIR A DIAGONAL DA IDENTIFICAÇÃO

;USE + E - PARA DAR ZOOM NA IMAGEM

pegident()

send, {ALTDOWN}{F4}{ALTUP}

sleep, 100

return